

На правах рукописи

**Шлёнов Матвей Ильич**

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИ-  
СТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ**

Специальность 05.04.02 - Тепловые двигатели

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2008

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

Научный руководитель:

доктор технических наук,  
профессор Марков В.А.

Официальные оппоненты:

Ведущее предприятие:

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2008 г. в \_\_\_\_ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при Московском государственном техническом университете 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.

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

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук,  
доцент

Тумашев Р.З.

## СПИСОК ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

ВСХ - внешняя скоростная характеристика;

ОГ - отработавшие газы;

ПИД - закон регулирования – пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования;

САР - система автоматического регулирования;

САУ - система автоматического управления;

ТНВД - топливный насос высокого давления.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Достижение требуемых топливно-экономических и экологических показателей невозможно без дальнейшего совершенствования системы топливоподачи, оснащенной САР частоты вращения дизеля. Сложность решения этой проблемы усугубляется многорежимностью транспортного дизеля и преобладанием неустановившихся режимов в процессе эксплуатации двигателя.

Особый интерес представляет оценка показателей токсичности ОГ на неустановившихся режимах работы (в переходных процессах). Проведение экспериментальных исследований с целью определения этих показателей в переходных процессах усложняется рядом факторов. Одним из этих факторов является практическое отсутствие измерительной аппаратуры, позволяющей определять показатели токсичности ОГ в реальном масштабе времени. Для обеспечения повторяемости переходных процессов необходимо тщательно выдерживать показатели дизеля на исходном режиме, что увеличивает трудоемкость проведения таких исследований.

В связи с этим, при совершенствовании САР частоты вращения дизеля целесообразно использовать расчетно-экспериментальные методы исследования, позволяющие на базе экспериментальных данных, полученных на установившихся режимах, определять необходимые показатели транспортного дизеля на неустановившихся режимах его работы и в наиболее характерных переходных процессах. Такое совершенствование САР частоты вращения дизеля целесообразно проводить с использованием методов математического моделирования. С помощью предлагаемых в диссертационной работе расчетных методов можно провести всесторонний анализ параметров дизеля в переходных процессах и выдать рекомендации по выбору параметров САР частоты вращения дизеля и изменению существующих настроек системы регулирования с целью улучшения эффективных и экологических показателей транспортных дизелей. Результаты этих исследований могут быть использованы при разработке и доводке систем регулирования частоты вращения, обеспечивающих перспективные требования к токсичности ОГ газов при достижении необходимых показателей дизелей по топливной экономичности.

**Цель работы.** Улучшение эксплуатационных показателей транспортно-го дизеля путем совершенствования системы автоматического регулирования частоты вращения.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель системы автоматического регулирования частоты вращения, позволяющая провести оценку токсичности отработавших газов в переходных процессах;
- разработана методика оценки суммарной токсичности отработавших газов в переходных процессах дизеля;
- разработана методика выбора параметров системы автоматического регулирования частоты вращения дизеля;
- разработана методика оценки расхода топлива и токсичности отработавших газов дизеля в автоколебательных процессах.

**Методы исследований.** Поставленная в работе цель достигается сочетанием теоретических и экспериментальных методов исследования. С помощью теоретических методов были проведены расчетные исследования переходного процесса разгона дизеля типа КамАЗ-740 с различной формой внешней скоростной характеристики, проведен выбор параметров системы автоматического регулирования частоты вращения дизеля, проведена оценка расхода топлива и токсичности отработавших газов дизеля в автоколебательных процессах. Экспериментальная часть работы заключалась в исследовании дизеля типа Д-246 дизель-генераторной установки с электронным регулятором, реализующим ПИД-закон регулирования.

**Достоверность и обоснованность** научных положений работы определяются:

- использованием фундаментальных законов и уравнений термодинамики, 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.

**Практическая ценность.** Разработан алгоритм и программа расчета переходного процесса с возможностью определения динамических характеристик и показателей токсичности ОГ. Предложена методика выбора параметров САР частоты вращения дизеля, обеспечивающая достижение наилучших показателей качества процесса регулирования. Разработаны методики оценки токсичности ОГ в переходных процессах, а также в автоколебательных процессах, позволяющие оптимизировать переходный процесс дизеля и минимизировать выбросы токсичных компонентов ОГ.

**Реализация результатов работы.** Работа проводилась в соответствии с планами госбюджетных и хоздоговорных работ лаборатории «Автоматика» НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана и кафедры «Теплофизика» (Э-6) МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты исследований внедрены в ЗАО «Форант-Сервис» и ЗАО «Дизель-КАР» (г. Москва).

**Апробация работы.** Диссертационная работа заслушана и одобрена на совместном заседании кафедр «Поршневые двигатели» и «Теплофизика» в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. По основным разделам диссертационной работы были сделаны доклады:

- на международном симпозиуме «Электроника и электрооборудование транспорта. Проблемы и пути решения», 22-24 июня 2004 г., Суздаль;

- на международной научно-технической конференции «3-и Луканинские чтения. Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе», 30-31 января 2007 г., Москва, ГТУ «МАДИ»;

- на международной научно-технической конференции «Двигатель-2007», посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, 19-21 сентября 2007 г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана;

- на Всероссийском научно-техническом семинаре (ВНТС) им. проф. В.И. Крутова по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок при кафедре «Теплофизика» (Э-6) МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2005, 2007 и 2008 г.г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 4 статьи и 6 материалов конференций, из них в журналах по списку ВАК – 2.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 164 страниц, включая 133 страниц основного текста, содержащего 49 рисунков, 7 таблиц. Список литературы включает 127 наименований на 13 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проведения работ, направленных на совершенствование САР частоты вращения транспортных дизелей, и дана общая характеристика диссертационной работы.

**В первой главе** проведен анализ требований, предъявляемых к транспортным дизелям в современных условиях. Показано, что приоритетными являются требования по топливной экономичности и токсичности ОГ. Рассмотрены функции САР дизеля, принципы их построения, возможные направления совершенствования САР частоты вращения дизелей.

Отмечено, что методики расчета переходных процессов дизелей достаточно полно разработаны в трудах отечественных ученых: Калиша Г.Г., Крутова В.И., Каца А.М., Настенко Н.Н., Левина М.И., Толшина В.И., Кринецкого И.И., Ковалевского Е.С., Грунауэра А.А., Долганова К.Е. и ряда других. Они позволяют оптимизировать характеристики САР и дизеля в целом, в частности форму ВСХ, а также оценить изменение параметров дизеля в переходных процессах и его динамические качества. Но, как правило, в этих методиках остаются неопределенными расход топлива и выбросы токсичных компонентов ОГ. Недостаточно изученным является и вопрос об оценке суммарной токсичности ОГ в переходных процессах, а также в автоколебательных про-

цессах дизеля. Практически отсутствуют методики выбора параметров САР и САУ.

На основании анализа состояния проблемы были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Разработка математической модели САР частоты вращения, позволяющей определять токсичность ОГ в переходных процессах.

2. Оценка влияния формы ВСХ на показатели токсичности и дымности ОГ дизеля в переходных процессах.

3. Разработка методики оценки суммарной токсичности ОГ дизеля в переходных процессах.

