

На правах рукописи

Плахов Сергей Валентинович

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЕЙ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТОПЛИВОПОДАЧЕЙ  
И РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Марков Владимир Анатольевич**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой поршневых двигателей МГТУ им.  
Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится «    »    2020 года в    часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Тумашев Р.З

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность диссертационной работы** обусловлена необходимостью обеспечения наилучших показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Среди ДВС различного назначения следует выделить дизельные двигатели, устанавливаемые на тепловозы. Тепловозные дизели вырабатывают около 16 % всей энергии, вырабатываемой двигателями внутреннего сгорания, эксплуатируемыми в России. Они потребляют более 12 млн. тонн дизельного топлива в год и выбрасывают в атмосферу около 2 млн. тонн вредных компонентов ОГ. В связи с этим Стратегия развития ОАО «РЖД» до 2030 года предусматривает реализацию мероприятий по повышению энергоэффективности и экологической безопасности грузовых и пассажирских перевозок, модернизацию уже эксплуатируемых тепловозов и создание новых тепловозов с усовершенствованными энергетическими установками. Показатели топливной экономичности и токсичности ОГ в значительной степени зависят от режимов работы транспортных энергоустановок, от реализуемых характеристик топливоподачи, качества процессов топливоподачи, распыливания топлива и смесеобразования. Применение электронного управления указанными процессами в тепловозных дизелях позволяет не только на порядок повысить точность реализации заданных характеристик, но и обеспечить их корректирование в соответствии с режимом работы дизеля. Точное поддержание скоростного режима работы энергоустановки и сокращение продолжительности переходных процессов также способствует улучшению эксплуатационно-технических показателей дизелей.

**Цель работы:** улучшение показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов тепловозного дизеля, а также статических и динамических показателей регулирования, путем создания и совершенствования систем электронного управления топливоподачей и регулирования частоты вращения коленчатого вала.

**Методы исследований.** Поставленная в работе цель достигается сочетанием теоретических и экспериментальных методов исследования. При теоретических исследованиях использованы методы теории автоматического регулирования и управления. Уравнения математических моделей решались с использованием современных аналитических и численных методов. Результаты теоретических исследований сопоставлялись с результатами испытаний тепловозного дизеля на моторном стенде, а также с известными опубликованными данными.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

– разработана математическая модель САР частоты вращения дизеля, которая включает линейные математические модели элементов САР, позволяет учитывать нелинейную характеристику топливоподачи – зависимость цикловой подачи топлива от положения дозирующего органа топливного насоса высокого давления, а также учитывает возможность варьирования скоростью изменения задания частоты вращения вала дизеля;

– разработана методика оптимизации значений коэффициентов пропорциональной и интегральной составляющих ПИ-закона регулирования, заключающаяся в экспериментальном исследовании САР частоты вращения и формировании критерия оптимальности переходного процесса в виде произведения продолжительности переходного процесса и заброса частоты вращения в переходном процессе;

– на основании экспериментальных исследований дизеля типа Д50 определена оптимизированная по топливной экономичности характеристика управления углом опережения впрыскивания топлива, реализуемая системой электронного управления топливоподачей типа ЭСУВТ.01 тепловозного дизеля.

**Достоверность и обоснованность** научных положений определяются:

– использованием фундаментальных законов, а также уравнений теории автоматического регулирования и управления, современных численных и аналитических методов реализации математических моделей;

– совпадением результатов расчетных и экспериментальных исследований и применением при оценке адекватности математических моделей достоверных опытных данных, полученных при испытаниях на развернутом двигателе в стендовых условиях.

**Практическая ценность** состоит в том, что:

– использование разработанной математической модели САР частоты вращения вала дизеля позволяет с достаточной для практики точностью решать задачи проектирования таких САР для отечественных дизелей;

– разработанная методика оптимизации значений коэффициентов пропорциональной и интегральной составляющих ПИ-закона регулирования может быть использована для уточнения алгоритмов регулирования частоты вращения вала тепловозного дизеля;

– полученная оптимизированная по топливной экономичности характеристика управления углом опережения впрыскивания топлива реализуется системой электронного управления топливоподачей типа ЭСУВТ.01 тепловозного дизеля;

– разработана при участии автора диссертации система электронного управления топливоподачей типа ЭСУВТ.01 с импульсным управлением электрогидравлическим клапаном, позволяющая значительно снизить расход топлива и уменьшить выбросы токсичных компонентов с ОГ, установлена и эксплуатируется на ряде отечественных маневровых тепловозов.

**Реализация результатов работы.** Разработаны опытные системы электронного управления топливоподачей типа ЭСУВТ для ряда тепловозных дизелей. Системы электронного управления топливоподачей типа ЭСУВТ.01 и ЭСУВТ.02 серийно установлены на тепловозы ТЭМ2, ТЭМ18ДМ и ЧМЭЗ. Опытные образцы системы управления топливоподачей типа ЭСУВТ.03 установлены на установочную серию тепловозов 2ТЭ116. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты работы внедрены в опытное проектирование и опытное производство ЗАО «Форант-Сервис» (г. Ногинск).

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

- математическая модель САР частоты вращения дизеля, включающая линейные математические модели элементов САР и позволяющая учитывать нелинейную зависимость цикловой подачи топлива от положения дозирующего органа;
- методика оптимизации значений коэффициентов пропорциональной и интегральной составляющих ПИ-закона регулирования;
- результаты экспериментальных исследований САР частоты вращения коленчатого вала дизеля и экспериментальных исследований тепловозного дизеля с системой электронного управления топливоподачей;
- оптимизированная по топливной экономичности характеристика управления углом опережения впрыскивания топлива, реализуемая системой электронного управления топливоподачей типа ЭСУВТ.01 тепловозного дизеля.

**Личный вклад соискателя.** Основные результаты диссертационной работы, методы и модели, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно в ходе теоретических разработок и экспериментальных исследований. Автором разработаны алгоритмы управления и регулирования различными тепловозными дизель-генераторными установками, а также весь комплекс программного обеспечения, примененные во всей линейке систем электронного управления топливоподачей типа ЭСУВТ, в частности, типа ЭСУВТ.01.

### **Апробация работы:**

Основные положения и результаты диссертации обсуждались:

- на заседании кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2020 г.);
- на Международной научно-технической конференции «Двигатель-2018», посвященной 150-летию факультета «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2018 г.);
- на заседаниях Всероссийской научно-технической конференции (ВНТК) им. проф. В.И. Крутова по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок при кафедре «Теплофизика» (Э-6) МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2018-2020 гг.);
- на Международной конференции «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering» EECE-2019. (Санкт-Петербург, 2019).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 научных статей – все в журналах, включенных в перечень ВАК рецензируемых ведущих научных журналов и изданий. Также по теме диссертации опубликовано 6 материалов по итогам международных и всероссийских конференций. Общий объем опубликованных работ – 1,5 п.л.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 120 страниц, включая 107 страниц основного текста, содержащего 43 рисунка и 11 таблиц. Список литературы содержит 122 наименования на 13 страницах. Приложение на 1 странице содержит документ о внедрении результатов диссертационной работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проведения работ, направленных на улучшение эксплуатационно-технических показателей дизелей, дана общая характеристика диссертационной работы.

