

УДК 621.436

Прохоренко А.А., к.т.н., Самойленко Д.Е., к.т.н., Мешков Д.В.

НТУ «ХПИ», г. Харьков

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ ФОРСУНКИ

*Рассмотрено использование метода исследования пространства параметров в качестве инструмента для выполнения многопараметрической оптимизации электроуправляемой дизельной топливной форсунки с линейным пьезоэлектрическим двигателем. Представлены алгоритм работы, конструктивные и варьируемые параметры, основные результаты использования метода.*

### **Введение**

Современные системы топливоподачи дизелей, основу которых составляют электрогидравлические форсунки (ЭГФ), представляют собою сложные гидромеханические системы. Это обусловлено тем, что по ряду определенных причин управление запорным органом (иглой распылителя) осуществляется не непосредственно от силового устройства (соленоида, пьезодвигателя и др.), а через гидравлическую систему жиклеров, каналов и объемов. Процессы, происходящие в перечисленных полостях форсунки, характеризуются не только сложным характером протекания, но и воздействием друг на друга. Сами же характеры протекания процессов определяются конструктивными параметрами — объемами, площадями, диаметрами, длинами каналов, размерами полостей, а также параметрами механической части — массами, жесткостями и перемещениями запорных органов.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что процесс проектирования современной дизельной ЭГФ заключается не только в разработке конструкции, но и обязательной последующей оптимизации ее параметров. Более того, вследствие взаимовлияния и взаимосвязи процессов, имеющих место при ее работе, набор конструктивных параметров должен быть таким, чтобы обеспечивать работоспособность форсунки в широком диапазоне режимов (от минимального до максимального значения давления и продолжительности управляющего импульса). Такой подход требует применения многокритериальной многопараметрической оптимизации уже на стадии проектирования форсунки. При этом очевидно, что такая оптимизация должна выполняться с применением адекватной математической модели устройства, которая позволяет не только изменять в широком диапазоне варьируемые параметры, но и отслеживать характер протекания процессов в любой точке системы.

Вследствие наличия большого числа параметров, влияющих на работу современной электроуправляемой форсунки, решение задачи их оптимизации сложно выполнить традиционными методами, требующими проведения большого числа факторных экспериментов, составления уравнений регрессии и т.д. Поэтому на практике оптимизация работы ЭГФ зачастую сводится к анализу влияния тех или иных параметров на выбранные критерии качества с последующим «подбором» «необходимых» их значений [1, 2, 3] и, в лучшем случае, построению оптимизационной картины по двум-трем параметрам. Однако, как показывает анализ последних публикаций [4, 5, 6], для решения подобных задач оптимизации в двигателестроении успешно может применяться метод исследования пространства параметров (ИПП), не имеющий ограничений ни на количество параметров, ни на количество критериев качества [7].

**Целью настоящей работы** является определение вектора оптимальных параметров пьезоэлектрической ЭГФ, обеспечивающего требуемый уровень критериев качества на всех режимах работы форсунки, с использованием метода ИПП.

**Объектом исследования** является разработанная в НТУ «ХПИ» конструкция пьезоэлектрической форсунки, описание и принцип действия которой приведены в [8].

**Инструментом исследования** является математическая модель указанной форсунки, реализованная в среде MatLab/Simulink и описанная в [8]. Математическая модель дополнена программным кодом, позволяющим генерировать таблицу испытаний (массив пробных точек) на основе ЛП<sub>т</sub> последовательности [7] и производить моделирование с последовательным перебором заданных векторов параметров.

### Исследуемые параметры

Разработанная конструкция пьезоэлектрической форсунки содержит около 40 конструктивных параметров, тем или иным образом влияющих на рабочий процесс системы. Из всей совокупности выделены 13 параметров, которые, по мнению авторов, оказывают влияние в наибольшей степени. Исследуемые параметры и пределы их варьирования перечислены в табл.1. и показаны на рисунке 1. Там же приведены значения параметров в исходной точке. Эти значения были выбраны в ходе предварительных расчетов и идентификации модели.

