

На правах рукописи

Кузнецов Александр Гаврилович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЕЙ  
НА ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

*А.Кузнецов*

Москва - 2010 г.

2

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Голубков Леонид Николаевич

доктор технических наук, профессор  
Гусаков Сергей Валентинович

технических наук, профессор  
вич

Ведущее предприятие

Кузнецов А.Г.  
Разработка методов и  
средств повышения  
эффективности работы  
дизелей на плавании

У1942311

ответственность  
предприятие  
ка»

У 1942311

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ  
обозначенного здесь срока

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

30 ч.  
том  
су:  
орпус,

е печат-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



312  
1942311  
Кузнецов А.Г. Разработка

Р.З.

1881

алл ули

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность диссертационной работы.** Создание современных комбинированных (с турбонаддувом) поршневых двигателей внутреннего сгорания осуществляется в условиях жёстко регламентированных технических требований на показатели и характеристики двигателей, что обусловлено экологическими и экономическими проблемами.

Характерными вариантами применения комбинированных дизелей, имеющими существенные отличия по условиям эксплуатации, являются работа в качестве источника энергии транспортных установок и использование в виде привода стационарных генераторов переменного тока.

К двигателям транспортных установок предъявляются наиболее строгие требования по соблюдению норм по экологическим и экономическим показателям. Одним из наиболее сложных типов транспортных средств является энергетическая установка тепловоза, в которой режимы дизеля в значительной степени зависят от функционирования элементов развитой трансмиссии. Основная проблема, возникающая при разработке стационарных дизель-генераторов и их систем, заключается в обеспечении жёстких требований по динамическим показателям качества переходных процессов при изменении нагрузки.

Одним из основных направлений обеспечения высоких требований по экологии, экономичности и динамическим показателям двигателей транспортных установок является совершенствование систем автоматического управления (САУ), которое идёт по пути использования в структуре регуляторов электронных микропроцессорных устройств (контроллеров). С применением контроллеров системы управления двигателями выходят на новый, качественно более высокий уровень, на котором целью управления становится не просто стабилизация регулируемых параметров рабочего процесса а комплексная автоматизация и оптимизация работы двигателя и энергетической установки в целом.

Оптимизация работы двигателя осуществляется как на установившихся, так и на неуставившихся режимах (в процессах управления и регулирования). Оптимизация процессов управления характерна для двигателей транспортных установок, в том числе – тепловозных. Повышение качества процессов регулирования важно для дизель-генераторов, функционирующих в условиях стационарных источников переменного тока.

Экспериментальное и теоретическое исследование неуставившихся режимов комбинированных дизелей является сложной задачей, реализация которой связана со специальной методикой проведения испытаний, составлением математических динамических моделей и разработкой систем управления. Комплекс проблем, связанных с исследованием неуставившихся режимов дизелей, в настоящее время в полной мере не решён. В связи с этим в данной работе предложены новые подходы к исследованию и разработке систем дизелей, направленные на повышение эффективности их работы на динамических режимах и основанные на расчётно-экспериментальном методе.

И Г Т У  
ИМ. В. Ф. БАУМАНА  
БИБЛИОТЕКА

В современных условиях жёсткой конкуренции двигателестроительных предприятий сократились сроки выпуска новых образцов двигателей. Поэтому разработка системы управления проводится одновременно с созданием самого двигателя методами комбинированного расчётно-экспериментального исследования и проектирования. Разработка элементов САУ, таких как электронный блок, датчики, исполнительные устройства опережает создание двигателя. В этом случае целесообразно продолжать разработку и отладку системы управления методом полунатурного моделирования, сопрягая натурные устройства автоматики с динамической моделью двигателя, которая имитирует его функционирование в реальном времени. Полунатурное моделирование позволяет сократить сроки разработки двигателя и его систем, а также снизить стоимость процесса разработки и испытаний системы управления двигателем.

**Цель работы:** разработка методов и средств расчётно-экспериментального исследования комбинированных дизелей с использованием полунатурного моделирования, направленных на повышения эффективности работы дизелей на динамических режимах.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- по результатам экспериментального исследования отсека дизеля с имитацией неустановившихся режимов проведён анализ особенностей работы дизеля в условиях переходных процессов, дано обоснование метода разработки динамической математической модели дизеля и проведено расчётное исследование путей повышения качества процессов регулирования дизель-генератора;
- предложена методика составления математической модели комбинированного дизеля и разработаны динамические модели дизеля и энергетической установки тепловоза, обеспечивающие полунатурное моделирование режимов работы с требуемой точностью в реальном времени;
- предложена структура стенда полунатурного моделирования режимов работы энергетической установки с комбинированным дизелем в реальном времени и разработаны технические средства стенда, алгоритмическое и программное обеспечение компьютерной части и устройства сопряжения стенда;
- в результате полунатурного моделирования переходных процессов комбинированного дизеля и энергетической установки тепловоза получены результаты влияния настроек элементов САУ на показатели качества процессов управления движением тепловоза и разработаны предложения по повышению эффективности работы дизеля в составе энергетической установки тепловоза.

**Объекты исследования:** комбинированный дизель, дизель-генератор переменного тока, энергетическая установка тепловоза и САУ тепловозом; разработанные методики составления математических моделей использованы при создании динамических моделей дизеля 16ЧН26/26 дизель-генератора 7-9 ДГ и энергетической установки тепловоза 2ТЭ116,

предназначенных для расчётного исследования и полунатурного моделирования в реальном времени.

**Методы исследования:**

- метод анализа информационных источников;
- метод анализа теории рабочих процессов комбинированных дизелей, теории электрических машин, теории автоматического управления и регулирования;
- метод экспериментального и расчётного исследования установившихся и неуставившихся режимов комбинированного дизеля;
- метод полунатурного моделирования переходных процессов комбинированного дизеля в составе энергетической установки.

**Достоверность научных положений** подтверждена соответствием результатов расчётного исследования и полунатурного моделирования в реальном времени установившихся и динамических режимов комбинированного дизеля и экспериментальных данных для сходственных режимов работы, полученных в условиях реальной эксплуатации энергетических установок.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- анализ особенностей работы комбинированного дизеля на неуставившихся режимах по результатам экспериментального исследования с имитацией условий работы дизеля в динамике;
- методика составления математической динамической модели комбинированного дизеля для полунатурного моделирования в реальном времени и разработанная математическая динамическая модель тепловозного дизеля;
- методика составления математической динамической модели энергетической установки, имитирующая динамические режимы работы в реальном времени, и разработанная математическая динамическая модель энергетической установки тепловоза;
- методы разработки стенда полунатурного моделирования динамических режимов технических устройств в реальном времени;
- методы повышения эффективности работы комбинированного дизеля в составе дизель-генератора и энергетической установки тепловоза.

**Практическая ценность результатов.** Результаты экспериментального и расчётного исследования особенностей работы комбинированного дизеля на неуставившихся режимах могут быть использованы для выбора параметров дизеля и системы приёмистости для повышения качества процессов регулирования частоты вращения вала дизель-генераторов переменного тока. Разработанные математические динамические модели комбинированного дизеля и энергетической установки тепловоза и методы и средства полунатурного моделирования позволяют ускорить и удешевить процесс разработки, отладки и настройки элементов САУ, а также заменить дорогостоящие экспериментальные испытания на полунатурные.

**Область применения результатов.** Методы интенсификации переходных процессов дизель-генераторов, разработанные динамические модели комбинированного дизеля и энергетической установки тепловоза,

стенд полунатурного моделирования могут использоваться на предприятиях, занимающихся проектированием и производством дизелей, элементов САУ тепловозов, а также других типов транспортных средств и технических устройств широкого промышленного назначения.

**Апробация и внедрение результатов.** По результатам диссертации сделаны доклады: на Всероссийском научно-техническом семинаре по управлению энергетическими установками в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007, 2008 и 2009 г.; на научно-технической конференции «3-и Луканинские чтения, решение энергэкологических проблем в автотранспортном комплексе» в МАДИ (ГТУ) в 2007 г.; на межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития поршневых ДВС» в СПбГМТУ в 2008.

Результаты диссертации внедрены в ООО «ППП Дизельавтоматика» и ЗАО «НЗТА».

**Публикации.** По результатам диссертации опубликовано 17 научных статей, из них 14 – в журналах, рекомендованных ВАК для докторских диссертаций по данному направлению.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложения. Общий объём работы 281 страница, включая 105 рисунков, 7 таблиц. Список литературы содержит 176 наименований на 16 страницах. Приложение на 2 страницах содержит документы о внедрении результатов работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены требования, предъявляемые к двигателям в современных условиях, приведено обоснование актуальности разработки методов и средств исследования и проектирования дизелей и их систем управления, направленных на повышение эффективности работы дизелей на динамических режимах. Дана общая характеристика диссертационной работы.

В главе 1 дан анализ методов расчётного исследования динамических режимов при разработке дизелей и их систем, поставлены цель и задачи диссертации. Моделирование динамических режимов необходимо, прежде всего, при создании систем управления двигателями и энергетическими установками в целом.

Фундаментальные основы теории регулирования тепловых двигателей были заложены в трудах Д.К. Максвелла, И.А., Вышнеградского, А.М. Ляпунова, А. Стодолы, М. Толе и других учёных. Большой вклад в развитие теории автоматического управления и регулирования двигателей и разработку методов моделирования динамических режимов систем управления внесли М.А. Айзерман, З.Ш. Блох, А.М. Кац, М.И. Левин, В.И. Крутов, В.И. Толшин и др.

Для сравнительного анализа существующих динамических моделей дизелей целесообразно пользоваться следующими оценочными критериями: точностью, временем расчёта, трудоёмкостью получения модели.

При моделировании используется различная степень детализации описания системы управления по составу. Система управления, включающая дизель, может рассматриваться в целом или в виде укрупнённых каналов прохождения сигналов. Но в большинстве случаев комбинированный дизель представляется как совокупность взаимосвязанных элементов: поршневой части, турбокомпрессора, впускного и выпускного трубопроводов, охладителя надвучного воздуха, топливной аппаратуры, различных дополнительных устройств. Каждый из перечисленных элементов описывается математической моделью в виде дифференциальных и алгебраических уравнений или передаточных функций.

Для описания динамических процессов в элементах комбинированного дизеля, обычно, используются уравнения динамического баланса потоков механической и тепловой энергии и массы воздуха и газов. Значения параметров, входящих в дифференциальные уравнения, могут определяться на каждом цикле двигателя методами теории рабочих процессов с использованием компьютерных программ. Такой подход характеризуется наивысшей точностью, но требует значительного времени расчёта. Другой подход состоит в чисто математической идентификации элементов комбинированного дизеля или всей системы управления в целом типовыми звеньями, используемыми в теории автоматического управления.

Наибольшее распространение при разработке дизелей и их систем управления получили комбинированные подходы к созданию моделей, сочетающие использование физических соотношений с удобными математическими методами формирования функциональных зависимостей между параметрами рабочего процесса дизеля. При определении основных параметров дизеля не рассматриваются отдельные циклы в цилиндре двигателя, а используются интегральные характеристики рабочего процесса – индикаторные или эффективные показатели. В полученных таким образом моделях достигается требуемый на конкретном этапе проектирования системы компромисс по точности, времени расчёта и затратам на их составление.