**В первой главе** диссертации проведен анализ работ, посвященных проблемам улучшения эксплуатационно-технических показателей дизелей. Рассмотрены требования, предъявляемые к показателям современных дизелей и направления улучшения показателей дизельных двигателей мобильных и стационарных энергетических установок. Проанализированы испытательные циклы дизелей транспортного назначения и режимы их работы. Отмечено, что перспективность работ, направленных на улучшение эксплуатационно-технических показателей дизелей путем совершенствования систем управления топливоподачей и регулирования частоты вращения обоснована в трудах отечественных ученых Л.В. Грехова, С.Н. Девянина, Е.Е. Коссова, В.И. Крутова, А.Г. Кузнецова, Н.М. Лукова, В.А. Маркова, Н.Н. Патрахальцева, Ф.И. Пинского, В.А. Рыжова, В.И. Толшина, В.В. Фурмана, А.З. Хомича, Ю.Я. Хрящева и ряда других. На основании анализа состояния проблемы были сформулированы цель работы и следующие задачи исследования:

1. Разработка методики формирования тепловозной характеристики, оптимизированной по топливной экономичности тепловозного дизеля, и проведение оптимизационных расчетов формы этой тепловозной характеристики.

2. Разработка математической модели САР частоты вращения дизеля, включающей линейные математические модели элементов САР и нелинейную зависимость подачи топлива от положения дозирующего органа ТНВД.

3. Проведение расчетных исследований с использованием разработанной модели с целью определения целесообразных структуры и параметров САР частоты вращения вала дизеля.

4. Проведение экспериментальных исследований САР частоты вращения коленчатого вала дизеля с целью уточнения ее структуры и параметров.

5. Разработка методики оптимизации значений коэффициентов пропорциональной и интегральной составляющих ПИИ-закона регулирования.

6. Проведение экспериментальных исследований тепловозного дизеля с системой электронного управления топливоподачей.

7. Определение оптимизированной по топливной экономичности характеристики управления углом опережения впрыскивания топлива для системы электронного управления топливоподачей типа ЭСУВТ.01 тепловозного дизеля.

**Вторая глава** посвящена расчетным исследованиям САР частоты вращения коленчатого вала. Разработана математическая модель САР частоты вращения дизеля, которая включает линейные математические модели элементов САР и позволяет учитывать нелинейную зависимость цикловой подачи топлива от положения дозирующего органа ТНВД и возможность варьирования скоростью изменения задания частоты вращения вала дизеля. Модель содержит дифференциальные уравнения элементов САР частоты вращения дизеля. Исследу-

емый дизель как объект регулирования по частоте вращения описывается линейным дифференциальным уравнением вида:

$$T_d \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k_{д1}\kappa - k_{д2}\alpha_d, \quad (1)$$

где  $\varphi = \Delta\omega_d/\omega_{до}$  – относительное изменение частоты вращения коленчатого вала двигателя  $\omega_d$ ;  $\kappa = \Delta h_p/h_{po}$  – относительное изменение положения дозирующей рейки ТНВД  $h_p$ ;  $\alpha_d = \Delta N/N_o$  – относительное изменение настройки потребителя  $N$ ;  $T_d$  – постоянная времени собственно двигателя;  $k_{д1}$ ,  $k_{д2}$  – коэффициенты усиления двигателя по воздействиям  $\kappa$  и  $\alpha_d$ . Из уравнения (1) получены передаточные функции двигателя по соответствующим воздействиям –  $\kappa$  и  $\alpha_d$ :

$$W_d^\kappa(p) = \frac{k_{д1}}{T_d p + 1}; \quad W_d^{\alpha_d}(p) = \frac{k_{д2}}{T_d p + 1}, \quad (2)$$

Эти передаточные функции позволяют представить структурную схему дизеля как объекта регулирования по частоте вращения в виде, показанном на Рис. 1,а.

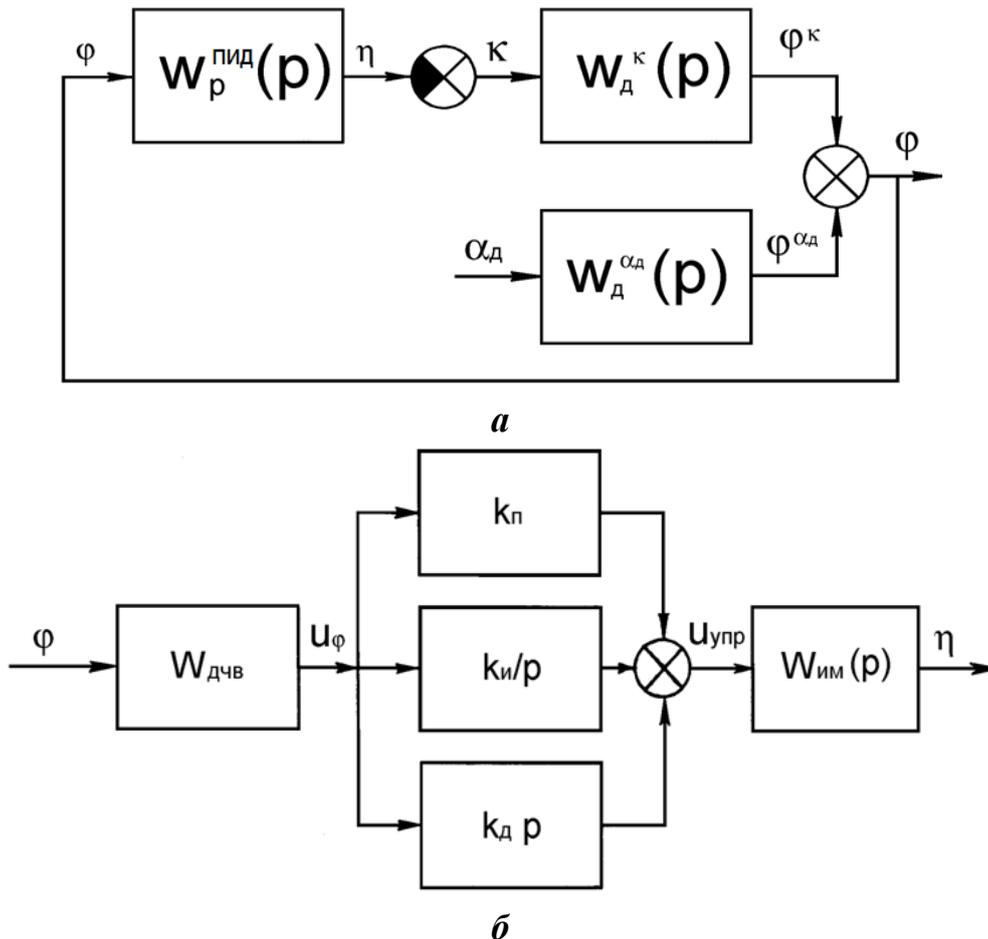


Рис. 1. Структурные схемы САР частоты вращения вала дизеля (а) и регулятора, реализующего ПИД-закон регулирования частоты вращения (б)

Математическое описание двигателя как объекта регулирования по частоте вращения дополнено математической моделью автоматического регулятора.