4. Разработка методики выбора параметров САР частоты вращения дизеля.

5. Разработка методики оценки расхода топлива и токсичности ОГ дизеля в автоколебательных процессах.

6. Проведение экспериментальных исследований дизеля, оснащенного САР частоты вращения, имеющей показатели и настройки, определенные в теоретической части работы.

**Вторая глава** посвящена проблемам формирования ВСХ в транспортных дизелях. Отмечено, что в проведенных исследованиях недостаточное внимание уделено оценке влияния формы этой характеристики на токсичность ОГ. Представлена математическая модель САР частоты вращения комбинированного двигателя, состоящая из уравнений наиболее значимых элементов дизеля с турбонаддувом.

Поршневая части двигателя:

$$J_d d\omega_d / dt = M_d - M_c ;$$

впускной трубопровод

$$[V_{вп} / (R_v T_k)] dp_k / dt = G_k - G_d ;$$

турбокомпрессор

$$J_t d\omega_t / dt = M_t - M_k ;$$

выпускной трубопровод

$$[V_{вып} / (R_r T_r)] dp_r / dt = G_r - G_t ,$$

где  $J_d$  и  $J_t$  – моменты инерции валов дизеля с потребителем и турбокомпрессора соответственно;  $\omega_d$  и  $\omega_t$  – частоты вращения валов дизеля и турбокомпрессора;  $M_d$ ,  $M_c$ ,  $M_t$ ,  $M_k$  – моменты: крутящий (эффективный) дизеля, сопротивления потребителя, развиваемый турбиной, потребляемый компрессором;  $V_{вп}$  и  $V_{вып}$  – объемы впускного и выпускного трубопроводов;  $p_k$  и  $p_r$  – давления наддувочного воздуха на выходе из компрессора и ОГ на входе в турбину;  $R_v$  и  $R_r$  – газовые постоянные наддувочного воздуха и ОГ;  $T_v$  и  $T_r$  – температуры наддувочного воздуха и ОГ;  $G_d$ ,  $G_k$ ,  $G_r$ ,  $G_t$  – расходы воздуха через двигатель и компрессор, газов через двигатель и турбину.

Уравнение исполнительного механизма, перемещающего дозирующий орган системы топливоподачи на величину  $\eta = \Delta h_p / h_{po}$ :  $T_{им}(d\eta/dt) + \eta = k_{им} U_{упр}$ .

Пропорционально –интегрально -дифференциальный (ПИД) закон управления:  $U_{упр} = k_p U_\phi + k_i \int U_\phi dt + k_d d U_\phi / dt$ .

Значения параметров двигателя, входящих в правые части уравнений, определялись в виде следующих функциональных зависимостей:

$$M_d = f(\omega_d, h_p, p_k); \quad M_T = f(\omega_T, h_p, p_T); \quad M_K = f(\omega_T, p_k); \\ G_K = f(\omega_T, p_k); \quad G_d = f(\omega_d, p_k); \quad G_T = f(\omega_d, p_T, p_k); \quad G_T = f(p_T, h_p).$$

При расчетных исследованиях использовано и ряд дополнительных функциональных зависимостей, в частности, для концентраций в ОГ оксидов азота, монооксида углерода, углеводородов и дымности ОГ:

$$C_{NOx} = f(\omega_d, h_p, p_k); \quad C_{CO} = f(\omega_d, h_p, p_k); \quad C_{CHx} = f(\omega_d, h_p, p_k); \quad K_x = f(\omega_d, h_p, p_k).$$

Для определения данных функциональных зависимостей была разработана программа аппроксимации экспериментальных данных исследуемого дизеля типа КамаАЗ-740 полиномиальными зависимостями, использующая метод наименьших квадратов. Программа рассчитывает коэффициенты полинома, аппроксимирующего заданный массив исходных точек. В частности, полиномиальная зависимость для описания функциональных зависимостей содержания в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$ , углеводородов  $C_{CHx}$  и дымности ОГ  $K_x$  использованы полиномы вида:

$$C_{NOx} = -0,68942 + 0,0047573 \cdot \omega_d + 130,260 \cdot h_p - 5,8697 \cdot p_k - 0,54951 \cdot \omega_d \cdot h_p + \\ 0,020 \cdot \omega_d \cdot p_k + 810,09 \cdot h_p \cdot p_k - 0,00000614 \cdot \omega_d^2 - 6023,1 \cdot h_p^2 - 20,46 \cdot p_k^2;$$

$$C_{CO} = 1,2281 - 0,010641 \cdot \omega_d - 271,60 \cdot h_p + 12,737 \cdot p_k + 1,0985 \cdot \omega_d \cdot h_p - \\ 0,026629 \cdot \omega_d \cdot p_k + 290,18 \cdot h_p \cdot p_k + 0,000032162 \cdot \omega_d^2 + 13667,0 \cdot h_p^2 - 107,52 \cdot p_k^2 + \\ 2,0081 \cdot \omega_d \cdot h_p \cdot p_k - 11,627 \cdot 10^{-8} \cdot \omega_d^3 + 79014,0 \cdot h_p^3 + 259,17 \cdot p_k^3 - 0,0012248 \cdot \omega_d^2 \cdot h_p + \\ 0,00041418 \cdot \omega_d^2 \cdot p_k - 44,6 \cdot \omega_d \cdot h_p^2 - 84901,0 \cdot h_p^2 \cdot p_k - 0,53873 \cdot \omega_d \cdot p_k^2 + \\ 7118,8 \cdot h_p \cdot p_k^2;$$

$$C_{CHx} = 0,091397 + 0,000014919 \cdot \omega_d - 13,4840 \cdot h_p + 0,094903 \cdot p_k - 0,078545 \cdot \omega_d \cdot h_p + \\ 0,020369 \cdot \omega_d \cdot p_k + 165,21 \cdot h_p \cdot p_k - 0,0000053221 \cdot \omega_d^2 + 281,63 \cdot h_p^2 - 20,197 \cdot p_k^2;$$

$$K_x = -126,170 + 0,91023 \cdot \omega_d - 780,6 \cdot h_p + 799,59 \cdot p_k - 30,139 \cdot \omega_d \cdot h_p - 3,4768 \cdot \omega_d \cdot p_k - \\ - 192350,0 \cdot h_p \cdot p_k - 0,0007332 \cdot \omega_d^2 + 1395800,0 \cdot h_p^2 + 8410,6 \cdot p_k^2.$$

Визуализация этих зависимостей в трехмерном пространстве представлена на рис. 1.

Для расчета переходных процессов была разработана программа, позволяющая решать систему дифференциальных уравнений САР методом Эйлера. С использованием разработанной математической модели проведено исследование влияния формы внешней скоростной характеристики на показатели дизеля типа КамаАЗ-740 в переходном процессе разгона.

