

**МАРКОВ**

Владимир Анатольевич  
доктор технических наук,  
профессор кафедры  
«Теплофизика»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**ФУРМАН**

Виктор Владимирович  
ведущий конструктор  
проектно-  
производственного  
предприятия  
«Дизельавтоматика»  
(г. Саратов)

**МИРОНОВ**

Виктор Алексеевич  
главный конструктор  
ОАО «Пензадизельмаш»  
(г. Пенза)

## Экспериментальные исследования электронной системы управления топливоподачей тепловозного дизеля

**В.А. Марков, В.В. Фурман, В.А. Миронов**

*Рассмотрена электронная система управления топливоподачей тепловозного дизеля. Представлены результаты экспериментальных исследований дизеля типа Д50, оборудованного штатной системой топливоподачи и опытной системой топливоподачи с электронной системой управления топливоподачей. Показана возможность существенного улучшения показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов при установке на дизель опытной системы топливоподачи.*

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, система управления, переходный процесс, токсичность отработавших газов.

*The article describes an electronic fuel supply control system for a locomotive diesel engine. The results of the experimental research of a Д50 type diesel engine equipped with a standard fuel supply system and an experimental fuel supply system with fuel supply control are presented. An opportunity to significantly improve the fuel economy and exhaust gases toxicity characteristics for the diesel engine with the experimental fuel supply system has been demonstrated.*

**Keywords:** diesel engine, control system, transient process, exhaust gases toxicity.

Дизельные двигатели давно стали основным типом двигателей в диапазоне агрегатных мощностей 200...80 000 кВт [1]. Дизели применяют практически во всех видах транспортных средств, они остаются одним из основных типов мобильных тепловых двигателей благодаря своей автономности, экономичности и надежности. Широко используют дизельные двигатели и на ж.-д. транспорте.

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС), включая дизели как основной источник энергии для различных транспортных средств, являются и основным потребителем топлив, при сгорании которых образуются вредные вещества, выбрасываемые в атмосферу. В таблице 1 приведены данные по Российской Федерации на конец XX века, характеризующие общее потребление топлива различными видами транспорта и выбросы отработавших газов (ОГ) от его сгорания в ДВС. Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что на ж.-д. транспорт приходится значительная доля потребления моторного топлива и выбросы в атмосферу ОГ вредных веществ [2].

Таблица 1

Потребление моторных топлив и выбросы продуктов сгорания ДВС

Вид транспорта	Общая мощность, %	Потребление топлива		Выбросы ОГ в атмосферу	
		%	млн т	%	млн т
Автомобильный	50	56,5	65,0	71,3	21,7
Сельскохозяйственные и лесопромышленные машины	20	23,5	27,0	17,8	5,4
Ж.-д.	16	11,0	12,6	6,3	1,9
Речной флот	8	5,6	6,8	2,6	0,8
Строительно-дорожные машины	4	1,9	2,2	1,3	0,4
Авиация	2	1,2	1,4	0,7	0,2
Итого	100	100	115,0	100	30,4

В современных условиях к показателям работы дизелей предъявляют целый комплекс достаточно жестких требований. Среди этих показателей приоритетными считают топливную экономичность и токсичность ОГ [1–4]. Необходимость экономного расходования топлива обусловлена продолжающимся истощением мировых запасов нефти, повышением цен на нефтепродукты и ростом выбросов в атмосферу CO<sub>2</sub> [1]. Поэтому при совершенствовании дизелей особое внимание обращают на снижение расхода топлива. Ужесточающиеся требования к экологическим показателям ДВС являются фактором, способствующим скорейшему внедрению мероприятий, направленных на снижение эмиссии токсичных компонентов ОГ.

Для дизельных двигателей маневровых тепловозов, работающих в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов, эффективным средством снижения эксплуатационного расхода топлива и выбросов с ОГ токсичных веществ является применение микропроцессорных систем автоматического управления (САУ) параметрами двигателя и силовой установки тепловоза в целом. С использованием микропроцессорных регуляторов САУ дизелями системы выходят на новый, качественно более высокий уровень, на котором целью управления становятся не просто стабилизация частоты вращения с ограниченной коррекцией необходимых параметров, а комплексная опти-

мизация работы двигателя как основного элемента энергетической установки [1].

Одной из важнейших САУ дизельными двигателями является система управления топливоподачей. Для достижения наибольшей эффективности при снижении расхода топлива и токсичности ОГ система управления топливоподачей должна обеспечивать требуемые характеристики цикловой подачи топлива, момента начала подачи — угла опережения впрыскивания, закон подачи топлива и давление впрыскивания, ряд других параметров топливоподачи на каждом эксплуатационном режиме работы дизеля.

Известны различные конструктивные схемы таких систем управления, разработанные рядом зарубежных двигателестроительных фирм (Detroit Diesel Allison, Caterpillar, R. Bosch и др.) и отечественными учебными, научно-исследовательскими и производственными организациями (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Ярославским заводом дизельной аппаратуры, Ногинским заводом топливной аппаратуры и др.) [1]. Одной из таких разработок является электронная система управления впрыскиванием топлива ЭСУВТ.01, предложенная производственно-промышленным предприятием ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов). Схема этой системы управления топливоподачей представлена на рис. 1. Она включает в себя насосную секцию топливного насоса высокого давления (ТНВД) с плунжером 3, приводимым от кулачка кулачкового вала ТНВД (см. рис. 1). При движении плунжера вверх топливо вытесняется в надплунжерную полость 12, в которой установлен клапан 6. При нахождении клапана 6 в крайнем левом положении надплунжерная полость 12 сообщена с линией 5 низкого давления ТНВД. Электронно-управляемый клапан 6 соединен с якорем 10 электромагнита 11. В требуемый момент времени на электромагнит 11 подается управляющий сигнал от электронного блока управления САУ и якорь 10 притягивается к электромагниту. При этом клапан 6 смещается вправо и своей кромкой 7 разъединяет надплунжерную полость 12 с линией 5 низкого давления ТНВД. Далее топливо под высоким давлением вытесняется в штуцер 8 ТНВД.