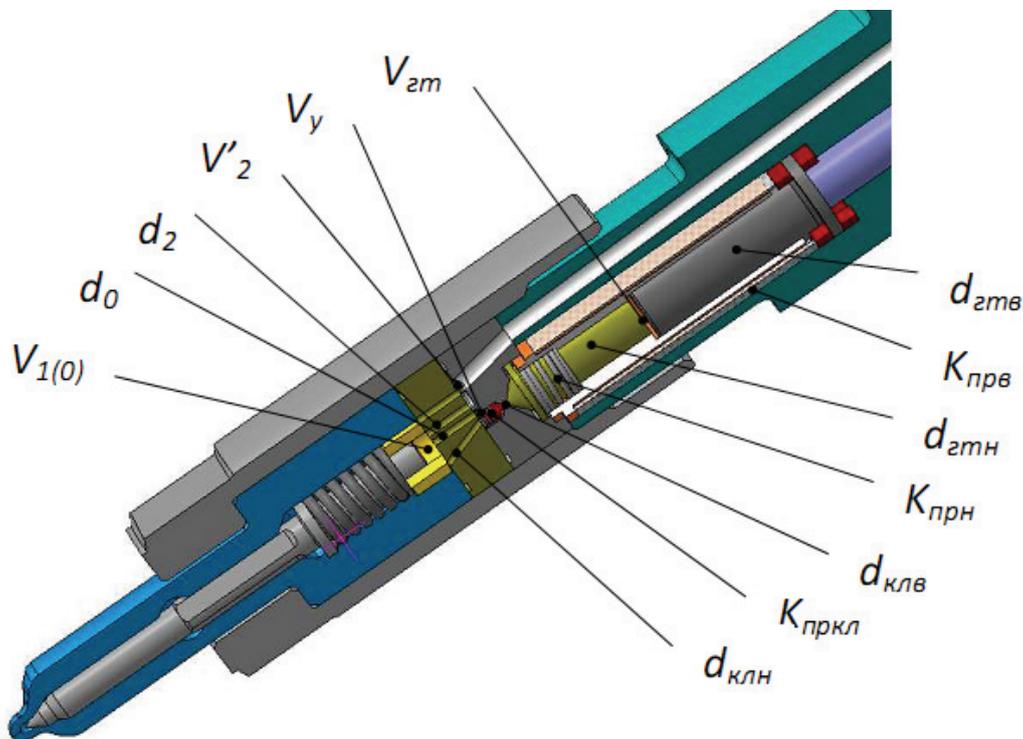


Рис. 1. Исследуемые конструктивные параметры ЭГФ конструкции НТУ «ХПИ»

В табл. 1 обозначено:  $K_{прв}$ ,  $K_{прн}$ ,  $K_{пркл}$  — жесткость, соответственно, верхней и нижней пружин гидротолкателя, пружины клапана;  $V_{1(0)}$  — объем полости запираения в начальный момент времени;  $V_{2m}$  — объем полости в гидротолкателе;  $V_y$  — объем полости управления;  $V'_2$  — объем полости перед камерой запираения;  $d_{клев}$ ,  $d_{клен}$  — эффективный диаметр проходного сечения, соответственно, в верхнем и нижнем каналах клапана;  $d_{2mв}$ ,  $d_{2мн}$  — диаметр поперечного сечения, соответственно, верхнего и нижнего плунжеров гидротолкателя;  $d_2$ ,  $d_0$  — диаметр проходного сечения, соответственно, входного и выходного жиклеров полости запираения.