Рассмотрен электронный регулятор частоты вращения коленчатого вала дизеля. Он содержит датчик частоты вращения (ДЧВ), электронный блок управления (ЭБУ) и исполнительный механизм (ИМ), воздействующий на орган управления топливоподачей дизеля – рейку ТНВД (Рис. 1,б). Датчик частоты вращения  $\omega_d$  или  $\varphi$  индукционного типа обладает дискретностью в съеме сигнала с периодом, не превышающим  $\Delta t_3=0,003-0,005$  с. Пренебрегая задержкой прохождения сигнала, такой датчик описан алгебраическим уравнением вида:

$$U_\varphi = k_\varphi \varphi, \quad (3)$$

где  $U_\varphi$  – выходной сигнал датчика,  $k_\varphi$  – коэффициент усиления датчика. Тогда его передаточная функция определяется из выражения:

$$W_{\text{дчв}}(p) = k_\varphi, \quad (4)$$

соответствующего идеальному усилительному звену (Рис. 1,б).

Исследуемый регулятор частоты вращения реализует ПИД-закон регулирования. В САР с такими регуляторами измеряется не только отклонение частоты вращения  $\varphi = \Delta\omega_d/\omega_{до}$  от заданного режима  $\omega_{до}$ , но и производную от изменения этого отклонения  $d\varphi/dt$  и накопление ошибки в виде интеграла  $\int \varphi dt$ . Таким образом, формируется ПИД-закон регулирования в виде:

$$U_{\text{упр}} = k_p U_\varphi + k_i \int U_\varphi dt + k_d dU_\varphi/dt, \quad (5)$$

где  $U_{\text{упр}}$  – выходной сигнал вычислительного устройства;  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих закона регулирования.

В качестве исполнительных механизмов (ИМ) электронных регуляторов чаще используются электромагнитный или электрогидравлический ИМ, перемещающие дозирующий орган системы топливоподачи на величину  $\eta = \Delta h_p/h_{po}$ . Они описываются уравнением:

$$T_{\text{им}} (d\eta/dt) + \eta = k_{\text{им}} U_{\text{упр}}, \quad (6)$$

или передаточной функцией:

$$W_{\text{им}}(p) = \frac{k_{\text{им}}}{T_{\text{им}} p + 1}, \quad (7)$$

соответствующей аperiodическому звену первого порядка. В расчетных исследованиях рассмотрен электрогидравлический ИМ, воздействующий на дозирующую рейку ТНВД. С учетом представленного математического описания, структурная схема САР частоты вращения представлена в виде на Рис. 1.

Методика расчета переходных процессов с применением разработанной математической модели предусматривает использование программного комплекса *Multisim 12.0* компании *National Instruments*. С использованием разработанной математической модели и ПК *Multisim 12.0* проведено исследование влияния коэффициентов усиления пропорциональной  $k_p$ , дифференциальной  $k_d$  и интегральной  $k_i$  составляющих ПИД-закона регулирования на характер переходного процесса, а также влияния на переходные процессы скорости изменения задания частоты вращения и введение нелинейности в структуру САР. В дизелях, обладающих большой инерционностью, вместо ПИД-регулятора часто используется ПИ-регулятор (т.е.  $k_d = 0$ ). Проблема состоит в том, что при рез-

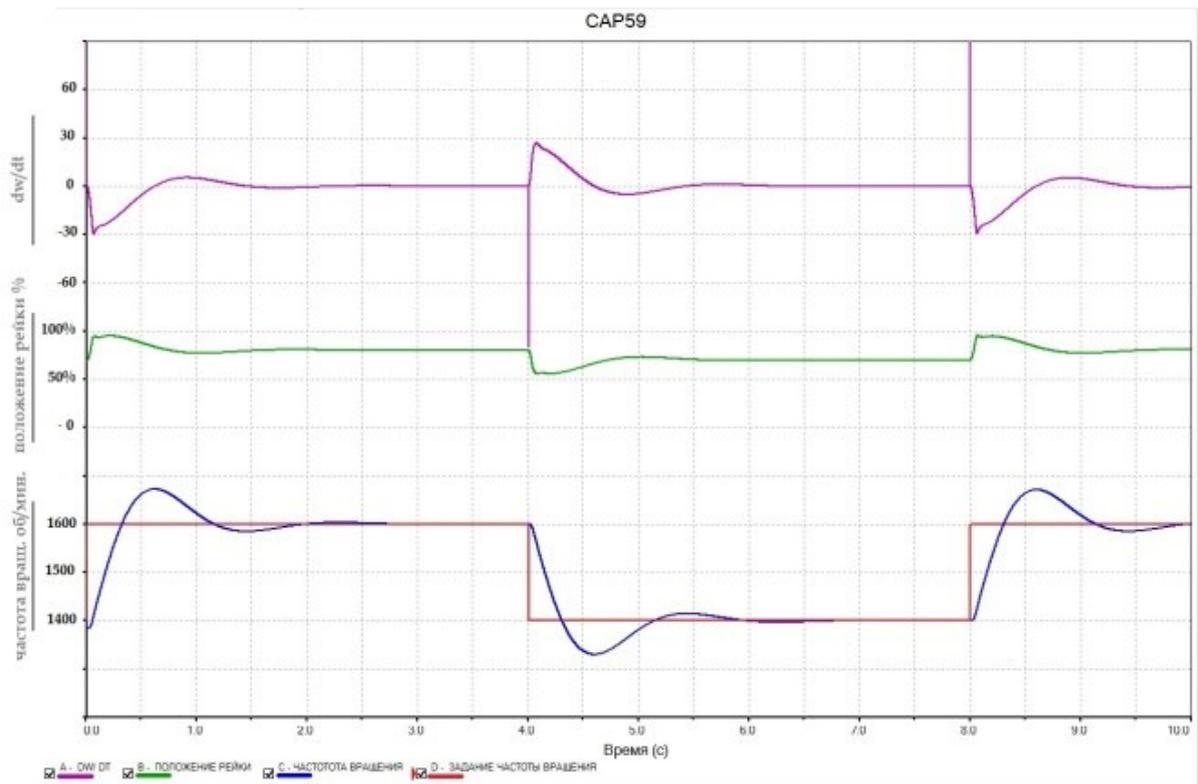
ком изменении задания угловой скорости вращения  $\omega_d$  производная  $dx/dt$  (ошибка регулирования  $x = \omega_d \text{ треб.} - \omega_d \text{ действ.}$ ) стремится к бесконечности. Поэтому необходимо ограничивать интенсивность роста задания угловой скорости (или частоты вращения) вала двигателя.