Использование клапана 6 (см. рис. 1) для регулирования фаз начала и окончания подачи топлива позволяет гибко управлять топливоподачей. В частности, при этом появляется возможность реализации сложных законов регулирования угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ) в соответствии с изменениями скоростного и нагрузочного режимов работы.

Предложенная схема ТНВД использована при создании опытной электронной системы управления топливоподачей для дизелей типа Д50 (6 ЧН 31,8/33) производства ОАО «Пензадизельмаш» (Пензенский дизельный завод).

Это среднеоборотный дизель мощностью  $N_e = 730 \dots 880$  кВт (1 000...1 200 л. с.) для дизель-генераторных установок, ж.-д. и водного транспорта. Этот двигатель широко используют, в частности, в дизель-генераторах маневровых, магистральных и промышленных тепловозов. Дизель типа Д50 оснащен неразделенной камерой сгорания в поршне типа Гессельман диаметром  $d_{к.с} = 256$  мм, котором реализуется объемное смесеобразование.

В дизеле Д50 используется топливная аппаратура (ТА) разделенного типа, содержащая ТНВД, топливопроводы высокого давления

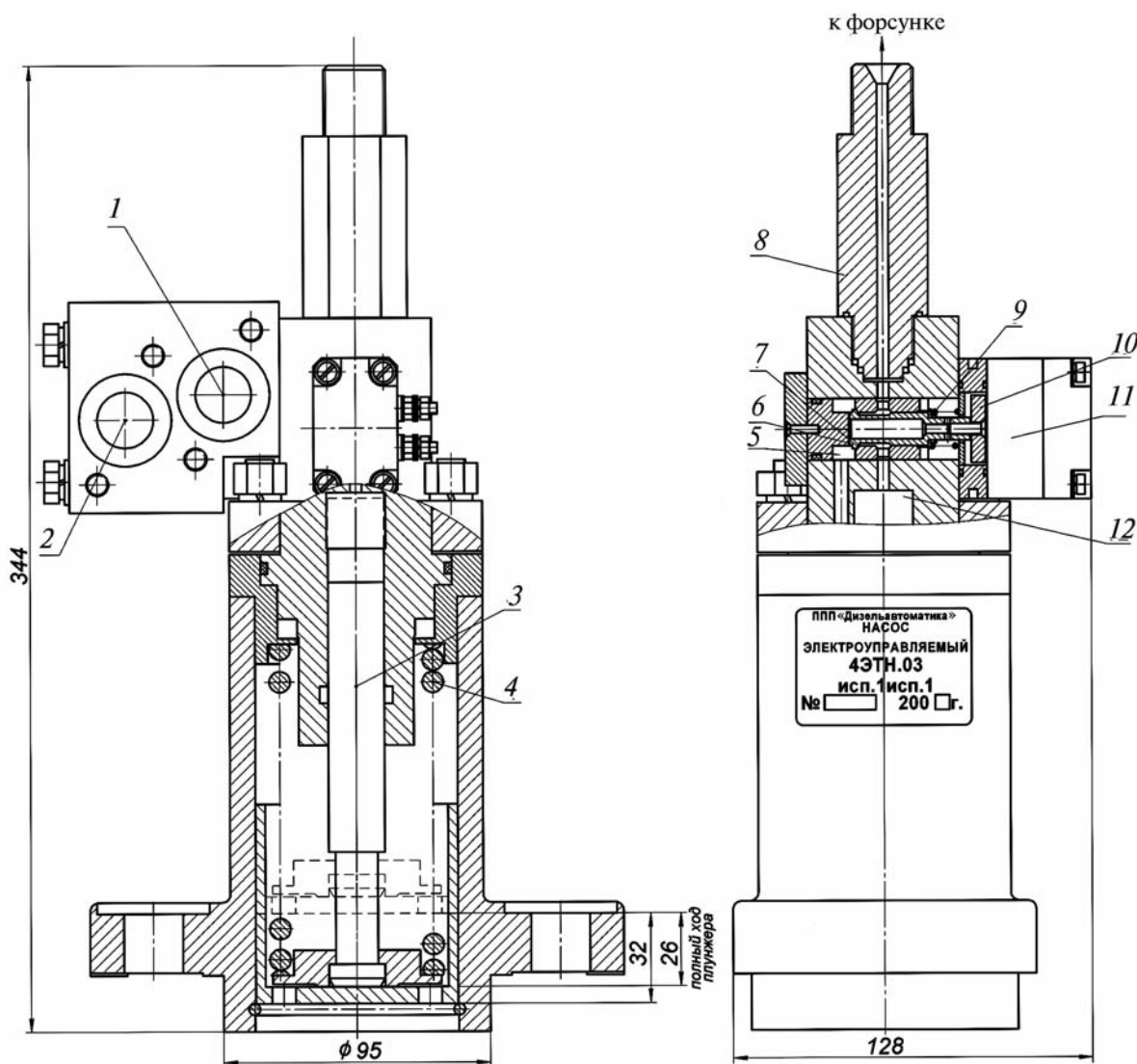


Рис. 1. Конструктивная схема ТНВД с электромагнитным клапаном управления подачей топлива:

- 1 — подвод топлива; 2 — отвод топлива; 3 — плунжер; 4 — пружина плунжера; 5 — линия низкого давления ТНВД; 6 — клапан; 7 — кромка клапана; 8 — штуцер ТНВД; 9 — возвратная пружина; 10 — якорь; 11 — электромагнит; 12 — надплунжерная полость