Таблица 1

## Исследуемые параметры

№	Параметр, $\alpha_{i,j}$	Размерность	Начальное значение, $\alpha_{0,j}$	Пределы изменения		Оптимальное значение
				$\alpha_j \max$	$\alpha_j \min$	
1	$K_{пркл}$	кН/м	290	205	375	361
2	$V_{1(0)}$	мм <sup>3</sup>	10	2	18	6
3	$V_y$	мм <sup>3</sup>	30	15	47	20
4	$V'_2$	мм <sup>3</sup>	8	3	13	4
5	$d_0$	мм	0,17	0,16	0,34	0,29
6	$d_2$	мм	0,2	0,03	0,27	0,2
7	$d_{клев}$	мм	1,5	0,25	2,25	1,94
8	$d_{клин}$	мм	0,5	0,2	0,8	0,38
9	$K_{прв}$	кН/м	250	200	300	250
10	$K_{прн}$	кН/м	130	100	160	100
11	$V_{зт}$	мм <sup>3</sup>	3,3	1,1	6,1	4,7
12	$d_{зтв}$	мм	5	2,3	6,1	5,7
13	$d_{зтв}/d_{зтн}$	мм	0,82	0,65	0,99	0,814

При выборе пределов варьирования каждого из параметров исходили из возможности покрытия наибольшей области с учетом конструктивных и технологических ограничений. Например, нижний предел значения  $V_{1(0)} = 2 \text{ мм}^3$  — из возможности обеспечения хода иглы 0,23 мм;  $d_{зтн} < d_{зтв}$  — из функционального назначения гидротолкателя — обеспечивать температурную компенсацию и увеличение перемещения при передаче движения от пьезодвигателя к клапану.

**Критерии качества**

В дополнение к общепринятым [9] для ЭГФ критериям качества — среднему давлению впрыскивания ( $p_{с\ ср}$ ) и величине управляющей подачи ( $B_y$ ) в настоящем исследовании введены еще два критерия, характеризующие быстрдействие форсунки:

$\tau_{под}$  — время от начала подачи управляющего импульса на пьезодвигатель до начала подъема иглы форсунки;

$\tau_{нос}$  — время от снятия управляющего импульса до посадки иглы форсунки.

Данные критерии важны с точки зрения относительного времени нахождения форсунки в «неуправляемом» состоянии, что сказывается на возможности обеспечения устойчивых малых цикловых подач.

Перечисленные критерии качества переведены в безразмерную форму следующим образом:

$$\Phi_p = \frac{p_{ак}}{p_{ср}}; \quad \Phi_B = \frac{B_y}{B_{ц}}; \quad \Phi_{под} = \frac{\tau_{под}}{\tau_{упр}}; \quad \Phi_{нос} = \frac{\tau_{нос}}{\tau_{упр}},$$

где  $p_{ак}$  — давление в аккумуляторе;

$B_{ц}$  — цикловая подача топлива;

$\tau_{уп}$  — продолжительность управляющего импульса.

В исследовании принято:  $p_{ак.мах} = 160$  МПа,  $p_{ак.мин} = 30$  МПа,  $\tau_{уп.мах} = 2,2$  мс,  $\tau_{уп.мин} = 0,6$  мс — для обеспечения соответственно номинальной и минимальной на устойчивом холодном ходу цикловых подач.

Значения критериев качества в исходной точке приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения критериев качества в пяти точках

i	$\Phi_{в}$	$\Phi_{р}$	$\Phi_{пос}$	$\Phi_{под}$	$\Phi'_{в}$	$\Phi'_{р}$	$\Phi'_{пос}$	$\Phi'_{под}$
180	0,103	1,354	0,130	0,015	0,427	17,866	0,572	0,050
259	0,106	1,351	0,156	0,020	0,420	18,336	0,612	0,068
<b>343</b>	<b>0,085</b>	<b>1,340</b>	0,163	<b>0,012</b>	<b>0,324</b>	<b>16,481</b>	0,683	<b>0,040</b>
369	0,081	1,345	0,224	0,028	0,327	18,114	0,903	0,092
902	0,100	1,353	0,158	0,036	0,437	18,884	0,645	0,120
0	0,096	1,433	0,205	0,060	1,22	138	0,428	0,290

Тогда задача оптимизации сводится к нахождению такого набора параметров, который обеспечит минимальное значение перечисленных критериев.