Пример полученных при расчетах переходных процессов разгона-торможения представлен на Рис. 2. Эти переходные процессы получены при оптимизированных значениях коэффициентов усиления пропорциональной  $k_p$ , дифференциальной  $k_d$  и интегральной  $k_i$  составляющих ПИД-закона регулирования. Следует отметить, что в этих переходных процессах дизеля при быстром изменении задания требуемой частоты вращения – с интенсивностью  $dn_{\text{треб}}/dt = 200000 \text{ мин}^{-1}/\text{с}$  применение ПИД-регулятора позволяет получить более качественные переходные процессы по сравнению с ПИ-регулятором. Причем, это отмечается в переходных процессах разгона-торможения и при постоянной нулевой нагрузке на генератор, и при постоянной 100 %-ной нагрузке на генератор. В этих случаях наличие дифференциальной составляющей ПИД-закона регулирования позволяет стабилизировать переходные процессы.

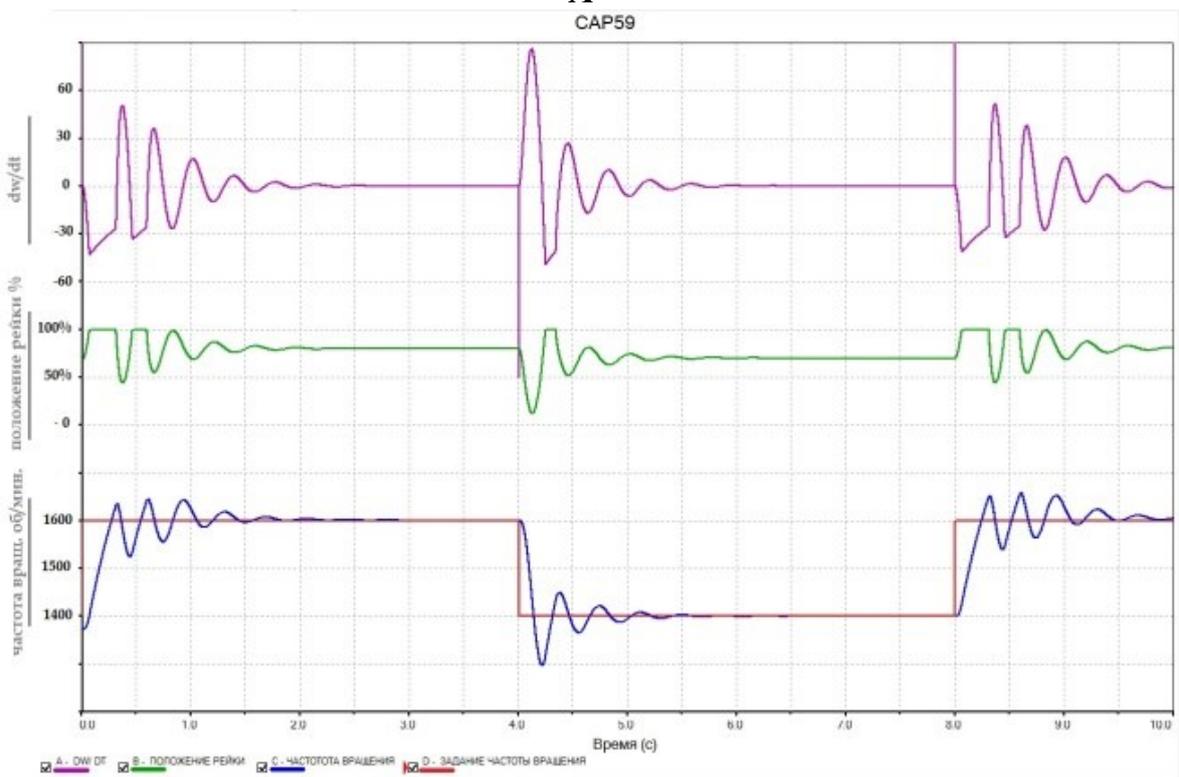
При большом диапазоне изменения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя  $\omega_d$  в переходном процессе использование линейных математических моделей может приводить к значительным погрешностям расчета переходных процессов. Поэтому для рассмотренных выше переходных процессов разгона-торможения целесообразнее использовать нелинейные математические модели. В исследуемой САР одной из наиболее значимых нелинейностей является нелинейная зависимость цикловой подачи топлива от положения дозирующего органа.

Сравнение переходных процессов разгона-торможения в САР, вызванных изменением задания частоты вращения с крутыми фронтами (скорость изменения задания –  $200000 \text{ мин}^{-1}/\text{с}$ ), при постоянной нулевой нагрузке на генератор и использовании ПИД-регулятор с коэффициентами  $k_p = 7$ ,  $k_i = 10$ ,  $k_d = 0$  показывает, что при учете нелинейной характеристики топливоподачи получен переходный процесс с меньшими продолжительностью и колебательностью по сравнению с переходным процессом, полученным при линейной характеристике топливоподачи. Аналогичные результаты получены и в случае постоянной 100 %-ной нагрузки на генератор.

Переходные процессы наброса-сброса нагрузки отличаются существенно меньшим диапазоном изменения угловой скорости вращения  $\omega_d$ . Но и в этих переходных процессах значения коэффициентов  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  оказывают влияние на качество процесса регулирования. При этом переходные процессы дизеля с ПИД-регулятором имеют меньшие продолжительность и колебательность, чем у дизеля с ПИ-регулятором. Использование ПИД-регулятора с коэффициентами  $k_p = 12$ ,  $k_i = 57$ ,  $k_d = 3$  обеспечивает продолжительность переходного процесса наброса полной нагрузки  $t_n = 5 \text{ с}$  и перерегулирование  $\sigma = 7 \%$ .