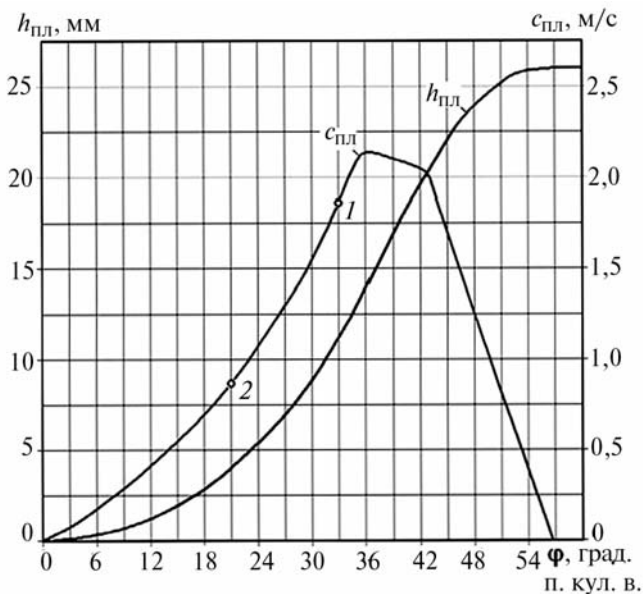


Рис. 2. Диаграмма изменения хода  $h_{пл}$  и скорости  $c_{пл}$  плунжера от угла  $\phi$  поворота кулачкового вала ТНВД дизеля Д50 (скорость  $c_{пл}$  плунжера соответствует частоте вращения коленчатого вала двигателя  $n = 750 \text{ мин}^{-1}$  и частоте вращения кулачкового вала ТНВД  $n = 375 \text{ мин}^{-1}$ ):

1 — точка начала нагнетания топлива ТНВД в серийной системе топливоподачи; 2 — точка начала нагнетания топлива ТНВД при смещении участка нагнетания на другой участок профиля кулачка — при повернутом на  $6^\circ$  поворота коленчатого вала по ходу вращения коленчатого вала

и форсунки. Насосная секция ТНВД базового дизеля выполнена с плунжерами диаметром  $d_{пл} = 20 \text{ мм}$ , которые имеют полный ход  $h_{пл} = 26 \text{ мм}$ . Характеристики профиля кулачка кулачкового вала ТНВД дизеля Д50 приведены на рис. 2. Диаметр ролика толкателя  $d_{рол} = 56,5 \text{ мм}$ , его толщина  $b_{рол} = 32 \text{ мм}$ .

В базовой системе топливоподачи ТНВД соединен с форсунками топливопроводами высокого давления. Длина нагнетательного топливопровода  $L = 1650 \text{ мм}$ , его внутренний диаметр  $d_{вн} = 3,5 \text{ мм}$ . Конструктивная схема форсунки представлена на рис. 3.

В исследуемой системе топливоподачи применены многосопловые закрытые форсунки. Распылитель форсунки выполнен с числом распыливающих отверстий  $i_p = 9$  диаметром  $d_p = 0,38 \text{ мм}$ . Угол конуса иглы форсунки  $\gamma_{и} = 60^\circ$ , ее ход  $h_{и} = (0,45 \pm 0,05) \text{ мм}$ , давление топлива в начале подъема иглы форсунки  $p_{фо} = 27,5 \text{ МПа}$ .

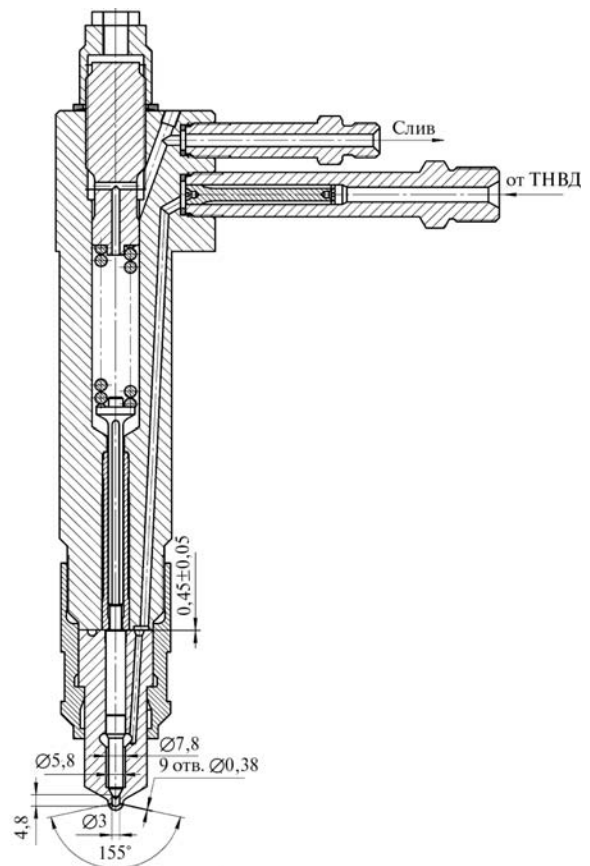


Рис. 3. Конструктивная схема форсунки системы топливоподачи дизеля Д50

В соответствии с принятой схемой в ООО «ППП Дизельавтоматика» изготовлены опытные секции ТНВД с электроуправляемыми клапанами с системой управления ЭСУВТ.01. Электронно-управляемый клапан 6 (см. рис. 1) насосной секции ТНВД выполнен с диаметром  $d_{кл} = 12 \text{ мм}$  и ходом  $h_{кл} = 0,3 \text{ мм}$ . Жесткость пружины электромагнитного клапана  $C_{пр} = 1,7 \text{ кгс/мм} = 17 \text{ Н/мм}$ . Площадь сечения жиклера за клапаном  $f_{ж} = 8 \text{ мм}^2$ . Объем полости электромагнита при закрытом клапане  $V_{кл} = 4000 \text{ мм}^3$ . Размеры якоря электромагнита  $24 \times 17 \times 5,5 \text{ мм}$ , минимальный зазор между якорем и электромагнитом  $0,08 \dots 0,1 \text{ мм}$ , максимальное усилие (расчетное) электромагнита  $F_{эм} = 3,5 \text{ кгс} = 350 \text{ Н}$ , максимальная продолжительность действия электромагнита  $8 \text{ мс}$ , время переходного процесса по переднему фронту тока  $1,3 \text{ мс}$ , время переходного процесса по заднему фронту тока  $0,2 \text{ мс}$ , угол первого включения электромагнита  $35 \dots 36^\circ$  поворота кулач-

кового вала (п. кул. в.) ТНВД относительно верхней мертвой точки (ВМТ).