### Методика и алгоритм проведения исследования

Как отмечалось выше, в настоящем исследовании использовался современный метод оптимизации, называемый «Исследование пространства параметров». Идеология и методика полностью описаны его авторами в [7]. Приведем здесь лишь некоторые основные положения методики.

Алгоритм оптимизации включает 3 этапа:

1-й — проведение численных экспериментов на основе плана, составленного по специальному алгоритму с использованием ЛП<sub>т</sub> последовательности. Результатом выполнения этапа является так называемые «таблицы испытаний» — результаты математического моделирования работы объекта исследования в каждой точке заданного плана. Такие точки названы «пробными точками». 2-й и 3-й этапы — соответственно выбор критериальных ограничений и проверка непустоты множества эффективных точек — могут быть объединены, и выполняться одновременно путем отбрасывания точек, имеющих хотя бы одно из значений критерия качества хуже, чем заданный.

Оставшиеся после таких действий точки могут быть рассмотрены как массив векторов параметров, обеспечивающих наилучшую (оптимальную) работоспособность исследуемой конструкции.

План эксперимента был составлен с использованием зависимости

$$q_{i,j} = \sum_{k=1}^m \frac{\left\{ \frac{1}{2} \cdot \sum_{l=k}^m \left[ 2 \left\{ \frac{i}{2^l} \right\} \right] \cdot \left[ 2 \cdot \left\{ \frac{r_j^{(l)}}{2^{l+1-k}} \right\} \right] \right\}}{2^{k-1}},$$

создающей набор относительных значений варьируемых параметров в пробных точках.

Здесь  $m = 1 + \frac{\ln(i)}{\ln(2)}$ ,  $r_j^{(l)}$  — число, определенное по таблице числителей [7],  $i$  — номер пробной точки;  $j$  — номер параметра;  $\{ \}$  — дробная часть числа;  $[ ]$  — целая часть числа.

Переход от относительных значений к абсолютным выполнен по зависимости

$$\alpha_{i,j} = q_{i,j} \alpha_{j_{\max}} + (1 - q_{i,j}) \alpha_{j_{\min}},$$

где  $\alpha_{j_{\max}}, \alpha_{j_{\min}}$  — пределы варьирования параметров.

На основе приведенного алгоритма был проведен численный эксперимент по ИПП в 1024 точках тринадцатимерного пространства. При этом моделирование работы ЭГФ было выполнено последовательно для двух режимов: 1 режим —  $p_{ак} = 160 \text{ МПа}$ ,  $\tau_{yn} = 2,2 \text{ мс}$ , 2 режим —  $p_{ак} = 30 \text{ МПа}$ ,  $\tau_{yn} = 0,6 \text{ мс}$ .

Результат проведенного численного эксперимента показал, что система сохраняет работоспособность на обоих режимах в 120 точках из 1024. Фрагмент полученной таблицы испытаний приведен в табл. 3. (соответствующие критерии качества для режима 2 обозначены:  $\Phi'_в, \Phi'_p, \Phi'_{нос}, \Phi'_{под}$ ).