**A**



**B**

Рис. 2. Переходные процессы в САР, вызванные изменением задания частоты вращения вала двигателя с крутыми фронтами (скорость изменения задания –  $200000 \text{ мин}^{-1}/\text{с}$ ), при постоянной 100 %-ной нагрузке на генератор и различной структурой регулятора: *a* – ПИД-регулятор:  $k_p = 12$ ,  $k_i = 57$ ,  $k_d = 3$ ; *б* – ПИ-регулятор:  $k_p = 7$ ,  $k_i = 10$ ,  $k_d = 0$

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований САР частоты вращения дизеля. Объектом исследования являлась тепловозная дизель-генераторная установка (ДГУ) с дизелем типа Д50 (6 ЧН 31,8/33) мощностью 736 кВт с системой электронного управления топливоподачей типа ЭСУВТ.01. Исследовано влияние коэффициентов П- и И-составляющих ПИ-закона регулирования на качество переходных процессов разгона дизеля по тепловозной характеристике. В переходных процессах фиксировались время переходного процесса  $t_{\Pi}$ , заброс частоты вращения  $\Delta n$ , период собственных колебаний  $T_0$ . Исследованы зависимости этих показателей от коэффициентов П- и И-составляющих ПИ-закона регулирования. Измерения проведены для режимов с частотой вращения  $n = 300, 480$  и  $750 \text{ мин}^{-1}$ . Ступенчатое изменение задания частоты вращения выполнялось с шагом  $5 \text{ мин}^{-1}$  (ступени:  $300/305, 480/485, 750/755$ ). Были определены значения указанных коэффициентов ПИ-закона регулирования частоты вращения на указанных скоростных режимах.

Определение времени переходных процессов проводится с учетом зоны допустимой нестабильности частоты вращения. Электронные САР обладают большими функциональными возможностями и существенно лучшими показателями процесса регулирования по сравнению с механическими и гидромеханическими системами регулирования. С учетом проведенного анализа показателей качества процесса регулирования частоты вращения дизелей принято, что допустимая нестабильность регулируемого параметра на установившемся режиме не должна превышать  $0,8 \%$ . Поэтому при поддержании постоянства частоты вращения вала дизеля Д50 на уровне  $n = 300 \text{ мин}^{-1}$  с такой допустимой нестабильностью частоты вращения ширина указанной зоны выбрана равной  $\Delta n = 0,5 \text{ мин}^{-1}$  или  $\pm 0,25 \text{ мин}^{-1}$ . Исследовано 37 переходных процессов. Примеры графиков этих переходных процессов разгона дизеля представлены на Рис. 3.

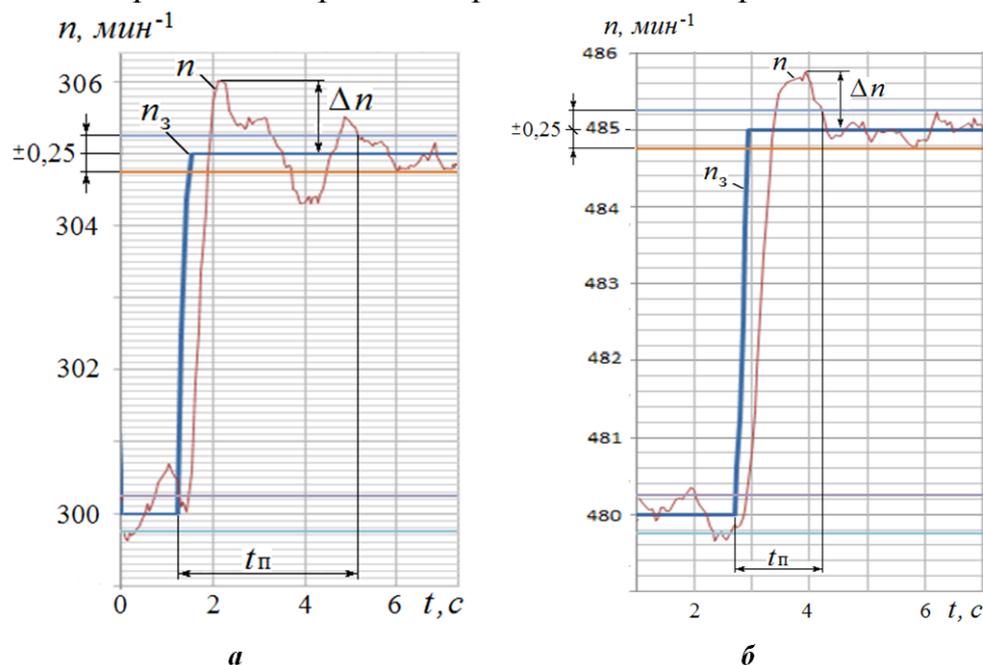


Рис. 3. График переходного процесса № 1 (а) и № 27 (б): горизонтальными линиями синего и оранжевого цвета показана зона допустимой нестабильности регулируемого параметра  $\Delta n_{\text{доп}} = \pm 0,25 \text{ мин}^{-1}$

Анализ полученных данных подтвердил необходимость изменения коэффициентов  $k_p$  и  $k_i$  составляющих ПИ-закона регулирования при смене режима работы дизеля. В соответствии с требованиями ГОСТ Р 55231-2012 на САР частоты вращения тепловозных дизелей основными показателями качества процесса регулирования являются продолжительность переходного процесса  $t_n$  и заброс частоты вращения в переходном процессе  $\Delta n$ . В связи с этим в качестве критерия оптимальности  $J_0$  переходного процесса выбрано произведение:

$$J_0 = t_n \cdot \Delta n .$$

По результатам испытаний определены переходные процессы, являющиеся оптимальными по данному критерию оптимальности. На режиме с  $n = 300 \text{ мин}^{-1}$  и  $N_e = 0 \text{ кВт}$  таковым является переходный процесс № 5, для которого выбранный критерий оптимальности оказался равным  $J_0 = 0,179$ . Для режима с  $n = 300 \text{ мин}^{-1}$  и  $N_e = 100 \text{ кВт}$  оптимальным является переходный процесс № 16 с минимальным значением  $J_0 = 0,456$ . Режиму с  $n = 480 \text{ мин}^{-1}$  и  $N_e = 0 \text{ кВт}$  соответствует оптимальный переходный процесс № 25 с минимальным значением  $J_0 = 0,180$ . Наконец, на режиме с  $n = 480 \text{ мин}^{-1}$  и  $N_e = 400 \text{ кВт}$  оптимальным является переходный процесс № 37, для которого выбранный критерий оптимальности оказался равным  $J_0 = 0,297$ . Каждому из этих переходных процессов соответствуют свои оптимизированные значения коэффициентов пропорциональной  $k_p$  и интегральной  $k_i$  составляющих ПИ-закона регулирования. Полученные оптимизированные значения коэффициентов  $k_p$  и  $k_i$  составляющих ПИ-закона регулирования позволили построить рекомендуемые характеристики их изменения в переходном процессе разгона дизеля по тепловозной характеристике (Рис. 4).

