

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИКИ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДИЗЕЛЯ С ЭЛЕКТРОННЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НА ЕГО ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

В.С. Морозова, В.С. Гун, А.А. Гун, В.Л. Поляцко

THEORETICAL RESEARCHES OF INFLUENCE OF DYNAMICS AND DURATION OF TRANSIENTS OF THE DIESEL ENGINE WITH THE ELECTRONIC REGULATOR ON ITS ECOLOGICAL PARAMETERS

V.S Morozova, V.S. Goun, A.A. Goun, V.L. Polyacko

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования показали, что путем совершенствования систем автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала дизеля возможно значительное улучшение его эксплуатационных, динамических, экономических и экологических показателей.

Ключевые слова: динамические параметры, электронный регулятор, контур управления, коэффициенты обратных связей, сигнал рассогласования, относительное отклонение, токсичность отработавших газов.

By computational and experimental research have shown that by improving the systems of automatic adjustment speed diesel engine may be a significant improvement in its performance indicators – dynamic performance of the engine and performance efficiency and toxicity of the exhausts.

Keywords: dynamic parameters, electronic regulator, contour of management, factors of feedback, signal of a mismatch, a relative deviation, toxic of exhaust.

Авторами разработан и научно обоснован в виде аналитического решения метод синтеза конструктивных параметров электронного регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля, обеспечивающий требуемые динамические характеристики и экологические показатели в зависимости от режима работы дизеля, технических параметров электронного регулятора и длительности переходного процесса (ПП).

Разработана методика и создан алгоритм анализа ПП дизеля, позволяющие исследовать изменение частоты вращения коленчатого вала и динамику перемещения рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД) для управляющих и возмущающих воздействий на динамические характеристики дизеля с механическим и электронным регуляторами с расчетом экологических показателей [1, 2].

В основе моделирования ПП лежит решение системы дифференциальных уравнений (1), описывающих динамику дизеля с электронным регулятором частоты вращения коленчатого вала:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{30}{\pi J} \left(\sum M_{кр} - M_c \right); \\ \frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{Bl}{L}V_h - \frac{k_0}{L}h - \frac{k_1}{L}V_h - \frac{k_2}{L}i - \frac{k_3}{L}m + \frac{U}{L}; \\ \frac{dV_h}{dt} = \frac{Bl}{m}i - \frac{c}{m}V_h; \\ \frac{dh}{dt} = V_h. \end{cases} \quad (1)$$

Расчет и конструирование

где n – частота вращения коленчатого вала (КВ) дизеля; h – положение рейки ТНВД; V_h – скорость перемещения рейки ТНВД; i – ток якоря исполнительного механизма (ДПТ); N – число цилиндров; J – суммарный момент инерции вращающихся масс; $M_{кр}$ – крутящий момент, развиваемый в j -м цилиндре; M_c – момент сопротивления на валу дизеля, включая момент потерь на трение; R и L – соответственно активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря исполнительного механизма; m – масса движущихся частей регулятора; l – длина обмотки якоря; c – электромеханический коэффициент; B – магнитная индукция обмотки возбуждения; k_0, k_1, k_2, k_3 – коэффициенты обратных связей соответственно по перемещению рейки ТНВД, по скорости перемещения рейки, по току исполнительного механизма, по частоте вращения коленчатого вала дизеля.

Крутящий момент $M_{кр}$ двигателя определялся в ходе моделирования замкнутого расчета рабочего цикла дизеля для «среднего» цилиндра. Масса сгоревшего топлива определялась на основе уравнения выгорания И.И. Вибе [3].

Параметры кинетики сгорания для ПП определялись по зависимостям В.М. Бунова [4]. В основе моделирования газообмена и параметров рабочего тела в цилиндре дизеля во время сжатия и расширения рабочего тела лежит решение задачи о распаде произвольного разрыва С.К. Годунова [5].

Авторами создан алгоритм и программа замкнутого расчета рабочего цикла дизеля как для одного «среднего» цилиндра, так и для развернутого дизеля и описаны граничные условия. Результаты расчета ПП дизеля 4ЧН14,5/20,5 с электронным регулятором частоты вращения коленчатого вала представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что содержание сажи в ОГ и время ПП дизеля совпадают с экспериментальными исследованиями В.М. Бунова с достаточной для инженерных расчетов точностью (погрешность $\sim 5\%$) [6].