Важной особенностью моделирования динамических режимов САУ транспортных установок является то, что двигатель работает в составе энергетической установки, назначение которой и определяет характерные режимы работы двигателя. В связи с этим, для имитации реальных режимов необходимо включать динамическую модель дизеля в модель транспортной установки в целом.

Для осуществления ускоренного проектирования и доводки двигателей и систем управления ими возникла задача создания и внедрения в практику методов полунатурного моделирования, которое позволяет разрабатывать и отлаживать на реальные режимы работы двигателей натурные средства САУ одновременно с созданием самого двигателя. Полунатурное моделирование даёт возможность также экономить средства, затрачиваемые на испытания двигателей. При полунатурном моделировании реальный микропроцессорный блок управления и, при необходимости, дру-

гие элементы (датчики, исполнительные устройства) САУ сопрягаются с математической (компьютерной) моделью создаваемого или испытываемого двигателя.

Для проведения цифрового полунатурного моделирования необходимо разработать комплекс аппаратных и программных средств, образующих стенд полунатурного моделирования. В натурную часть стенда входят микропроцессорный контроллер, управляющее устройство, датчики и исполнительные устройства САУ дизеля. Цифровая компьютерная модель описывает динамические свойства комбинированного двигателя и транспортной установки.

Основной особенностью работы стенда полунатурного моделирования является обмен информацией между натурной и модельной частями стенда в реальном времени. Для моделирования переходных процессов САУ в реальном времени необходимо согласование в фиксированные моменты времени натурной и модельной частей стенда. Периодичность обмена задаётся контроллером и составляет, обычно, интервал времени порядка миллисекунд. Проблема обеспечения обмена информацией между натурной и модельной частями стенда в реальном времени становится одной из основных и по сути определяет вид модели. За интервал времени между последовательными обменами информацией в модели должны быть определены все необходимые изменения параметров рабочего процесса энергетической установки.

Проведённый анализ существующих математических моделей дизелей показал, что ни одна из них в полной мере не подходит для полунатурного моделирования. В связи с этим возникает задача разработки универсальной, «быстрой» и, в то же время, точной динамической модели комбинированного дизеля, удовлетворяющей специфическим требованиям полунатурного моделирования. Такая модель должна включать дифференциальные уравнения, описывающие изменения основных параметров во времени, соотношения теории рабочих процессов комбинированных двигателей и эмпирическую часть, содержащую данные для интегрирования дифференциальных уравнений и расчёта параметров по формулам рабочего процесса. Основная задача состоит в нахождении такого компромиссного сочетания теоретической и эмпирической частей модели, при котором расчёт динамических режимов проводится с нужной точностью за требуемый малый промежуток времени.

Для изучения особенностей работы дизеля на неустановившихся режимах и выработки подходов к составлению его динамической модели возникает необходимость проведения экспериментального исследования дизеля с имитацией реальных динамических режимов.

Кроме имитационных моделей дизеля и энергетической установки тепловоза для осуществления полунатурного моделирования необходимо устройство сопряжения натурной и компьютерной частей стенда, осуществляющее преобразование сигналов обмена информацией между частями стенда.

В результате проведённого анализа сформулированы цель и поставлены следующие задачи диссертационной работы:

- экспериментальное исследование дизеля с имитацией неустановившихся режимов с целью анализа особенностей работы дизеля в динамике и обобщения подходов к составлению его динамической математической модели;
- расчётное исследование способов улучшения показателей качества переходных процессов дизель-генератора;
- разработка динамических математических моделей комбинированного дизеля и энергетической установки тепловоза для расчётного исследования и полунатурного моделирования в реальном времени динамических режимов;
- разработка стенда для полунатурного моделирования в реальном времени режимов работы комбинированного дизеля в составе энергетической установки;
- полунатурное моделирование переходных процессов комбинированного дизеля в составе энергетической установки тепловоза и анализ результатов моделирования;
- разработка предложений по повышению эффективности работы дизеля в составе энергетической установки тепловоза.

В главе 2 приведены результаты экспериментального и расчётного исследования характеристик комбинированного дизеля при работе на неустановившихся режимах.

В динамике из-за инерционности элементов комбинированного двигателя соотношения между параметрами рабочего процесса, соответствующие установившимся режимам, нарушаются. Для получения исходных данных, необходимых для построения динамической модели комбинированного дизеля, режимы экспериментальных статических характеристик должны соответствовать неустановившимся режимам переходных процессов. Это достигается специальной методикой испытаний, при которой обеспечивается независимое изменение параметров рабочего процесса дизеля и лопаточных машин. Применительно к крутящему моменту дизеля это означает независимые изменения положения органа дозирования подачи топлива, частоты вращения вала, плотности надувочного воздуха. Дизель отсоединяется от турбокомпрессора и оснащается автономным источником наддувочного воздуха. При заданном постоянном давлении наддувочного воздуха, поддерживаемом автономным источником, снимаются скоростные или нагрузочные характеристики дизеля. Испытания повторяются при различных значениях давления наддува.

Для получения характеристик комбинированного дизеля в условиях работы на неустановившихся режимах на испытательном стенде ОАО «Коломенский завод» было проведено экспериментальное исследование одноцилиндрового отсека дизеля размерности 26/26. Подвод воздуха к цилиндру двигателя осуществлялся от автономного источника, что обеспечивало возможность задания давления наддува независимо от других пара-

метров режима испытаний. Производилось снятие нагрузочных характеристик при частоте вращения вала установки  $n_d = 750 \text{ мин}^{-1}$ , характерной для работы дизеля на генератор переменного тока. Было получено шесть нагрузочных характеристик при следующих постоянных давлениях наддувочного воздуха (абсолютные значения)  $p_k = 0,1; 0,139; 0,179; 0,218; 0,257; 0,296 \text{ МПа}$ .

На рис. 1 в качестве примера приведены изменения следующих параметров рабочего процесса дизеля на нагрузочной характеристике при постоянных давлениях наддува  $p_k = 0,139 \text{ МПа}$  (рис.1,а) и  $p_k = 0,257 \text{ МПа}$  (рис. 1, б): коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ ; температуры отработавших газов  $T_r$ , °К; индикаторного КПД  $\eta_i$ ; эффективного КПД  $\eta_e$ ; механического КПД  $\eta_m$ ; концентраций содержания в отработавших газах оксидов азота  $C_{NOx}$ , % и оксида углерода  $C_{CO}$ , %.

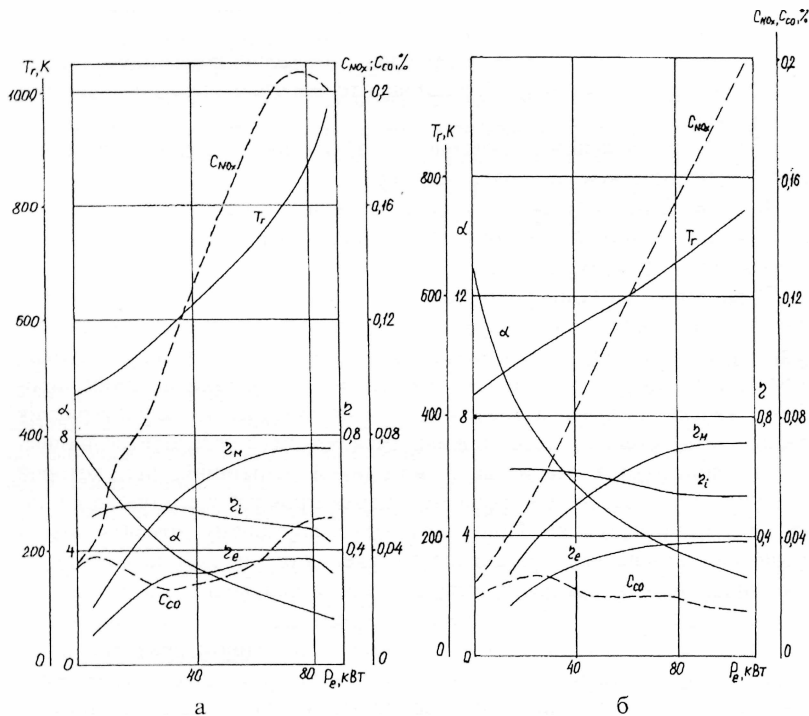


Рис. 1. Нагрузочные характеристики отсека дизеля 26/26 при постоянном давлении наддува: а -  $p_k = 0,139 \text{ МПа}$ ; б -  $p_k = 0,257 \text{ МПа}$

Для расчётного исследования динамических режимов была составлена математическая модель дизеля 16ЧН26/26 при работе в качестве привода генератора переменного тока. Для описания процессов изменения угловых скоростей вала дизеля и ротора турбокомпрессора использовались

уравнения динамического баланса крутящих моментов. В динамическую часть модели комбинированного дизеля входили также дифференциальные уравнения изменения давлений воздуха во впускном трубопроводе и отработавших газов в выпускном трубопроводе. Функциональные зависимости, входящие в дифференциальные уравнения модели, такие, как эффективный момент дизеля, описывались полными полиномами второго и третьего порядков с положительными показателями степени, коэффициенты которых определялись методом наименьших квадратов по исходным данным, полученным при испытаниях отсека дизеля с имитацией условий работы дизеля на неустановившихся режимах с коррекцией на полноразмерный двигатель.

Пригодность разработанной математической модели для расчётного анализа динамических режимов оценивалась путём сравнения экспериментальных и расчётных переходных процессов системы автоматического регулирования (САР) частоты вращения вала дизель-генератора при набросах и сбросах нагрузки. На рис. 2 приведены экспериментальные (сплошные линии) и расчётные (пунктирные линии) переходные процессы изме-

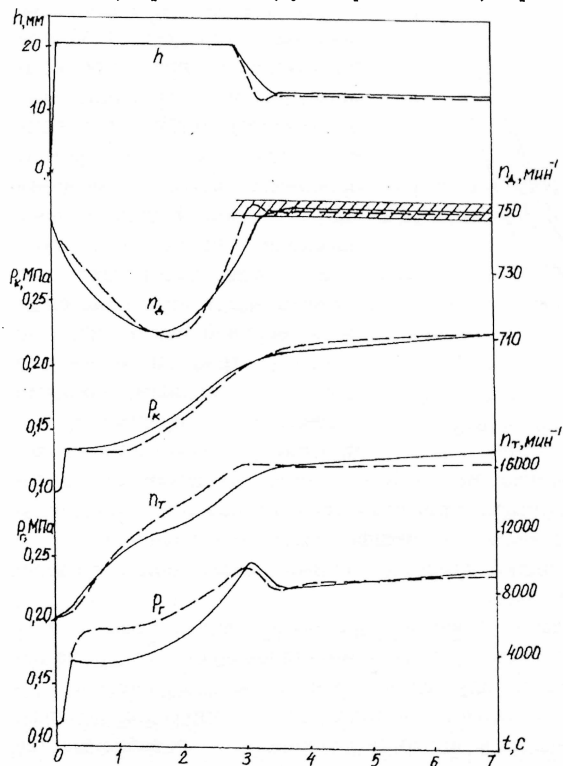


Рис. 2 Переходные процессы САР дизель-генератора

нения параметров при набросе нагрузки: положения реек дизель-генератора ТНВД  $h$ , частот вращения вала дизеля  $n_d$  и ротора турбокомпрессора  $n_r$ , давлений надвучного воздуха  $p_k$  и отработавших газов  $p_r$ . Сравнение экспериментальных и расчётных переходных процессов свидетельствует о приемлемой точности разработанной математической модели и возможности её использования для расчётного исследования динамических режимов рассмотренного дизель-генератора пере-

менного тока.