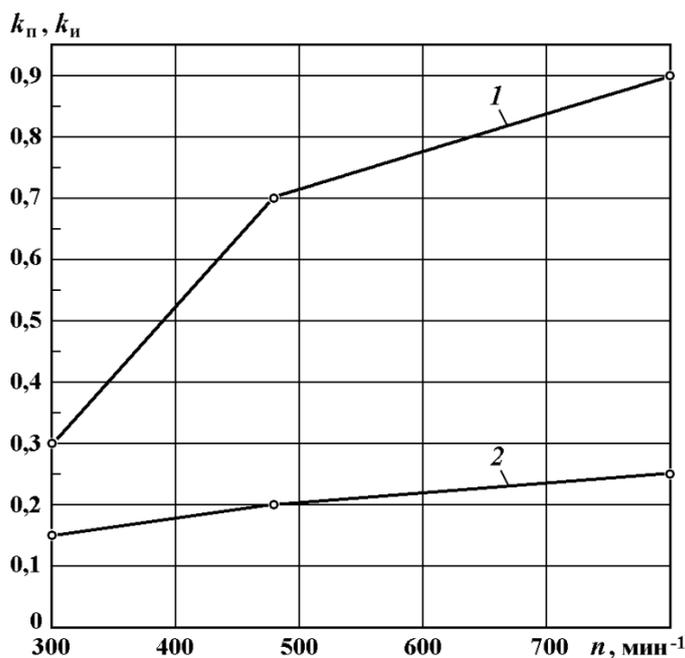


Рис. 4. Рекомендуемые характеристики изменения коэффициентов  $k_p$  (1) и  $k_i$  (2) пропорциональной и интегральной составляющих ПИ-закона регулирования в переходном процессе разгона дизеля по тепловозной характеристике

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям тепловозного дизеля с системой электронного управления топливоподачей типа ЭСУВТ.01. Эта система обеспечивает формирование требуемых характеристик угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ) быстродействующим электрогидравлическим клапаном 2, установленным в надплунжерной полости ТНВД (Рис. 5). Использование этого клапана для управления фазами начала и окончания подачи топлива позволяет формировать сложные законы управления топливоподачей, включая управление УОВТ. В свою очередь, это позволяет снизить выбросы оксидов азота с ОГ тепловозного дизеля.

Испытывался дизель-генератор типа 1-ПДГ4Д производства АО «Пензадизельмаш». Тепловозный дизель типа Д50 этого генератора имел номинальную мощность  $N_e = 830$  кВт при частоте вращения  $n = 750$  мин<sup>-1</sup>. Серийная система топливоподачи с гидромеханическим регулятором не предусматривает управление УОВТ. На режиме, соответствующем восьмой позиции контроллера, динамический УОВТ, определяемый моментом начала подъема иглы форсунки, был равен  $\theta = 16,8^\circ$  поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки (п.к.в. до ВМТ). Испытания дизеля проведены на режимах тепловозной характеристики при различных позициях контроллера машиниста (некоторые параметры дизеля на режимах этой характеристики представлены в Таблице 1). В результате испытаний получены значения угла начала подъема давления в линии высокого давления топливной системы, угла опережения впрыскивания топлива (соответствующего углу начала подъема иглы форсунки) и его продолжительности для каждого режима. Результаты этих исследований приведены в Таблице 1 и на Рис. 6.

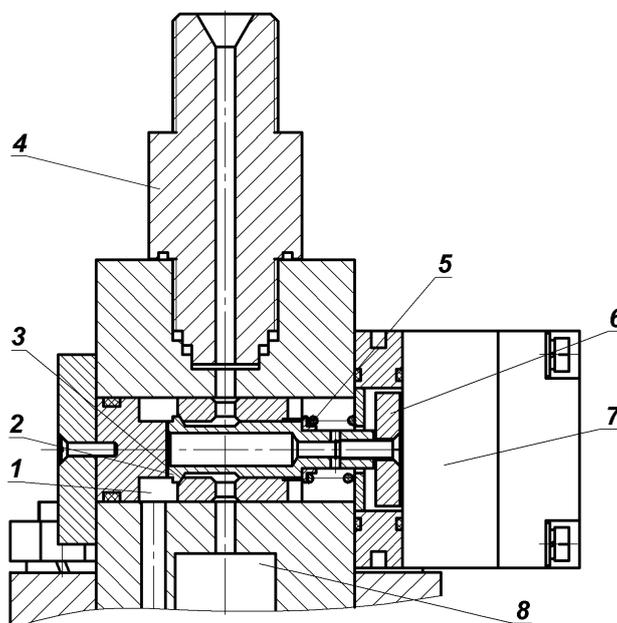


Рис. 5. Конструктивная схема системы управления подачей топлива с электромагнитным клапаном ТНВД: 1 – линия низкого давления ТНВД; 2 – клапан; 3 – кромка клапана; 4 – штуцер ТНВД; 5 – возвратная пружина; 6 – якорь; 7 – электромагнит; 8 – надплунжерная полость

Таблица 1.

Частоты вращения вала дизеля, соответствующие позициям контроллера (тепловозная характеристика) и параметры дизеля Д50 при различных УОВТ

Позиция контроллера	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота вращения вала, мин <sup>-1</sup>	300	365	430	495	560	625	720	750
Эффективная мощность, Н·м	100	200	300	400	520	625	780	830
Оптимальный УОВТ, ° п.к.в. до ВМТ	3,6	5,4	7,2	8,5	10,9	13,2	15,0	16,8
Удельный эффективный расход топлива при оптимальном УОВТ, г/(кВт·ч)	262,7	222,2	211,2	207,4	203,9	200,6	202,5	203,5
Удельный эффективный расход топлива при неизменном УОВТ (серийная система)	267,0	225,8	214,0	209,7	205,5	201,6	202,8	203,5
Доля режима в общем времени работы дизеля, %	24,5	20,6	18,0	16,3	12,1	4,7	2,5	1,3
Весовой коэффициент рассматриваемого режима, $K_i$	0,245	0,206	0,180	0,163	0,121	0,047	0,025	0,013

Результаты, полученные при испытаниях дизеля типа Д50, подтверждают целесообразность оптимизации значений УОВТ в соответствии с режимом работы дизеля. Такое управление УОВТ реализуется разработанной системой управления ЭСУВТ.01. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что при переводе дизеля на позиции контроллера с пониженной частотой вращения коленчатого вала целесообразно снижать угол опережения впрыскивания топлива по характеристике на Рис. 7. Наличие оптимума характеристик удельного эффективного расхода топлива  $g_e = f(\theta)$  с минимальными значениями  $g_e$  хорошо прослеживается на Рис. 6. Установка системы управления ЭСУВТ.01 позволила снизить удельный эффективный расход топлива на режимах, соответствующих позициям контроллера от № 7 до № 1. На первой позиции контроллера удельный эффективный расхода топлива дизеля снизился на величину  $\Delta g_e = 4,3$  г/(кВт·ч), т.е. на 1,6 %.