Таблица 3

Таблица испытаний

№ п.п.	Режим 1								Режим 2							
	$i$	$\Phi_в$	$i$	$\Phi_p$	$i$	$\Phi_{нос}$	$i$	$\Phi_{под}$	$i$	$\Phi'_в$	$i$	$\Phi'_p$	$i$	$\Phi'_{нос}$	$i$	$\Phi'_{под}$
1	303	0,040	690	0,488654	766	0,126	907	0,011	413	0,120	413	12,537	221	0,330	343	0,040
2	431	0,050	105	0,722185	871	0,130	413	0,011	443	0,125	503	13,059	609	0,418	907	0,040
3	315	0,057	662	0,836689	180	0,130	525	0,012	826	0,139	533	13,433	821	0,522	413	0,040
4	566	0,074	341	1,322423	163	0,131	343	0,012	46	0,159	991	13,433	766	0,533	525	0,042
5	369	0,081	1001	1,322642	996	0,136	287	0,013	303	0,159	998	13,520	475	0,538	287	0,045
6	343	0,085	893	1,325381	913	0,138	341	0,013	250	0,164	295	13,616	535	0,542	341	0,045
7	878	0,095	615	1,333889	66	0,139	238	0,013	998	0,175	593	13,693	163	0,543	238	0,047
8	902	0,100	214	1,334112	977	0,142	533	0,014	511	0,178	662	13,867	871	0,547	533	0,047
9	180	0,103	695	1,334223	535	0,149	45	0,014	315	0,181	511	13,891	180	0,572	511	0,047
10	259	0,106	566	1,334334	214	0,150	511	0,014	295	0,191	709	14,030	66	0,573	520	0,048
11	963	0,115	382	1,335448	621	0,150	520	0,014	627	0,193	143	14,081	996	0,577	45	0,048
12	491	0,117	606	1,337234	141	0,150	991	0,014	533	0,194	799	14,177	141	0,577	893	0,048
13	729	0,120	525	1,338688	709	0,153	214	0,015	929	0,198	687	14,333	745	0,595	991	0,048
14	615	0,126	45	1,33936	745	0,154	893	0,015	431	0,199	303	14,524	621	0,597	180	0,050
15	443	0,128	343	1,339921	520	0,155	180	0,015	593	0,205	237	14,547	913	0,597	214	0,050
16	421	0,132	623	1,339921	259	0,156	826	0,015	662	0,207	397	14,599	259	0,612	826	0,050
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
115	999	0,426	821	1,49925	729	0,333	221	0,125	163	0,726	1007	30,840	511	1,830	141	0,160
116	745	0,433	799	1,500797	431	0,345	609	0,129	475	0,741	483	39,600	443	1,842	467	0,160
117	991	0,461	155	1,510717	250	0,349	141	0,143	821	0,753	958	40,416	413	1,850	958	0,182
118	22	0,462	609	1,515582	826	0,352	105	0,821	766	0,909	821	93,963	46	1,948	10	0,192
119	977	0,504	687	1,525117	303	0,355	662	0,840	609	1,737	609	282,277	627	2,018	609	0,322
120	766	0,547	221	1,529783	315	0,360	690	0,877	221	3,229	221	521,597	826	2,118	221	0,325

Как видно из данных, приведенных в табл. 2, в результате проведенного исследования идеальное решение задачи оптимизации получено не было. Поэтому, применяя принцип формализации, назначаем компромиссное решение путем выбора одного из полученных векторов параметров, который и назовем оптимальным.

При этом, на наш взгляд, целесообразно руководствоваться следующим.

Введем ограничение по критерию качества  $\Phi_p < 0,11$  для режима 1. Таким образом, количество векторов параметров, соответствующее этому ограничению, уменьшится до 7. Последующее ограничение критерия  $\Phi'_{нос} < 1,0$  оставляет 5 векторов в точках 180, 259, 343, 369, 902.

Значения критериев качества в этих точках приведены в табл. 2.

Анализируя данные табл. 3, нетрудно заметить, что вектор параметров в точке 343 имеет 5 из 8 минимальных значений критериев качества из выбранных векторов и еще один, незначительно отличающийся от минимального. Исходя из этого, наилучшей пробной точкой (оптимальной) объявлена точка 343. Соответствующие ей значения вектора параметров приведены в табл. 1.

Принципиально возможно проведение дополнительного исследования в окрестностях точки 343, как описано в работе [4]. Однако, по нашему мнению, особой необходимости в этом нет; исходя из закона Парето, значительное увеличение объема работ дает малый эффект в результате.

В заключение на рис. 2, 3 приведены графики, отражающие процессы в ЭГФ с исходными и оптимальными параметрами.