При расчётном моделировании исследовалось влияние параметров регулятора, характеристик дизеля и системы воздухообеспечения на показатели качества переходных процессов дизель-генератора при набросах и сбросах нагрузки. На рис. 3 приведены расчётные переходные процессы изменения частоты вращения вала дизель-генератора для наброса нагрузки при различных значениях времени работы цифрового ЭБ регулятора  $\Delta t$ . Увеличение времени работы ЭБ регулятора ухудшает качество переходных процессов - увеличивается и время процесса  $\tau$ , и отклонение частоты вращения  $\phi$ . Сравнительно небольшие значения  $\Delta t$  порядка 0,003 – 0,005 с незначительно влияют на протекание процессов. Заметное влияние наблюдается при  $\Delta t = 0,05 - 0,1$  с.

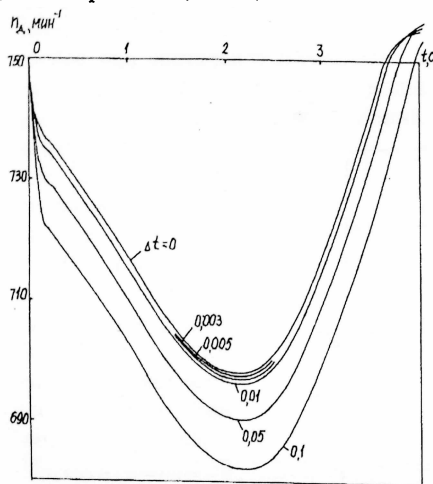


Рис. 3. Влияние на переходные процессы САР времени работы регулятора

Эффективным способом влияния на динамику процессов регулирования является применение системы приёмистости. На рис. 4, а показаны переходные процессы САР при подкрутке ротора турбокомпрессора (моделирование осуществлялось путём добавления к крутящему моменту турбины дополнительного момента  $\Delta M_T$ ). На рис. 4, б приведены переходные процессы при подводе массы дополнительного воздуха  $m_{доп}$  в цилиндры дизеля. В верхней части рис. 4, б показаны графики изменения давлений: основными линиями — давления во впускном трубопроводе  $p_k$ , пунктирными ли-

ниями — давления в цилиндрах дизеля. Как видно из процессов, приведённых на рис. 4, подкрутка ротора турбокомпрессора и подвод дополнительного воздуха в цилиндры дизеля интенсифицирует рост давления  $p_k$ , что улучшает качество переходных процессов, снижая время процесса  $\tau$  и заброс частоты вращения  $\phi$ .

Рассмотренная математическая модель, разработанная в рамках данного исследования особенностей работы комбинированного дизеля на неустановившихся режимах, базируется на уравнениях динамического баланса, которые обычно используются в подобных динамических моделях. Новизна подхода заключается в описании функциональных зависимостей моментов и расходов по результатам исследований, имитирующих неустановившиеся режимы работы дизеля. Это позволило приблизить описание характеристик моментов и расходов к условиям реальных неустановив-

шихся режимов и повысить точность расчётов переходных процессов исследованного дизеля при работе в качестве привода генератора переменного тока на постоянной частоте вращения.

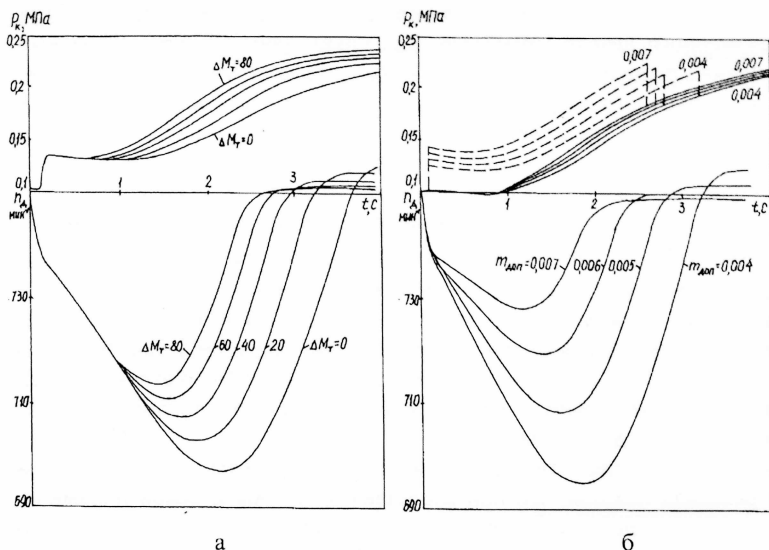


Рис. 4. Переходные процессы САР при: а – подкрутке ротора турбокомпрессора; б – подводе дополнительного воздуха

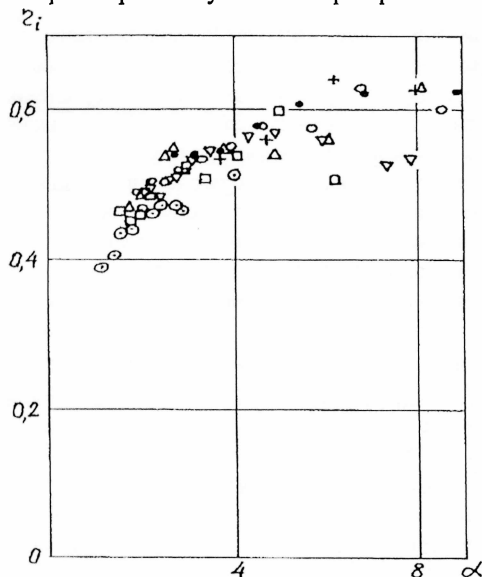
Адаптация данной модели для дизеля 16ЧН26/26 тепловозного назначения требует проведения дополнительных экспериментальных исследований по описанной выше методике на различных частотах вращения вала, что необходимо для описания транспортных условий работы дизеля, что требует значительных материальных и финансовых затрат.

Результаты, полученные в рамках проведённого исследования дизеля с имитацией неустановившихся режимов работы, позволили обосновать подход к составлению универсальной динамической модели комбинированного дизеля для полунатурного моделирования.

При заданном расходе топлива эффективный момент дизеля  $M_e$  определяется характеристикой эффективного КПД  $\eta_e$ . Анализ зависимостей эффективного КПД  $\eta_e$ , построенных по результатам экспериментального исследования отсека дизеля с имитацией условий работы на неустановившихся режимах, показывает, что изменение давления наддува существенно влияет на значение эффективного КПД дизеля даже при неизменной величине коэффициента избытка воздуха. Такие условия работы дизеля с турбонаддувом присущи неустановившимся режимам, когда турбокомпрессор из-за высокой механической инерционности отстаёт от поршневой части двигателя.

На рис. 5 приведены зависимости индикаторного КПД  $\eta_i$  дизеля размерности 26/26 от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  при постоянных значениях давления надвучного воздуха  $p_k$ , полученные при экспериментальном исследовании отсека с нанесенными на них режимами работы полноразмерного дизеля 16ЧН26/26. Как показывают экспериментальные исследования рабочего процесса различных типов двигателей, характеристика индикаторного КПД в зависимости от  $\alpha$  имеет достаточно общий вид, что важно при составлении моделей для полунатурного моделирования. Анализ зависимостей на рис. 5 показывает, что изменение давления надвучного воздуха не оказывает такого существенного влияния на характеристику индикаторного КПД  $\eta_i$  дизеля, как это наблюдается для эффективного КПД  $\eta_e$ . Поэтому для составления функциональной зависимости индикаторного КПД от других параметров рабочего процесса дизеля, прежде всего – коэффициента избытка воздуха, можно пользоваться исходными данными нагрузочных или скоростных характеристик, полученных при стандартных испытаниях дизеля. Характер расположения точек режимов полноразмерного двигателя на поле зависимостей параметров отсека подтверждает данный вывод.

Анализ характеристик дизеля в условиях работы на неуставившихся режимах показал, что при составлении математической динамической модели для полунатурного моделирования целесообразно формировать функциональные зависимости для таких величин, как индикаторный КПД, коэффициент наполнения и др., зависимости которых от других параметров хорошо изучены в теории рабочих процессов двигателей и могут



быть получены при стандартных испытаниях дизеля или спрогнозированы по имеющимся в теории данным для аналогичных типов двигателей.

Рис. 5. Зависимости  $\eta_i$  от  $\alpha$  при  $p_k = \text{const}$ :  $\square$  -  $p_k = 0,1$  МПа;  $\nabla$  -  $p_k = 0,139$  МПа;  $\Delta$  -  $p_k = 0,179$  МПа;  $\circ$  -  $p_k = 0,218$  МПа;  $\bullet$  -  $p_k = 0,257$  МПа;  $+$  -  $p_k = 0,296$  МПа;  $\bigcirc$  - полноразмерный дизель.

В главе 3 представлена математическая модель комбинированного дизеля в составе энергетической установки. Рассматривается математическая модель энергетической установки тепловоза 2ТЭ116, в электрической части которой через выпрямительную установку объединены контуры переменного и постоянного тока.

На рис. 6 приведена функциональная схема САУ тепловоза, которая включает энергетическую установку и регулятор. Энергетическую установку тепловоза целесообразно представить в виде совокупности следующих укрупнённых составных частей: дизель и тяговый генератор (Д + Г – механическая часть); возбудитель, управляемый выпрямитель и обмотка возбуждения тягового генератора (В + ОВГ – электрическая часть); тяговый генератор, выпрямительная установка и тяговые электродвигатели (Г + ЭД – электрическая часть); тяговые электродвигатели, колёсные пары тепловоза и поезд (ЭД + П – механическая часть). Входными воздействиями для энергетической установки тепловоза являются управляющие воздействия в виде положения рейки топливных насосов  $h$  и сигнала управления выпрямителем ОВГ  $y_v$  и возмущающее воздействие – характер дороги (ХД), определяющий момент сопротивления движению поезда  $M_c$ .

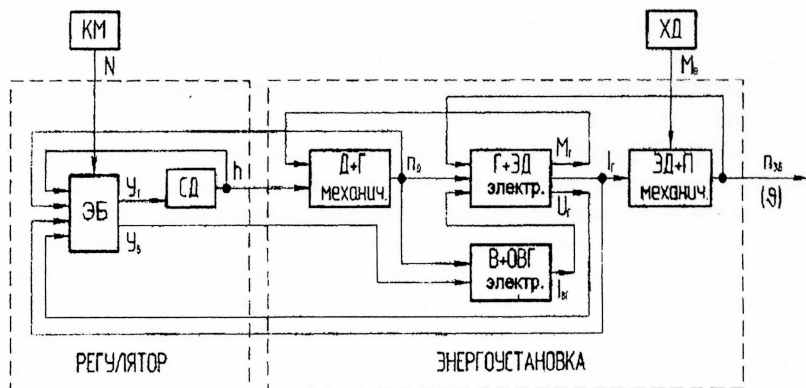


Рис. 6. Функциональная схема САУ тепловоза

Выходной параметр – частота вращения валов тяговых электродвигателей  $n_{эд}$  или пересчитанная через неё скорость поезда  $v$ . Внутренними сигналами схемы, связывающими между собой элементы установки, являются: частота вращения вала дизель-генератора  $n_d$ ; ток  $I_r$  и напряжение  $U_r$  генератора; ток обмотки возбуждения генератора  $I_{вг}$ ; момент, необходимый для вращения вала генератора  $M_r$ .

