

На правах рукописи

Фурман Виктор Владимирович

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ ТЕПЛОВОЗОВ
ПУТЕМ СОЗДАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва - 2016

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

Ерохов Виктор Иванович

заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры экологической безопасности технических систем ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

Козлов Андрей Юрьевич

доктор технических наук, заведующий отделом теории рабочих процессов и имитационного моделирования энергетических установок ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

Хмелёв Роман Николаевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Ведущее предприятие:

ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения»

Защита диссертации состоится « 21 » марта 2017 г. в 14 ч. 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.

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 Д212.141.09.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Тумашев Р.З.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

В настоящее время совершенствование силовых установок тепловозов (СУ) чаще всего связано с применением новых конструкционных материалов, технологий, конструкторских решений и систем электронного управления. Применение электронного управления процессами в СУ тепловозов позволяет не только на порядок повысить точность реализации заданных характеристик, но и обеспечить их стабильность в течение длительного периода эксплуатации. В большинстве известных примеров применения электронного управления на тепловозах разработчики тщательно копируют применявшиеся ранее законы управления процессами в силовых установках. Это позволяет получить определенный технико-экономический эффект, однако не раскрывает широкий спектр возможностей технического совершенствования эксплуатационных характеристик силовых установок за счет применения электронного регулирования.

В диссертации рассмотрена проблема совершенствования технико-экономических характеристик дизель-генераторов тепловозов путем совершенствования законов управления процессом топливоподачи, нагрузкой тягового генератора, наддувом в установившихся и переменных режимах тяговой работы тепловозов с целью снижения расхода топлива и повышения надежности работы установки. В связи с продолжающимся истощением мировых запасов нефти, дефицитом нефтепродуктов и высокими ценами на моторные топлива решение проблемы снижения расхода топлива является весьма актуальным. Немаловажным аспектом решения поставленной проблемы является возможность совершенствования экологических показателей тепловозных дизелей посредством электронного управления процессом топливоподачи. Серийные отечественные системы топливоподачи не в полной мере реализуют требуемые законы управления топливоподачей и по этой причине не позволяют обеспечить заметное снижение выбросов в атмосферу нормируемых токсичных компонентов отработавших газов (ОГ).

Таким образом, необходимо проведение комплекса исследований, направленных на разработку систем электронного управления топливоподачей, определение оптимизированных характеристик управления, оценку влияния этих характеристик на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ, определение динамических свойств системы электронного управления топливоподачей, оценку эффективности использования этой системы в условиях реальной эксплуатации тепловозных дизелей. Результаты таких исследований могут быть использованы при создании отечественных электронных систем управления топливоподачей, обеспечивающих перспективные требования к токсичности ОГ и показателям топливной экономичности тепловозных дизелей при достижении требуемых динамических свойств этих систем.

Цель работы: улучшение эксплуатационно-технических характеристик дизель-генераторов тепловозов путем создания и совершенствования систем электронного управления.

Объект исследования: системы электронного управления дизель-генераторами тепловозов.

Методы исследований. Поставленная в работе цель достигается сочетанием теоретических и экспериментальных методов исследования. При теоретических исследованиях использованы методы теории рабочего процесса дизелей и 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 и в условиях реальной эксплуатации, полученными автором, а также с опубликованными данными других авторов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны системы электронного управления топливоподачей с импульсным управлением электрогидравлическим клапаном, обеспечивающие реализацию оптимизированных законов подачи топлива и характеристик изменения угла опережения впрыскивания в тепловозном дизеле;
- разработаны новые подходы к созданию алгоритмов управления силовых установок тепловозов, реализующих оптимальное управление частотой вращения и мощностью дизель-генераторов при работе на установившихся и переходных режимах работы.
- разработана уточненная методика расчета топливоподачи дизеля на базе программного комплекса (ПК) ВПРЫСК, созданного в МГТУ им. Н.Э. Баумана, позволяющая оценить особенности этого процесса в дизелях, оснащенных системами электронного управления топливоподачей с импульсным управлением электрогидравлическим клапаном;
- разработана методика расчета ограничительной характеристики тепловозного дизель-генератора, базирующаяся на определении требуемой цикловой подачи дизельного топлива на каждой позиции контроллера в переходном процессе при переводе позиции контроллера с низшей на высшую с обеспечением требуемого качества переходного процесса;
- разработана методика оценки динамических свойств системы электронного управления топливоподачей, базирующаяся на построении амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик электронного регулятора частоты вращения и определении собственной частоты колебаний частоты вращения двигателя, суммарного фазового сдвига и ориентировочного заброса частоты вращения при сбросе номинальной нагрузки;
- в сравнительных экспериментальных исследованиях тепловозного дизеля на моторном стенде выявлена возможность улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ при использовании системы электронного управления топливоподачей с импульсным управлением электро-

гидравлическим клапаном, обеспечивающей управление углом опережения впрыскивания топлива;

- в эксплуатационных испытаниях тепловоза, оборудованного системой электронного управления топливоподачей с импульсным управлением электрогидравлическим клапаном, подтверждена работоспособность и эффективность этой системы в реальных условиях эксплуатации;
- разработана методика оценки эффективности использования системы электронного управления топливоподачей, базирующейся на определении эксплуатационных затрат при распределении режимов работы, характерном для дизельных двигателей маневровых тепловозов.

Достоверность и обоснованность научных положений определяются:

- использованием фундаментальных законов и уравнений теории рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания и 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 и при эксплуатационных испытаниях тепловоза с системой электронного управления топливоподачей;
- положительным опытом эксплуатации тепловозов, оснащенных электронными системами управления, реализующими разработанные в диссертации характеристики и алгоритмы.

Практическая ценность состоит в том, что:

- разработанная система электронного управления топливоподачей с импульсным управлением электрогидравлическим клапаном, позволяющая значительно снизить расход топлива, установлена и эксплуатируется на ряде отечественных маневровых тепловозов;
- уточненная методика расчета топливоподачи дизеля позволяет оценить особенности этого процесса в дизелях, оснащенных системами электронного управления, и с достаточной для практики точностью решать задачи проектирования таких систем для отечественных тепловозных дизелей;
- проведенные экспериментальные исследования дизеля, оснащенного системой электронного управления топливоподачей с импульсным управлением электрогидравлическим клапаном, подтвердили эффективность использования этой системы в отечественных тепловозных дизелях;
- проведенные расчетные исследования рабочего процесса дизеля, оснащенного системой импульсного управления электрогидравлическим клапаном, с использованием ПК ДИЗЕЛЬ-РК, созданного в МГТУ им. Н.Э. Баумана, подтвердили влияние закона подачи на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ и возможность использования этого ПК для исследования дизеля с системой электронного управления;
- разработанная методика расчета ограничительной характеристики тепловозного дизель-генератора позволяет профилировать указанную характери-

стику с целью ее формирования разработанной системой электронного управления топливоподачей;

- разработанная методика оценки динамических свойств системы электронного управления позволяет определить собственную частоту колебаний частоты вращения двигателя, суммарного фазового сдвига и ориентировочного заброса частоты вращения при сбросе номинальной нагрузки;
- проведенные эксплуатационные испытания тепловоза, оборудованного системой электронного управления топливоподачей с импульсным управлением электрогидравлическим клапаном, подтвердили возможность заметного снижения расхода топлива в реальных условиях эксплуатации;
- разработанная методика оценки эффективности использования системы электронного управления топливоподачей позволяет определить эксплуатационный расход топлива при реальном распределении режимов работы двигателей маневровых тепловозов;
- разработано программное обеспечение, реализующее предложенные автором характеристики и алгоритмы управления для отечественных дизель-генераторов тепловозов.

Реализация результатов работы. Разработанные алгоритмы управления составили основу созданных под руководством автора серийных электронных регуляторов частоты вращения и мощности типа ЭРЧМ30Т, которые установлены и эксплуатируются на тепловозах ЧМЭЗ, ТЭМ2, ТЭМ18Д, 2ТЭ10, 2ТЭ116, ТЭП70 и 2ТЭ25 в количестве более 2000 единиц. Разработаны опытные системы электронного управления топливоподачей для ряда тепловозных и автотракторных дизелей, включая дизели, адаптированные к работе на природном газе. Системы электронного управления топливоподачей серийно установлены на 160 единицах тепловозов ТЭМ2, ТЭМ18Д и ЧМЭЗ. Опытный экземпляр системы установлен на тепловозе 2ТЭ116. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» и кафедры «Локомотивы» ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет путей сообщения». Результаты работы внедрены в опытное проектирование и опытное производство ЗАО «Форант-Сервис» (г. Ногинск). Результаты работы реализованы в Филиале «Дирекция тяги» ОАО «РЖД» (г. Москва), ОАО «Коломенский завод» (г. Коломна), ОАО «Пензадизельмаш» (г. Пенза), Государственном объединении «Белорусская железная дорога» (г. Минск).

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертации обсуждались:

- на заседании кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2016 г.);
- на международном симпозиуме «Образование через науку», посвященном 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2005 г.);
- на межотраслевой научно-технической конференции «Современные про-

блемы развития поршневых ДВС», посвященной 75-летию кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок СПбГМТУ (Санкт-Петербург, 2005 г.);

- на международной научно-технической конференции «Двигатель-2007», посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2007 г.);

- на II Международной научно-технической конференции «Локомотивы. XXI век», Государственный университет путей сообщения императора Александра Первого (Санкт-Петербург, 2014 г.);

- на заседаниях Всероссийского научно-технического семинара (ВНТС) им. проф. В.И. Крутова по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок при кафедре «Теплофизика» (Э-6) МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2005-2016 г.г.);

- на III Международной научно-технической конференции «Локомотивы. XXI век», Государственный университет путей сообщения императора Александра Первого (Санкт-Петербург, 2015 г.).

Публикации. По теме диссертации изданы монография и 23 научные статьи, в том числе 16 из них опубликованы в журналах, включенных в перечень ВАК рецензируемых ведущих научных журналов и изданий. Также по теме диссертации опубликовано 10 материалов конференций. Получено 5 патентов на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, основных выводов по диссертационной работе, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 321 страница, включая 281 страницы основного текста, содержащего 72 рисунка, 34 таблицы. Список литературы включает 237 наименований на 25 страницах. Приложение на 40 страницах содержит листинги исходных данных для расчета рабочего процесса дизеля и листинги результатов расчета рабочего процесса, а также документы о внедрении результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведения работ, направленных на создание и совершенствование систем электронного управления топливоподачей тепловозных дизелей, дана общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе диссертации проведен анализ работ, посвященных созданию и совершенствованию электронных систем автоматического управления (САУ) топливоподачей дизелей транспортного назначения. Рассмотрены направления и тенденции развития систем управления дизель-генераторами тепловозов. Показана возможность улучшения показателей тепловозных дизелей при установке на них САУ топливоподачей. Проведен обзор регуляторов и САУ дизелей тепловозов и даны некоторые характеристики их дизель-генераторов. Проанализированы распределения режимов

работы дизельных двигателей дизель-генераторов тепловозов в условиях их реальной эксплуатации. Представлены применяемые типы систем топливоподачи дизелей транспортного назначения. Подтверждена целесообразность управления углом опережения впрыскивания топлива (УОВТ) в соответствии с режимом работы дизелей. Рассмотрены разработанные системы управления УОВТ транспортных дизелей. Отмечено, что необходимость создания и совершенствования систем электронного управления топливоподачей и управления УОВТ в дизелях достаточно полно обоснована в трудах отечественных ученых Л.В. Грехова, А.А. Грунауэра, С.Н. Девянина, Е.Е. Коссова, В.И. Крутова, А.Г. Кузнецова, В.А. Маркова, Н.Н. Патрахальцева, Ф.И. Пинского, А.Е. Симсона, В.И. Толшина, А.З. Хомича и ряда других. На основании анализа состояния проблемы были сформулированы цель работы и следующие задачи исследования:

1. Разработка электронных САУ топливоподачей, обеспечивающих реализацию целесообразных законов подачи топлива и характеристик изменения УОВТ в тепловозном дизеле.

2. Разработка уточненной методики расчета топливоподачи дизеля, позволяющая оценить особенности этого процесса в дизелях, оснащенных системами электронного управления топливоподачей и проведение расчетных исследований.

3. Разработка расчетной методики и проведение расчетных исследований рабочего процесса дизеля, оснащенного системой электронного управления топливоподачей, с целью оценки влияния закона подачи, формируемого системой электронного управления, на показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов.