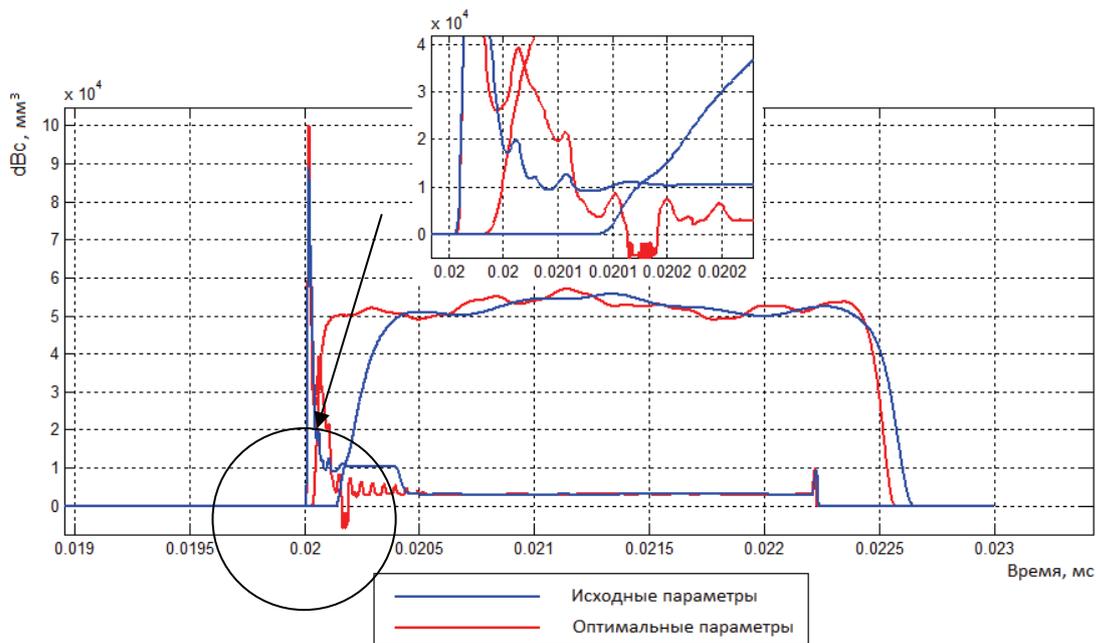


Рис. 2. Зависимость дифференциальной характеристики топливоподачи и расхода топлива в камере управления при исходных и оптимизированных параметрах