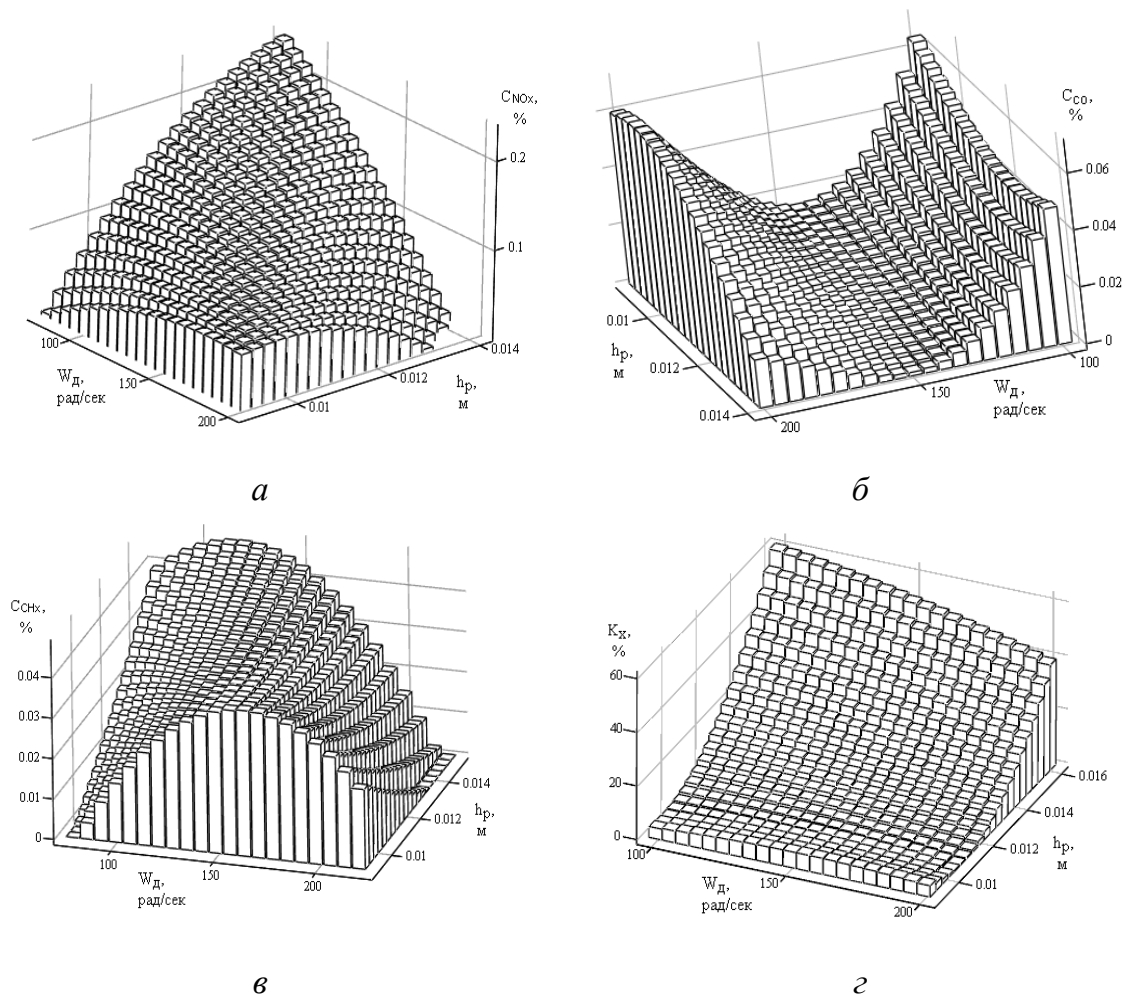


Рисунок 1. Визуализация характеристик токсичности ОГ дизеля типа КамАЗ-740 от его частоты вращения  $\omega_d$  и положения рейки топливного насоса  $h_p$  при давлении наддува  $p_k=0,12$  МПа: *а* – оксидов азота; *б* – монооксида углерода; *в* – несгоревших углеводородов; *г* – дымности ОГ

На первом этапе расчетных исследований определялось влияние наклона участка отрицательной коррекции ВСХ на показатели дизеля. При этом диапазон корректирования топливоподачи на участке отрицательной коррекции оценивался коэффициентом отрицательного корректирования  $K_{Me\text{ отр}} = M_{e\text{ п min}} / M_{e\text{ ном}}$ . Исследовались четыре варианта наклона участка отрицательной коррекции с коэффициентами  $K_{Me\text{ отр}}=1,24$ ; 1,00; 0,83; 0,65. Результаты расчетов (рис. 2) свидетельствуют о том, что при изменении наклона участка отрицательной коррекции, соответствующее изменению коэффициента  $K_{Me\text{ отр}}$  от 1,24 до 0,65, не приводит к существенному изменению динамических качеств дизеля. При допустимой нестабильности частоты вращения  $\omega_\epsilon=1,5\%$  во всех четырех исследованных случаях время переходного процесса разгона дизеля составило примерно  $t_n=6$  с. Вместе с тем, наклон участка отрицательной коррекции ВСХ оказывает заметное влияние на показатели токсичности и дымности ОГ (рис. 3).



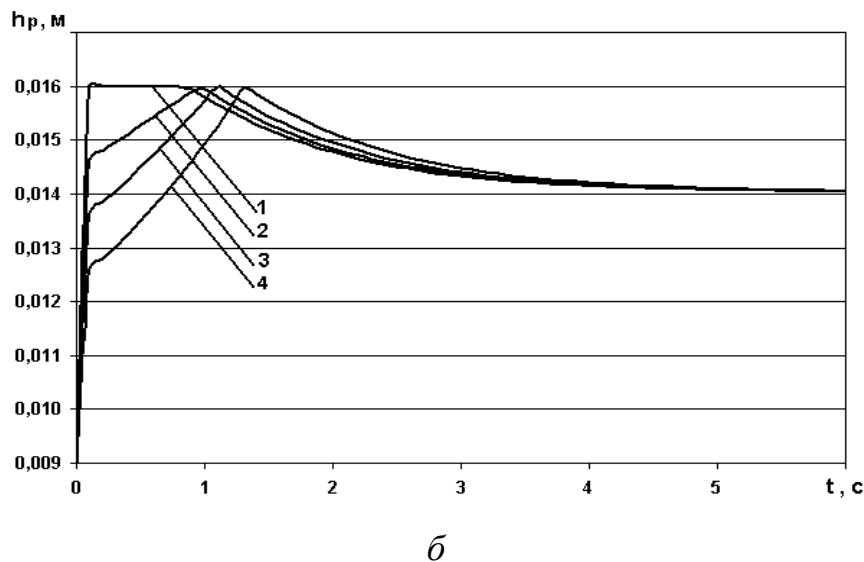
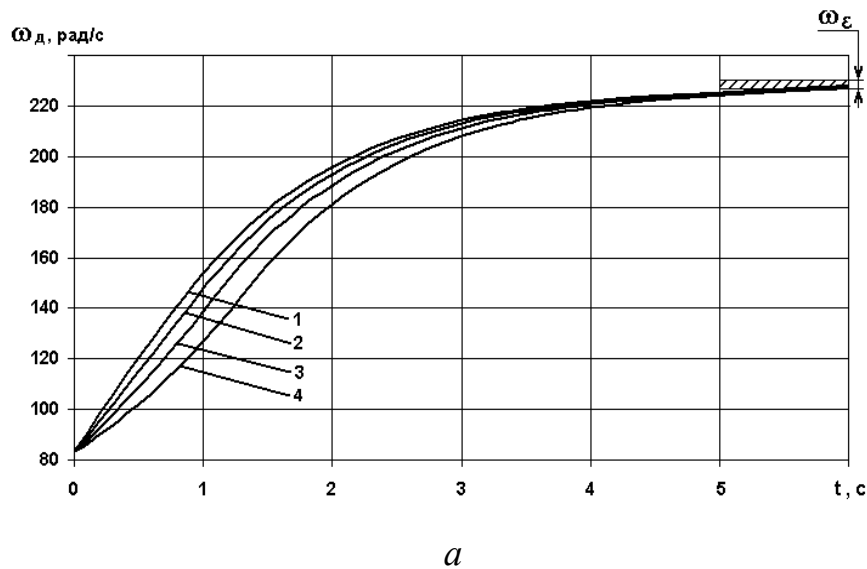