4. Разработка методики расчета ограничительной характеристики тепловозного дизель-генератора, позволяющей профилировать указанную характеристику с целью ее формирования разработанной системой электронного управления топливоподачей.

5. Разработка методики оценки динамических свойств системы электронного управления топливоподачей, позволяющей определить динамические показатели САУ при сбросе номинальной нагрузки.

6. Проведение экспериментальных исследований тепловозного дизеля на моторном стенде с целью оценки влияния управления УОВТ на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ при использовании системы электронного управления топливоподачей.

7. Проведение эксплуатационных испытаний тепловоза, оборудованного системой электронного управления топливоподачей, с целью оценки эффективности этой системы и возможности снижения расхода топлива дизельным двигателем в реальных условиях эксплуатации.

8. Разработка методики оценки эффективности использования системы электронного управления топливоподачей с определением эксплуатационного расхода топлива при реальном распределении режимов работы двигателей маневровых тепловозов.

Во второй главе представлены электронные САУ топливоподачей дизелей, разработанные производственно-промышленным предприятием ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов) при участии автора диссертации. Созданы различные варианты таких систем для ряда тепловозных дизелей. Показано, что наиболее перспективной является электронная система с импульсным индивидуальным управлением с помощью клапанов, установленных в магистралях высокого давления. Для российских тепловозных дизелей целесообразны разделенные системы топливоподачи с электронно-управляемым клапаном, установленным в надплунжерной полости топливного насоса высокого давления (ТНВД). Применение таких систем позволяет с минимальными конструктивными изменениями адаптировать системы электронного управления топливоподачей к современным дизелям. Для тепловозного дизеля типа Д50 (6 ЧН 31,8/33) ОАО «Пензадизельмаш» разработаны электроуправляемые насосы 4ЭТН.03 с электрогидравлическими клапанами (Рис. 1) системы типа ЭСУВТ.01.

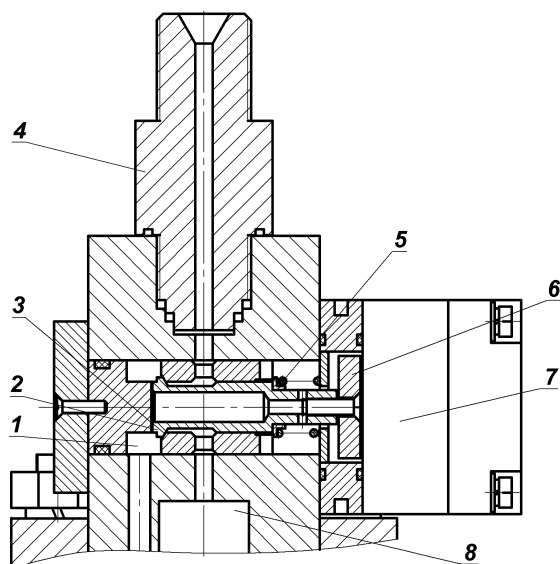


Рис. 1. Конструктивная схема топливного насоса высокого давления с электромагнитным клапаном управления подачей топлива: 1 – линия низкого давления ТНВД; 2 – клапан; 3 – кромка клапана; 4 – штуцер ТНВД; 5 – возвратная пружина; 6 – якорь; 7 – электромагнит; 8 – надплунжерная полость

Разработана уточненная методика расчета процесса топливоподачи дизеля, базирующаяся на использовании ПК ВПРЫСК, созданного в МГТУ им. Н.Э.Баумана профессором Л.В. Греховым. Методика описывает одномерное нестационарное теплоизолированное движения вязкой сжимаемой жидкости в трубопроводах высокого давления и позволяет оценить особенности этого процесса в дизелях, оснащенных системами электронного управления топливоподачей.

Для оценки влияния параметров штатной (гидромеханической) и опытной (электронно-управляемой) топливной аппаратуры (ТА) на топливоподачу были проведены моделирование и оптимизация процесса топливоподачи в ПК ВПРЫСК. Расчёты произведены для номинального режима работы при частоте вращения кулачкового вала ТНВД $n_{\text{тн}}=375 \text{ мин}^{-1}$ и цикловой подаче топлива $g_{\text{ц}}=1,54 \text{ г}$. Объектом исследования являлась электронная

САУ топливоподачей типа ЭСУВТ.01, которой оснащён дизель типа Д50 в составе дизель-генераторной установки 1-ПДГ4Д.

При расчетах в качестве одного из основных параметров, характеризующих качество процессов впрыскивания и распыливания топлива выбрано максимальное давление впрыскивания $P_{впр.мах}$. На Рис. 2 приведены графики давления впрыскивания для штатной системы и для системы типа ЭСУВТ.01. Эти данные свидетельствуют о том, что при всех прочих равных параметрах двух ТА, при использовании системы ЭСУВТ.01 сразу получен значительный прирост давления впрыскивания (от 92,5 до 116,4 МПа). При этом средний диаметр капель по Заутеру уменьшился с 25,9 до 23,2 мкм и были исключены подвпрыскивания топлива.

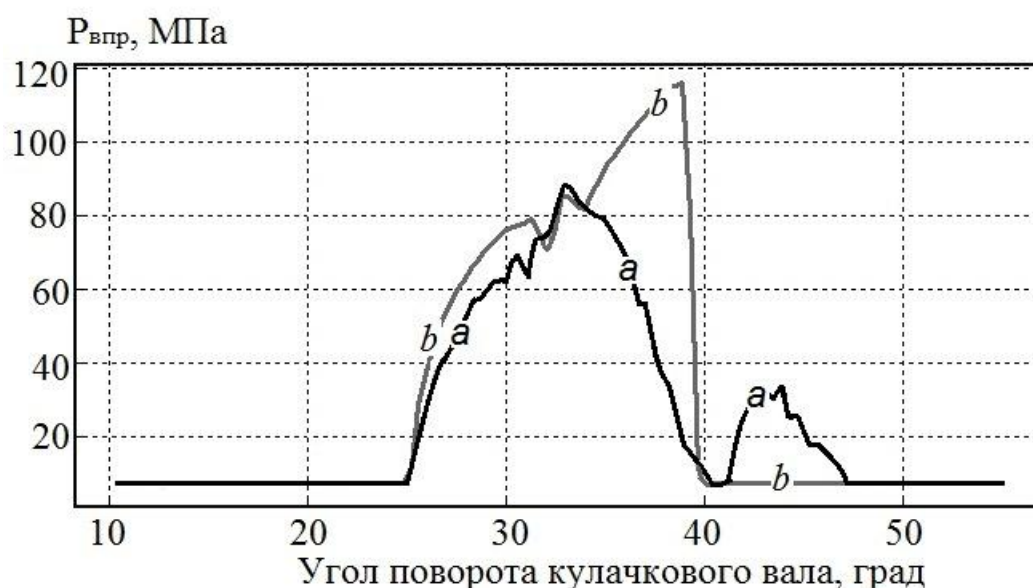


Рис. 2. Характеристика давления впрыскивания топлива по углу поворота вала ТНВД для штатной системы без электронного управления (a) и системы типа ЭСУВТ.01 (b)

Исследовано влияние ряда конструктивных параметров системы ЭСУВТ.01 на показатели впрыскивания и распыливания топлива. Среди этих параметров – диаметр электро-управляемого клапана $D_{кл}$, его максимальный ход $H_{кл}$, параметры нагнетательного трубопровода (длина $L_{тр}$ и диаметр $D_{тр}$). Наибольшее влияние на максимальное давление впрыскивания $P_{впр.мах}$ и средний диаметр капель по Заутеру D_{32} оказывает внутренний диаметр трубопровода $D_{тр}$, а также выбор оптимального момента начала закрытия клапана, т.е. выбор участка профиля кулачка, на котором происходит топливоподача. При расчетах был проведен поиск оптимального момента начала закрытия электроуправляемого клапана системы типа ЭСУВТ.01 (оптимального участка профиля кулачка, на котором происходит впрыск) для заданного номинального режима. Для номинального режима оптимальный угол начала закрытия клапана оказался равным 21,6 град. поворот коленчатого вала до верхней мертвой точки (п.к.в. до ВМТ). На за-

ключительном этапе расчетов были получены зависимости времени открытия дозирующего клапана и геометрической продолжительности подачи от частоты вращения кулачкового вала ТНВД и требуемой цикловой подачи (Рис. 3). Показано, что с изменением этих параметров продолжительность открытия клапана изменяется от $\tau=1,40$ мс при $n_{\text{ТН}}=375$ мин⁻¹ и $g_{\text{ц}}=0,15$ г до $\tau=11,38$ мс при $n_{\text{ТН}}=150$ мин⁻¹ и $g_{\text{ц}}=1,5$ г.

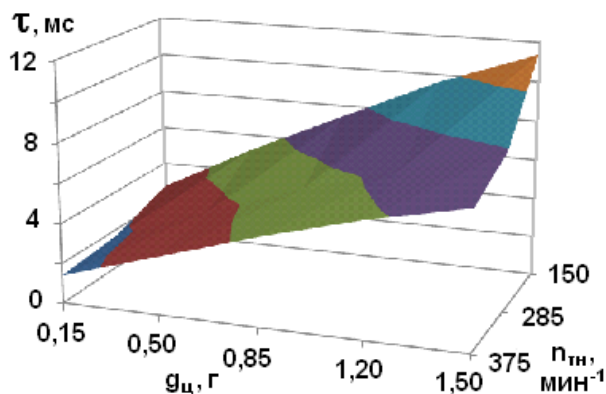


Рис. 3. Зависимость продолжительности открытия дозирующего клапана τ от частоты вращения кулачкового вала ТНВД $n_{\text{ТН}}$ и требуемой массовой цикловой подачи топлива $g_{\text{ц}}$

В третьей главе проведены расчетные исследования рабочего процесса тепловозного дизеля с электронным управлением топливopодачей. Разработана методика проведения расчетных исследований рабочего процесса дизеля со штатной и опытной системами топливopодачи, базирующаяся на использовании ПК ДИЗЕЛЬ-РК, созданного в МГТУ им. Н.Э.Баумана профессором А.С. Кулешовым. В основе этого ПК лежит расчетный метод, предложенный профессором Н.Ф. Разлейцевым. РК-модель учитывает особенности характеристики впрыска, включая многофазный впрыск, мелкость распыливания топлива, ориентацию струй в объеме камеры сгорания, динамику развития топливных струй, взаимодействие струй с воздушным вихрем и стенками.

С использованием ПК ДИЗЕЛЬ-РК проведены расчетные исследования рабочего процесса дизеля Д50 с целью оценки влияния закона подачи, формируемого системой топливopодачи с электронной САУ, на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ. В качестве исследуемого фактора влияния штатной и опытной систем топливopодачи на рабочий процесс принято изменение закона подачи топлива и характеристики давления впрыскивания при переходе от штатной системы с гидромеханической САУ к опытной системе с электронной САУ типа ЭСУВТ.01.

При расчете рабочего процесса дизеля со штатной и опытной системами топливopодачи использованы характеристики подачи топлива (законы подачи), полученные при расчетных исследованиях с использованием ПК ВПРЫСК. Эти законы подачи топлива, соответствующие номинальному режиму дизеля Д50 с частотой вращения коленчатого вала $n=750$ мин⁻¹ и цикловой подачей $g_{\text{ц}}=1,54$ г, представлены на Рис. 4.

Результаты расчетов показателей рабочего процесса тепловозного дизеля Д-50 со штатной и опытной системами топливopодачи на номинальном

режиме сведены в Таблицы 1 и 2. Установка опытной системы топливоподачи позволила заметно улучшить показатели распыливания топлива и смесеобразования на номинальном режиме. Замена штатной ТА на опытную с электронным управлением топливоподачей типа ЭСУБТ.01 позволила также сократить продолжительность топливоподачи с 31,2 до 29,9 град. п.к.в., увеличить максимальное давление впрыскивания – от 924,8 до 1163,7 бара, уменьшить средний диаметр капель по Заутеру – с 25,89 до 23,23 мкм. При этом мощностные показатели дизеля со штатной и опытной ТА оказались примерно одинаковыми – его эффективная мощность N_e была равна соответственно 880,2 и 882,4 кВт. При этом эффективные показатели дизеля с опытной системой топливоподачи улучшились по сравнению с дизелем со штатной системой топливоподачи – удельный эффективный расход топлива g_e снизился с 205,1 до 203,9 г/(кВт·ч), а эффективный КПД дизеля η_e возрос с 0,413 до 0,415 соответственно.