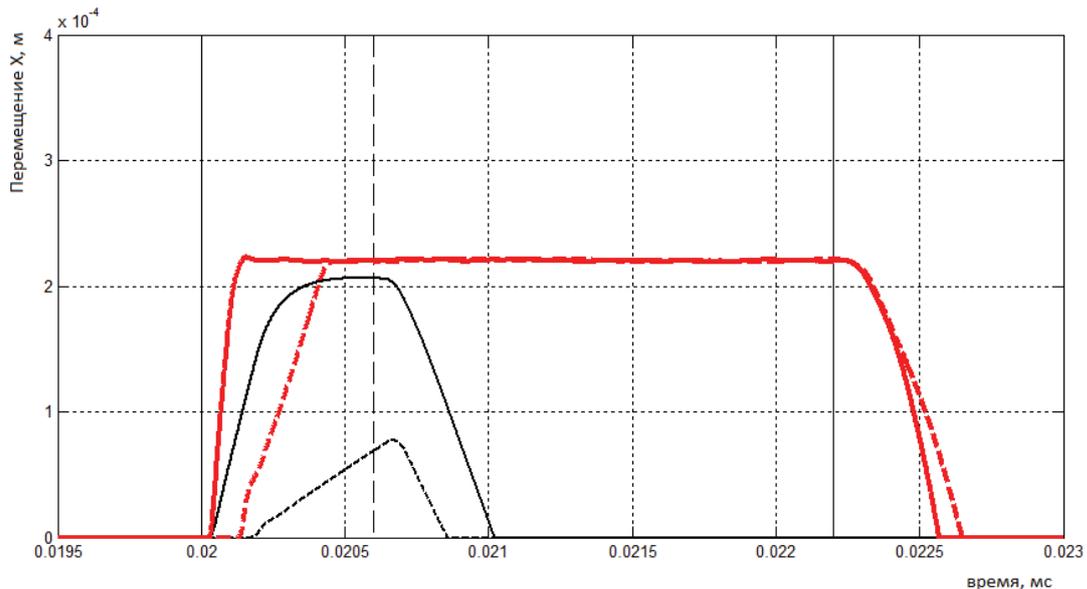


Рис. 3. Зависимости перемещения иглы распылителя с исходными (---) и оптимизированными параметрами (—), запорного клапана камеры управления с исходными (---) и оптимизированными параметрами (—).

### **Выводы**

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. Для проведения многопараметрической многокритериальной оптимизации конструкции пьезоэлектрической форсунки целесообразно применять современный метод — исследование пространства параметров.

2. Обозначены четыре критерия качества, позволяющие оценить эффективность рабочего процесса ЭГФ.

3. Выполненная оптимизация позволила:

а) определить область значений параметров, при которых конструкция форсунки является работоспособной во всем диапазоне возможных режимов ее работы;

б) определить конкретный вектор параметров, при которых форсунка обеспечивает меньшие значения критериев качества, чем в исходной точке. При этом на номинальном режиме быстродействие увеличивается по подъему в 5 раз, по посадке в 1,25 раза, а на режиме холостого хода расход топлива на управление уменьшается в 3,75 раза при увеличении среднего давления впрыскивания более чем в 8 раз.

### **Список литературы**

1. Фонов В.В. Компоненты перспективных топливных систем аккумуляторного типа с электронным управлением для транспортных дизелей: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.04.02 / В.В. Фонов. — М., 2004. — 16 с.
2. Ефимов К. В. Оптимизация параметров электрогидравлической форсунки для дизеля с микропроцессорной системой управления: автореф. дис. на соискание учен. степени канд.техн.наук: спец. 05.04.02 / К.В. Ефимов. — М., 2004. —23 с.
3. Врублевский А.Н. Многокритериальный синтез топливной системы с электронным управлением впрыскивания/ А.Н. Врублевский, А.Л. Григорьев, А.В. Денисов //Двигатели внутреннего сгорания. — 2008. — №1. — С. 91-98.
4. Прохоренко А.П. Математическая модель процесса топливоподачи системой Common Rail с пьезоэлектрической форсункой / А.П. Прохоренко, Д.Е. Самойленко, Д.В. Мешков / Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник / АДІ ДонНТУ. — Горлівка, 2009. — №1(8). — С. 6-12.
5. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: второе расшир. изд. / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. — М: Дрофа, 2006. — 175 с.
6. Грехов Л.В.Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. — М.: Легион-Автодата, 2004. — 344 с.
7. Режим доступа: [http://www.psi-movi.com/rus\\_PSImethod.htm](http://www.psi-movi.com/rus_PSImethod.htm)
8. Гоц А.Н. Выбор оптимальных параметров головки цилиндров с развитыми проходными сечениями систем газообмена / А.Н. Гоц // Режим доступа: <http://ev.nuos.edu.ua/content/vybor-optimalnykh-parametrov-golovki-tsilindrov-s-razvitymi-prokhodnymi-secheniyami-sistem-g>
9. Емельянов Л. А. Развитие комплекса математических моделей дизеля, оснащенного аккумуляторной топливной системой с электронным управлением: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук: спец. 05.04.02 / Л. А. Емельянов / Моск. гос. автомоб.-дор. ин-т (техн. ун-т). — Москва, 2007. — 24 с.

Стаття надійшла до редакції 15.03.10

© Прохоренко А.О., Самойленко Д.Є., Мешков Д.В., 2010