Для оценки работоспособности предложенной топливной системы с электронным управлением топливоподачей, а также возможности получения требуемых показателей топливной экономичности и токсичности ОГ, в дизельной лаборатории отдела главного конструктора ОАО «Пензадизельмаш» проведены сравнительные испытания серийной системы топливоподачи и электронной системы управления впрыском топлива ЭСУВТ.01. При испытаниях на моторном стенде объектом испытаний являлся дизель-генератор типа 1-ПДГ4Д производства ОАО «Пензадизельмаш». Тепловозный дизель этого генератора имел номинальную мощность  $N_e = 880$  кВт при частоте вращения  $n = 750$  мин<sup>-1</sup>.

Испытательный стенд был оборудован необходимой измерительной аппаратурой. В процессе испытаний определялись основные показатели дизеля — его мощность  $N_e$ , частота вращения коленчатого вала  $n$ , приведенный к нормальным атмосферным условиям ( $p_0 = 101,3$  кПа,  $T_0 = 273$  К) расход воздуха  $G_{air}$  (весовой) или  $V_{air}$  (объемный), расход топлива  $G_T$ , ряд других параметров. Кроме штатных приборов для определения основных параметров дизеля стенд был оснащен дымомером ИДС-3С и газоанализатором Vario Plus. Испытания проводились при следующих условиях: атмосферное давление  $p_a = 99,9$  кПа, температура воздуха  $t_a = +22$  °С; его относительная влажность  $\varphi_r = 33\%$ , парциальное давление водяных паров  $p_{парц} = 2,8$  кПа. Использовалось дизельное топливо по ГОСТ 305—82 и моторное масло марки М14Г<sub>2</sub>ЦС.

На первом этапе двигатель был укомплектован серийным гидромеханическим регулятором. На втором этапе на двигатель была установлена электронная система управления впрыском топлива ЭСУВТ.01 производства ООО «ППП Дизельавтоматика». Два дополнительных этапа (третий и четвертый), не предусмотренные утвержденной программой испытаний, были проведены по просьбе разработчика ООО «ППП Дизельавтоматика». Комплекта-

ция дизеля на этих этапах полностью соответствовала комплектации второго этапа.

Следует отметить, что серийная система топливоподачи не предусматривает регулирование угла опережения впрыскивания топлива, поэтому при ее испытаниях на первом этапе статический УОВТ не изменялся —  $\theta = 24^\circ$  поворота коленчатого вала (п.к.в.) до ВМТ. При испытаниях системы ЭСУВТ.01 на втором этапе УОВТ устанавливались оптимальными с точки зрения топливной экономичности. На третьем этапе испытаний система ЭСУВТ.01 реализовывала действительные УОВТ (углы начала подъема иглы форсунки), равные полученным при испытаниях серийной системы топливоподачи. На четвертом этапе испытания системы ЭСУВТ.01 проведены с оптимальными УОВТ на другом профиле кулачка кулачкового вала ТНВД (т. е. повернутом на  $6^\circ$  п.к.в. по ходу вращения коленчатого вала, см. рис. 2).

В условиях эксплуатации дизельные двигатели маневровых тепловозов работают в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов [5]. Поэтому на всех четырех этапах испытания проводились на режимах тепловозной характеристики по рабочей методике РМ ПДЗ 02—2007.

На каждой позиции контроллера удельный эффективный расход топлива  $g_e$  определялся весовым способом с учетом просочившегося в дренажную систему ТНВД. Дополнительно на втором этапе были замерены расходы топлива на режимах холостого хода при  $n = 250$  и  $220$  мин<sup>-1</sup>. На всех режимах каждого этапа испытаний проводилось осциллографирование процессов сгорания и топливоподачи. Примеры осциллограмм представлены на рис. 4. Результаты обработки осциллограмм приведены в табл. 2.

На осциллограмме, представленной на рис. 4, а, полученной на первом этапе со штатной ТА, видно, что на форсированных режимах после окончания впрыскивания наблюдается колебание давления топлива в трубопроводе и, как следствие, возникновение такого явления как «подвпрыск». На осциллограмме, показанной на рис. 4, в, полученной на первом этапе со штатной ТА на нефорсированном режиме, на-