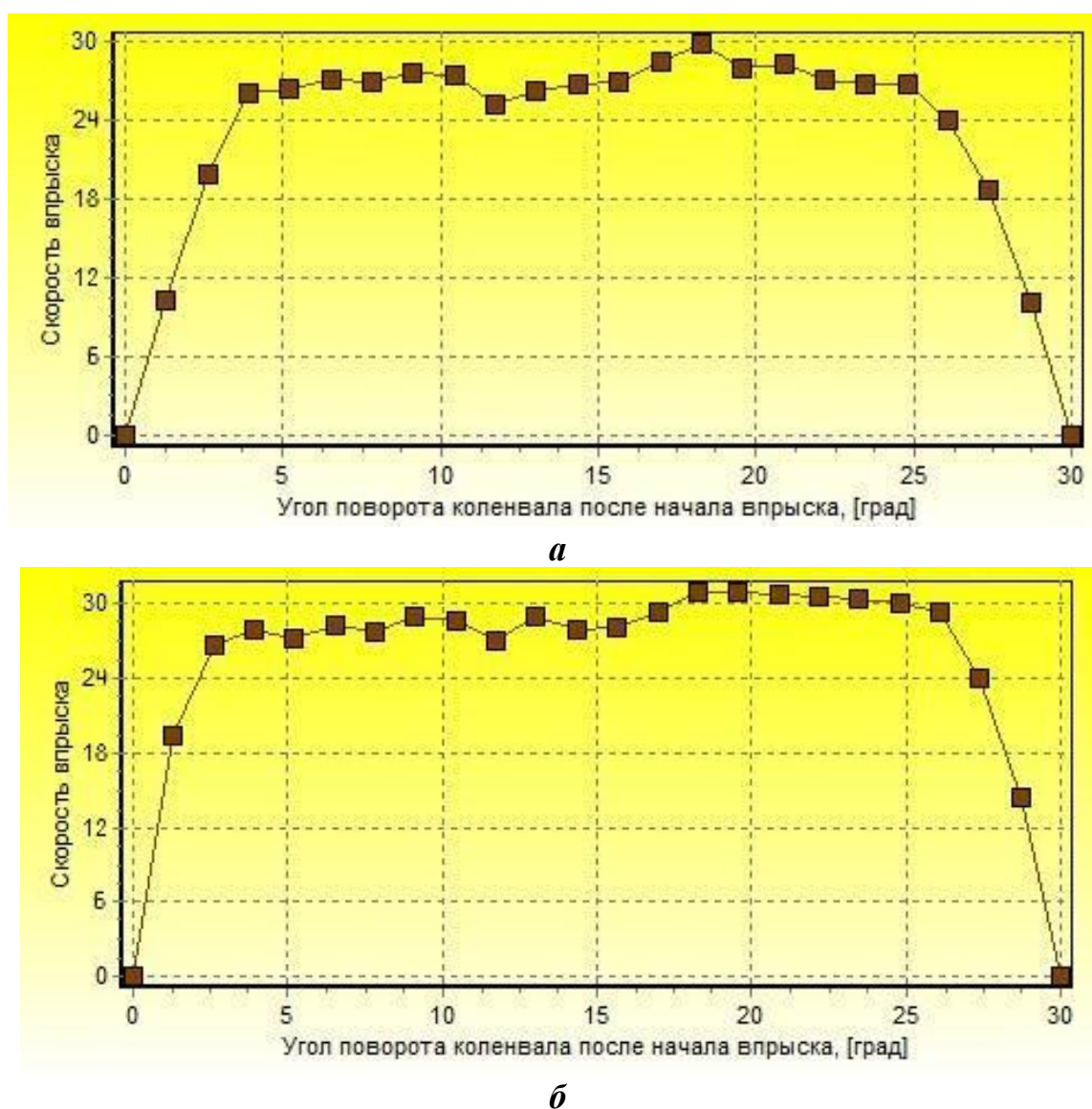


Рис. 4. Закон подачи топлива, формируемый штатной (а) и опытной системой топливоподачи типа ЭСУБТ.01 (б) дизеля типа Д50

Таблица 1.

Показатели рабочего процесса дизеля Д50 со штатной и опытной системами топливоподачи на номинальном режиме с частотой вращения $n=750 \text{ мин}^{-1}$ и цикловой подачей $g_{\text{ц}}=1,54 \text{ г}$

Тип системы топливоподачи	Продолжительность топливоподачи, град.	Максимальное давление впрыска, бар	Средний диаметр капель по Заутеру, мкм	УОВТ (угол начала подъема иглы форсунки), град.	Коэффициент избытка воздуха	Эффективная мощность двигателя, кВт
Штатная	31,2	924,8	25,89	15,8	2,0	880,2
Опытная	29,9	1163,7	23,23	16,7	2,0	882,4

Таблица 2.

Показатели рабочего процесса дизеля Д50 со штатной и опытной системами топливоподачи на номинальном режиме с частотой вращения $n=750 \text{ мин}^{-1}$ и цикловой подачей $g_{\text{ц}}=1,54 \text{ г}$

Тип системы топливоподачи	Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	Эффективный КПД двигателя	Дымность ОГ (показатель ослабления светового потока), м^{-1}	Дымность ОГ (приведенный коэффициент ослабления светового потока), % по шкале Хартриджа	Концентрация оксидов азота в ОГ, ppm	Удельный массовый выброс оксидов азота, г/(кВт·ч)
Штатная	205,1	0,413	0,460	18,0	1301,0	15,42
Опытная	203,9	0,415	0,435	17,0	1322,0	15,63

При установке системы управления типа ЭСУВТ.01 дымность ОГ K_x (показатель ослабления светового потока) дизеля типа Д50, работающего на номинальном режиме, уменьшилась с 0,460 до 0,435 м^{-1} (приведенный коэффициент ослабления светового потока снизился при этом с 18 до 17% по шкале Хартридж). Повышение эффективности процесса сгорания дизеля с системой управления типа ЭСУВТ.01 привело к небольшому росту содержания в ОГ оксидов азота C_{NO_x} на номинальном режиме. Так, при замене штатной системы топливоподачи на опытную систему концентрация оксидов азота в ОГ дизеля C_{NO_x} увеличилась с 1301 до 1322 ppm . В результате удельный массовый выброс оксидов азота на этом режиме (отнесенный к единице вырабатываемой мощности) e_{NO_x} возрос с 15,42 до 15,63 г/(кВт·ч). Однако такой рост эмиссии с ОГ оксидов азота легко компенсируется при оптимизации значений УОВТ.

В целом полученные данные подтверждают улучшение показателей распыливания топлива, смесеобразования и сгорания дизеля Д50 при установке системы ЭСУВТ.01 за счет трансформации закона подачи топлива и увеличения давления впрыскивания. Однако улучшение показателей топливной экономичности, дымности и токсичности ОГ, обусловленное этими

факторами, не очень значительное. В частности, при переходе от закона подачи штатной системы к закону топливоподачи опытной системы удельный эффективный расход топлива g_e на номинальном режиме снизился с 205,1 до 203,9 г/(кВт·ч), т.е. примерно на 0,6%. Более значимым фактором является возможность реализации оптимизированных законов управления УОВТ, которую обеспечивает система ЭСУВТ.01.

Четвертая глава посвящена расчетным исследованиям разработанных электронных САУ топливоподачей. Одной из важнейших статических характеристик топливоподачи является внешняя скоростная характеристика, ограничивающая максимально возможную подачу топлива в широком диапазоне скоростных режимов. Разработана методика расчета этой ограничительной характеристики для тепловозного дизель-генератора, которая сводится к определению требуемой цикловой подачи топлива на каждой позиции контроллера при его переводе с низшей позиции на высшую с обеспечением требуемого качества переходного процесса. Обычно принимается, что при определении подачи топлива в переходном процессе основным ограничительным параметром является дымность ОГ. В этом случае экспериментальным путем производится подбор требуемых значений коэффициента избытка воздуха α_Σ . Зависимость суммарного коэффициента избытка воздуха α_Σ от цикловой подачи топлива q_Σ , кг/цикл, определяется формулой:

$$\alpha_\Sigma = \frac{G_{vi} \cdot \pi \cdot \tau}{\omega \cdot \lambda_o \cdot q_\Sigma \cdot Z}, \quad (1)$$

где G_{vi} – расход воздуха через дизель, кг/с; Z – число цилиндров; λ_o – стехиометрическое соотношение; τ – тактность дизеля; $\omega = \pi n/30$ – угловая скорость вращения вала дизеля, рад/с; n – частота вращения дизеля, мин⁻¹. После дифференцирования коэффициента избытка воздуха α_Σ по цикловой подаче топлива q_Σ (при постоянстве G_{vi} и ω) получено:

$$\frac{\partial \alpha_\Sigma}{\partial q_\Sigma} = - \frac{G_{vi} \cdot \pi \cdot \tau}{\omega \cdot \lambda_o \cdot q_\Sigma^2 \cdot Z}. \quad (2)$$

Индикаторная мощность дизеля N_i рассчитаны по формулам:

$$N_i = \frac{H_U \cdot Z \cdot \omega \cdot q_\Sigma \cdot \eta_i}{\pi \cdot \tau}, \quad dN_i = \frac{H_U \cdot Z \cdot \omega}{\pi \cdot \tau} \cdot (\eta_i \cdot dq_\Sigma + q_\Sigma \cdot d\eta_i) \quad (3)$$

где H_U – низшая теплотворная способность топлива, Дж/кг; η_i – индикаторный КПД дизеля. В начале переходного процесса $\omega = \text{const}$ и индикаторная мощность N_i зависит только от индикаторного КПД η_i и цикловой подачи топлива q_Σ . Зависимости приращения α_Σ от приращения q_Σ и приращения η_i от приращения α_Σ определены в виде $d\alpha_\Sigma = (\partial \alpha_\Sigma / \partial q_\Sigma) \cdot dq_\Sigma$ и $d\eta_i = (\partial \eta_i / \partial \alpha_\Sigma) \cdot d\alpha_\Sigma$. Тогда формула для dN_i получила вид:

$$dN_i = \frac{H_U \cdot Z \cdot \omega}{\pi \cdot \tau} \cdot dq_\Sigma \cdot \left(\eta_i - \frac{G_{vi} \cdot \pi \cdot \tau}{\omega \cdot \lambda_o \cdot q_\Sigma^2 \cdot Z} \cdot \frac{\partial \eta_i}{\partial \alpha_\Sigma} \right). \quad (4)$$

Формула (4) показывает, что при определенных значениях q_Σ , η_i и α_Σ индикаторная мощность N_i достигнет максимума (при $dN_i = 0$). Тогда индика-

торный КПД η_i , соответствующий максимальной для данного режима мощности, рассчитывается по формуле:

$$\eta_i = \frac{G_{vi} \cdot \pi \cdot \tau}{\omega \cdot \lambda_o \cdot q_{ц}^2 \cdot Z} \cdot \frac{\partial \eta_i}{\partial \alpha_{\Sigma}}. \quad (5)$$

С учетом полученных соотношений выражение для индикаторного КПД двигателя на режиме максимальной мощности принимает вид:

$$\eta_i = \alpha_{\Sigma} \cdot \frac{\partial \eta_i}{\partial \alpha_{\Sigma}}. \quad (6)$$

Зависимость индикаторного КПД η_i от α_{Σ} и n определяется экспериментально для каждой позиции контроллера (Рис. 5).