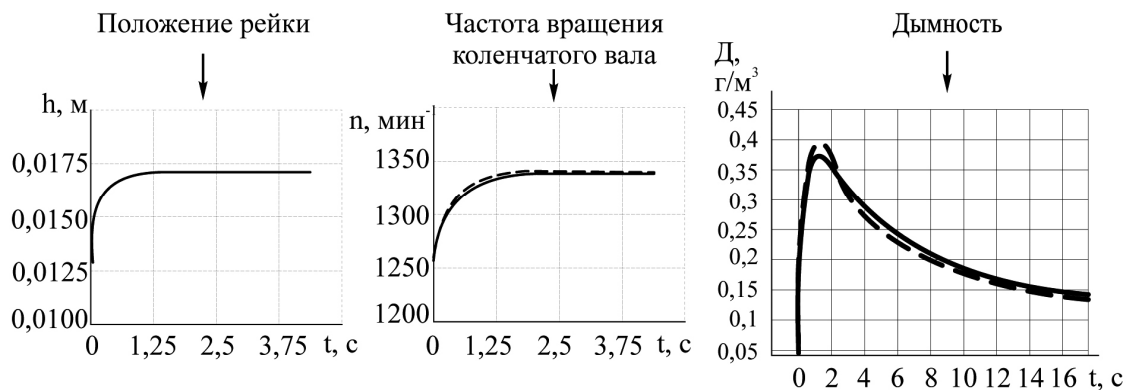


Рис. 1. ПП дизеля 4ЧН14,5/20,5 с электронным регулятором частоты вращения коленчатого вала дизеля: — расчет ПП по предложенной методике; - - - - экспериментальные данные В.М. Бунова

Для синтеза динамических характеристик рассмотрим линейное дифференциальное уравнение (2), описывающее динамику дизеля при постоянной нагрузке, предложенное В.И. Крутовым [7].

$$T_D \frac{d\varphi}{dt} + k_D \varphi = \eta, \quad (2)$$

где k_D – коэффициент самовыравнивания; T_D – постоянная времени дизеля.

Под параметрами η и φ понимаются относительные отклонения от начального режима работы: $\eta = \Delta h/h_{stl}$, $\varphi = \Delta n/n_{stl}$, где h_{stl} – начальное положение рейки; $\Delta h = h - h_{stl}$ – отклонение рейки от начального положения; n_{stl} – начальная частота вращения коленчатого вала дизеля; $\Delta n = n - n_{stl}$ – отклонение от начальной частоты вращения.

Динамическая система при фиксированных параметрах дизеля n_{stl} и регулятора h_{stl} описывается системой неоднородных линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dh}{dt} &= V_h; \\ \frac{dV_h}{dt} &= \frac{Bl}{m}i - \frac{c}{m}V_h; \\ \frac{di}{dt} &= -\frac{R+k_2}{L}i - \frac{Bl+k_1}{L}V_h - \frac{k_0}{L}h - \frac{k_3}{L}n + \frac{U}{L}; \\ \frac{dn}{dt} &= \frac{n_{st}}{T_D h_{st}}h - \frac{k_D}{T_D}n - \frac{n_{st}}{T_D} \cdot (k_D - 1). \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Поставлена задача: найти значения коэффициентов управления частотой вращения коленчатого вала – k_0, k_1, k_2, k_3 , обеспечивающих апериодический ПП заданной длительности, т. е. необходимо найти корни характеристического уравнения $(\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \dots (\lambda - \lambda_n) = 0$ системы (3).

В частности, для определения коэффициентов обратных связей оптимальных ПП будем рассматривать случай действительных отрицательных значений λ , что дает апериодический экспоненциальный характер изменения частоты вращения коленчатого вала дизеля.

В важном частном случае, когда $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n = \lambda$ – кратные корни с отрицательной действительной и нулевой мнимой частью, получаем апериодический ПП с постоянной времени $\tau = -\lambda^{-1}$. При этом коэффициентами характеристического уравнения являются коэффициенты бинома Ньютона [4].

Для реализации методики был разработан пакет прикладных программ расчета коэффициентов обратной связи и ПП дизельных двигателей. В качестве примера для управляющих воздействий при изменении сигнала задания по частоте вращения коленчатого вала дизеля определены коэффициенты обратных связей (4):

$$\left\{ \begin{aligned} k_0 &= \frac{ML}{Bl} \left(-4\lambda^3 - \frac{k_D}{T_D} \left(\frac{k_D}{T_D} \left(4\lambda + \frac{k_D}{T_D} \right) + 6\lambda^2 \right) \right); \\ k_1 &= \frac{ML}{Bl} \left[6\lambda^2 + \left(\frac{k_D}{T_D} + \frac{c}{M} \right) \left(4\lambda + \frac{k_D}{T_D} \right) + \left(\frac{c}{M} \right)^2 \right] - Bl; \\ k_2 &= -L \left(\lambda + \frac{k_D}{T_D} + \frac{c}{M} \right) - R; \\ k_3 &= \frac{ML}{Bl} \frac{h_{st}}{n_{st}} \left(\lambda + \frac{k_D}{T_D} \right)^4. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

При исследовании динамических характеристик дизеля ПП рассчитывались для управляющих (изменение положения педали управления) и возмущающих (изменение момента нагрузки от 0 до номинальной, и наоборот) воздействий на систему автоматического регулирования частоты (САРЧ) вращения дизеля.

Относительные изменения положения рейки и частоты вращения коленчатого вала дизеля 4ЧН14,5/20,5 при изменении сигнала задания по частоте вращения для различных λ представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что динамические характеристики ПП зависят от параметров электронного регулятора k_0, k_1, k_2, k_3 , определяемых λ . Параметры ПП могут быть изменены в соответствии с заданным классом точности САРЧ.