Для осуществления полунатурного моделирования системы управления тепловоза возникает задача создания «быстрой» динамической математической модели энергетической установки тепловоза и комбинированного дизеля как её основного элемента, которая при достоверном определении основных параметров рабочего процесса осуществляет расчёт за

промежутки времени порядка миллисекунд. Поставленная цель достигается сочетанием в модели соотношений теории рабочих процессов комбинированных двигателей с эмпирической частью.

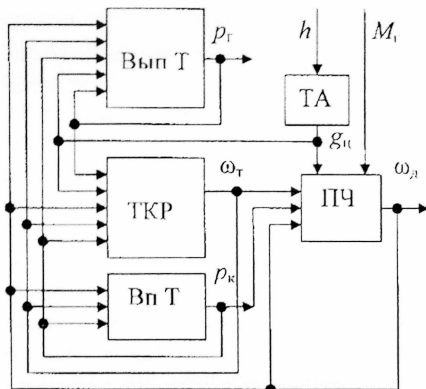


Рис. 7. Функциональная схема комбинированного дизеля

угловую скорость вала ротора турбокомпрессора  $\omega_\tau$ ; цикловую подачу топлива  $g_u$ ; давление воздуха во впускном трубопроводе  $p_k$ ; давление газов в выпускном трубопроводе  $p_r$ .

Структура предлагаемой «быстрой» динамической модели комбинированного дизеля представлена на рис. 8. Основу модели комбинированного двигателя составляют дифференциальные уравнения поршневой части (собственно дизеля), турбокомпрессора, впускного и выпускного трубопроводов. Изменения угловых скоростей вала дизеля  $\omega_d$  и ротора турбокомпрессора  $\omega_\tau$  описываются уравнениями динамического баланса механической энергии при вращении твердого тела. Изменения давлений воздуха во впускном трубопроводе  $p_k$  и газов в выпускном трубопроводе  $p_r$  описываются уравнениями динамического баланса расходов.

Поршневая часть дизеля:  $\frac{d\omega_d}{dt} = \frac{1}{I_d}(M_i - M_n - M_r)$ , где  $I_d$  — момент инерции вала дизель-генератора,  $M_i$  — индикаторный момент дизеля,  $M_n$  — момент внутренних потерь в дизеле,  $M_r$  — момент тягового генератора.

Турбокомпрессор:  $\frac{d\omega_\tau}{dt} = \frac{1}{I_\tau}(M_\tau - M_k)$ , где  $I_\tau$  — момент инерции ротора турбокомпрессора,  $M_\tau$  — момент турбины,  $M_k$  — момент компрессора.

Впускной трубопровод:  $\frac{dp_k}{dt} = \frac{R_b T_b}{V_{вп}}(G_k - G_d)$ , где  $R_b$  и  $T_b$  — газовая постоянная и температура воздуха,  $V_{вп}$  — объём впускного трубопровода,  $G_k$  и  $G_d$  — расходы воздуха через компрессор и дизель. Учитывалось изменение температуры воздуха в охладителе  $T_b$  ( $T_k$ ), где  $T_k$  — температура воздуха на выходе из компрессора.

На функциональной схеме (рис. 7) комбинированный дизель представлен как совокупность следующих элементов: собственно двигатель, или поршневая часть (ПЧ); топливная аппаратура (ТА); турбокомпрессор (ТКР); впускной трубопровод (ВпТ); выпускной трубопровод (ВыпТ). Взаимосвязь между элементами комбинированного дизеля осуществляется через следующие параметры рабочего процесса: угловую скорость вала дизеля  $\omega_d$ ; угловую

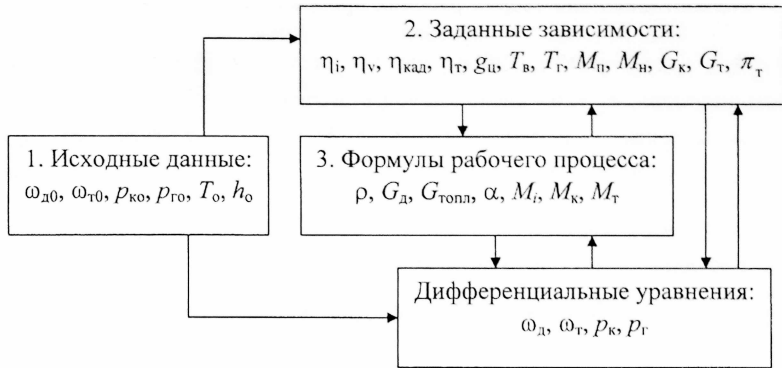


Рис. 8. Структура математической динамической модели дизеля

Выпускной трубопровод:  $\frac{dp_r}{dt} = \frac{R_r T_r}{V_{\text{вып}}} (G_d + G_{\text{топл}} - G_r)$ , где  $R_r$  и  $T_r$  – газовая постоянная и температура газов,  $V_{\text{вып}}$  – объём выпускного трубопровода,  $G_{\text{топл}}$  – расход топлива,  $G_r$  – расход газов через турбину.

Параметры рабочего процесса, определяющие правые части дифференциальных уравнений, разделены на три группы. Первую составляют исходные данные:  $\omega_{d0}, \omega_{t0}, p_{k0}, p_{r0}, T_0, h_0$ . Среди остальных параметров выделены такие (вторая группа), которые для достижения высокой скорости расчёта определены заранее в виде функциональных зависимостей от других (первичных) параметров. В эту группу включены коэффициенты, характеризующие отличие реальных рабочих процессов от теоретических, и параметры рабочего процесса, определение которых требует значительно времени при расчётах: индикаторный КПД дизеля  $\eta_i$ , коэффициент наполнения  $\eta_v$ , адиабатический КПД компрессора  $\eta_{\text{кад}}$ , эффективный КПД турбины  $\eta_r$ , цикловая подача топлива  $g_u$ , температура воздуха  $T_b$ , температура газов  $T_r$ , моменты  $M_n$  и  $M_r$ , расходы  $G_k$  и  $G_r$ , степень понижения давления газов в турбине  $\pi_r$ . В третью группу вошли параметры, значения которых определяются по формулам рабочего процесса: плотность  $\rho$  наддувочного воздуха, коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , расходы воздуха  $G_d$  и топлива  $G_{\text{топл}}$ , моменты дизеля  $M_i$ , компрессора  $M_k$  и турбины  $M_r$ .

В результате анализа теории рабочих процессов комбинированных двигателей заданы функциональные зависимости для второй группы параметров модели:  $\eta_i(\alpha, \omega_d)$ ,  $\eta_v(\omega_d, p_k)$ ,  $g_u(h, \omega_d)$ ,  $T_r(\omega_d, \alpha, p_k)$ ,  $M_n(\omega_d)$ ,  $\eta_{\text{кад}}(\omega_t, p_k)$ ,  $G_k(\omega_t, p_k)$ ,  $\pi_r(p_r)$ ,  $\eta_r(\omega_{\text{тпр}}, \pi_r)$ ,  $G_{\text{тпр}}(\omega_{\text{тпр}}, \pi_r)$ , где  $\omega_{\text{тпр}} = \omega_r / \sqrt{T_r}$  и  $G_{\text{тпр}} = G_r \sqrt{T_r} / p_r$ .

По соотношениям теории рабочих процессов определяются параметры модели из третьей группы. Для дизеля:  $\rho = p_k / (R_v T_v)$ ;  $G_d = \rho i V (n_d / 120) \eta_v$ , где  $i$  – число цилиндров,  $V$  – рабочий объем цилиндра,  $n_d / 120$  – число циклов за 1 секунду при частоте вращения вала дизеля  $n_d = 30 \omega_d / \pi$ ;  $G_{\text{топл}} = i g_u n_d / 120$ ;  $\alpha = G_d / (14,3 G_{\text{топл}})$ ;  $M_i = H_u G_{\text{топл}} \eta_i / \omega_d$ , где  $H_u$  – низшая теплота сгорания дизельного топлива.

Для турбокомпрессора:  $T_k = T_0 [1 + (\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1) / \eta_{\text{кад}}]$ , где  $k$  – показатель адиабаты для воздуха;  $\pi_k$  – степень повышения давления воздуха в компрессоре; адиабатическая работа сжатия 1 кг воздуха в компрессоре  $L_{\text{кад}} = \frac{k}{k-1} R_v T_0 (\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1)$ ; действительная работа сжатия  $L_k = L_{\text{кад}} / \eta_{\text{кад}}$ ; мощность, затрачиваемая на привод компрессора  $N_k = G_k L_{\text{кад}} / \eta_{\text{кад}}$ ;  $M_k = N_k / \omega_\tau$ ; адиабатическая работа 1 кг газа в турбине  $L_{\text{тад}} = \frac{k_\tau}{k_\tau - 1} R_\tau T_\tau \left( 1 - \pi_\tau^{\frac{1-k_\tau}{k_\tau}} \right)$ , где  $k_\tau$  – показатель адиабаты отработавших газов; полезная работа газов в турбине  $L_\tau = L_{\text{тад}} \eta_\tau$ ; мощность турбины  $N_\tau = G_\tau L_\tau$ ;  $M_\tau = N_\tau / \omega_\tau$ .

Функциональные зависимости между параметрами рабочего процесса комбинированного дизеля задавались в виде полиномов, коэффициенты которых определялись методом наименьших квадратов. Подбор вида полиномов осуществлялся по критерию высокой точности приближения при возможно более простой структуре полиномов. В результате предварительного подбора вида полиномов, исходя из физической картины рабочего процесса, получены полиномы, содержащие члены как в положительной, так и в отрицательной степенях, наибольшая степень полиномов, в основном, от -3 до +3. Из состава полиномов удалялись члены, оказывающие малозаметное влияние на точность приближения. Выбранные полиномы содержат минимально возможное количество членов, набор которых обеспечивает высокую точность приближения. В качестве примера на рис. 9 показана поверхность полинома индикаторного КПД дизеля с точками исходных данных.

Для оценки экологических показателей дизеля 16ЧН26/26 получены полиномы функциональных зависимостей для концентраций оксидов азота  $C_{\text{Nox}}(\alpha, T_\tau)$  и углерода  $C_{\text{Co}}(\alpha, T_\tau)$ .

В электрической схеме тепловоза 2ТЭ116 есть две цепи электропередачи энергии, содержащие контуры переменного и постоянного тока: обмотка якоря возбуждителя – управляемый выпрямитель – обмотка возбуждения тягового генератора (ОЯВ – УВ – ОВГ); обмотка тягового генератора – выпрямительная установка – обмотки возбуждения и якорей тяговых электродвигателей (ОЯГ – В – ОЭД).