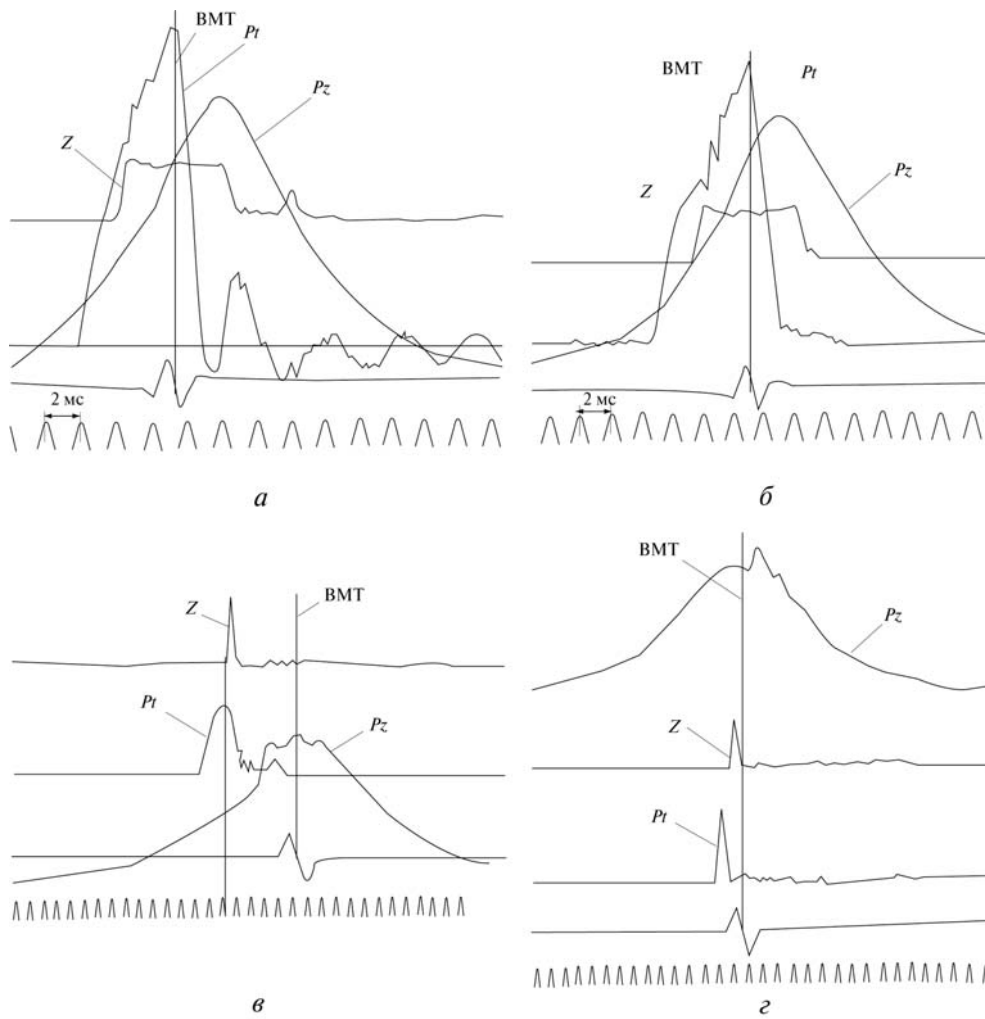


Рис. 4. Примеры осциллограмм процессов сгорания и топливоподачи:

*a* — штатная ТА, 8-я позиция контроллера, 1-й этап; *б* — ЭСУВТ, оптимальные по топливной экономичности УОВТ, 8-я позиция контроллера, 2-й этап; *в* — штатная ТА, 0-я позиция контроллера, 1-й этап; *г* — ЭСУВТ, оптимальные по топливной экономичности УОВТ, 0-я позиция контроллера;  $p_z$  — давление в цилиндре;  $p_t$  — давление топлива в трубке высоко непосредственно после ТНВД;  $Z$  — ход иглы форсунки; ВМТ — верхняя мертвая точка цилиндра в такте сжатия

Таблица 2

Результаты обработки осциллограмм процессов сгорания и топливоподачи

Позиция контроллера	Серийная система (1 этап)			ЭСУВТ (2 этап)			ЭСУВТ (3 этап)			ЭСУВТ (4 этап)		
	Угол начала подъема давления, °п.к.в. до ВМТ	Угол начала подъема иглы форсунки, °п.к.в. до ВМТ	Продолжительность впрыска, °п.к.в.	Угол начала подъема давления, °п.к.в. до ВМТ	Угол начала подъема иглы форсунки, °п.к.в. до ВМТ	Продолжительность впрыска, °п.к.в.	Угол начала подъема давления, °п.к.в. до ВМТ	Угол начала подъема иглы форсунки, °п.к.в. до ВМТ	Продолжительность впрыска, °п.к.в.	Угол начала подъема давления, °п.к.в. до ВМТ	Угол начала подъема иглы форсунки, °п.к.в. до ВМТ	Продолжительность впрыска, °п.к.в.
8	23,6	14,6	31,5	29,0	18	33,9	29,0	16,8	31,5	29,4	17,1	29,9
7	23,7	16,0	26,5	27,6	16,4	30,0	29,0	18,3	28,0	27,6	17,8	27,7
6	23,9	17,2	22,2	24,5	15,7	26,3	29,0	17,7	25,6	25,3	17,1	23,9
5	23,5	15,8	18,1	22,0	14,4	20,2	26,0	17,2	19,0	21,1	13,9	17,5
4	24,1	17,5	14,4	15,0	8,5	16,3	26,5	19,2	14,7	17,0	10,5	14,5
3	24,2	18,0	11,3	14,2	8,6	11,9	25,7	18,8	10,9	11,3	5,2	10,9
2	24,2	18,2	9,3	10,7	5,4	9,9	26,1	18,8	9,0	8,3	3,2	8,8
1	24,2	18,0	5,4	10,6	3,6	6,3	27,0	19,8	5,8	7,9	2,6	6,1
0	30,6	21,6	4,1	9,9	5,0	4,0	32,6	23,1	2,7	8,6	4,0	4,0

Параметры дизеля при его работе на различных этапах

Позиции контроллера	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Мощность, кВт	Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)							
			1 этап	2 этап		3 этап		4 этап		
				$g_e$	$\Delta g_e, \%$	$g_e$	$\Delta g_e, \%$	$g_e$	$\Delta g_e, \%$	
8	750	882,35	205,2	204,1	-0,54	203,9	-0,63	203,5	-0,83	
7	650	724,26	202,6	202,5	-0,05	202,4	-0,01	199,6	-1,48	
6	570	558,82	199,5	200,6	+0,55	202,5	+1,50	202,6	+1,55	
5	480	393,38	206,3	204,4	-0,92	207,1	+0,39	206,9	+0,29	
4	400	268,38	209,4	207,4	-0,96	215,7	+3,01	211,3	+0,91	
3	330	176,47	219,4	211,6	-3,56	219,9	+0,23	211,5	-3,60	
2	300	113,97	237,5	222,2	-6,44	237,9	+0,17	239,6	+0,88	
1	300	55,15	315,4	262,7	-16,71	305,0	-3,30	284,9	-9,67	
0	300	0	7,50 кг/ч	6,23 кг/ч	-16,93	6,70 кг/ч	-10,67	6,29 кг/ч	-16,13	
0	250	0	—	5,20 кг/ч	—	—	—	—	—	
0	220	0	—	4,72 кг/ч	—	—	—	—	—	

растание давления в цилиндре после вспышки происходит задолго до ВМТ. Это и является основной причиной снижения КПД двигателя по сравнению с его значением при работе с оптимальным УОВТ. Поэтому целесообразно регулировать УОВТ в соответствии с режимом работы двигателя. Это и реализует система управления ЭСУВТ. При ее испытаниях также отмечено более равномерное дозирование топлива по всем цилиндрам на всех режимах работы дизель-генератора, о чем свидетельствует малый разброс температур ОГ по цилиндрам, составивший 10...20 °С.