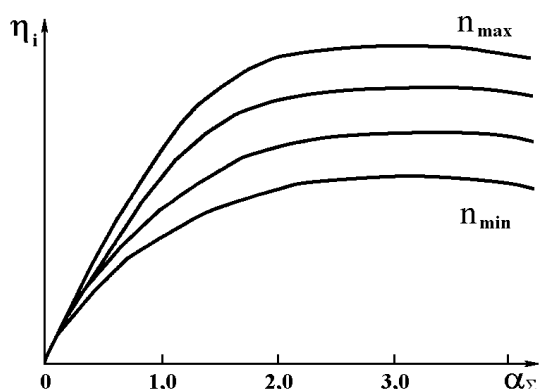


Рис. 5. Зависимости индикаторного КПД от коэффициента избытка воздуха и частоты вращения коленчатого вала дизеля

Для определения α_{Σ} и η_i проводятся испытания дизеля на каждой позиции контроллера при различных нагрузках с замером часового расхода топлива G_T , кг/ч, записью индикаторных диаграмм и расчетом среднего индикаторного давления p_i . При этом цикловая подача топлива $q_{ц}$, кг/цикл, и индикаторная мощность N_i , Вт, определяются в виде:

$$q_{ц} = \frac{G_T \cdot \pi \cdot \tau}{3600 \cdot \omega \cdot Z}, \quad N_i = \frac{p_i \cdot V_h \cdot \omega \cdot Z}{\pi \cdot \tau}, \quad (7)$$

где V_h – рабочий объем одного цилиндра двигателя, м³. С учетом выражений (3) и (7) формула для индикаторного КПД η_i приобретает вид:

$$\eta_i = \frac{p_i \cdot V_h}{H_U \cdot q_{ц}}. \quad (8)$$

В результате исследований для каждого скоростного режима построены зависимости индикаторной мощности, индикаторного КПД и коэффициента избытка воздуха от цикловой подачи топлива (Рис. 6). Таким образом, индикаторная мощность дизеля N_i достигает максимума при соответствующей цикловой подаче топлива $q_{ц}$, и дальнейшее ее увеличение нецелесообразно. В этом случае при росте $q_{ц}$ из-за низких значений α_{Σ} не обеспечивается полное сгорание топлива. В результате не увеличиваются индикаторная мощность N_i и крутящий момента M_d , наблюдается значительное ухудшение основных показателей дымности и токсичности ОГ.

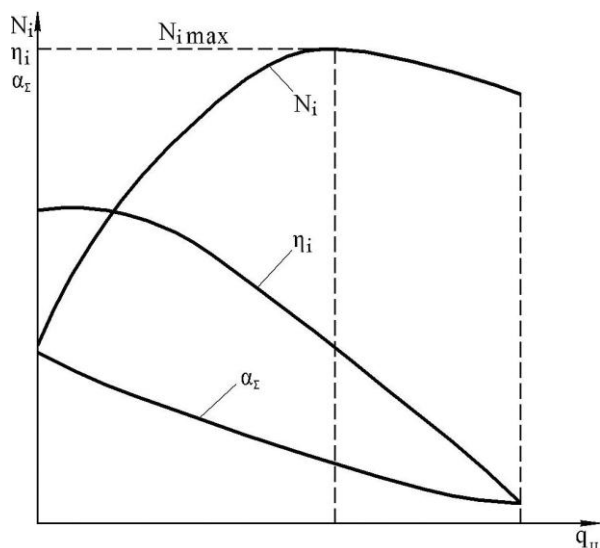


Рис. 6. Зависимость индикаторной мощности, индикаторного КПД и коэффициента избытка воздуха от цикловой подачи топлива

Для проведения аналитических исследований использовано линейное математическое описание, содержащее дифференциальные уравнения элементов САУ. Разработана методика оценки динамических свойств электронной САУ топливоподачи, позволяющая определить ее динамические показатели. При этом рассмотрена система управления тепловоза с электронным регулятором частоты вращения, воздействующим на дозирующую рейку ТНВД дизеля 12 ЧН 26/26, разработанная ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов). Эта система автоматического регулирования частоты (САРЧ) состоит из следующих звеньев (Рис. 7): дизеля с ТНВД; модулятора (диск с зубьями, вращающийся с числом оборотов n); датчика частоты вращения (ДЧВ); электронного регулятора частоты вращения (ЭРЧВ), содержащего блок управления (БУ) и электрогидравлическое исполнительного устройства (ИУ); рычажной передачи от ИУ к ТНВД.

Передаточная функция звена САРЧ записана в виде:

$$W(p) = \frac{B_m p^m + B_{m-1} p^{m-1} + \dots + B_1 p + B_0}{A_n p^n + A_{n-1} p^{n-1} + \dots + A_1 p + A_0}. \quad (9)$$

где $A_n, \dots, A_0, B_m, \dots, B_0$ – константы; p – комплексная переменная преобразования Лапласа. Частотные характеристики звена получают при подстановке $p = i\omega$ (где ω – частота колебаний входного сигнала) в выражение (9). Тогда амплитудно-фазовая частотная характеристика принимает вид:

$$W(i\omega) = \frac{B_m \omega^m + iB_{m-1} \omega^{m-1} - B_{m-2} \omega^{m-2} - iB_{m-3} \omega^{m-3} + \dots + iB_1 \omega + B_0}{A_n \omega^n + iA_{n-1} \omega^{n-1} - A_{n-2} \omega^{n-2} - iA_{n-3} \omega^{n-3} + \dots + iA_1 \omega + A_0}.$$

Введены следующие обозначения:

$$aw = B_0 - B_2 \omega^2 + B_4 \omega^4 - \dots,$$

$$bw = B_1 \omega - B_3 \omega^3 + B_5 \omega^5 - \dots,$$

$$cw = A_0 \omega - A_2 \omega^2 + A_4 \omega^4 - \dots,$$

$$dw = A_1 \omega - A_3 \omega^3 + A_5 \omega^5 - \dots,$$

где w – входной сигнал; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота колебаний входного сигнала регулятора системы, s^{-1} ; f – частота колебаний этого сигнала, Гц.

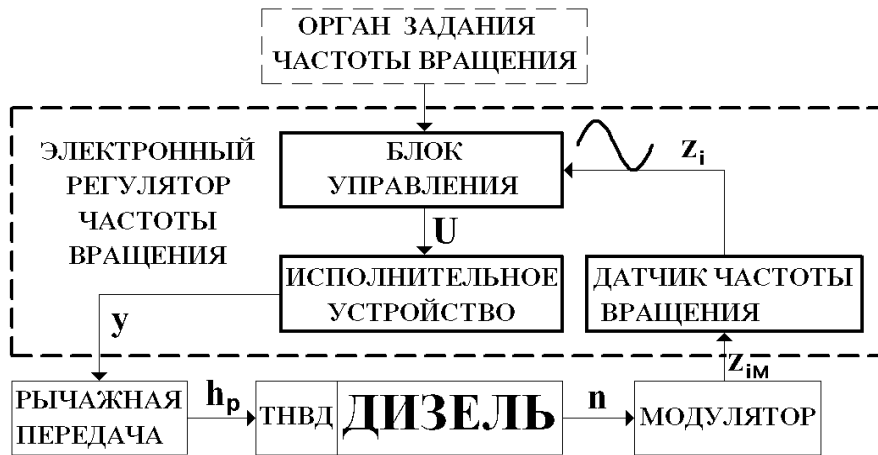


Рис. 7. Структура САРЧ дизеля 12 ЧН 26/26: U – напряжение от БУ к ИУ; y – перемещение выходного органа (поршня сервомотора) ИУ; h_p – ход рейки ТНВД; z_{im} – число зубьев модулятора, проходящих за секунду мимо ДЧВ; z_i – число периодов синусоидальных сигналов от ДЧВ.

Коэффициент усиления звена САУ $k_{зв}$ и его фазовый сдвиг $\gamma_{зв}$ вычисляются по формулам:

$$k_{зв} = \sqrt{\frac{aw^2 + bw^2}{cw^2 + dw^2}}; \gamma_{зв} = -\arctg \frac{bw \cdot cw - aw \cdot dw}{aw \cdot cw + bw \cdot dw} \frac{180}{\pi}. \quad (10)$$

Дизель типа 12 ЧН 26/26 описан следующим образом. Скорость изменения его частоты вращения рассчитывалась по формуле, $\text{мин}^{-1}/\text{с}$:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{30}{\pi} \frac{M_N h_p}{h_{pN} I},$$

где M_N – номинальный крутящий момент дизеля, Н·м; h_p – текущее перемещение рейки ТНВД, мм; h_{pN} – номинальный ход рейки ТНВД, мм; I – приведенный момент инерции дизеля и его агрегатов, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Коэффициент усиления дизеля k_d и его основной фазовый сдвиг γ_d , град, вычислялись по формулам:

$$k_d = \frac{30}{\pi} \frac{M_N}{h_p I \omega}. \quad \gamma_d = -\arctg \frac{30}{\pi} \frac{M_N}{h_p I} \frac{180}{\pi}.$$

Фазовый сдвиг запаздывания дизеля рассчитывался по формуле, град: $\gamma_{зд} = \omega t_{зд} 180 / \pi$, где $t_{зд} = 15 \cdot (2 \cdot \tau + i) / n \cdot i$ – время запаздывания дизеля, с; τ – его тактность; i – число цилиндров. Суммарный фазовый сдвиг дизеля $\gamma_{сд}$ определялся в виде, град: $\gamma_{сд} = \gamma_d + \gamma_{зд} = 90^\circ + \omega t_{зд} 180 / \pi$.

ЭРЧВ, включающий модулятор, датчик частоты вращения, БУ и ИУ, имел звено задержки (учитывает время расчета частоты вращения t_3); звено расчета текущей частоты вращения; звено фильтрации; пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) звено. Текущее значение частоты вращения после звена фильтрации определялось по выражению, мин^{-1} : $n_\phi + (dn_\phi / dt) T_\phi = n_t$, где n_ϕ – текущая частота вращения вала после фильтрации, мин^{-1} ; dn_ϕ / dt – текущее значение скорости изменения частоты вра-

щения вала после фильтрации, мин⁻¹/с; T_ϕ – постоянная времени звена фильтрации, с. Коэффициент усиления этого звена k_ϕ и фазовый сдвиг звена фильтрации γ_ϕ , град, определены в виде:

$$k_\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + T_\phi^2 \omega^2}}, \quad \gamma_\phi = -\arctg(T_\phi \omega) \frac{180}{\pi}.$$

ПИД-звено формирует напряжение, подаваемое на электромагнит ИУ. Это напряжение подчиняется закону, определяемому формулой, В:

$$U = k_1 n + k_2 \frac{dn}{dt} + k_3 \int n dt,$$

где $n = (n_\phi - n_3)$ – разность между текущей частотой вращения n_ϕ (после звена фильтрации) и заданной частотой вращения n_3 , мин⁻¹; k_1 – пропорциональный коэффициент ПИД-звена, В/мин⁻¹; k_2 – дифференциальный коэффициент, В·с/мин⁻¹; k_3 – интегральный коэффициент, В/(с·мин⁻¹). Коэффициент усиления ПИД-звена $k_{\text{пид}}$, В/мин⁻¹, и его фазовый сдвиг $\gamma_{\text{пид}}$, град, рассчитаны по формулам:

$$k_{\text{пид}} = \sqrt{\frac{(k_3 - k_2 \omega^2)^2 + k_1^2 \omega^2}{\omega}}, \quad \gamma_{\text{пид}} = -\arctg \frac{k_3 - k_2 \omega^2}{k_1 \omega} \frac{180}{\pi}.$$

Коэффициент усиления БУ ЭРЧВ $k_{\text{бу}}$ в целом есть произведение коэффициентов усиления звена задержки, звена расчета текущей частоты вращения, звена фильтрации и ПИД-звена, т.е. справедлива формула, В·с

$$k_{\text{бу}} = k_3 k_{\text{рч}} k_\phi k_{\text{пид}} = k_{\text{рч}} \sqrt{\frac{(k_3 - k_2 \omega^2)^2 + k_1^2 \omega^2}{1 + T_\phi^2 \omega^2}}.$$

Фазовый сдвиг БУ в целом $\gamma_{\text{бу}}$ есть сумма фазовых сдвигов звена задержки γ_3 , звена расчета текущей частоты вращения $\gamma_{\text{рч}}$, звена фильтрации γ_ϕ и ПИД-звена $\gamma_{\text{пид}}$, поэтому он рассчитывался по выражению, град:

$$\gamma_{\text{бу}} = -[\arctg(t_3 \omega) + \arctg(T_\phi \omega) + \arctg \frac{k_3 - k_2 \omega^2}{k_1 \omega}] \frac{180}{\pi}.$$

Электрогидравлическое ИУ, содержащее электромагнит, золотник, силовой поршень и рычажную передачу обратной связи рассчитано по общепринятой методике. Коэффициент усиления ЭРЧВ в целом k_p определен как произведение коэффициентов усиления БУ и ИУ в виде, мм·с:

$$k_p = k_{\text{бу}} k_{\text{иу}} = k_{\text{рч}} k_u \sqrt{\frac{(k_3 - k_2 \omega^2)^2 + (k_1 \omega)^2}{(1 + T_\phi^2 \omega^2) \cdot [(1 - T^2 \omega^2)^2 + (2\delta T \omega)^2]}}.$$