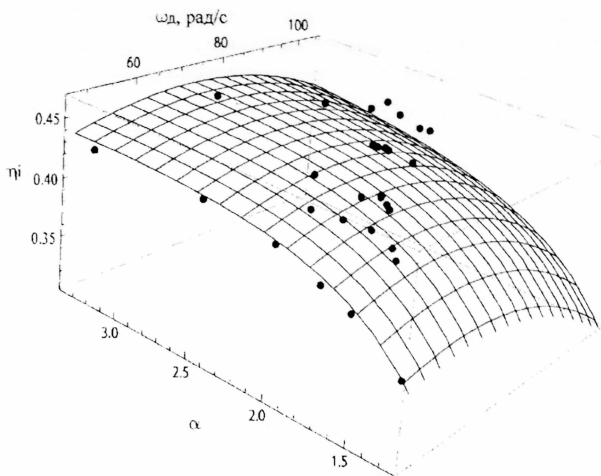


Рис. 9. Поверхность полинома  $\eta_i(\alpha, \omega_k)$

Схема замещения рассматриваемых цепей приведена на рис. 10. На рисунке для цепи ОЯВ – УВ – ОВГ:  $E_{я}=E_{яв}$  – действующее значение ЭДС ОЯВ;  $R_{я}=R_{яв}$  и  $L_{я}=L_{яв}$  – активное сопротивление и индуктивность ОЯВ;  $U_{я}=U_{яв}$  и  $I_{я}=I_{яв}$  – действующие значения напряжения и тока

ОЯВ;  $U=U_{ОВГ}$  и  $I=I_{ОВГ}$  – напряжение и ток ОВГ;  $R=R_{ОВГ}$  и  $L=L_{ОВГ}$  – активное сопротивление и индуктивность ОВГ;  $E_{эд}$  отсутствует. Для цепи ОЯГ – В – ОЭД:  $E_{я}=E_{яг}$  – действующее значение ЭДС ОЯГ;  $R_{я}=R_{яг}$  и  $L_{я}=L_{яг}$  – активное сопротивление и индуктивность ОЯГ;  $U_{я}=U_{яг}$  и  $I_{я}=I_{яг}$  – действующие значения напряжения и тока ОЯГ;  $U=U_{г}$  и  $I=I_{г}$  – напряжение и ток после выпрямительной установки;  $R=R_{эд}=R_{овд}+R_{яэд}$  и  $L=L_{эд}=L_{овд}+L_{яэд}$  – активное сопротивление и индуктивность обмоток возбуждения и якорей ЭД;  $E_{эд}$  – ЭДС ЭД;  $u_b$  отсутствует.

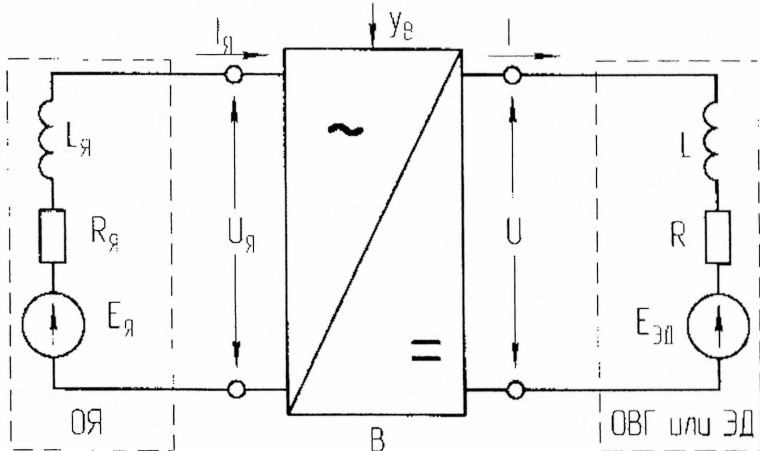


Рис. 10. Схема замещения электрических цепей энергоустановки

И. П. Т. У.  
ИМ. В. И. БАУМАНА  
БИБЛИОТЕКА

Для обеспечения необходимой скорости расчётов динамических режимов энергетической установки в реальном времени переходные процессы изменения токов в рассматриваемых цепях описываются единым уравнением второго закона Кирхгофа  $L_{\text{Я}} \frac{dI_{\text{Я}}}{dt} + L \frac{dI}{dt} + R_{\text{Я}} I_{\text{Я}} + RI = U - E_{\text{ЭД}}$ .

На установившихся режимах индуктивность учитывается только в переменной части цепи. В цепи возбуждения тягового генератора это -  $L_{\text{ЯВ}}$ , в цепи питания тяговых электродвигателей -  $L_{\text{ЯГ}}$ . Для переменной части схемы определялись действующие значения напряжения и тока через величину полного сопротивления  $z = \sqrt{R_{\text{Я}}^2 + (\omega L_{\text{Я}})^2}$ , где  $\omega$  - циклическая частота синусоидальной ЭДС в ОЯВ или ОЯГ. В балансе напряжений учитывалось падение напряжения на  $R_{\text{ОВГ}}$  для цепи питания ОВГ и на  $R_{\text{ЭД}}$  для цепи питания ЭД. В переходных процессах ток изменяется во всей электрической схеме, поэтому для тягового генератора необходимо учитывать также наличие  $L_{\text{ОВГ}}$ , а в цепи питания ЭД -  $L_{\text{ЭД}}$ .

Действующее значение ЭДС в ОЯВ или фазе ОЯГ  $E_{\text{Я}} = 4,44 k_{\text{ОБ}} f w \Phi$ , где  $k_{\text{ОБ}}$  - обмоточный коэффициент;  $w$  - число витков в обмотке;  $\Phi$  - магнитный поток полюса статора В или ОВГ;  $f = pn/60$  - частота синусоидальной ЭДС;  $2p$  - число пар полюсов;  $n$  - частота вращения ротора.

Принято, что изменение тока в цепи ОЯВ - УВ - ОВГ при изменении управляющего сигнала  $u_{\text{в}}$  происходит за счёт изменения ЭДС ОЯВ  $E_{\text{ЯВ}} = E_{\text{ЯВУВ}}/u_{\text{ВН}}$ , где  $E_{\text{ЯВН}}$  и  $u_{\text{ВН}}$  - действующие значения ЭДС и управляющего сигнала на номинальном режиме. Действующее значение напряжения ОЯВ или ОЯГ  $U_{\text{Я}} = E_{\text{Я}} I_{\text{ЯГ}}$ .

Значения постоянных напряжения и тока после однофазного управляемого выпрямителя:  $U_{\text{ОВГ}} = 0,9 U_{\text{ЯВ}}$ ,  $I_{\text{ОВГ}} = 0,9 I_{\text{ЯВ}}$ ; после трёхфазной выпрямительной установки  $U_{\text{Г}} = 2,34 U_{\text{ЯГ}}$ ,  $I_{\text{Г}} = 1,23 I_{\text{ЯГ}}$ .

ЭДС и электромагнитный момент тягового ЭД  $E_{\text{ЭД}} = C_E n_{\text{ЭД}} \Phi_{\text{ОВД}}$ ,  $M_{\text{ЭД}} = C_M I_{\text{ЭД}} \Phi_{\text{ОВД}}$ , где  $C_E = pn/(60a)$  - конструктивный коэффициент ЭДС:  $p$  - число пар полюсов;  $a$  - число параллельных ветвей;  $N$  - число проводников в обмотке якоря;  $C_M = 9,57 C_E$  - конструктивный коэффициент момента;  $I_{\text{ЭД}} = I_{\text{Г}}/6$  - ток якоря;  $\Phi_{\text{ОВД}}$  - магнитный поток полюса, пропорциональный току (для ЭД последовательного возбуждения).

При работе тягового генератора на выпрямитель ток в фазах обмотки якоря является несинусоидальным. В течение времени, соответствующего углу коммутации  $\gamma$ , ток фазы отстаёт от напряжения на угол, примерно равный  $(0,5 \dots 0,6) \gamma$ .  $\cos \gamma = 1 - 0,816 x_{\text{Г}} I_{\text{Г}}/E_{\text{К}}$ , где  $x_{\text{Г}}$  - сопротивление фазы в режиме коммутации,  $E_{\text{К}}$  - действующее значение фазной ЭДС за сопротивлением  $x_{\text{Г}}$ .

Электрическая мощность тягового генератора после трёхфазной мостовой схемы выпрямления  $P_{\text{Г}} = 2,34 I_{\text{Г}} U_{\text{ЯГ}} \cos(\gamma/2)$ . Потери мощности в тяговых электроагрегатах тепловоза представлены в виде суммы  $\Delta P = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{м}}$ , где  $\Delta P_{\text{э}} = k_{\text{э}} I^2$  - электрические потери,  $\Delta P_{\text{м}} = k_{\text{м}} n^2$  - механические и маг-

нитные потери. Механическая мощность тягового генератора  $P_{Гм} = P_{Гэ} + \Delta P_{Г}$ . Момент генератора  $M_{Г} = P_{Гм} / \omega_{д}$ . Электрическая мощность тягового электродвигателя  $P_{Эдэ} = U_{Эд} I_{Эд}$ , где  $U_{Эд} = E_{Эд} + I_{Эд} R_{Эд}$ . КПД электродвигателя  $\eta_{Эд} = 1 - \Delta P_{Эд} / P_{Эдэ}$ . Крутящий момент (механический) электродвигателя  $M_{Эдм} = M_{Эдэ} \eta_{Эд}$ .

Динамический баланс механических энергий шести тяговых электродвигателей и поезда в процессе поступательного движения описывается уравнением второго закона Ньютона  $a = (F_m - F_c) / m_{п}$ , где  $m_{п}$  – масса поезда;  $a$  – ускорение;  $F_m = M_{кп} / R_k$  – сила тяги;  $F_c$  – сила сопротивления движению поезда;  $M_{кп}$  – момент на колёсных парах тепловоза;  $R_k$  – радиус колёс тепловоза. С учётом передаточного отношения  $i_{кп}$  редукторов, установленных между шестью тяговыми электродвигателями и колёсными парами,  $M_{кп} = 6 i_{кп} M_{Эдм}$ .

В главе 4 дано описание стенда для расчётно-экспериментального исследования динамических режимов дизеля в реальном времени. Структура стенда представлена на рис. 11. Стенд состоит из натурной части, компьютерной части и устройства их сопряжения.

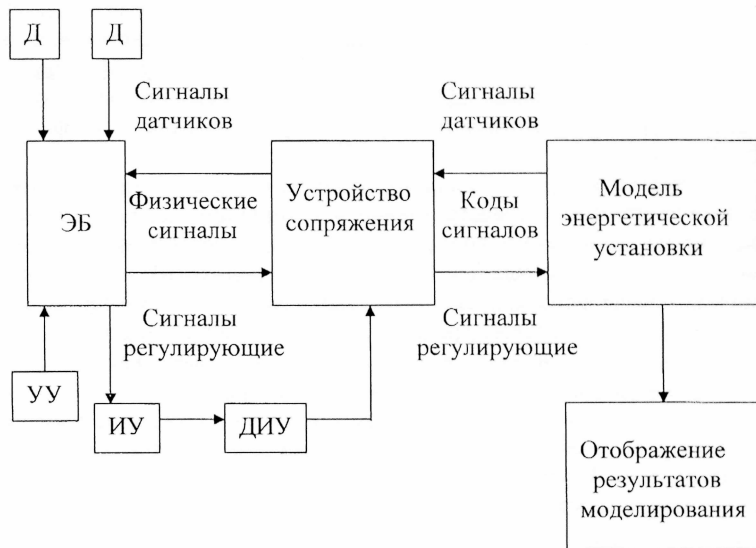


Рис. 11. Структура стенда полунатурного моделирования

Возможны два режима работы стенда полунатурного моделирования.