Рисунок 2. Изменение параметров дизеля типа КамАЗ-740 в переходном процессе его разгона: *a* - частоты вращения дизеля  $\omega_d$ ; *б* - положения дозирующей рейки ТНВД; 1 -  $h_{p\ n\ min}=16,0$  мм ( $K_{Me\ отр}=1,24$ ); 2 -  $h_{p\ n\ min}=14,6$  мм ( $K_{Me\ отр}=1,00$ ); 3 -  $h_{p\ n\ min}=13,6$  мм ( $K_{Me\ отр}=0,83$ ); 4 -  $h_{p\ n\ min}=12,6$  мм ( $K_{Me\ отр}=0,65$ )

Максимальное значение содержания оксидов азота  $C_{NO_x}$  в ОГ дизеля типа КамАЗ-740 в переходном процессе отмечено при  $h_{p\ n\ min}=16,0$  мм и составляет  $C_{NO_x}=0,23$  % (см. рис. 3,*a*). Но можно отметить, что осредненные для переходного процесса разгона дизеля значения концентрации  $C_{NO_x}$  в ОГ для исследованных вариантов ВСХ отличаются незначительно.

Зависит от формы ВСХ и содержание в ОГ монооксида углерода  $C_{CO}$  (см. рис. 3,*б*). Однако и в этом случае осредненные для переходного процесса разгона дизеля значения концентрации  $C_{CO}$  в ОГ для исследованных вариантов ВСХ отличаются незначительно.

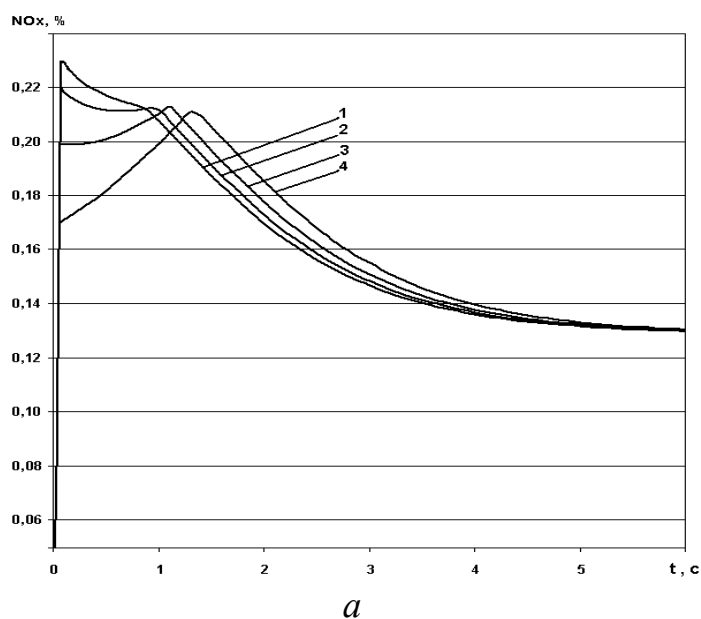
Более значительное влияние форма ВСХ оказывает на содержание в ОГ несгоревших углеводородов  $C_{CH_x}$ . Особенно это заметно на начальной стадии переходного процесса (при  $t < 1,5-2,0$  с, см. рис. 3,*в*). Для исследованных вари-

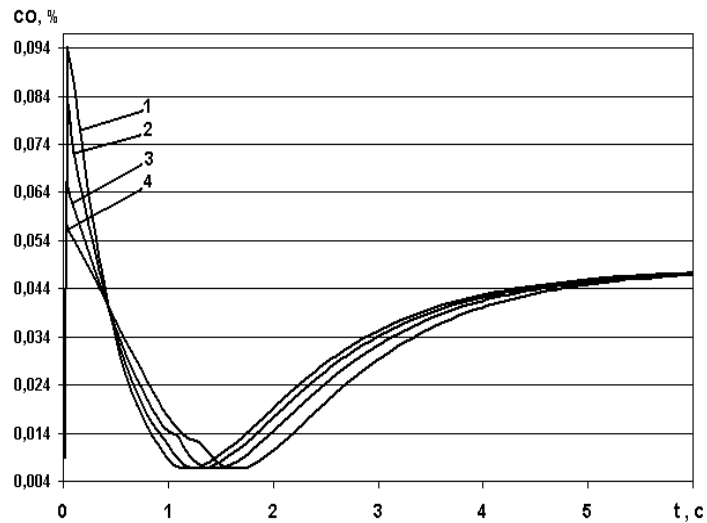
антов ВСХ при фиксированных значениях времени  $t$  концентрации  $C_{\text{СНХ}}$  могут отличаться в 1,5 раза. С этой точки зрения наиболее неблагоприятна ВСХ с  $h_{\text{п min}}=16,0$  мм, при реализации которой в диапазоне времени  $t=0-1$  отмечена наибольшая концентрация несгоревших углеводородов в ОГ -  $C_{\text{СНХ}}=0,048-0,050$  %.

От наклона участка отрицательной коррекции в наибольшей степени зависит дымность ОГ  $K_x$  (см. рис. 3,2). Так, при изменении коэффициента  $K_{\text{Ме отр}}$  от 1,24 до 0,65 максимальная дымность ОГ в переходном процессе снижается с 60 до 36 % по шкале Хартриджа, т.е. примерно в 1,7 раза.