Результаты расчетов эффективного расхода топлива  $g_e$  на проведенных четырех этапах испытаний дизеля Д50 представлены в табл. 3 и на рис. 5—8. Они свидетельствуют о том, что применение системы ЭСУВТ.01 позволяет снизить расход топлива на величину  $\Delta g_e = 3,5...17 \%$  на позиции контроллера от 0-й до 3-й и на величину  $\Delta g_e = 0,9 \%$  на 4-й и 5-й позициях контроллера при оптимальных УОВТ по сравнению с серийной системой топливоподачи. На режимах холостого хода снижение частоты вращения до  $n = 250 \text{ мин}^{-1}$  позволяет уменьшить расход топлива на  $\Delta g_e = 31,3 \%$  по сравнению с серийной системой топливоподачи (при  $n = 300 \text{ мин}^{-1}$ ), а при снижении частоты вращения до  $n = 220 \text{ мин}^{-1}$  — на  $\Delta g_e = 37,0 \%$ .

Установка на дизель электронной системы управления топливоподачей ЭСУВТ.01 позво-

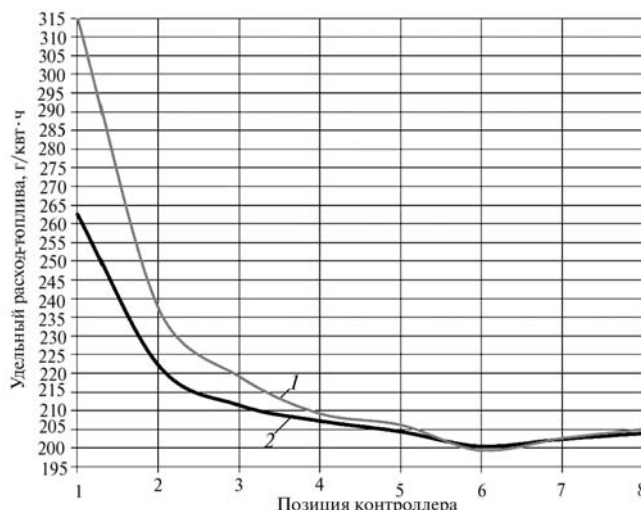


Рис. 5. Зависимость удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от позиции контроллера:

1 — штатная топливная система; 2 — система ЭСУВТ.01 (оптимальные УОВТ)

ляет реализовать управлением двигателем на частичных режимах с последовательным отключением цилиндров. В результате отключения группы цилиндров (второго, третьего и шестого) при работе с системой ЭСУВТ.01 получена незначительная экономия расхода топлива по сравнению с результатами, полученными при работе всех цилиндров с этой же системой. При этом из-за повышения цикловой подачи топлива в работающих цилиндрах наблюдалось повышение температуры газов за работающими цилиндрами на 25...30 °С.

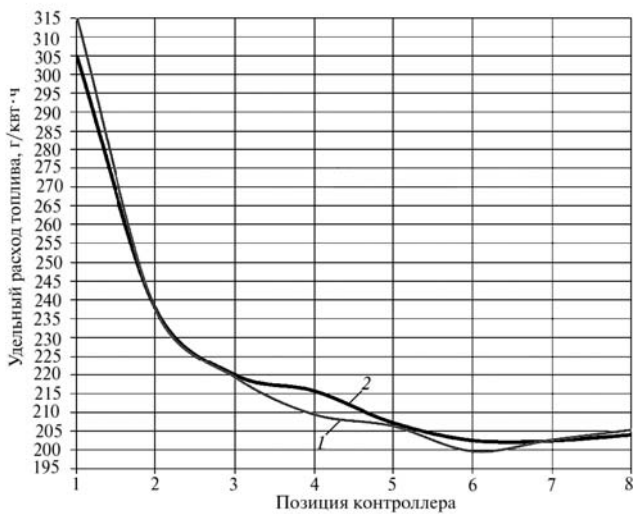


Рис. 6. Зависимость удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от позиции контроллера:

1 — штатная топливная система; 2 — система ЭСУВТ.01 (УОВТ соответствуют УОВТ штатной топливной системы)

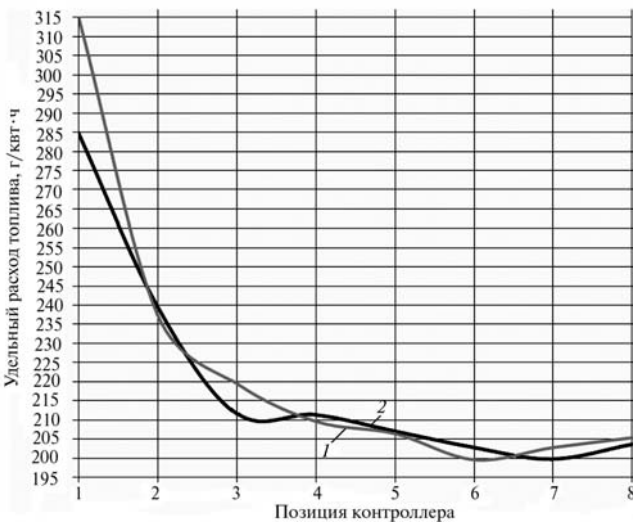


Рис. 7. Зависимость удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от позиции контроллера:

1 — штатная топливная система; 2 — система ЭСУВТ.01 (другой профиль кулачка)

Для оценки экологических качеств дизельного двигателя Д50 дизель-генератора 1-ПДГ4Д, укомплектованного электронной системой управления ЭСУВТ.01, в процессе испытаний определялись показатели дымности ОГ и их токсичности. Испытания по определению дымности ОГ проведены с целью оценки ее соответствия требованиям ГОСТ Р 51250—99 [6]. Замеры дымности ОГ выполнялись в процессе работы дизеля по теп-

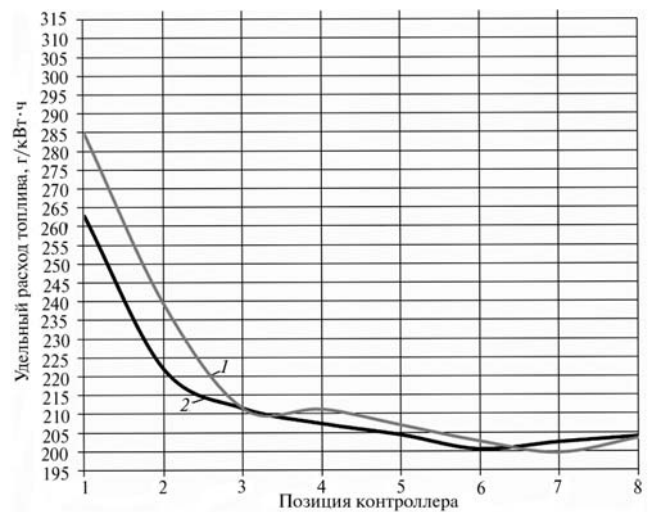


Рис. 8. Зависимость удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от позиции контроллера:

1 — система ЭСУВТ.01 (другой профиль кулачка); 2 — система ЭСУВТ.01 (оптимальные УОВТ)

ловозной характеристике на втором этапе исследований. Испытания проводились на режимах, приведенных в табл. 4.