1. Режим отладки взаимодействия ЭБ с внешними устройствами, к которым относятся датчики дизеля и энергетической установки и исполнительные устройства регулятора. В этом случае наиболее часто осуществляется функционирование САУ в разомкнутом состоянии. Данный режим работы

стенда применяется для доработки конструкции датчиков и исполнительных устройств регулятора, отладки аппаратных каналов схем интерфейса и программных средств обработки и формирования сигналов ЭБ.

2. Режим моделирования замкнутой САУ дизеля и энергетической установки. Это основной режим работы стенда, предназначенный для отладки алгоритмов и программ управления ЭБ и определения настроек регулятора для реальных режимов энергетической установки.

Рассматривались следующие варианты структуры стенда полунатурного моделирования (рис. 11). Основным элементом натурной части стенда является ЭБ (микроконтроллер) регулятора. В случае использования стенда для отладки взаимодействия контроллера с внешними устройствами на физическом уровне сигналов к микроконтроллеру могут быть подключены: устройство управления энергетической установкой (УУ) – для энергетической установки тепловоза это контроллер машиниста; часть реальных датчиков (Д); исполнительное устройство регулятора (ИУ) с датчиком (ДИУ). При моделировании замкнутой системы управления эти устройства могут войти в состав модели.

Для связи натурной и компьютерной частей стенда используется специальное устройство сопряжения, которое преобразует вид регулирующих сигналов и сигналов датчиков. Коды сигналов датчиков на выходе компьютерной части стенда преобразуются в физическую форму, воспринимаемую контроллером. Для регулирующих сигналов, вырабатываемых контроллером, осуществляется обратное преобразование – из физической формы в код.

Рассмотрены два варианта структуры стенда. В первом все необходимые программные средства стенда полунатурного моделирования реализованы на одном компьютере в современной операционной системе. Во втором в составе стенда используются два компьютера: в одном записана модель дизеля и транспортной установки (упрощённая конфигурация компьютера), другой служит средством связи оператора со стендом – с него осуществляется задание, в том числе оперативное, настроек системы управления и отображение результатов моделирования.

Устройство сопряжения стенда реализовано в виде программируемого электронного блока на базе компьютера или однокристального микроконтроллера. Программа такого устройства организует движение потоков информации между натурной и модельной частями стенда и задаёт режим работы каналов преобразования сигналов, аппаратный состав которых проще, чем в устройстве жёсткой логики. При использовании в составе стенда двух компьютеров программа одного из них содержит модель энергетической установки и алгоритмы преобразования и формирования сигналов устройства сопряжения. В этом случае конфигурация этого компьютера является упрощённой с точки зрения стандартных компьютерных составляющих, однако должна быть дополнена аппаратными средствами каналов преобразования сигналов устройства сопряжения.

Современные однокристалльные микроконтроллеры сочетают достаточно высокое быстродействие с широкими функциональными возможностями. При полунатурном моделировании компьютер стенда полунатурного моделирования использовался для оперативного управления стендом и отображения результатов моделирования. «Быстрая» динамическая модель установки реализована в микроконтроллере устройства сопряжения, функции которого в этом случае расширяются и включают не только преобразование сигналов, но и непосредственно процесс моделирования. Такой подход оправдан именно с позиций работы стенда в реальном времени. В этом случае отпадает необходимость применения для организации работы в реальном времени компьютерных операционных систем, а для отображения результатов моделирования можно использовать наиболее удобную операционную систему и соответствующие программные средства.

В натурную часть стенда полунатурного моделирования, разработанного в рамках данной работы, вошли элементы регулятора типа ЭРЧМ30ТЗ производства ООО «ППП Дизельавтоматика», устанавливаемого на дизель-генераторы 1А-9ДГ магистральных тепловозов 2ТЭ116 с дизелем 16ЧН26/26.

Натурная часть стенда включала в себя поворотный электромагнит ИУ. Гидравлический серводвигатель ИУ регулятора входил в состав модели. Динамические свойства гидравлического серводвигателя с жёсткой обратной связью описываются типовым дифференциальным уравнением апериодического звена первого порядка  $T_C \frac{dh}{dt} + h = k_C z$ , где  $T_C$  и  $k_C$  – соответственно постоянная времени и коэффициент передачи серводвигателя,  $z$  – сигнал воздействия на золотник серводвигателя.

В электронной цифровой модели дизеля и энергетической установки тепловоза в процессе имитации режимов работы формируются двоичные коды сигналов следующих датчиков: частоты вращения вала дизель-генератора  $n_d$ , частоты вращения ротора турбокомпрессора  $n_{тк}$ , давления наддува  $p_K$ , давления масла в масляной системе дизеля  $p_M$ , положения реек ТНВД  $h$ , напряжения тягового генератора  $U_{гг}$ , тока тягового генератора  $I_{гг}$ .

В компьютерной части стенда задаётся также двоичный код комплексного сигнала управления энергетической установкой тепловоза, содержащий номер позиции контроллера машиниста и другие сигналы с пульта управления тепловоза. В устройстве сопряжения производится перевод двоичных кодов сигналов в физическую форму, которая соответствует виду выходных сигналов реальных датчиков с характерными диапазонами изменения их параметров: Таким образом, ЭБ системы управления при полунатурном моделировании получает от устройства сопряжения стенда набор сигналов, вид и форма которых не отличаются от сигналов реальных датчиков и устройств управления, чем достигается максимальное приближение процесса полунатурного моделирования к реальным условиям работы дизеля и энергетической установки тепловоза. Выходные сигналы ЭБ (регулирующие сигналы на ИУ и блок управления возбуждением

тягового генератора) поступают на устройство сопряжения стенда, где осуществляется их перевод в двоичные коды, которые передаются в цифровую модель дизеля и энергетической установки тепловоза.

Цикл программы устройства сопряжения производит постоянный опрос входных параметров через драйверы устройств ввода. При запросе информации по одному из интерфейсов компьютера в цикле программы формируется ответный пакет данных и передаётся соответствующему драйверу устройств вывода. Алгоритмы драйверов ввода/вывода сигналов и интерфейсов реализованы на базе прерываний микроконтроллера и используют соответствующую периферию асинхронно. Алгоритм главного цикла программы представляет собой циклически выполняющийся опрос драйверов ввода, принятия данных по интерфейсу с одновременной отсылкой обновлённых значений входных переменных, преобразование и передачу принятых по интерфейсу данных на драйверы вывода.

В главе 5 приведены результаты расчётно-экспериментального исследования динамики дизеля в составе энергетической установки и проведён анализ методов повышения эффективности работы дизеля на динамических режимах. На разработанном стенде проведено полунатурное моделирование динамических режимов энергетической установки тепловоза 2ТЭ116. Целями моделирования являлись: проверка функционирования стенда, проверка адекватности динамических моделей комбинированного дизеля и энергетической установки тепловоза, исследование влияния настроек регулятора на качество процессов управления энергетической установкой тепловоза.

В качестве примера на рис. 12 приведены экспериментальные процессы, полученные при следующей последовательности задания позиций КМ (канал управления движением тепловоза): последовательный перевод КМ на позиции N=1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12 с работой на каждой промежуточной позиции в течение десяти секунд и последовательное возвращение на позицию N=1. Соответствующие процессы, полученные при полунатурном моделировании, показаны на рис. 13. Полученные результаты подтвердили работоспособность разработанного стенда с заложенными в него математическими моделями, что даёт возможность использования стенда для полунатурного моделирования динамических режимов комбинированного дизеля и энергетической установки тепловоза в широком диапазоне изменения режимов работы установки и настроек САУ.

На рис. 14 показаны полученные методом полунатурного моделирования переходные процессы изменения основных параметров дизеля и энергетической установки при изменении момента сопротивления движению на восьмой позиции КМ (канал регулирования).

На рис. 15 приведены переходные процессы изменения частоты вращения вала дизель-генератора  $n_d$ , расхода топлива  $G_T$ , расхода оксидов

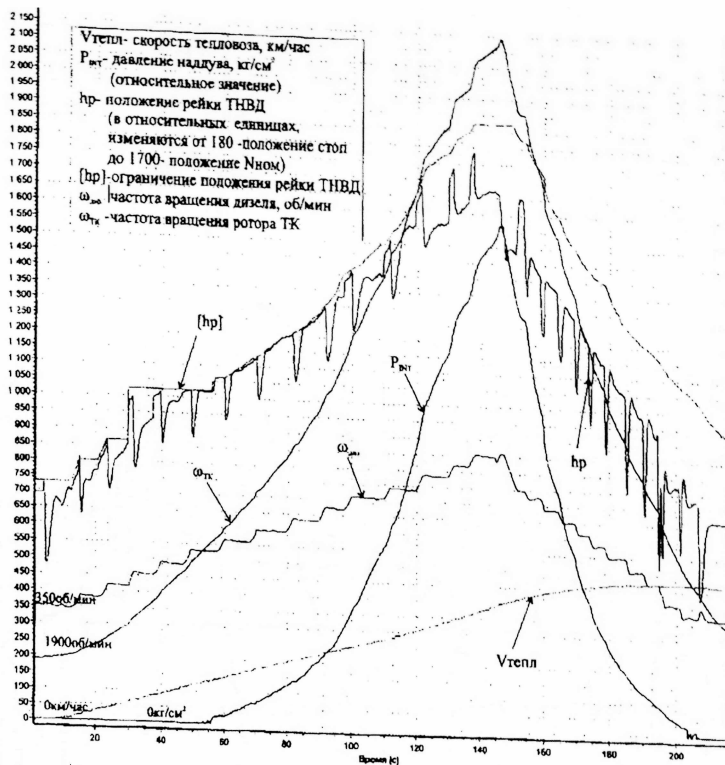


Рис. 12. Процесс управления тепловозом (эксперимент)

азота  $G_{\text{NOx}}$  и расхода оксида углерода  $G_{\text{CO}}$  при переводе КМ на позиции N = 1 – 8 – 14.

С целью исследования влияния настроек регулятора на качество процессов управления энергетической установкой тепловоза проведено полунатурное моделирование движения тепловоза при резком переводе КМ с позиции N=1 на позицию N=12. На первом этапе исследования проводилось изменение значений коэффициентов пропорциональной  $k_{\text{пр}}$  и интегральной  $k_{\text{и}}$  составляющих пропорционально-интегрального (ПИ) закона регулирования канала стабилизации частоты вращения вала дизель-генератора при разгоне. Изменение коэффициентов ПИ закона регулирования исследованного канала регулятора в широких пределах оказало слабое влияние на процессы изменения параметров энергетической установки тепловоза 2ТЭ116, включая процесс перемещения реек ТНВД.