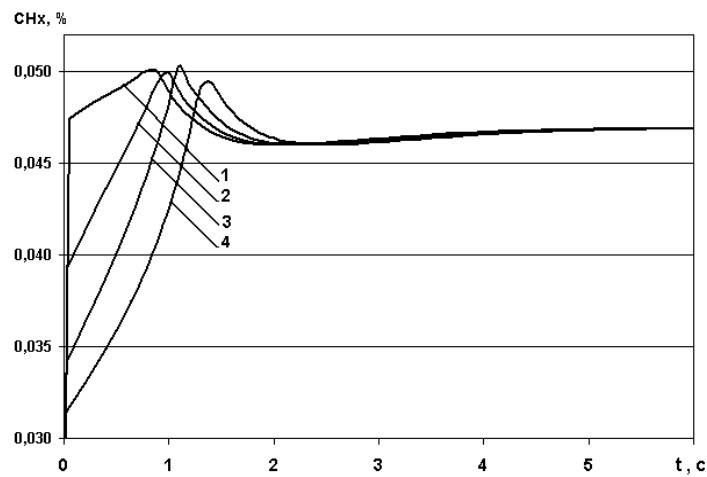
На втором этапе исследований определялось влияние наклона участка положительной коррекции ВСХ на показатели дизеля. При этом диапазон корректирования топливоподачи на участке положительной коррекции оценивался коэффициентом положительного корректирования  $K_{\text{Ме пол}} = M_{\text{е max}}/M_{\text{е ном}}$ . При расчетах переходных процессов дизеля типа КамАЗ-740 исследовались четыре варианта наклона участка положительной коррекции с коэффициентами  $K_{\text{Ме пол}}=1,50; 1,35; 1,20; 1,05$ . При этом диапазон корректирования топливоподачи на участке отрицательной коррекции был практически неизменным и равным  $K_{\text{Ме отр}} = M_{\text{е n min}}/M_{\text{е ном}}=1,00$ .

Результаты расчетов переходного процесса разгона дизеля КамАЗ-740, представленные на рис. 4, свидетельствуют о том, что изменение диапазона корректирования топливоподачи на участке положительной коррекции, соответствующего изменению коэффициента  $K_{\text{Ме пол}}$  от 1,05 до 1,50, сопровождается сокращением продолжительности переходного процесса  $t_{\text{п}}$  с 8,2 до 5,4 с (при допустимой нестабильности частоты вращения  $\omega_{\text{е}}=1,5$  %). Для базового варианта (характеристики 2 на рис. 4) величина  $t_{\text{п}}$  составила 6,1 с.

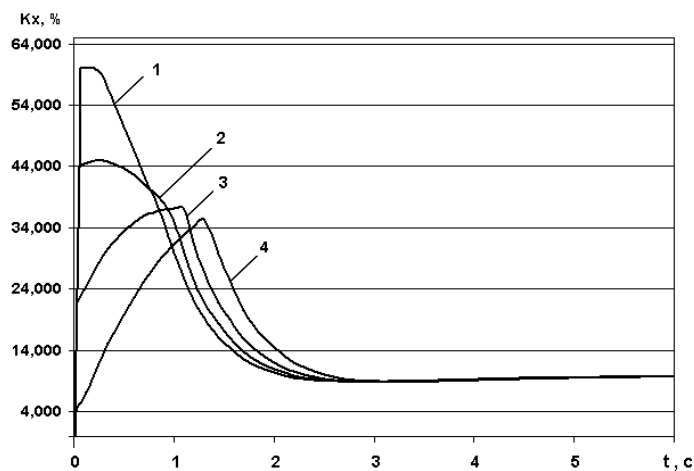




*б*

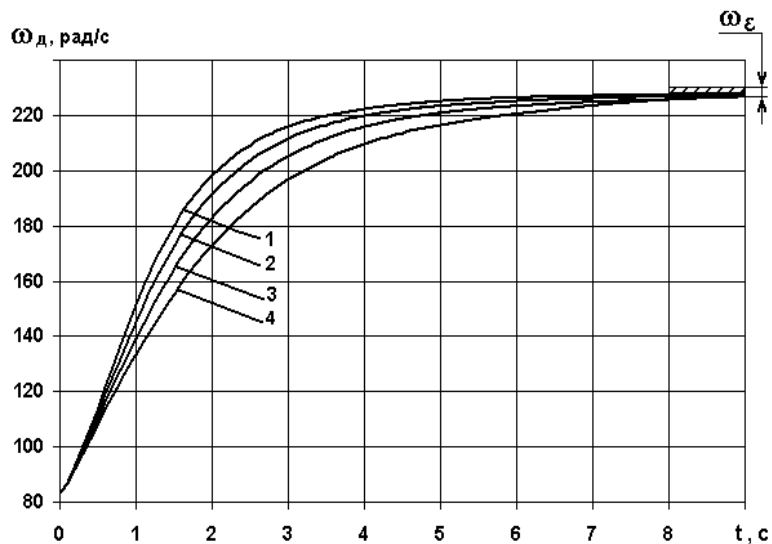


*в*

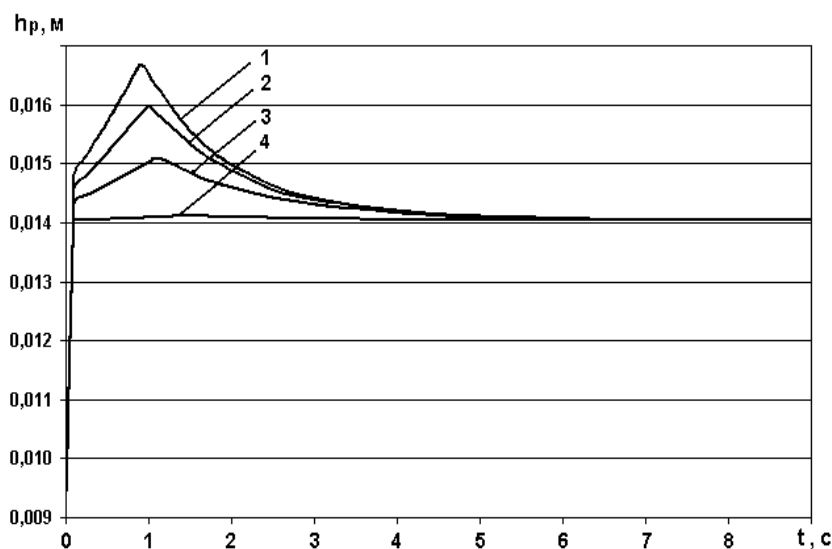


*г*

Рисунок 3. Изменение параметров дизеля типа КамАЗ-740 в переходном процессе его разгона: *а* - содержания в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$ ; *б* - монооксида углерода  $C_{CO}$ ; *в* - несгоревших углеводородов  $C_{CHx}$ ; *г* - дымности ОГ  $K_x$ ; 1 -  $h_{p \text{ n min}}=16,0$  мм ( $K_{Me \text{ отп}}=1,24$ ); 2 -  $h_{p \text{ n min}}=14,6$  мм ( $K_{Me \text{ отп}}=1,00$ ); 3 -  $h_{p \text{ n min}}=13,6$  мм ( $K_{Me \text{ отп}}=0,83$ ); 4 -  $h_{p \text{ n min}}=12,6$  мм ( $K_{Me \text{ отп}}=0,65$ )



*a*



*б*

Рисунок 4. Изменение параметров дизеля типа КамАЗ-740 в переходном процессе его разгона: *a* - частоты вращения дизеля  $\omega_d$ ; *б* - положения дозирующей рейки ТНВД  $h_p$ ; 1 -  $h_{p\text{Mmax}}=16,7$  мм ( $K_{\text{Ме пол}}=1,50$ ); 2 -  $h_{p\text{Mmax}}=16,0$  мм ( $K_{\text{Ме пол}}=1,35$ ); 3 -  $h_{p\text{Mmax}}=15,1$  мм ( $K_{\text{Ме пол}}=1,20$ ); 4 -  $h_{p\text{Mmax}}=14,2$  мм ( $K_{\text{Ме пол}}=1,05$ )

Наклон участка положительной коррекции ВСХ оказывает заметное влияние и на показатели токсичности и дымности ОГ (см. рис. 5). При увеличении диапазона корректирования топливоподачи на участке положительной коррекции максимальные концентрации оксидов азота  $C_{\text{NOx}}$  в ОГ дизеля типа КамАЗ-740 в переходном процессе его разгона возрастают. Их максимальное содержание в ОГ  $C_{\text{NOx}} = 0,224$  % отмечено при коэффициенте приспособляемости  $K_{\text{Ме пол}} = 1,50$  (см. рис. 5,*a*). Вместе с тем, концентрации  $C_{\text{NOx}}$  в ОГ сравнительно слабо зависят от исследованных значений коэффициента приспособляемости  $K_{\text{Ме пол}}$ .