Фазовый сдвиг ЭРЧВ γ_p есть сумма фазовых сдвигов БУ и ИУ: $\gamma_\delta = \gamma_{\text{ао}} + \gamma_{\text{еб}}$. Тогда справедливо соотношение, град:

$$\gamma_p = -[\arctg(t_3 \omega) + \arctg(T_\phi \omega) + \arctg \frac{k_3 - k_2 \omega^2}{k_1 \omega} + \arctg \frac{2\delta T \omega}{1 - T^2 \omega^2}] \frac{180}{\pi}.$$

Так как в замкнутой САРЧ в режиме автоколебаний произведение коэффициентов усиления всех звеньев равно единице, то коэффициент усиления регулятора в этом режиме $k_{\text{ра}}$ определен в следующем виде, мм/с⁻¹:

$$k_{pa} = 1/(k_{дчв} k_m k_{чв} k_{рп}) = 4\pi^2 f I Y_N / (M_N z_v).$$

На Рис. 8 приведены частотные характеристики ЭРЧВ при двух коэффициентах усиления регулятора k_p . На этом же рисунке прямой линией показана зависимость k_{pa} от частоты колебаний f . Точки пересечения зависимостей коэффициента усиления k_p от частоты колебаний f и характеристики $k_{pa} = f(f)$ определяют собственную частоту колебаний САРЧ f_c . Для собственной частоты колебаний f_c по Рис. 8 найден фазовый сдвиг ЭРЧВ γ_p . При известном дополнительном фазовом сдвиге дизеля $\gamma_{зд}$ суммарный фазовый сдвиг САРЧ γ_c рассчитан по выражению, град: $\gamma_c = 90^\circ + \gamma_\delta + \gamma_{сд}$. Если значение γ_c меньше 180° , то система будет устойчивой. По собственной частоте колебаний и времени запаздывания найден заброс частоты вращения при сбросе номинальной нагрузки в виде:

$$\delta_d = \frac{1500 M_N}{\pi I f_c n} + \frac{3000 M_N t_{зд}}{\pi I n_N}.$$

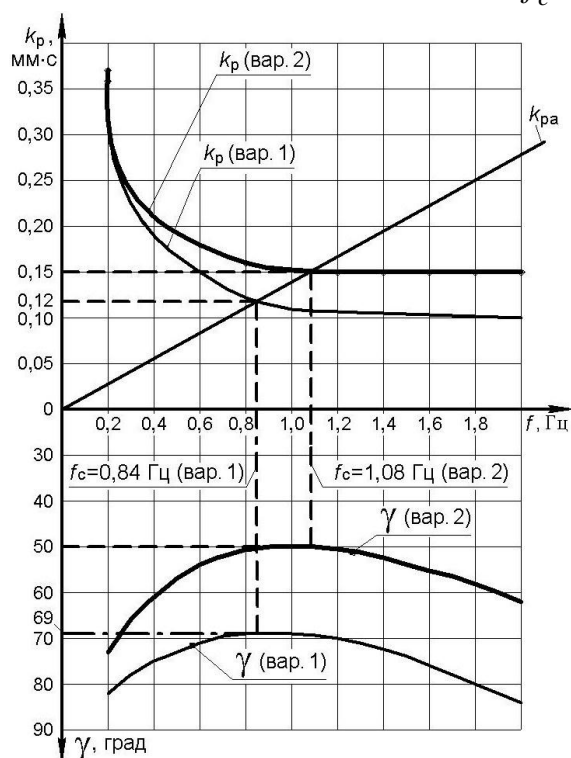


Рис. 8. Частотные характеристики ЭРЧВ: f – частота колебаний; k_p – коэффициент усиления регулятора; k_{pa} – коэффициент усиления регулятора в режиме автоколебаний; γ – фазовый сдвиг регулятора

При расчетах приняты значения коэффициентов ПИД-звена, приведенные в Таблице 3. Полученные частотные характеристики ЭРЧВ – амплитудно-частотная и фазово-частотная (зависимости коэффициента усиления и фазового сдвига от частоты колебаний частоты вращения, Рис. 8) свидетельствуют о том, что реализация характеристик по варианту 2, соответствующих большему коэффициенту усиления пропорциональной составляющей ПИД-звена ($k_1 = 0,05 \text{ В/мин}^{-1}$), позволяет улучшить показатели качества процесса регулирования – уменьшить заброс частоты вращения при сбросе номинальной нагрузки до $\delta_d = 5,5 \%$ и снизить суммарный фазовый сдвиг САРЧ до $\gamma_c = 150$ град., т.е. увеличить ее запас устойчивости.

Таблица 3.

Влияние коэффициентов ПИД-звена (пропорциональный k_1 , дифференциальный k_2 и интегральный k_3) на заброс частоты вращения при сбросе номинальной нагрузки δ_d и частотные показатели (f_c и γ_c)

Варианты характеристик регулятора	Коэффициенты ПИД-закона регулирования			Заброс частоты вращения δ_d , %	Собственная частота колебаний f_c , Гц	Суммарный фазовый сдвиг САРЧ γ_c , град
	k_1 , В/мин ⁻¹	k_2 , В·с/мин ⁻¹	k_3 , В/(с·мин ⁻¹)			
Вариант 1	0,03	0,001	0,15	6,9	0,84	-167
Вариант 2	0,05	0,001	0,15	5,5	1,08	-150

Пятая глава посвящена экспериментальным исследованиям тепловозного дизеля типа Д50 на моторном стенде с целью оценки влияния управления УОВТ на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ при использовании системы типа ЭСУВТ.01. На первом этапе двигатель был укомплектован штатным гидромеханическим регулятором. На втором, третьем и четвертом этапе на двигатель была установлена электронная система управления типа ЭСУВТ.01. Серийная система топливоподачи не предусматривает управление УОВТ, поэтому при ее испытаниях на первом этапе статический УОВТ не изменялся. Он был равен $\theta=24^\circ$ п.к.в. до ВМТ. При испытаниях системы ЭСУВТ.01 на втором этапе УОВТ устанавливались оптимальными по топливной экономичности. На третьем этапе испытаний система ЭСУВТ.01 реализовывала действительные УОВТ (углы начала подъема иглы форсунки), равные полученным при испытаниях серийной системы. На четвертом этапе испытания системы ЭСУВТ.01 проведены с оптимальными УОВТ, реализуемыми на другом участке профиля кулачка ТНВД (повернутом на 6° п.к.в. по ходу вращения коленчатого вала). На всех режимах каждого этапа испытаний производилось осциллографирование процессов сгорания и топливоподачи и получены значения угла начала подъема давления в линии высокого давления топливной системы, УОВТ (соответствующего углу начала подъема иглы форсунки) и его продолжительности. При испытаниях дизеля с системой ЭСУВТ.01 отмечено более равномерное дозирование топлива по всем цилиндрам на всех режимах работы дизель-генератора.

Результаты расчетов удельного эффективного расхода топлива g_e по данным стендовых испытаний дизеля типа Д50 представлены на Рис. 9. Они свидетельствуют о том, что применение системы ЭСУВТ.01 позволило снизить расход топлива на $\Delta g_e=3,5-17\%$ на позициях контроллера от 0 до 3 и на $\Delta g_e=0,9\%$ – на четвертой и пятой позициях контроллера при оптимальных значениях УОВТ по сравнению с серийной ТА. На режимах холостого хода снижение частоты вращения до $n=250$ мин⁻¹ позволяет снизить расход топлива на $\Delta g_e=31,3\%$ по сравнению с серийной системой (при частоте вращения холостого хода $n=300$ мин⁻¹), а при снижении частоты вращения холостого хода до $n=220$ мин⁻¹ – на $\Delta g_e=37,0\%$.

Испытания по определению дымности ОГ проведены с целью оценки ее соответствия требованиям ГОСТ Р 51250-99. При работе дизеля на режимах тепловозной характеристики (Таблица 4) на втором этапе исследований измерялся приведенный коэффициент ослабления светового потока N [%] и рассчитывался натуральный показатель ослабления светового потока K_x . Результаты испытаний (Таблица 5) свидетельствуют о том, что дымность ОГ дизеля находилась в пределах норм ГОСТ Р 51250-99.

При определении показателей токсичности ОГ измерялись объемные концентрации в ОГ оксидов азота C_{NO_x} , монооксида углерода C_{CO} и несгоревших углеводородов C_{CH_x} (в миллионных объемных долях – *ppm*). Концентрации токсичных компонентов ОГ определялись на четырех режимах тепловозной характеристики (Таблица 6). Далее рассчитаны часовые массовые выбросы токсичных компонентов (E_{NO_x} , E_{CO} , E_{CH_x}) и их удельные выбросы, отнесенные к единице вырабатываемой мощности (e_{NO_x} , e_{CO} , e_{CH_x}).

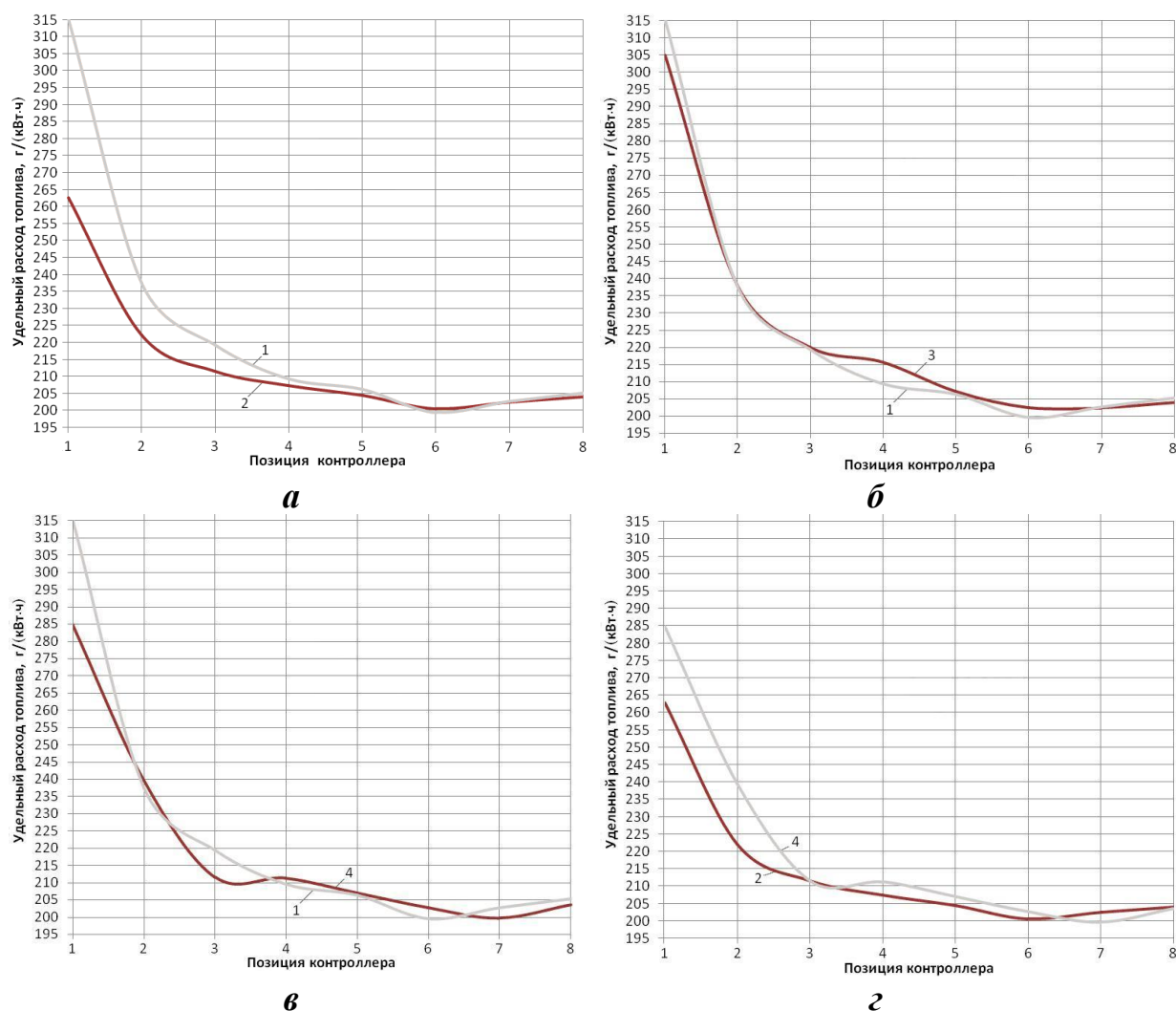


Рис. 9. Зависимость удельного эффективного расхода топлива g_e от позиции контроллера: 1 – штатная ТА; 2 – система ЭСУБТ.01 (оптимальные УОВТ); 3 – система ЭСУБТ.01 (УОВТ соответствуют УОВТ штатной топливной системы); 4 – система ЭСУБТ.01 (другой профиль кулачка)

Полученные показатели токсичности ОГ (Таблица 7) сравнивались с предельно допустимыми нормами ГОСТ Р 51249-99. По выбросам оксидов азота e_{NO_x} и монооксида углерода e_{CO} дизель типа Д50 с системой ЭСУВТ.01 удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51249-99. Удельные выбросы углеводородов e_{CH_x} превышают норму, установленную ГОСТ Р 51249-99. Это вызвано тем, что впрыскивание топлива осуществлялось на неоптимальном участке кулачка кулачкового вала ТНВД.