На втором этапе исследования проводилось изменение коэффициентов пропорциональной  $k_{\text{п12}}$  и интегральной  $k_{\text{и12}}$  составляющих ПИ закона регулирования частоты вращения вала дизель-генератора на двенадцатой

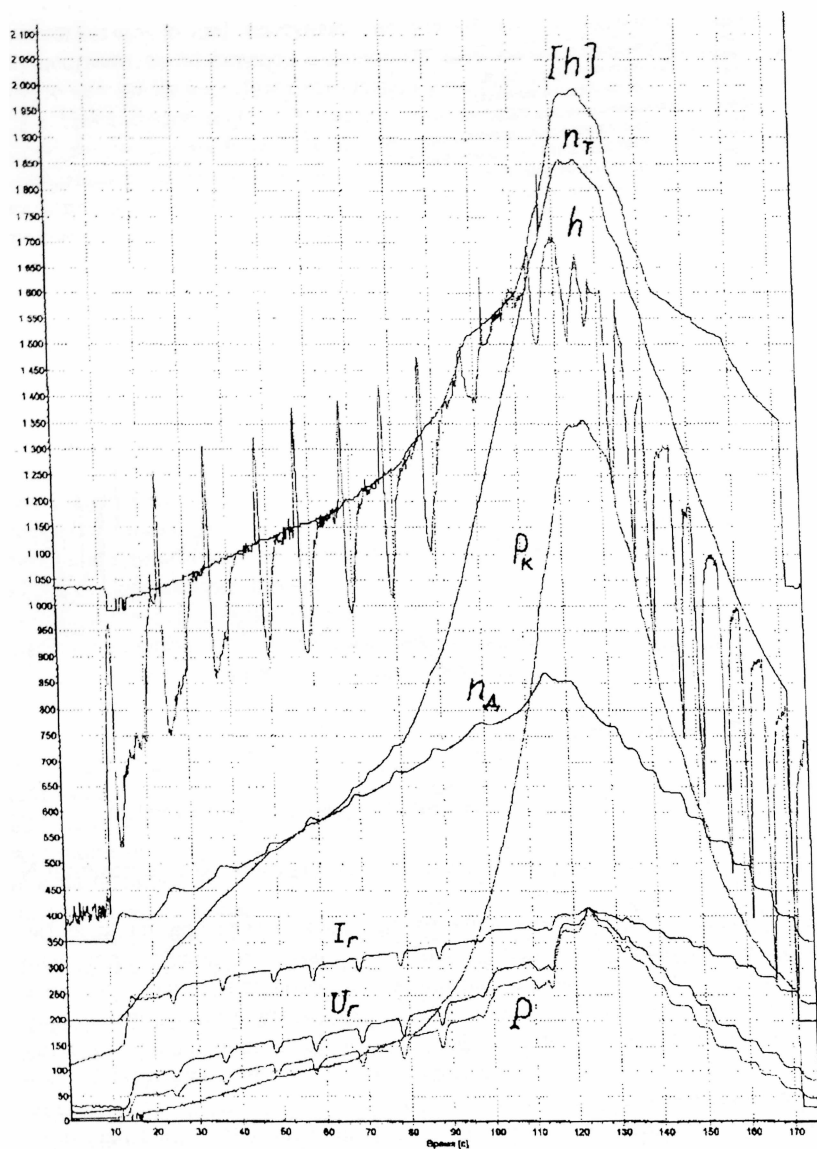


Рис. 13. Процесс управления тепловозом (полунатурное моделирование)

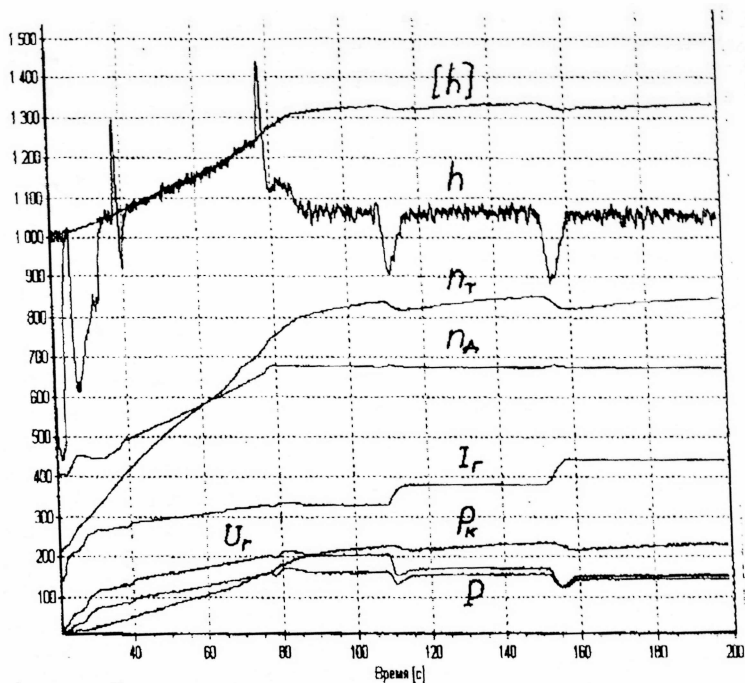


Рис. 14. Процесс регулирования при изменении момента сопротивления

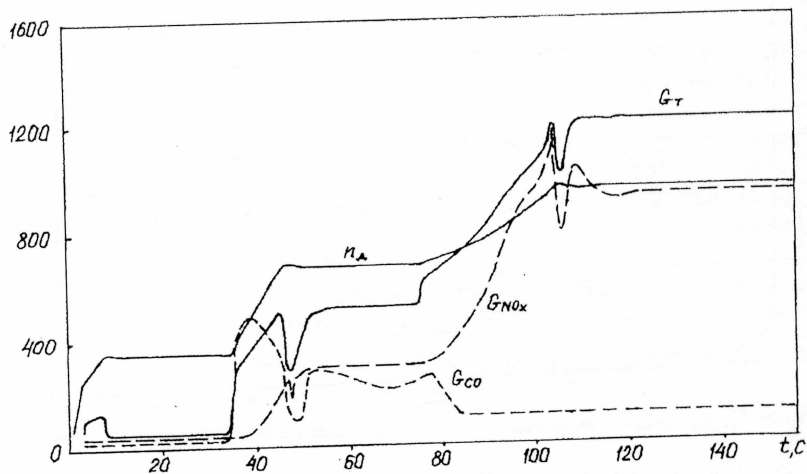


Рис. 15. Процессы изменения расходов топлива, оксидов азота и углерода

позиции КМ. Заметное влияние на переходные процессы изменения основных параметров энергетической установки тепловоза оказывает коэффициент пропорциональной составляющей  $k_{п12}$ . Уменьшение  $k_{п12}$  (рис. 16) приводит к вялому протеканию процесса перемещения реек ТНВД  $h(t)$ .

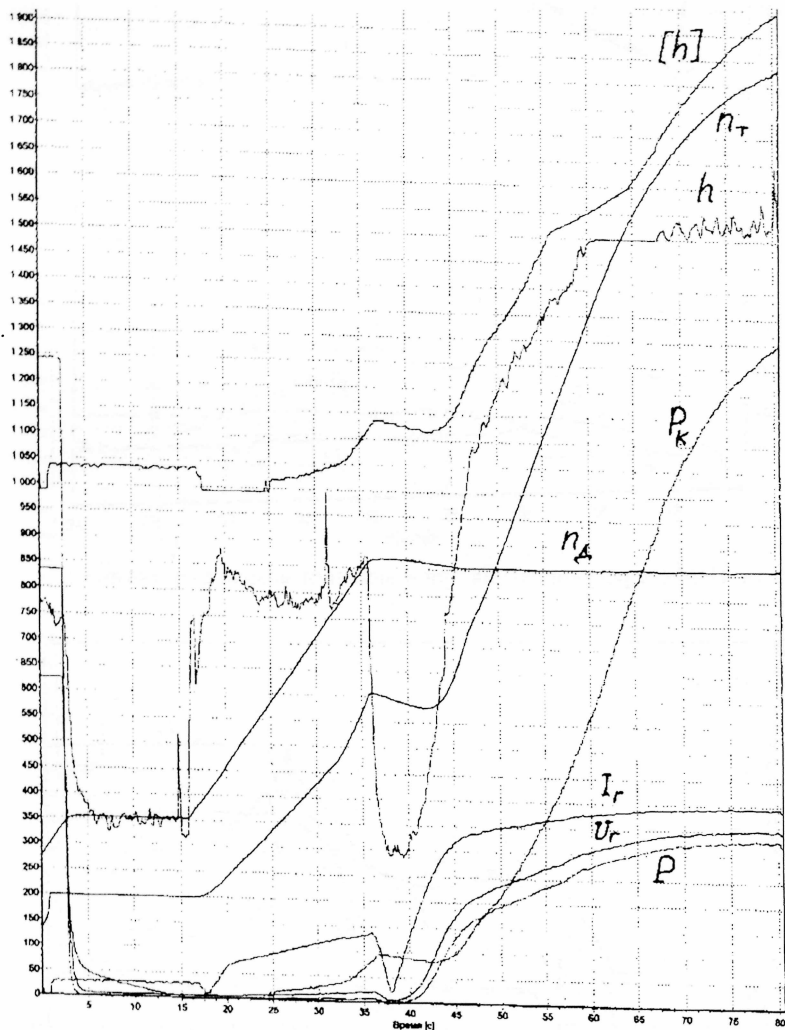


Рис. 16. Переходные процессы САУ при изменении настроек регулятора

Рейка не доходит до положения ограничения. Происходит значительный по величине и длительный по времени провал положения реек после выхода частоты вращения  $n_d$  на значение уставки, соответствующей двенадца-

той позиции КМ. Этот провал вызывает замедление роста давления наддува  $p_K$  и уменьшение соответствующего ограничения реек по давлению наддува. Восстановление частоты вращения после превышения значения уставки происходит более медленно. Таким образом, уменьшение  $k_{п12}$  приводит к ухудшению качества процессов регулирования частоты вращения вала дизель-генератора.

На третьем этапе исследования осуществлялось изменение коэффициентов пропорциональной  $k_{пм}$  и интегральной  $k_{им}$  составляющих ПИ закона регулирования канала регулирования мощности, действующего кратковременно после окончания режима разгона. Моделирование показало, что уменьшение незначительно влияет на протекание процессов регулирования.

Исследовалось также одновременное изменение настроек канала регулирования мощности, действующего кратковременно после окончания режима разгона и канала регулирования частоты вращения вала дизель-генератора при разгоне  $k_{пр}$ .

В целом, анализ результатов проведённого методом полунатурного моделирования исследования варьирования настроек каналов регулятора показал, что изменение настроек регулятора оказывает определённое влияние на процесс перемещения реек ТНВД, непосредственно связанных с ИУ регулятора. При этом переходные процессы остальных параметров энергетической установки тепловоза изменяются незначительно, что можно объяснить механической инерционностью системы газотурбинного наддува и приводимого в движение поезда – это влияние оказывается на энергетическую установку через частоту вращения валов тяговых ЭД, связанных через редукторы с колёсными парами тепловоза. Другая причина полученного эффекта заключается в том, что важным элементом алгоритма работы регулятора, во многом определяющим протекание переходных процессов, является ограничение темпа набора частоты вращения вала дизель-генератора.

Рассмотрим возможные пути повышения эффективности управления энергетической установкой тепловоза, которые целесообразно рекомендовать для исследования методом полунатурного моделирования на предприятиях, занимающихся разработкой и производством элементов систем управления тепловозных дизелей.

Выбор настроек системы управления целесообразно проводить, приняв в качестве критерия усреднённый показатель в форме

$$I = \sum_{i=1}^n k_i G_{топли} + \sum_{i=1}^n k_i G_{тi}, \text{ где } n - \text{ количество исследуемых режимов, } k_i - \text{ весо-}$$

вой коэффициент  $i$ -го режима.  $G_r = \sum_{j=1}^m k_{гj} G_j$  - суммарный расход токсичных

компонентов на  $i$ -ом режиме, где  $m$  – количество токсичных компонентов,  $k_{гj}$  – весовые коэффициенты токсичных компонентов.