Содержание в ОГ монооксида углерода  $C_{CO}$  с увеличением диапазона корректирования топливоподачи на участке положительной коррекции также возрастает. Максимальная концентрация монооксида углерода в ОГ  $C_{CO}=0,081\%$  соответствует коэффициенту приспособляемости  $K_{Me\text{ пол}}=1,50$  (см. рис. 5,б). Однако и в этом случае осредненные для переходного процесса разгона дизеля значения концентрации  $C_{CO}$  в ОГ для исследованного диапазона положительного корректирования топливоподачи отличаются незначительно.

Более значительное влияние диапазон корректирования топливоподачи на участке положительной коррекции ВСХ оказывает на содержание в ОГ углеводородов  $C_{CHx}$ . Максимальная концентрация несгоревших углеводородов отмечена при коэффициенте приспособляемости  $K_{Me\text{ пол}}=1,50$  и составляет  $C_{CHx}=0,056\%$  (рис. 5,в). При уменьшении коэффициента приспособляемости до  $K_{Me\text{ пол}}=1,05$  максимальное значение  $C_{CHx}=0,046\dots 0,047\%$  достигается лишь в период окончания переходного процесса.

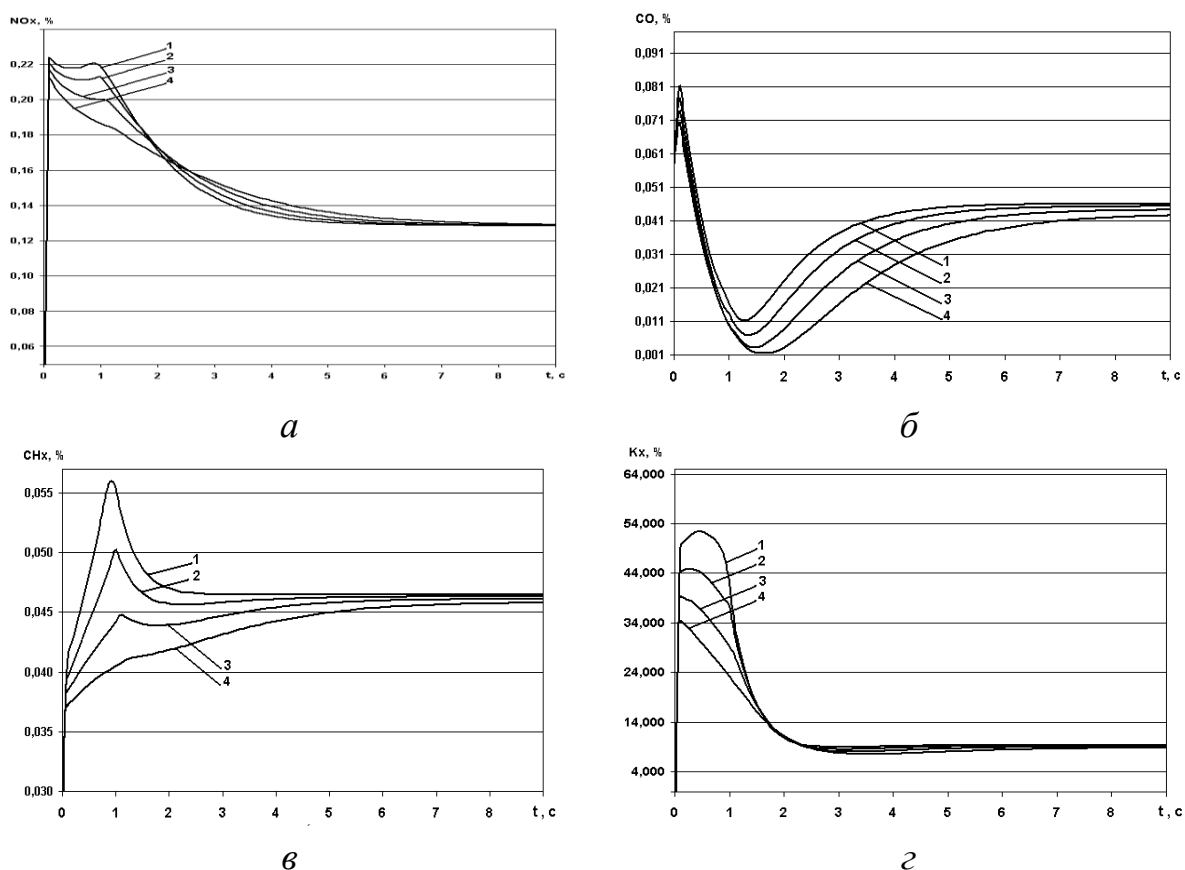


Рисунок 5. Изменение параметров дизеля типа КамАЗ-740 в переходном процессе его разгона: *а* - содержания в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$ ; *б* - монооксида углерода  $C_{CO}$ ; *в* - несгоревших углеводородов  $C_{CHx}$ ; *г* - дымности ОГ  $K_x$ ; 1 -  $h_{p\text{ Mmax}}=16,7$  мм ( $K_{Me\text{ пол}}=1,50$ ); 2 -  $h_{p\text{ Mmax}}=16,0$  мм ( $K_{Me\text{ пол}}=1,35$ ); 3 -  $h_{p\text{ Mmax}}=15,1$  мм ( $K_{Me\text{ пол}}=1,20$ ); 4 -  $h_{p\text{ Mmax}}=14,2$  мм ( $K_{Me\text{ пол}}=1,05$ )

Наибольшее влияние диапазон корректирования топливоподачи на участке положительной коррекции ВСХ оказывает на дымность ОГ  $K_x$ . Максимальная дымность ОГ  $K_x=52\%$  по шкале Хартриджа имеет место при коэффициенте при-

способляемости  $K_{\text{Ме пол}}=1,50$  (см. рис. 5,2). Уменьшение коэффициента приспособляемости сопровождается быстрым снижением дымности ОГ, и при коэффициенте приспособляемости  $K_{\text{Ме пол}}=1,05$  максимальная дымность ОГ в переходном процессе снижается до  $K_x=34\%$  по шкале Хартриджа, т.е. примерно в 1,5 раза.