Таблица 4.

Режимы испытаний дизеля с целью определения дымности ОГ

№ режима	Мощность		Частота вращения, мин ⁻¹
	кВт	%	
1	832,0	100	750
2	724,3	75	650
3	393,38	50	480
4	176,5	25	330
5	55,15	5	300

Таблица 5.

Дымность ОГ дизеля Д50 с системой ЭСУВТ.01

№ режима	Расход топлива кг/с	Расход воздуха, кг/с	Расход ОГ, дм ³ /с	Нормы по ГОСТ Р 51250-99		Результаты расчетов K_x , м ⁻¹	Результаты измерения N , %
				K_x , м ⁻¹	N , %		
1	0,050	1,7	1356,25	0,461	18	0,400	12
2	0,041	1,3	1039,27	0,519	20	0,400	11
3	0,022	0,82	621,55	0,638	24	0,300	10
4	0,010	0,48	379,75	0,829	30	0,470	9
5	0,0041	0,41	336,89	0,897	32	0,400	9

Таблица 6.

Режимы испытаний дизеля при определении показателей токсичности ОГ

№ режима	Мощность		Частота вращения, мин ⁻¹
	кВт	%	
1	882,35	100	750
2	393,38	50	480
3	176,47	25	330
4	55,15	5	300

Таблица 7.

Показатели токсичности ОГ дизеля Д50 с системой ЭСУВТ.01

№ режима	N_e , кВт	n , мин ⁻¹	V_{air} , м ³ /ч	G_t , кг/ч	Концентрация, %			K_i
					C_{NOx}	C_{CO}	C_{CHx}	
1	882,35	750	5078,8	181,9	0,13	0,010	0,045	0,20
2	393,38	480	2330,29	81,39	0,10	0,006	0,035	0,10
3	176,47	330	1434,0	38,3	0,019	0,001	0,010	0,10
4	55,15	300	1284,6	15,00	0,0052	0,003	0,042	0,60

Примечание: V_{air} – расход воздуха; G_t – расход топлива; K_i – доля времени работы дизеля на каждом режиме (его весовой коэффициент)

Таблица 8.

Средневзвешенные выбросы токсичных компонентов ОГ дизеля Д50 с системой ЭСУВТ.01

№ режима	N_{ei} отн	n_i , мин ⁻¹	V_{exhi} , м ³ /ч	$N_{ei} \cdot K_i$	Удельные выбросы вредных веществ, г/(кВт·ч)		
					e_{NOx}	e_{CO}	e_{CHx}
1	1,00	750	4938,8	0,2	10,65	0,58	1,74
2	0,50	480	2267,69	0,05			
3	0,25	330	1404,5	0,025			
4	0,05	300	1273,0	0,03			
Предельные выбросы (ГОСТ Р 51249-99)					12,0	3,0	1,0

Примечание: индексом «i» отмечен i-тый режим испытательного цикла; N_{ei} отн – относительная мощность (отнесенная к ее максимальному значению); V_{exhi} – объемный расход ОГ; ГОСТ Р 51249-99 – для дизелей выпуска с 2000 г.

Оценка динамических свойств системы ЭСУВТ.01 проведена при ее исследованиях в переходных процессах (Рис. 10). Получены следующие результаты: величина заброса частоты вращения дизеля при сбросе 100% нагрузки $\delta_d=1,21\%$; длительность переходного процесса $\tau=3,5$ с. Данные о неустойчивости частоты вращения n на установившихся режимах по позициям контроллера сведены в Таблицу 9.

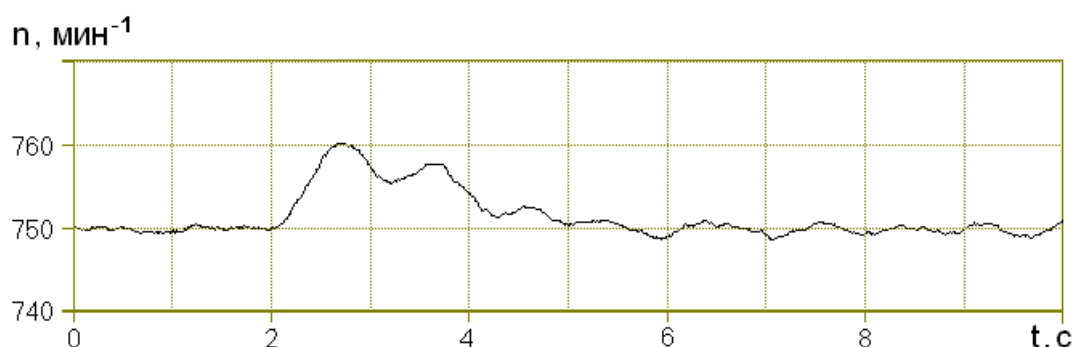


Рис. 10. Вид характеристики переходного процесса сброса 100%-ной нагрузки ($\delta_d=1,21\%$; длительность переходного процесса $\tau=3,5$ с)

Таблица 9.

Нестабильность частоты вращения дизеля на установившихся режимах

Позиция контроллера	Частота вращения, мин ⁻¹	Мощность, кВт	Нестабильность, %
0	300	0	0,52
1	300	55,15	0,52
2	300	113,97	0,48
3	330	176,47	0,31
4	400	268,38	0,39
5	480	393,38	0,23
6	570	558,82	0,26
7	650	724,26	0,17
8	750	882,35	0,26
8	750	0	0,26

Шестая глава посвящена эксплуатационным испытаниям тепловоза с электронной САУ топливоподачей. Испытания проведены по Программе и методике испытаний, разработанной ОАО «ВНИИЖТ» при участии автора диссертации. Испытания проведены от момента оборудования тепловоза ЧМЭЗ системой ЭСУВТ.01 до текущего ремонта ТР-1. Исследованы опытный тепловоз ЧМЭЗ № 4747 с системой ЭСУВТ.01 и тепловозы контрольной группы ЧМЭЗ №№ 2736, 4762, 5254, 5775, 3074 и 5562 со штатными дизелями. Возрастные характеристики этих тепловозов, их дизелей и даты проведения ремонтных работ на момент начала проведения испытаний приведены в Таблице 10, условия их эксплуатации – в Таблице 11. Эти условия исследуемых тепловозов по виду и участкам маневровой работы имели существенные отличия. Для сравнения с опытным тепловозом были выбраны тепловозы ЧМЭЗ №№ 5562 и 5775, работавшие в идентичных условиях эксплуатации с тепловозом ЧМЭЗ №4747 с системой ЭСУВТ.01.

Таблица 10.

Годы выпуска тепловозов опытного и контрольной группы

№ п/п	Тепловоз ЧМЭЗ		Дизель <i>K6S310DR</i>		Дата проведения КР, СР, ТР-3		
	Номер тепло-воза	Год вы-пуска	Номер дизеля	Год вы-пуска	КР	СР	ТР-3
1	4747	1985	1278	1996	09.04.12		
2	2736	1978	2184	1986	24.03.06	30.06.12	
3	3074	1979	29546	1967	25.02.05	14.03.12	
4	4762	1985	352	1982	25.05.12		
5	5254	1986	3328	1980	19.09.11		
6	5562	1986	1490	1987	15.08.08		30.09.11
7	5775	1987	1186	1981	24.08.04	11.05.12	

Примечание: КР, СР и ТР – капитальный, средний ремонт и текущий ремонт

Таблица 11.

Условия работы тепловозов опытного и контрольной группы

Номер тепловоза ЧМЭЗ	Основной вид работы	Участок работы
4747	Маневровая	ст. Саратов-1
2736	Маневровая	ст. Князевка
3074	Вывозная	ст. Трофимовский
4762	Хозяйственное движение	ст. Багаевка
5254	Хозяйственное движение	ст. Карамыш
5562	Маневровая	ст. Саратов-1
5775	Маневровая	ст. Саратов-1

Примечание: указаны станции Приволжского участка железной дороги

В качестве сравниваемого периода для выбранных тепловозов был принят интервал времени с 01.10.2012г. по 01.09.2013 г (установка системы управления типа ЭСУВТ.01 на тепловозе ЧМЭЗ № 4747 проведена 19.07.2012 г.). В постоянную эксплуатацию опытный тепловоз ЧМЭЗ №4747 был введен 25.09.2012 г. Количество плановых технического обслуживания (ТО), текущего ремонта (ТР), а также непланового ремонта (НР), проведенных по каждому тепловозу ЧМЭЗ, по данным АСУТ-ЦТ ОАО «РЖД», за период эксплуатации с 01.10.2012 по 1.09.2013 гг. приведено в Таблице 12. Результаты обработки данных лабораторных анализов моторного масла дизельных двигателей испытываемых тепловозов за период с 01.10.2012 по 01.09.2013 г.г. показали, что при общем количестве проб, равном 25, имелась лишь одна забракованная проба для тепловоза № 5775 (у тепловозов № 4747 и № 5562 забракованных проб не было).

Таблица 12.

Количество плановых ТО, ТР и НР испытываемых тепловозов за период подконтрольной эксплуатации

Виды ТО, ТР и НР	Количество ТО, ТР, НР и рекламаций для тепловозов ЧМЭЗ опытного и контрольной группы						
	4747	2736	4762	5254	5775	3074	5562
ТО-2	53	51	62	59	56	63	55
ТО-3	6	5	6	7	6	6	6
ТР-1	1	1	1	1	1	1	-
ТР-2	-	-	-	-	-	-	1
НР	5	1	1	1	3	-	2
Рекламация	2	-	-	-	-	-	-

Топливная экономичность тепловоза ЧМЭЗ № 4747 с системой ЭСУВТ.01 в условиях реальной эксплуатации оценивалась:

- по результатам реостатных испытаний тепловоза с измерением расхода топлива дизеля на режиме холостого хода;

- по методике оценки эффективности работы маневровых тепловозов с системой управления типа ЭСУВТ.01, утвержденной Поручением ОАО «РЖД» от 13.09.2012 г. № П-ВГ-486;

- по данным лицевого счета из системы централизованной обработки маршрутов машиниста (ЦОММ) опытного и контрольной группы локомотивов за весь период эксплуатации с 01.10.2012 по 01.09.2013 г.г.;

- путем обработки данных о работе и расходе топлива опытным и контрольной группой тепловозов, полученных из материалов аппаратно-программного комплекса «Борт» (АПК «Борт»).

Результаты контрольных реостатных испытаний опытного тепловоза с системой управления типа ЭСУВТ.01 с измерением расхода топлива на режиме холостого хода при различных значениях минимальной частоты вращения коленчатого вала с включенным (числитель) и выключенным (знаменатель) тормозным компрессором приведены в Таблице 13. По данным реостатных испытаний снижение расхода топлива на режиме холостого хода при уменьшении частоты вращения с 350 до 280 мин⁻¹ составило в среднем 2,24 кг/час или 21,79 %.

По данным системы ЦОММ за период с 01.10.2012 по 01.09.2013 г.г. бюджет времени работы опытного тепловоза ЧМЭЗ № 4747 с системой управления типа ЭСУВТ.01 в целом составил 7972 часа, из них 6392,6 часа или 80,2 % времени тепловоз находился в рабочем состоянии. Аналогичные показатели для тепловозов ЧМЭЗ №№ 5562 и 5775 составили:

- 8022,6 часа, из них 7453,1 часа или 92,9 % для тепловоза 5562;
- 8013 часа, из них 7709,8 часа или 96,2 % для тепловоза 5775.