В случае, когда нормы превышены по одному из токсичных компонентов, например для дизелей – по  $\text{NO}_x$ , в качестве критерия качества удобно рассматривать произведение  $I = \sum_{i=1}^n G_{\text{топл}} G_{\text{т}} \cdot$

При оптимизации переходных процессов САУ, наряду с критериями экономичности и экологии, следует рассматривать также критерии качества протекания процессов: время переходного процесса (быстродействие САУ), максимальное отклонение регулируемого параметра (заброс), тип процесса (апериодический или колебательный) или интегральные оценки процесса в целом, основанные на площади под кривой процесса. Обычно, наибольший эффект достигается при использовании комплексных критериев.

Проведён анализ следующих пути совершенствования алгоритмов регулирования, направленных на повышения качества переходных процессов САУ:

- использование на режимах работы САУ по управлению и регулированию регулятора переменной структуры с введением в закон регулирования дифференциальной составляющей;
- использование комбинированного регулирования, сочетающего принципы регулирования по отклонению и возмущению (условиям движения поезда);
- переход на более простые схемы ИУ регулятора частоты вращения с реализацией необходимых преобразований программными средствами ЭБ;
- переход на регулирование скорости поезда, как конечного результата функционирования энергетической установки и САУ тепловоза.

Реализация предложений по улучшению показателей экономичности и токсичности тепловозных дизелей связана с применением топливной аппаратуры перспективного типа. В МГТУ им. Н.Э. Баумана при участии автора разработаны перспективные варианты топливной аппаратуры дизелей.

В одном из вариантов ТНВД оснащён двумя рейками для раздельного воздействия на подачу и угол опережения впрыска (УОВТ) топлива. В другой конструкции УОВТ задаётся с помощью электромагнитного клапана, установленного в наполнительном канале между полостью плунжерной пары и нагнетательным клапаном. В результате модернизации данной схемы была разработана конструкция ТНВД с уменьшенными объёмами полости нагнетания, что позволило повысить давление впрыска. Проведённые безмоторные и моторные испытания предложенных вариантов ТНВД показали их работоспособность и эффективность влияния на показатели экономичности и токсичности рабочего процесса дизеля. Развитием данного направления в топливной аппаратуре дизелей является использование разгруженных быстродействующих клапанов, установленных в нагнетательном канале ТНВД.

Разработанные средства полунатурного моделирования в виде стенда с динамическими моделями комбинированного дизеля и энергетической

установки позволяют предприятиям, проектирующим и выпускающим элементы автоматики для транспортных установок, вносить необходимые конструктивные и программные изменения в структуру САУ и путём полунатурного моделирования проводить исследование предложенных в рамках данной работы и других перспективных вариантов построения систем управления.

Стенд полунатурного моделирования реализован на базе программируемых устройств, что обеспечивает гибкость структуры стенда и возможность его программной перенастройки на различные типы энергетических и других промышленных установок. При создании соответствующих динамических моделей разработанный базовый вариант стенда может быть адаптирован для полунатурного моделирования в реальном времени установившихся и динамических режимов работы технических устройств широкого назначения. Стенд предназначен, прежде всего, для разработки, отладки и настройки конструктивных узлов, алгоритмов работы, аппаратурных и программных средств элементов САУ техническими устройствами и технологическими процессами.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В результате проведённых теоретических и экспериментальных исследований разработаны методы и средства, направленные на повышение эффективности работы дизелей и качества процессов управления ими на динамических режимах. По результатам диссертационной работы сделаны следующие основные выводы.

1. В современных условиях сокращения сроков выпуска новых образцов двигателей разработка систем управления проводится одновременно с созданием самого двигателя. На этапе проектирования, когда элементы САУ уже реализованы аппаратурно и конструктивно, а двигатель физически ещё не существует, целесообразно продолжать разработку и отладку системы управления методом полунатурного моделирования, сопрягая натурные устройства автоматики с динамической компьютерной моделью двигателя, которая имитирует его функционирование в реальном времени. Полунатурное моделирование даёт возможность также экономить средства, затрачиваемые на испытания двигателей.

2. Анализ существующих математических моделей комбинированных дизелей показал, что они не отвечают требованиям моделирования в реальном времени. Для анализа особенностей работы дизелей в динамике и обоснования подхода к составлению математической динамической модели дизеля для полунатурного моделирования проведено экспериментальное исследование одноцилиндрового отсека дизеля размерности 26/26 с имитацией динамических режимов. Методика проведения эксперимента предусматривает подвод воздуха в цилиндр двигателя от постороннего источника, чем обеспечивается независимое изменение параметров рабочего процесса, соответствующее условиям неустановившимся режимам работы дизеля.

3. По результатам экспериментов составлена динамическая модель дизеля 16ЧН26/26 как привода генератора переменного тока и проведено расчётное исследование влияния на переходные процессы САУ параметров регулятора, дизеля и системы приёмистости с целью повышения качества процессов регулирования дизель-генератора.

4. Анализ характеристик дизеля в условиях работы на неустановившихся режимах показал, что при составлении универсальной динамической модели целесообразно формировать функциональные зависимости для таких величин, как индикаторный КПД, коэффициент наполнения и др., которые могут быть получены при стандартных испытаниях дизеля.

5. Предложена методика составления динамической математической модели комбинированного дизеля для полунатурного моделирования. Изменения основных параметров элементов комбинированного дизеля описываются дифференциальными уравнениями динамического баланса потоков энергии и массы газа. Для достижения высокой скорости расчёта часть параметров рабочего процесса дизеля задана в виде функциональных зависимостей от других (первичных) параметров. В эту группу включены коэффициенты, характеризующие отличие реальных рабочих процессов от теоретических, и параметры рабочего процесса, определение которых требует значительного времени при расчётах: индикаторный КПД дизеля, коэффициент наполнения, адиабатический КПД компрессора, эффективный КПД турбины и др.

6. На основе анализа методов интерполяции и аппроксимации выбран способ описания функциональных зависимостей параметров рабочих процессов в виде полиномов, коэффициенты которых определены методом наименьших квадратов. Выбор необходимых полиномов осуществлялся из условий высокой точности приближения к исходным данным и соответствия физической картине рабочего процесса комбинированного дизеля.

7. По предложенной методике составлены динамические математические модели дизеля 16ЧН26/26 и энергетической установки тепловоза 2ТЭ116, имитирующие неустановившиеся режимы работы в реальном времени.

8. Для осуществления цифрового полунатурного моделирования разработан комплекс аппаратных и программных средств, образующих стенд полунатурного моделирования. В натурную часть стенда входят микропроцессорный контроллер, исполнительное устройство и другие элементы САУ. Цифровая компьютерная модель описывает динамические свойства комбинированного двигателя и транспортной установки. Связь между натурной и модельной частями стенда в реальном времени осуществляется устройством сопряжения.

9. Разработано программное обеспечение функционирования цифровых моделей дизеля и энергетической установки и работы устройства сопряжения стенда по преобразованию и формированию сигналов информационных потоков между натурной и модельной частями стенда.

10. Проведено полунатурное моделирование характерных режимов работы дизеля 16ЧН26/26 в составе энергетической установки тепловоза 2ТЭ116. Сравнение результатов моделирования динамических режимов с аналогичными экспериментальными переходными процессами изменения основных параметров дизеля и энергетической установки показало работоспособность разработанного стенда и адекватность описания рабочих процессов комбинированного дизеля и энергетической установки составленными моделями.

11. Методом полунатурного моделирования проведено исследование влияния настроек регулятора на качество процессов управления и регулирования энергетической установки тепловоза при изменении позиции КМ (канал управления) и момента сопротивления движению поезда (канал регулирования).

12. Проведён анализ методов повышения эффективности работы тепловозного дизеля на динамических режимах.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Крутов В.И., Кузнецов А.Г. Перспективы развития автоматического регулирования автомобильных дизелей // Автомобильная промышленность. 1987. № 2. С. 10-11.
2. Система регулирования угла опережения впрыскивания топлива/ А.Г. Кузнецов [и др.] // Автомобильная промышленность. 1994. № 9. С 9-12.
3. Анализ методов составления математической модели дизеля с газотурбинным наддувом/ В.И. Крутов [и др.] // Известия вузов. Машиностроение. 1994. № 10-12. С. 62-69.
4. Кузнецов А.Г. Анализ критериев экономичности и токсичности работы транспортных двигателей // Двигателестроение. 1996. № 2. С. 67-68.
5. Проблемы создания и совершенствования систем управления дизелей/ А.Г. Кузнецов [и др.] // Известия вузов. Машиностроение. 1999. № 5-6. С. 76-87.
6. Улучшение экологических показателей транспортных дизелей путём управления процессом топливоподачи/ А.Г. Кузнецов [и др.] // Вестник МГТУ. Машиностроение. 2000. № 2. С. 62-75.
7. Математическая модель системы автоматического управления дизелем с турбонаддувом/ А.Г. Кузнецов [и др.] // Вестник МГТУ. Машиностроение. 2000. № 4. С. 106-119.
8. ТНВД с электронным управлением топливоподачей / А.Г. Кузнецов [и др.] // Автомобильная промышленность. 2000. № 10. С. 11-15.
9. Кузнецов А.Г., Трифонов В.Л., Боковиков А.Н. Вопросы разработки стенда полунатурного моделирования динамических режимов систем управления. Научно-техническая конференция 3-и Луканинские чтения. Решение энергетических проблем в автотранспортном комплексе: Тезисы докладов. МАДИ (ГТУ). М.: 2007. С. 63-64.
10. Кузнецов А.Г., Трифонов В.Л. Разработка стенда полунатурного моделирования энергетической установки с дизелем. Актуальные проблемы

развития поршневых ДВС: материалы межотраслевой научно-технической конференции. СПб.: Издательский центр СПбГМТУ. 2008. С. 96-98.

11. Кузнецов А.Г., Лиходед Е.И. Описание функциональных зависимостей динамической модели дизеля полиномами. Актуальные проблемы развития поршневых ДВС: материалы межотраслевой научно-технической конференции. СПб.: Издательский центр СПбГМТУ. 2008. С. 98-101.

12. Кузнецов А.Г. Стенд полунатурного моделирования динамических режимов энергетических установок с дизелями // Вестник МГТУ. Машиностроение. 2008. № 4. С. 25-29.

13. Система регулирования угла опережения впрыскивания топлива в цилиндр дизеля / А.Г. Кузнецов [и др.] // Автомобильная промышленность. 2009. № 2. С. 9-12.

14. Кузнецов А.Г. Динамическая модель энергетической установки теплового двигателя // Вестник МГТУ. Машиностроение. 2009. № 3. С. 49-56.

15. Боковиков А.Н., Кузнецов А.Г. Математическая модель системы воздухооборудования автомобильного дизеля для полунатурного моделирования его динамических режимов // Грузовик. 2009. № 11. С. 30-33.

16. Боковиков А.Н., Кузнецов А.Г. Результаты полунатурного моделирования режимов работы автомобильного дизеля // Грузовик. 2009. № 12. С. 15-17.

17. Кузнецов А.Г. Динамическая модель дизеля // Автомобильная промышленность. 2010. № 2. С. 30-33.

Подписано к печати 11.03.10. Заказ № 140  
Объем 2,0 печ.л. Тираж 100 экз.  
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5  
(499) 263-62-01