Для оценки токсичности ОГ в переходном процессе разработана методика оценки суммарной токсичности ОГ дизеля. Она основана на решении задачи многокритериальной оптимизации переходного процесса с использованием метод свертки. При этом обобщенный критерий оптимальности для каждого из четырех рассматриваемых наклонов участков отрицательной и положительной коррекции ВСХ имеет вид:

$$J_{O_i} = J_{t_{\text{пи}}} \cdot \left( \frac{J_{\text{NO}_{x_i}} + J_{\text{CO}_i} + J_{\text{CH}_{x_i}} + J_{K_{x_i}}}{4} \right),$$

где  $J_{t_{\text{пи}}}$ ,  $J_{\text{NO}_{x_i}}$ ,  $J_{\text{CO}_i}$ ,  $J_{\text{CH}_{x_i}}$ ,  $J_{K_{x_i}}$  – частные критерии оптимальности по продолжительности переходного процесса, содержанию в ОГ оксидов азота  $\text{NO}_x$ , монооксида углерода CO, углеводородов  $\text{CH}_x$ , дымности ОГ  $K_x$ . Частные критерии оптимальности по концентрациям основных токсичных компонентов в ОГ представлены в виде отношений определенных интегралов кривых изменения концентрации соответствующего компонента в переходном процессе  $i$  – го режима к базовому на расчетном временном участке  $t$  от 0 до  $t_{\text{п max}} = 8,2$  с – времени наиболее длительного из рассмотренных переходных процессов. Результаты расчетов, показывают, что с точки зрения обеспечения компромисса между динамическими показателями двигателя и его экологическими показателями наиболее предпочтительным является вариант формы участка положительной коррекции ВСХ с коэффициентом приспособляемости  $K_{\text{Ме пол}}=1,50$ .

**Третья глава** посвящена проблемам выбора параметров САР частоты вращения дизеля и оценке эксплуатационных показателей дизеля в автоколебательных процессах. Представлена методика выбора параметров электронного регулятора частоты вращения дизеля, построенная с использованием методов параметрической оптимизации САР и САУ и предусматривающая использование программного комплекса «Моделирование в технических устройствах (МВТУ)», разработанного под руководством к.н.т., доцента О.С. Козлова. При использовании этого программного комплекса исследованы переходные процессы сброса нагрузки в САР дизеля типа Д-240 (4 Ч 11/12,5) без наддува.

При моделировании САР управляющее воздействие подавалось на объект регулирования в виде суммы пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих закона регулирования. Оптимизируемыми параметрами рассматриваемой САР при ее параметрической оптимизации являлись коэффициенты ПИД-закона регулирования. В качестве критериев оптимальности использованы

заброс регулируемого параметра в переходном процессе  $y_{\max}$ , продолжительность переходного процесса  $t_p$ . Кроме того, использован комплексный критерий, представляющий собой произведение величин  $t_p$  и  $y_{\max}$ .

Минимальное значение комплексного критерия качества получено при следующих значениях коэффициентов ПИД-закона:  $k_p=14$ ,  $k_i=20$  и  $k_d=1,5$ . Эти значения приняты оптимальными. Данная методика может быть использована и для выбора значений других параметров электронного регулятора.

Резервом улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля является уменьшения неустойчивости параметров на установившихся режимах работы дизеля с автоколебательными процессами. Предложена методика оценки топливной экономичности и токсичности ОГ в автоколебательных процессах дизеля, основанная на использовании обобщенной зависимости экономических и экологических показателей дизеля от коэффициента избытка воздуха. В этой методике предполагается, что из-за низкой инерционности системы топливоподачи и относительно большой инерционности системы воздухообеспечения в возникающем автоколебательном процессе скоростного режима колебательные изменения расхода топлива  $G_T$  не сопровождаются изменениями расхода воздуха  $G_B$ , и наблюдаются колебания коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , приводящие к ухудшению показателей топливной экономичности и токсичности ОГ.

Результаты расчетных исследований свидетельствуют о том, что относительное увеличение расхода топлива  $g_e$  в автоколебательном процессе дизеля типа КамАЗ-740, работающего на номинальном режиме, составило 0,35%, а относительный рост содержания в ОГ нормируемых токсичных компонентов ОГ оказался равным:  $C_{NO_x}$  - 0,15 %,  $C_{CO}$  - 0,36 %,  $C_{CH_x}$  - 0,34 %. При переходе к режимам с пониженной частотой вращения неустойчивость скоростного режима усиливается. Так, на режиме внешней характеристики с минимальной частотой вращения  $n=600$  мин<sup>-1</sup> степень нечувствительности регулятора увеличивается до  $\epsilon_p=10-12\%$ , возрастает и неравномерность подачи топлива от цикла к циклу. Это приводит к увеличению неустойчивости скоростного режима до значений  $\nu=10-15\%$ . Кроме того, этот режим отличается невысоким коэффициентом избытка воздуха  $\alpha=1,35$ , близким к пределу дымления. Поэтому даже небольшие отклонения  $\alpha$  в автоколебательном процессе изменения частоты вращения приводят к существенному ухудшению показателей топливной экономичности и токсичности ОГ. В результате, при упомянутом значении  $\nu$  удельный эффективный расход топлива  $g_e$  в автоколебательном процессе увеличивается на 5-7%, концентрации в ОГ оксидов азота  $NO_x$  - на 3-5%, монооксида углерода CO и углеводородов  $CH_x$  - на 6-8% по сравнению с режимом с неизменным значением частоты вращения дизеля.

**В четвертой главе** приведены результаты исследований дизеля Д-246 (4 ЧН 11/12,5) дизель-электрического генератора АД-40 с электронным регулятором частоты вращения, имеющим параметры и настройки, полученные расчетным путем в третьей главе. Исследования осуществлялись на моторном стенде ОАО «НЗТА». Для привода дозирующего органа (рейки ТНВД) ис-

пользован исполнительный механизм непрямого действия с электромеханическим преобразователем типа «сопло-заслонка».

При экспериментальных исследованиях определены коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-закона регулирования, обеспечивающие наилучшее качество переходных процессов САР. Они оказались равными  $k_p=20$ ,  $k_i=100$ ,  $k_d=1$ , что хорошо согласуется с данными, полученными расчетным путем.

Осциллографирование переходных процессов исследуемого дизеля, оснащенного электронным регулятором с указанными выше значениями коэффициентов ПИД-закона регулирования, позволило получить переходный процесс наброса нагрузки со следующими показателями (рис. 6): время переходного процесса  $t_n=1,5$  с, перерегулирование (заброс частоты вращения)  $\sigma=3,8\%$ , наклон регуляторной характеристики  $\delta=0$  (астатический регулятор). Аналогичные показатели для переходного процесса сброса нагрузки составили:  $t_n=1,8$  с,  $\sigma=3,9\%$ .

Проведенные расчетно-экспериментальные исследования подтвердили эффективность использования разработанного регулятора частоты вращения, реализующего ПИД-закон регулирования, в дизельных двигателях дизель-генераторных установок и возможность обеспечения динамических и статических показателей, соответствующих первому классу точности САР. Высокие статические и динамические показатели дизельного двигателя с разработанным регулятором свидетельствуют о возможности его использования и в дизелях транспортного назначения.