Таблица 4

Режимы испытаний дизеля с целью определения дымности ОГ

Номер режима	Мощность		Частота вращения, $\text{мин}^{-1}$
	кВт	%	
1	832,0	100	750
2	724,3	75	650
3	393,38	50	480
4	176,5	25	330
5	55,15	5	300

При испытании измерялся приведенный коэффициент ослабления светового потока  $N$  [%] и рассчитывался натуральный показатель ослабления светового потока  $K_x$ . Результаты испытаний приведены в табл. 5. Они свидетельствуют о том, что дымность ОГ исследуемого дизеля находилась в пределах норм и соответствует требованиям ГОСТ Р 51250—99.

При экспериментальных исследованиях дизеля Д50 проверялось соответствия выбросов вредных веществ с ОГ требованиям ГОСТ Р 51249—99 [7]. Замеры выбросов вредных веществ с ОГ выполнялись в процессе работы дизеля по тепловозной характеристике на втором этапе исследований. Испытания проводились на режимах, приведенных в табл. 6.



Таблица 5

Результаты определения дымности ОГ дизеля Д50 с электронной системой управления ЭСУВТ.01

Номер режима	Расход топлива, кг/с	Расход воздуха, кг/с	Расход ОГ, дм <sup>3</sup> /с	Нормы по ГОСТ Р 51250—99		Результаты расчетов $K_i$ , м <sup>-1</sup>	Результаты измерения $N$ , %
				$K$ , м <sup>-1</sup>	$N$ , %		
1	0,050	1,7	1356,25	0,461	18	0,400	12
2	0,041	1,3	1039,27	0,519	20	0,400	11
3	0,022	0,82	621,55	0,638	24	0,300	10
4	0,010	0,48	379,75	0,829	30	0,470	9
5	0,0041	0,41	336,89	0,897	32	0,400	9

Таблица 6

Режимы испытаний дизеля с целью определения токсичности ОГ

Номер режима	Мощность		Частота вращения, мин <sup>-1</sup>
	кВт	%	
1	882,35	100	750
2	393,38	50	480
3	176,47	25	330
4	55,15	5	300

При испытании измерялись объемные концентрации в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$ , монооксида углерода  $C_{CO}$  и несгоревших углеводородов  $C_{CHx}$ . Эти концентрации определялись в миллионных объемных долях [ppm] и пересчитывались в объемное процентное содержание каждого компонента. Результаты измерений и расчетов показателей дымности ОГ дизеля Д50 с электронной системой управления ЭСУВТ.01 приведены в табл. 7.

Таблица 7

Объемные концентрации токсичных компонентов в ОГ дизеля Д50 с электронной системой управления ЭСУВТ.01

Номер режима	$N_{ei}$ , кВт	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$V_{gir}$ , м <sup>3</sup> /ч	$G_r$ , кг/ч	Концентрация вредных выбросов, %			$K_i$ *
					NO	CO	CH <sub>x</sub>	
1	882,35	750	5078,8	181,9	0,13	0,010	0,045	0,20
2	393,38	480	2330,29	81,39	0,10	0,006	0,035	0,10
3	176,47	330	1434,0	38,3	0,019	0,001	0,010	0,10
4	55,15	300	1284,6	15,00	0,0052	0,003	0,042	0,60

\*  $K_i$  — доля времени работы дизеля на каждом режиме (его весовой коэффициент).

По измеренным объемным концентрациям в ОГ нормируемых токсичных компонентов с учетом значений весовых коэффициентов ка-

ждого режима  $K_i$  (см. табл. 7) рассчитаны удельные массовые выбросы оксидов азота  $e_{NOx}$ , монооксида углерода  $e_{CO}$  и несгоревших углеводородов  $e_{CHx}$ . Результаты определения удельных средневзвешенных выбросов вредных веществ с ОГ дизеля Д50 с электронной системой управления ЭСУВТ.01 приведены в табл. 8.

Таблица 8

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

Номер режима	$N_{ei}$ отн	$n_{i-1}$ , мин <sup>-1</sup>	$V_{exhi}$ , м <sup>3</sup> /ч	$N_{ei} K_i$	Удельные средневзвешенные выбросы вредных веществ, г/(кВт·ч)		
					$e_{NOx}$	$e_{CO}$	$e_{CHx}$
1	1,00	750	4938,8	0,2	10,65	0,58	1,74
2	0,50	480	2267,69	0,05			
3	0,25	330	1404,5	0,025			
4	0,05	300	1273,0	0,03			
Норма удельных средневзвешенных выбросов выпуск с 2000 г. (требования ГОСТ Р 51249—99)					12,0	3,0	1,0

Примечание. Индексом «i» отмечен i-й режим испытательного цикла;  $N_{ei}$  отн — относительная мощность (отнесенная к ее максимальному значению);  $V_{exhi}$  — объемный расход ОГ.