Наиболее простым и распространенным методом оптимизации значений УОВТ является их оптимизация из условия обеспечения наименьшего эксплуатационного расхода топлива. Такой подход применен и в настоящей работе. С использованием полученных экспериментальных данных по каждому из режимов тепловозной характеристики определены интегральные эксплуатационные расходы топлива  $g_{e \text{ инт}}$  на режимах этой характеристики при неизменном установочном УОВТ (серийная система топливоподачи) и при оптимальном УОВТ (опытная система топливоподачи) с использованием формулы:

$$g_{e \text{ инт}} = \sum_{i=1}^8 g_{ei} \cdot K_i$$

При постоянном установочном УОВТ интегральный эксплуатационный расход топлива на режимах этой характеристики составил  $g_{e \text{ инт}} = 226,70$  г/(кВт·ч), а при регулировании УОВТ он снизился до  $g_{e \text{ инт}} = 223,76$  г/(кВт·ч). Таким образом, при замене серийной системы топливоподачи на опытную снижение интегрально-

го эксплуатационного расхода топлива составило  $\Delta g_{e \text{ инт}} = 2,94$  г/(кВт·ч) или 1,30 %. При использовании системы управления ЭСУВТ.01 дополнительное снижение расхода топлива достигнуто за счет оптимизации закона подачи и более равномерного дозирования топлива по цилиндрам. Кроме того, оснащение тепловозного дизеля системой управления ЭСУВТ.01 позволяет уменьшить минимальную частоту вращения холостого хода и сократить время переходных процессов, что также является факторами снижения эксплуатационного расхода топлива. При оснащении тепловоза системой управления ЭСУВТ.01 суммарное снижение расхода топлива составило от 8,24 до 11,49 %.

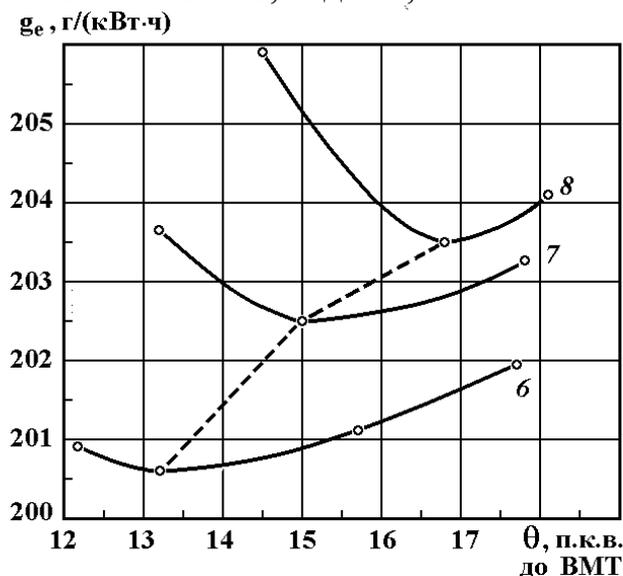


Рис. 6. Зависимости удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от УОВТ  $\theta$  при позициях контроллера № 6, 7 и 8; пунктир – закон изменения УОВТ  $\theta$ , ° п.к.в. до ВМТ

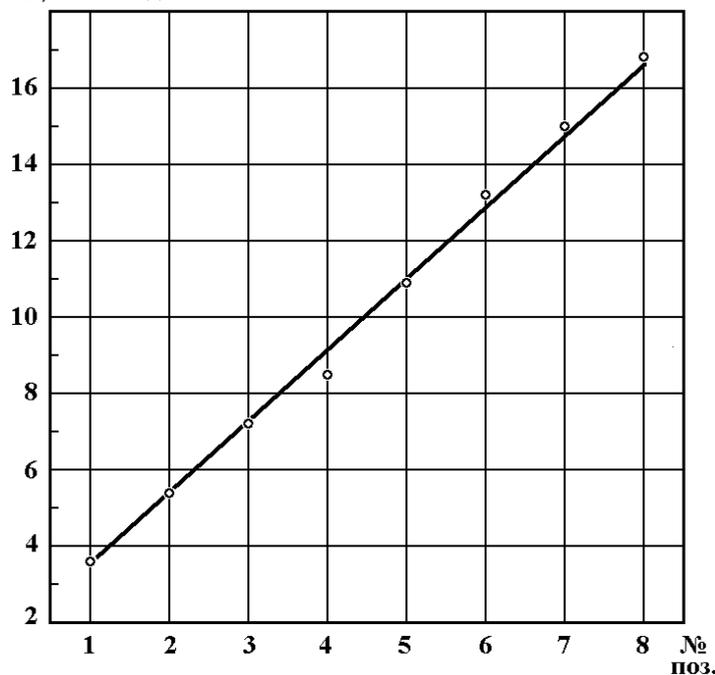


Рис. 7. Оптимизированная по удельному эффективному расходу топлива  $g_e$  характеристика управления УОВТ на режимах тепловозной характеристики; № поз. – номер позиций контроллера машиниста

Для оценки экологических качеств тепловозного дизеля типа Д50 дизель-генератора 1-ПДГ4Д, укомплектованного системой управления ЭСУВТ.01, в процессе испытаний определялись показатели дымности ОГ и их токсичности. Причем, дизель испытывался со значениями УОВТ, оптимизированными по показателям его топливной экономичности. Результаты испытаний свидетельствуют о том, что дымность ОГ исследуемого дизеля находилась в допустимых пределах, ограниченных нормами требований ГОСТ Р 51250-99 к дымности ОГ. На режиме максимальной мощности при  $n = 750 \text{ мин}^{-1}$  тепловозной характеристики дымность ОГ оказалась равной  $K = 0,400 \text{ м}^{-1}$  при максимально допустимой дымности ОГ, равной  $K = 0,461 \text{ м}^{-1}$ .

Испытания дизеля типа Д50 также показали, что по интегральным выбросам оксидов азота  $e_{\text{NO}_x} = 10,65 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$  и монооксида углерода  $e_{\text{CO}} = 0,58 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$  на режимах четырехрежимного испытательного цикла исследуемый дизель с системой управления ЭСУВТ.01 удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51249-99. Соответствующие предельные выбросы составляют  $e_{\text{NO}_x} = 12,00 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$  и  $e_{\text{CO}} = 3,00 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ . Лишь эмиссия несгоревших углеводородов  $e_{\text{СН}_x} = 1,75 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$  оказалась выше ее допустимого значения  $e_{\text{СН}_x} = 1,00 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ . Однако выброс этого токсичного компонента в дизелях легко снижается при использовании средств очистки ОГ.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Разработана система управления ЭСУВТ.01 с импульсными электрогидравлическими клапанами ТНВД, обеспечивающая реализацию требуемых законов подачи топлива и оптимизированных характеристик угла опережения впрыскивания топлива. Эта система управления обеспечивает регулирование частоты вращения вала дизеля по ПИД- и ПИ-законам регулирования. ПИ-закон регулирования целесообразно формировать в дизелях, обладающих относительно большой инерционностью, в частности в тепловозных дизелях.