Таблица 13.

Результаты контрольных реостатных испытаний опытного тепловоза с измерением расхода топлива на режиме холостого хода

Частота вращения вала дизеля, мин ⁻¹	Величина расхода дизельного топлива, кг/час			
	27.07.2012	26.10.2012	26.04.2013	18.07.2013
350	<u>9,67</u> -	<u>10,0</u> -	<u>10,5</u> -	<u>10,96</u> 8,86
280	-	<u>8,15</u> -	<u>7,45</u> -	<u>8,53</u> 7,03

Средний удельный расход топлива дизелями тепловозов ЧМЭЗ №№ 4747, 5562 и 5775 с учетом фактического времени нахождения тепловозов в рабочем состоянии и суммарного расхода топлива за период с 01.10.2012 по 01.09.2013 г.г. составил соответственно 10,36 кг/ч, 11,75 кг/ч и 10,85 кг/ч, при среднем удельном расходе по группе тепловозов ЧМЭЗ №№ 5562 и 5775 – 11,29 кг/ч. Экономия топлива тепловозом ЧМЭЗ № 4747 с системой ЭСУВТ.01 по сравнению с группой тепловозов ЧМЭЗ №№ 5562 и 5775 составила 8,24 %. Информация о расходе топлива тепловозом ЧМЭЗ № 4747 с системой ЭСУВТ.01 за период с 06.12.2012 по 19.09.2013 г.г., рассчитанная по методике, утвержденной ОАО «РЖД», приведена в Таблице 14.

Для оценки расхода топлива при работе дизеля на режиме холостого хода при нулевой позиции контроллера по ходу испытаний трижды производилась корректировка часового расхода топлива. Он периодически проверялся при реостатных испытаниях с измерением весовым способом с помощью электронного расходомера при частоте вращения n , равной 350 и 280 мин⁻¹. Экономия топлива за указанный период составила 3971 кг или 11,49 % от фактического расхода топлива в эксплуатации. Обработка посменных данных о времени работы выбранных для сравнения тепловозов за период эксплуатации с 01.10.2012 по 01.09.2013 г.г. по данным из эксплуатационных отчетов АПК «Борт» приведена в Таблице 15. Эти данные свидетельствуют о том, что время работы дизелей на режиме холостого хода с учетом времени выбега/торможения для выбранных к сравнению тепловозов оказалось практически одинаково и равно 52-54 %. Обработка посменных данных о работе и расходе топлива дизелей опытного и контрольной группы тепловозов ЧМЭЗ, полученные из отчетных форм АПК «БОРТ», приведена в Таблице 16. Оценка топливной экономичности тепловозов ЧМЭЗ проведена путем сравнения удельных расходов топлива, отнесенных к трем показателям: 100 км пробега тепловоза, один час работы дизеля и один час работы тепловоза.

Таблица 14.

Удельный расход топлива тепловозом ЧМЭЗ № 4747
с системой ЭСУВТ.01

Оцениваемый период	Расход топлива, кг/100 лок.-км	Экономия топлива	
		Кг	%
06.12.2012-18.04.2013	545,74	1430,6	9,37
09.05.2013-25.07.2013	432,75	1651,2	14,12
25.07.2013-19.09.2013	478,76	889,2	11,69
06.12.2012-19.09.2013	488,83	3971,0	11,49

Таблица 15.

Распределение режимов работы дизелей тепловозов

№ п/п	Наименование параметров	Значения параметров по тепловозам		
		4747	5562	5775
Комплектация топливной системы		ЭСУВТ.01	Штатная	Штатная
1	Баланс времени по тепловозу, %			
1.1	Время в движении	26,58	23,21	22,75
1.2	Время стоянки	73,42	76,79	77,25
2.	Баланс времени по дизелю, %			
2.1	Время в тяге	19,06	15,23	14,70
2.2	Время холостого хода	51,96	54,20	54,14
2.3	Время выбег/торможения	11,54	10,49	10,60
2.4	Время прогрева	1,23	0,68	0,75
2.5	Время с заглушенным дизелем	16,21	19,40	19,81

Анализ полученных данных показал, что сравниваемые тепловозы при одинаковом виде и участке работы имели значительные различия по средней технической скорости (более 20 %) и средней мощности тягового генератора (от 3,7 до 5 раз) по отношению к опытному тепловозу с системой ЭСУВТ.01. Кроме того, имелись значительные расхождения по времени работы тепловоза по данным АПК «БОРТ» и ЦОММ, что обусловлено особенностями работы системы «Борт» на локомотиве при выключенной аккумуляторной батарее и ее техническим состоянием. Учитывая, что при сравнении топливной экономичности на единицу пробега локомотива невозможно учесть расход топлива дизелем при стоянке тепловоза, оценка топливной экономичности выполнена за 1 час работы. Это аналогично оценке, выполняемой по методике ОАО «РЖД», и обработке маршрутов машиниста ЦОММ.

Таблица 16.

Посменные данные о работе и расходе топлива опытным и контрольной группой тепловозов ЧМЭЗ

№ п/п	Наименование параметров	Значения параметров по тепловозам		
		4747	5562	5775
Комплектация топливной системы		ЭСУВТ.01	Штатная	Штатная
1.	Загрузка тепловоза и дизеля в эксплуатации			
1.1	Общий пробег тепловозов, км	11 422	14 866	14 473
1.2	Среднемесячный пробег тепловозов, лок-км/месс	1 038,4	1 351,5	1 315,7
1.3	Общее время работы тепловоза, ч: м: с	5051:33:00	6087:18:00	5926:32:00
1.4	Время с работающим дизелем, ч: м: с	4232:43:33	4906:34:42	4752:43:45
1.5	Общий расход топлива, кг	54 911	71 221	68 431
1.6	Работа общая, кВт·ч	31 392	111 278	141 189
1.7	Средняя техническая скорость тепловоза, км/ч	8,5	10,52	10,74
1.8	Средняя мощность тягового генератора, кВт	32,61	119,98	162,09
1.9	Удельный расход топлива, кг/100 лок.-км	481	479	473
	Среднее квадратическое отклонение, кг/100 лок.-км	47,92	81,35	66,58
1.10	Удельный расход топлива дизелем, кг/ч	12,97	14,52	14,40
	Среднее квадратическое отклонение, кг/ч	0,98	1,62	0,70
1.11	Удельный расход топлива тепловозом, кг/ч	10,87	11,70	11,55

Экономия топлива дизелем тепловоза ЧМЭЗ №4747 с системой ЭСУВТ.01 составила: 1,55 кг/ч (10,67 %) по сравнению с ЧМЭЗ № 5562; 1,43 кг/ч (9,93 %) по сравнению с ЧМЭЗ № 5775; 1,46 кг/ч (10,31 %) по сравнению с тепловозами ЧМЭЗ №№ 5562 и 5775. Оценка эффективности работы тепловоза ЧМЭЗ № 4747 с системой ЭСУВТ.01 различными методами за период с 01.10.2012 по 01.09.2013 г.г. такова: по методике ОАО «РЖД» экономия дизельного топлива составила 11,49%, по данным системы ЦОММ – 8,24%, по данным АПК «БОРТ» – 10,31%.

В целом, проведенные испытания тепловоза ЧМЭЗ № 4747 с системой ЭСУВТ.01 подтвердили работоспособность этой системы и эффективность ее использования в отечественных тепловозных дизелях.

В седьмой главе представлена методика оценки эффективности использования системы электронного управления топливоподачей с определением эксплуатационного расхода топлива, базирующейся на определении эксплуатационных затрат при распределении режимов работы, характерном для дизелей маневровых тепловозов. Расчет эффективности использования электронной САРЧ проведен применительно к тепловозному дизель-генератору 1-ПДГ4 с дизелем 6 ЧН 31,8/33. Разработанная методика основана на подсчете избыточной работы цикла (циклом считается период работы всех цилиндров дизеля), вызванной неравномерностью частоты вращения вала дизеля, и дополнительного расхода топлива, обусловленного избыточной работой цикла. Рассмотрены следующие режимы работы: минимальный скоростной режим с частотой вращения $n=300 \text{ мин}^{-1}$, частичный скоростной режим с $n=400 \text{ мин}^{-1}$ и номинальный скоростной режим с $n=750 \text{ мин}^{-1}$. Для режима с $n=300 \text{ мин}^{-1}$ дизеля с гидромеханическим регулятором относительная неравномерность частоты вращения дизеля равна $\delta_n=0,0333$ (нестабильность частоты вращения $\Delta n=10 \text{ мин}^{-1}$), а с электронным регулятором – $\delta_n=0,0167$ ($\Delta n=5 \text{ мин}^{-1}$). Для режима работы с $n=400 \text{ мин}^{-1}$ дизеля с гидромеханическим регулятором – $\delta_n=0,02$ ($\Delta n=8 \text{ мин}^{-1}$), а с ЭРЧВ – $\delta_n=0,0075$ ($\Delta n=3 \text{ мин}^{-1}$). Для режима работы с $n=750 \text{ мин}^{-1}$ дизеля с гидромеханическим регулятором – $\delta_n=0,0067$ ($\Delta n=5 \text{ мин}^{-1}$), а с электронным регулятором – $\delta_n=0,0027$ ($\Delta n=2 \text{ мин}^{-1}$). На основе анализа реальных распределений режимов работы дизелей маневровых тепловозов принято, что продолжительность работы дизеля на режиме холостого хода при $n=300 \text{ мин}^{-1}$ равна 60 % или $T=3000 \text{ ч/год}$, на режиме с $n=750 \text{ мин}^{-1}$ – 1 % или $T=50 \text{ ч/год}$, а на частичном режиме с $n=400 \text{ мин}^{-1}$ – 39% или $T=1950 \text{ ч/год}$. При принятом распределении режимов работы дизеля маневрового тепловоза, и установке ЭРЧВ общий годовой экономический эффект составил 84089 руб. на один тепловоз при цене 1 тонны дизельного топлива – 15000 руб/т (цена 2010 г.).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования показали, что путем создания и совершенствования систем электронного управления топливоподачей тепловозных дизелей возможно значительное улучшение их эксплуатационно-технических показателей – показателей их топливной экономичности и токсичности ОГ, статических и динамических характеристик двигателей. Полученные при исследованиях результаты сводятся к следующим основным выводам и рекомендациям:

1. Разработаны системы электронного управления топливоподачей с импульсными электрогидравлическими клапанами, обеспечивающие реализацию требуемых законов подачи топлива и оптимизированных характеристик угла опережения впрыскивания топлива в дизелях транспортного назначения. В соответствии с принятой схемой изготовлены опытные секции ТНВД с системой управления типа ЭСУВТ.01 с электроуправляемыми клапанами для тепловозного дизеля типа Д50.

2. Основными факторами улучшения показателей топливной экономичности, токсичности ОГ, статических и динамических характеристик дизеля типа Д50 при его оснащении системой управления типа ЭСУВТ.01 с электроуправляемыми клапанами являются повышение статической и динамической точности регулирования частоты вращения, возможность регулирования угла опережения впрыскивания топлива в функции частоты вращения коленчатого вала и уменьшение минимальной устойчивой частоты вращения холостого хода с $n=300 \text{ мин}^{-1}$ до $n=220...250 \text{ мин}^{-1}$.

3. Для проведения расчетных исследований процесса топливоподачи дизеля типа Д50 со штатной и опытной системами топливоподачи разработана уточненная методика расчета, основанная на использовании ПК ВПРЫСК и позволяющая оценить особенности этого процесса в дизелях, оснащенных системами электронного управления топливоподачей.

4. Проведенные с использованием ПК ВПРЫСК расчетные исследования дизеля типа Д50 со штатной и опытной системами топливоподачи на номинальном режиме при частоте вращения кулачкового вала ТНВД $n_{\text{тн}}=375 \text{ мин}^{-1}$ и цикловой подаче топлива $g_{\text{ц}}=1,54 \text{ г}$ показали, что использование системы ЭСУВТ.01 позволяет целенаправленно изменять закон подачи топлива и значительно повысить давление впрыскивания, а, следовательно, и качество распыливания топлива. При замене штатной системы на опытную максимальное давление впрыскивания возросло от 92,5 до 116,4 МПа, средний диаметр капель по Заутеру уменьшился с 25,9 до 23,2 мкм, были исключены подвпрыскивания топлива.