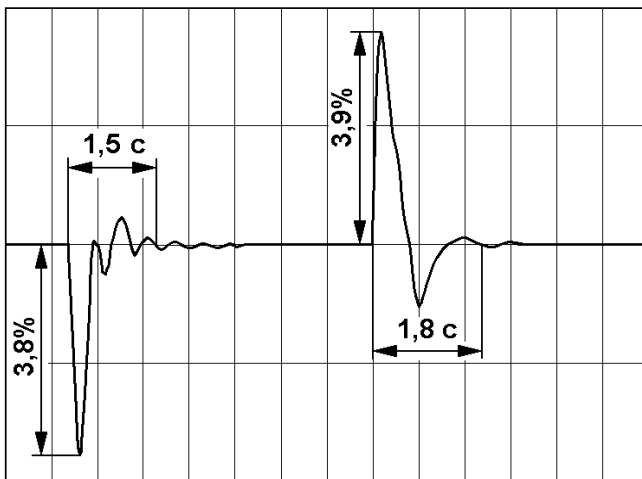


Рисунок 6. Изменение частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя с ПИД-регулятором в переходных процессах наброса нагрузки на дизель-генераторную установку (слева) и сброса нагрузки (справа)

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель системы автоматического регулирования частоты вращения дизеля, позволяющая провести оценку токсичности отработавших газов в переходных процессах путем описания их характеристик в виде полиномиальных зависимостей от режимных параметров двигателя.

2. Разработана методика оценки суммарной токсичности отработавших газов в переходных процессах дизеля, основанная на использовании обобщенного критерия оптимальности, представляющего собой произведение частных



критериев оптимальности, характеризующих продолжительность переходного процесса и выбросы нормируемых газообразных токсичных компонентов отработавших газов дизеля.

3. Определен оптимизированный вариант формы внешней скоростной характеристики дизеля типа КамАЗ-740 с коэффициентом корректирования топливоподачи на участке отрицательной коррекции  $K_{Me\text{ отр}}=0,65$  и коэффициентом приспособляемости на участке положительной коррекции  $K_{Me\text{ пол}}=1,50$ , обеспечивающий компромисс между динамическими и экологическими показателями дизеля.

4. Разработана методика выбора параметров системы автоматического регулирования частоты вращения дизеля, основанная на минимизации комплексного критерия качества процесса регулирования, представляющему собой произведение продолжительности переходного процесса и максимального отклонения регулируемого параметра в переходном процессе.

5. Проведенные расчетные исследования переходного процесса сброса нагрузки дизеля типа Д-240 позволили определить оптимизированные значения коэффициентов ПИД-закона регулирования электронного регулятора частоты вращения дизеля, оказавшиеся равными  $k_p=14,0$ ,  $k_i=20,0$  и  $k_d=1,5$ .

6. Разработана методика оценки расхода топлива и токсичности отработавших газов дизеля в автоколебательных процессах, базирующаяся на использовании обобщенной зависимости экономических и экологических показателей дизеля от коэффициента избытка воздуха.

7. Проведенные расчетные исследования показали, что в автоколебательном процессе дизеля типа КамАЗ-740, работающего на номинальном режиме при  $n=2200\text{ мин}^{-1}$ , относительное увеличение расхода топлива составило 0,35 %, а относительное увеличение содержания в отработавших газах нормируемых токсичных компонентов оказалось равным:  $C_{NO_x}$  - 0,15 %,  $C_{CO}$  - 0,36 %,  $C_{CH_x}$  - 0,34 %. На минимальном скоростном режиме при  $n=600\text{ мин}^{-1}$  удельный эффективный расход топлива  $g_e$  в автоколебательном процессе увеличивается на 5-7%, концентрации в ОГ оксидов азота  $NO_x$  - на 3-5%, монооксида углерода  $CO$  и углеводородов  $CH_x$  - на 6-8% по сравнению с режимом с неизменным значением частоты вращения дизеля.

8. Практически реализована система автоматического регулирования частоты вращения дизеля типа Д-246 дизель-генераторной установки с электронным регулятором, реализующим ПИД-закон регулирования с коэффициентами  $k_p=20$ ,  $k_i=100$ ,  $k_d=1$ .

9. Проведенные экспериментальные исследования дизеля типа Д-246 дизель-генераторной установки с электронным регулятором, реализующим ПИД-закон регулирования, показали возможность получения показателей процесса регулирования, соответствующих первому классу точности САР – продолжительность переходного процесса наброса нагрузки  $t_n=1,5\text{ с}$ , перерегулирование  $\sigma=3,8\%$ , продолжительность переходного процесса сброса нагрузки  $t_n=1,8\text{ с}$ , перерегулирование  $\sigma=3,9\%$ .

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

1. Марков В.А., Поздняков Е.Ф., Шленов М.И. Улучшение показателей качества системы автоматического регулирования частоты вращения дизель-генератора // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 2007. - № 1. - С. 29-39.
2. Марков В.А., Шленов М.И., Полухин Е.Е. Влияние формы внешней скоростной характеристики на токсичность отработавших газов дизеля при переходных процессах // Грузовик &. - 2007. - № 9. - С. 20-21. - № 10. - С. 36-38.
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.
4. Пинский Ф.И., Полухин Е.Е., Шленов М.И. Сравнительное исследование электрогидравлических форсунок автомобильных дизелей // Электроника и электрооборудование транспорта. - 2004. - № 3-4. - С. 21-24.
5. Влияние формы внешней скоростной характеристики на токсичность отработавших газов дизеля в переходных процессах / В.А. Марков, М.И. Шленов, Е.Е. Полухин и др. // Материалы докладов международной конференции «Двигатель-2007», посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. - С. 329-335.
6. Методика оценки расхода топлива и токсичности ОГ дизеля на неустановившихся режимах работы: Тезисы доклада на ВНТС в МГТУ им. Н.Э. Баумана / Марков В.А., Полухин Е.Е., Шленов М.И. и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. - 2005. - № 4. - С. 113.
7. Пинский Ф.И., Полухин Е.Е., Шленов М.И. Сравнительное исследование дизельных электрогидравлических форсунок с положительными обратными связями // Электронные системы управления. Компьютеризированные электротехнические системы, комплектующие изделия: тезисы докладов международного симпозиума «Электроника и электрооборудование транспорта. Проблемы и пути развития». - Суздаль, 22-24 июня 2004 г. - С. 12-13.
8. Разработка математических моделей для расчета переходных процессов транспортных дизелей / В.А. Марков, Е.Е. Полухин, М.И. Шленов и др.: Тезисы доклада на ВНТС в МГТУ им. Н.Э. Баумана // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. - 2007. - № 4. - С. 115.
9. Регулятор частоты вращения с последовательными корректирующими звеньями для дизеля / Е.Ф. Поздняков, В.А. Марков, М.И. Шленов и др. // «Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе»: тез. докл. науч.-тех. конф. «3-и Луканинские чтения». - М.: МАДИ (ГТУ), 2007. - С. 46-48.
10. Электронный регулятор частоты вращения дизель-генератора / Е.Ф. Поздняков, В.А. Марков, М.И. Шленов и др. // Материалы докладов международной конференции «Двигатель-2007», посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. - С. 309-312.