2. Разработана математическая модель САР частоты вращения дизеля, которая включает линейные математические модели элементов САР и позволяет учитывать нелинейную зависимость цикловой подачи топлива от положения дозирующего органа ТНВД. Модель также учитывает возможность варьирования скоростью изменения задания частоты вращения вала дизеля. Методика расчета переходных процессов с применением разработанной математической модели предусматривает использование программного комплекса *Multisim 12.0* компании *National Instruments*.

3. Проведены расчетные исследования переходных процессов разгона-торможения и наброса-сброса нагрузки дизель-генераторной установки, в которой в качестве первичного двигателя использовался дизель КамАЗ-740 размерности 12/12. Показано, что переходные процессы дизеля с ПИД-регулятором имеют меньшую продолжительность и колебательность, чем у дизеля с ПИ-регулятором. Использование ПИД-регулятора с коэффициентами  $k_{\text{п}} = 12$ ,  $k_{\text{и}} = 57$ ,  $k_{\text{д}} = 3$  обеспечивает продолжительность переходного процесса наброса

полной нагрузки  $t_n = 5$  с и перерегулирование (провал частоты вращения в переходном процессе)  $\sigma = 7\%$ , что соответствует требованиям ГОСТ Р 55231-2012 к САР третьего класса точности двигателей внутреннего сгорания.

4. Ограничение скорости изменения задания частоты вращения коленчатого вала двигателя приводит к улучшению качества переходных процессов разгона-торможения. При учете нелинейной зависимости цикловой подачи топлива от положения дозирующего органа топливного насоса высокого давления получен переходный процесс с меньшими продолжительностью и колебательностью по сравнению с переходным процессом, полученным при линейной характеристике топливоподачи.

5. При быстром изменении задания требуемой частоты вращения (например, с интенсивностью  $dn_{\text{треб}}/dt = 200000$  мин<sup>-1</sup>/с) применение ПИД-регулятора позволяет получить более качественные переходные процессы по сравнению с ПИ-регулятором. Наличие дифференциальной составляющей ПИД-закона регулирования позволяет стабилизировать рассматриваемые переходные процессы. При более жестком ограничении скорости изменения задания требуемой частоты вращения (например, с интенсивностью  $dn_{\text{треб}}/dt = 400$  мин<sup>-1</sup>/с) различия в переходных процессах разгона-торможения двигателя с ПИД- и с ПИ регулятором становятся менее заметными.

6. Проведены реостатные испытания системы управления ЭСУВТ.01. Исследованы динамические качества САР частоты вращения в переходном процессе разгона дизеля по тепловозной характеристике. В качестве показателей качества процесса регулирования использованы время переходного процесса, заброс частоты вращения в переходном процессе и период собственных колебаний регулируемого параметра.

7. Предложена методика оптимизации значений коэффициентов пропорциональной и интегральной составляющих ПИ-закона регулирования, заключающаяся в формировании критерия оптимальности переходного процесса в виде произведения продолжительности переходного процесса и заброса частоты вращения в переходном процессе. Полученные оптимизированные значения указанных коэффициентов позволили построить рекомендуемые характеристики их изменения в переходном процессе разгона дизеля по тепловозной характеристике.

8. Проведены экспериментальные исследования тепловозного дизеля Д50 (6 ЧН 31,8/33) с системой управления ЭСУВТ.01 в составе дизель-генераторной установки типа 1-ПДГ4Д маневрового тепловоза. По результатам проведенных испытаний определена оптимизированная по топливной экономичности характеристика управления углом опережения впрыскивания топлива на режимах тепловозной характеристики. Эта характеристика предусматривает уменьшение УОВТ с 16,8 до 3,6° п.к.в. до ВМТ при переводе контроллера машиниста с восьмой на первую позицию.

9. При реализации указанной характеристики в дизеле Д50 снижение эксплуатационного расхода топлива составило  $\Delta g_{e \text{ инт}} = 2,94$  г/(кВт·ч) или 1,30%. При установке указанной системы на дизель Д50 дополнительное уменьшение

расхода топлива достигается за счет оптимизации закона подачи топлива, более равномерного дозирования топлива по цилиндрам дизеля, сокращения времени переходных процессов и уменьшения минимальной частоты вращения холостого хода.

10. Результаты испытаний свидетельствуют о том, что дымность ОГ дизеля Д50 с системой управления ЭСУВТ.01 находилась в пределах норм соответствует требованиям ГОСТ Р 51250-99. По выбросам оксидов азота и монооксида углерода исследуемый дизель удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51249-99. Повышенная эмиссия несгоревших углеводородов может быть снижена при оснащении дизеля каталитическим нейтрализатором.

### **Основные положения диссертации изложены в следующих работах:**

1. Системы электронного управления топливоподачей для газовых и газодизельных двигателей / С.В. Плахов [и др.] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2018. Том 17. № 1. С. 20-29 (0,80 п.л./0,20 п.л.).

2. Совершенствование системы электронного управления топливоподачей газодизельного двигателя / С.В. Плахов [и др.] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2018. Том 17. № 2. С. 70-79 (0,80 п.л./0,20 п.л.).

3. Исследование системы автоматического регулирования дизель-генераторной установки. Часть 1 / С.В. Плахов [и др.] // Грузовик. 2018. № 6. С. 30-34 (0,40 п.л./0,10 п.л.).

4. Исследование системы автоматического регулирования дизель-генераторной установки. Часть 2 / С.В. Плахов [и др.] // Грузовик. 2018. № 7. С. 31-37 (0,60 п.л./0,15 п.л.).

5. Исследование системы автоматического регулирования дизель-генераторной установки. Часть 3 / С.В. Плахов [и др.] // Грузовик. 2018. № 8. С. 26-34 (0,80 п.л./0,15 п.л.).

6. Моделирование системы автоматического регулирования частоты вращения дизельного двигателя / С.В. Плахов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 7. С. 35-46 (1,00 п.л./0,25 п.л.).

7. Экспериментальные исследования системы автоматического регулирования частоты вращения вала тепловозного дизеля / С.В. Плахов [и др.] // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2020. № 3. С. 35-50 (0,80 п.л./0,20 п.л.).

8. Марков В.А., Фурман В.В., Плахов С.В., Совершенствование процесса топливоподачи в тепловозном дизеле // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2020. № 4. С. 62-75 (0,80 п.л./0,25 п.л.).