5. При моделировании рабочего процесса дизеля типа Д50 с использованием ПК ДИЗЕЛЬ-РК в качестве исследуемого фактора принято изменение закона подачи топлива и характеристики давления впрыскивания при переходе от штатной к опытной системе топливоподачи. Показано, что

установка опытной системы типа ЭСУВТ.01 улучшает показатели распыливания топлива и смесеобразования – продолжительность топливоподачи сократилась с 31,2 до 29,9 град. поворота коленчатого вала, максимальное давление впрыскивания возросло от 924,8 до 1163,7 бара, средний диаметр капель по Заутеру уменьшился с 25,89 до 23,23 мкм.

6. Результаты расчета рабочего процесса дизеля типа Д50 на номинальном режиме показали, что мощностные показатели дизеля со штатной и опытной системами топливоподачи оказались примерно одинаковыми – его эффективная мощность N_e была равна соответственно 880,2 и 882,4 кВт. При этом эффективные показатели дизеля с опытной системой топливоподачи, улучшились по сравнению со штатной системой – удельный эффективный расход топлива g_e снизился с 205,1 до 203,9 г/(кВт·ч), а эффективный КПД дизеля η_e возрос с 0,413 до 0,415.

7. Полученные расчетные данные подтверждают возможность улучшения показателей дизеля Д50 при установке опытной системы типа ЭСУВТ.01 за счет трансформации закона подачи топлива и увеличения давления впрыскивания. Однако улучшение показателей топливной экономичности, дымности и токсичности ОГ, обусловленное этими факторами, не очень значительное. Более значимым фактором является возможность реализации оптимизированных законов управления УОВТ.

8. Разработана методика расчета ограничительной характеристики тепловозного дизель-генератора – внешней скоростной характеристики, базирующаяся на определении требуемой цикловой подачи топлива на каждой позиции контроллера в переходном процессе при переводе позиции контроллера с низшей на высшую с обеспечением требуемого качества переходного процесса. Эта методика позволяет определить зависимость индикаторной мощности от коэффициента избытка воздуха, индикаторного КПД и цикловой подачи топлива, а также величины цикловой подачи топлива, коэффициента избытка воздуха и индикаторного КПД, при которых индикаторная мощность достигает максимума.

9. Разработана методика оценки динамических свойств системы электронного управления топливоподачей, базирующаяся на построении амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик ЭРЧВ и определении собственной частоты колебаний частоты вращения дизеля, суммарного фазового сдвига и заброса частоты вращения при сбросе номинальной нагрузки. Полученные частотные характеристики свидетельствуют о том, что реализация электронного регулирования частоты вращения с коэффициентами ПИД-закона регулирования $k_1=0,05$ В/мин⁻¹, $k_2=0,001$ В·с/мин⁻¹ и $k_3=0,15$ В/(с·мин⁻¹), имеющего больший коэффициент усиления пропорциональной составляющей ($k_1=0,05$ В/мин⁻¹ против $k_1=0,03$ В/мин⁻¹), позволила улучшить показатели качества регулирования – уменьшить заброс частоты вращения при сбросе номинальной нагрузки до $\delta_d=5,5$ % и снизить суммарный фазовый сдвиг САРЧ до $\gamma_c=150$ град., т.е. увеличить ее запас устойчивости.

10. Проведенные испытания дизеля типа Д50 на моторном стенде показали, что применение системы ЭСУВТ.01 позволило снизить удельный эффективный расход топлива на 3,5-17% на позициях контроллера от 0 до 3 и на 0,9% – на четвертой и пятой позициях контроллера при оптимальных значениях УОВТ по сравнению с серийной системой. На режимах холостого хода снижение частоты вращения до $n=250$ мин⁻¹ позволило уменьшить удельный эффективный расход топлива на 31,3% по сравнению с серийной системой топливоподачи (при частоте вращения холостого хода $n=300$ мин⁻¹), а при ее снижении до $n=220$ мин⁻¹ – на 37,0%.

11. Показано, что дымность ОГ дизеля типа Д50 с системой типа ЭСУВТ.01 находилась в пределах норм соответствует требованиям ГОСТ Р 51250-99. По выбросам оксидов азота e_{NOx} и монооксида углерода e_{CO} дизель удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51249-99. Выбросы углеводородов e_{CHx} превышают норму, установленную ГОСТ Р 51249-99, что объясняется впрыскиванием топлива на неоптимальном участке кулачка кулачкового вала ТНВД. Для снижения выбросов углеводородов e_{CHx} необходима оптимизация участка впрыскивания кулачка.

12. При динамических испытаниях дизеля Д50 с системой ЭСУВТ.01 получены следующие показатели регулирования: величина заброса частоты вращения при сбросе 100% нагрузки составила $\delta_d=1,21\%$, длительность переходного процесса наброса нагрузки $\tau=3,5$ с.

13. При установке опытной системы топливоподачи дымность ОГ K_x (показатель ослабления светового потока) дизеля типа Д50, работающего на номинальном режиме, уменьшилась с 0,460 до 0,435 м⁻¹ (приведенный коэффициент ослабления светового потока снизился при этом с 18 до 17% по шкале Хартриджа). При замене штатной системы топливоподачи на опытную концентрация отмечен небольшой рост концентрации оксидов азота в ОГ C_{NOx} с 1301 до 1322 ppm и увеличение удельного массового выброса оксидов азота e_{NOx} возрос с 15,42 до 15,63 г/(кВт·ч). Однако рост эмиссии оксидов азота компенсируется путем оптимизации УОВТ.

14. Эксплуатационные испытания тепловоза ЧМЭЗ № 4747 с системой управления типа ЭСУВТ.01 в интервале наработки до ТР-1 подтвердили возможность выполнять заданные функции по автоматическому регулированию частоты вращения и топливоподачи. Изменение УОВТ осуществляется разработанной системой управления в функции частоты вращения коленчатого вала двигателя, а также корректируется по температуре охлаждающей жидкости в системе охлаждения.

15. При контрольных реостатных испытаниях тепловоза ЧМЭЗ № 4747 с системой управления типа ЭСУВТ.01 за счет снижения минимальной частоты вращения холостого хода с 350 до 280 мин⁻¹ уменьшение часового расхода топлива составило в среднем 21,8 %. Применение разработанной системы не привело к увеличению браковок и неплановых смен моторного масла и охлаждающей жидкости, а также к росту расхода масла на «угар».

16. Улучшение топливной экономичности тепловоза ЧМЭЗ №4747 с

опытной системой топливоподачи типа ЭСУВТ.01 по сравнению с тепловозами ЧМЭЗ №№ 5775 и 5562 со штатной системой при идентичных условиях эксплуатации и различных подходах и методах ее оценки составило от 8,24 до 11,49 % (по методике ОАО «РЖД» 11,49 %; по данным АПК «БОРТ» - 10,31 %; по данным ЦОММ – 8,24 %).

17. Разработана методика оценки эффективности системы электронного управления топливоподачей в дизеле, базирующаяся на определении эксплуатационных затрат при распределении режимов работы, характерном для дизелей маневровых тепловозов. При принятом распределении режимов работы и установке системы ЭРЧВ общий годовой экономический эффект составил 84089 руб. на один тепловоз.

Основные положения диссертации опубликованы следующих работах:

1. Коссов Е.Е., Шапран Е.Н., Фурман В.В. Совершенствование режимов работы силовых энергетических систем тепловозов: Монография. Луганск: Изд-во Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, 2006. 280 с. (18,00 п.л. / 6,00 п.л.)

2. Марков В.А., Фурман В.В., Полухин Е.Е. Улучшение показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов путем совершенствования системы автоматического регулирования частоты вращения // Грузовик &. 2005. № 11. С. 25-30. № 12. С. 19-24 (1,00 п.л. / 0,40 п.л.).

3. Марков В.А., Шленов М.И., Фурман В.В. Оценка расхода топлива и токсичности отработавших газов дизеля на различных режимах // Грузовик. 2006. № 2. С. 40-49 (0,70 п.л. / 0,25 п.л.).

4. Система управления для дизельного двигателя / В.В. Фурман [и др.] // Грузовик. 2011. № 12. С. 36-47 (1,00 п.л. / 0,40 п.л.).

5. Марков В.А., Фурман В.В., Миронов В.А. Экспериментальные исследования электронной системы управления топливоподачей тепловозного дизеля // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 1. С. 38-48 (0,90 п.л. / 0,30 п.л.).

6. Системы электронного управления топливоподачей газовых и газодизельных двигателей / В.В. Фурман [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. 2012. № 4. С. 14-18 (0,45 п.л. / 0,15 п.л.).

7. Экспериментальные исследования газодизельного двигателя трактора К-700А / В.В. Фурман [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 10. С. 7-9 (0,35 п.л. / 0,10 п.л.).

8. Расчетные исследования электронной системы управления топливоподачей дизеля / В.В. Фурман [и др.] // Грузовик. 2012. № 11. С. 21-27 (0,5 п.л. / 0,15 п.л.).

9. Системы топливоподачи для газодизельных и газовых двигателей / В.В. Фурман [и др.] // Грузовик. 2013. № 4. С. 38-45 (0,70 п.л. / 0,25 п.л.).

10. Марков В.А., Фурман В.В., Акимов В.С. Система топливоподачи с электронным управлением тепловозного дизеля // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 7. С. 60-65 (0,5 п.л. / 0,15 п.л.).

11. Марков В.А., Фурман В.В., Иванов В.А. Исследование системы автоматического регулирования частоты вращения тепловозного дизеля // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 8. С. 54-63 (0,80 п.л. / 0,30 п.л.).
12. Марков В.А., Фурман В.В., Иванов В.А. Оценка эффективности системы автоматического регулирования частоты вращения тепловозного дизеля // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 11. С. 52-57 (0,35 п.л. / 0,10 п.л.).
13. Игин В.Н., Марков В.А., Фурман В.В. Эксплуатационные испытания тепловоза с электронной системой управления топливоподачей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 4. С. 25-37 (1,1 п.л. / 0,30 п.л.).
14. Марков В.А., Девянин С.Н., Фурман В.В. Комплексная система автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала дизеля и температуры охлаждающей жидкости // Грузовик. 2014. № 7. С. 2-10 (0,75 п.л. / 0,25 п.л.).
15. Фурман В.В. Система топливоподачи с электронным управлением для дизеля // Грузовик. 2014. № 9. С. 10-14 (0,35 п.л. / 0,35 п.л.).
16. Использование альтернативных моторных топлив в дизельных двигателях / В.В. Фурман [и др.] // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. 2014. № 9. С. 3-10 (0,65 п.л. / 0,20 п.л.).
17. Фурман В.В. Метод расчета ограничительной характеристики топливоподачи тепловозного дизель-генератора // Грузовик. 2014. № 12. С. 16-18 (0,35 п.л. / 0,35 п.л.).
18. Электронный регулятор дизеля тепловоза ЧМЭЗ / В.В. Фурман [и др.] // Локомотив. 2002. № 3. С. 22-25 (0,30 п.л. / 0,15 п.л.).
19. Электронный регулятор для дизель-генератора магистрального тепловоза / В.В. Фурман [и др.] // Локомотив. 2004. № 6. С. 12-16. № 7. С. 22-25 (0,5 п.л. / 0,10 п.л.).
20. Показатели дизеля на неустановившихся режимах [Текст] / В.В. Фурман [и др.] // Сборник научных трудов по проблемам двигателестроения, посвященный 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. С. 68-74 (0,5 п.л. / 0,15 п.л.).
21. Электронный регулятор дизеля для маневрового тепловоза ЧМЭЗ / В.В. Фурман [и др.] // Локомотив. 2010. № 7. С. 23-25. № 8. С. 15-17. № 9. С. 26-29 (0,35 п.л. / 0,15 п.л.).
22. Электронное управление подачей топлива / В.В. Фурман [и др.] // Локомотив. 2011. № 7. С. 29-31 (0,20 п.л. / 0,10 п.л.).
23. Электронный регулятор дизеля на тепловозе ЧМЭЗ / В.В. Фурман [и др.] // Локомотив. 2012. № 1. С. 18-20. № 2. С. 19-21 (0,20 п.л. / 0,10 п.л.).
24. Фурман В.В., Иванов В.А., Марков В.А. Системы электронного управления для дизельных двигателей // Наука и образование. Инженерный журнал. 2013. Вып. 5. С. 1-18. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/cryogen/723.html> (1,50 п.л. / 1,00 п.л.).