Приведенные в табл. 8 данные свидетельствуют о том, что по выбросам оксидов азота  $e_{NOx}$  и монооксида углерода  $e_{CO}$  исследуемый дизель Д50 с электронной системой управления ЭСУВТ.01 удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51249—99. Однако при испытаниях дизель-генератора 1-ПДГ4Д установлено, что удельные средневзвешенные выбросы несгоревших углеводородов  $e_{CHx}$  превышают норму, установленную ГОСТ Р 51249—99. Это вызвано тем, что при испытаниях двигателя с системой управления ЭСУВТ.01 на втором этапе исследований впрыскивание топлива осуществлялось на неоптимальном участке кулачка кулачкового вала ТНВД (начало подачи — в точке 1 диаграммы скорости плунжера  $c_{пл}$  на рис. 2, а окончание подачи — на заднем фронте характеристики  $c_{пл}$  с уменьшающейся скоростью плунжера). Для снижения выбросов несгоревших углеводородов  $e_{CHx}$  желательно реализовать впрыскивание при его начале в точке 2 на рис. 2. В этом случае окончание подачи происходит при мак-

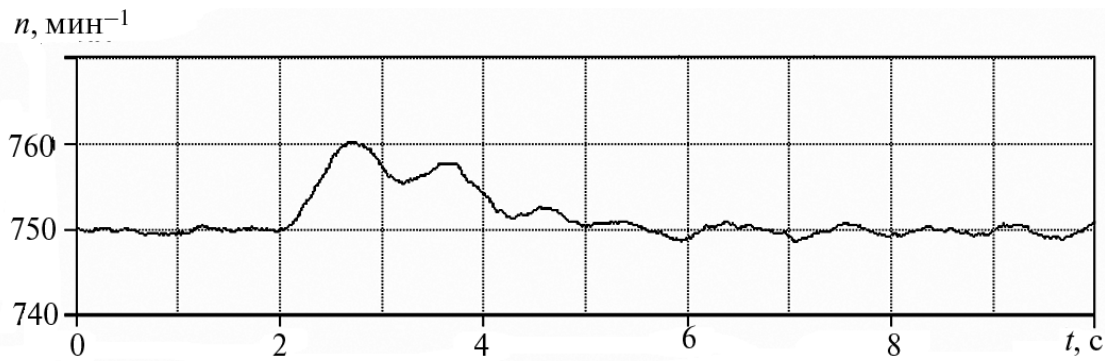


Рис. 9. Характеристика переходного процесса сброса частоты вращения дизеля при сбросе 100 %-ной нагрузки ( $\delta_d = 1,21\%$ ; длительность переходного процесса  $\tau = 3,5$  с)

симальных скоростях плунжера  $c_{пл}$ . Следует также отметить, что выбросы несгоревших углеводородов можно значительно снизить, установив на выпуске термический или каталитический нейтрализатор ОГ.

Для оценки статических и динамических свойств САУ с электронной системой ЭСУВТ.01 были проведены ее исследования на установившихся режимах и в переходных процессах. Пример полученной характеристики переходного процесса представлен на рис. 9. При испытаниях получены следующие результаты: величина сброса частоты вращения дизеля при сбросе 100%-ной нагрузки  $\delta_d = 1,21\%$ ; длительность переходного процесса  $\tau = 3,5$  с. Данные о нестабильности частоты вращения  $n$  на установившихся режимах по позициям контроллера сведены в табл. 9.

Таблица 9

Нестабильность частоты вращения дизеля  $n$  на установившихся режимах

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

Для оценки шумности работы исследуемого дизельного двигателя на нулевой позиции кон-

троллера (режим холостого хода при  $N_e = 0$  и  $n = 300$  мин<sup>-1</sup>) были проведены замеры уровня шума при оптимальном УОВТ и УОВТ, равном штатному с системой ЭСУВТ.01. Замеры произведены приборами ВШВ-003-М3; микрофон М101. Схема замера шумности дизеля приведена на рис. 10. Результаты замера представлены в табл. 10.

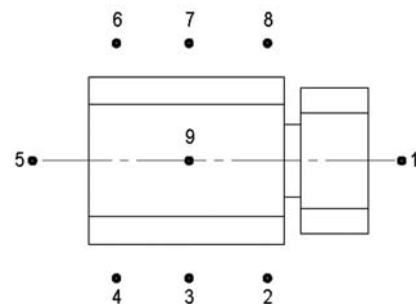


Рис. 10. Схема замера шумности работы дизеля Д50 с системой ЭСУВТ.01

Таблица 10

Результаты замера шумности работы дизеля Д50 с системой ЭСУВТ.01

Номер точек замера	Замер № 1: угол опережения подачи топлива оптимальный	Замер № 2: угол опережения подачи топлива, равный серийному	Примечание
1	90 дБ	91 дБ	На турбокомпрессор установлено мерное сопло. Общий уровень шума
2	91 дБ	94 дБ	
3	93 дБ	95 дБ	
4	97 дБ	98 дБ	
5	86 дБ	90 дБ	
6	85 дБ	96 дБ	
7	96 дБ	97 дБ	
8	93 дБ	95 дБ	
9	93 дБ	94 дБ	

Результаты измерений показывают, что воздушный шум, исходящий от двигателя с системой ЭСУВТ.01 при оптимальных значениях УОВТ, имеет меньшие значения (на 1...11 дБ в зависимости от точек местонахождения измерительного прибора) по сравнению с воздушным шумом при работе двигателя с УОВТ, равных УОВТ штатной системы топливоподачи.

В целом результаты проведенного комплекса экспериментальных исследований подтверждают работоспособность электронной системы управления топливоподачей ЭСУВТ.01. Система работоспособна, работает без сбоев, выполняет все заявленные производителем функции. Кроме того, САУ дизеля Д50 с системой управления ЭСУВТ.01 имеет лучшие статические и динамические качества и позволяет целенаправленно управлять УОВТ, за счет чего можно существенно улучшить показатели топливной экономичности и токсичности ОГ.

## Литература

1. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2005. 344 с.
2. Новиков Л.А. Технологии снижения вредных выбросов тепловозов // Двигателестроение. 1997. № 1-2. С. 49—51.
3. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
4. Коссов В.Е., Шапран Е.Н., Фурман В.В. Совершенствование режимов работы силовых энергетических систем тепловозов. Луганск: Изд-во Восточноукраинского университета им. В. Даля, 2009. 240 с.
5. Гончаров А.Е., Казанцев В.П. Маневровая работа на железнодорожном транспорте. М.: Транспорт, 1978. 183 с.
6. ГОСТ Р 51250—99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения. М.: Изд-во Стандартов, 1999. 20 с.
7. ГОСТ Р 51249—99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения. М.: Изд-во Стандартов, 1999. 42 с.

Статья поступила в редакцию 28.11.2011