Для возмущающих воздействий авторами предложено уравнение динамики дизеля:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{30}{\pi J} \left(\frac{\partial M}{\partial h} \Big|_{h_{st}, n_{st}, x} - \frac{\partial M}{\partial n} \Big|_{h_{st}, n_{st}, n} \right) = \frac{30}{\pi J} (k_x x - k_n n), \quad (5)$$

где k_x, k_n – постоянные коэффициенты, определяемые при условии $\Delta n = 0$; x – отклонение положения рейки ТНВД, соответствующее исходному стационарному режиму работы.

Расчет и конструирование

Используя уравнение (5), исследованы ПП дизеля с пропорциональным (П) электронным регулятором при 100 %-ном уменьшении и последующем увеличении нагрузки (рис. 3).

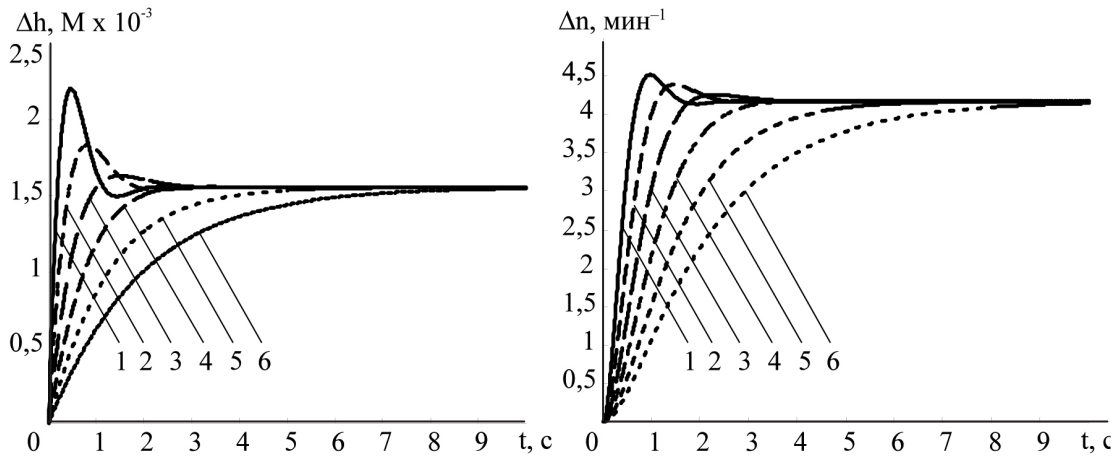
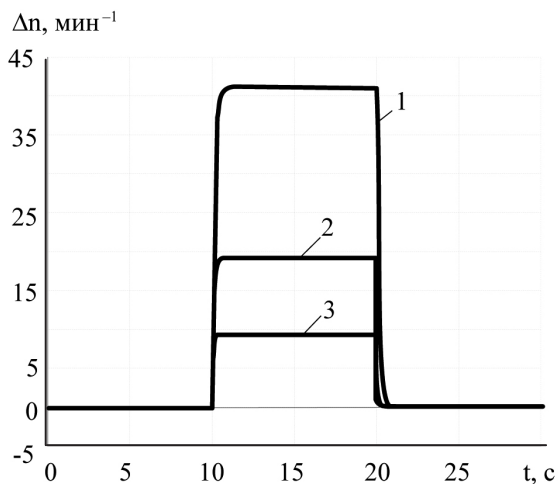


Рис. 2. Кинетика перемещения рейки и изменение частоты вращения коленчатого вала 4ЧН14,5/20,5 при изменении сигнала задания: 1 – $\lambda = -50$; 2 – $\lambda = -20$; 3 – $\lambda = -16$; 4 – $\lambda = -14$; 5 – $\lambda = -12$; 6 – $\lambda = -10$



Из рис. 3 видно, что заброс частоты Δn вращения, определяющий наклон регуляторной характеристики дизеля, может быть задан при проектировании и изменен в процессе настройки электронного регулятора.

ПП дизеля с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором описывается системой уравнений пятого порядка, с коэффициентами обратных связей (k_0, k_1, k_2, k_3, k_4).

Рис. 3. ПП дизеля 4ЧН14,5/20,5 с П-регулятором при мгновенном изменении нагрузки: 1 – $\lambda = -50$; 2 – $\lambda = -100$; 3 – $\lambda = -200$

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = V_h; \\ \frac{dV_h}{dt} = \frac{Bl}{m}i - \frac{c}{m}V_h; \\ \frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{Bl}{L}V_h - \frac{k_0}{L}h - \frac{k_1}{L}V_h - \frac{k_2}{L}i - \frac{k_3}{L}n - \frac{k_4}{L}\varphi; \\ \frac{dn}{dt} = \frac{30}{\pi J} \left(\frac{\partial M}{\partial h} \Big|_{h_{st}, n_{st}, x} - \frac{\partial M}{\partial n} \Big|_{h_{st}, n_{st}, n} \right) = \frac{30}{\pi J} (k_x x - k_n n); \\ \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\pi n}{30}. \end{cases} \quad (6)$$

где φ – угол поворота коленчатого вала.

ПП дизеля с ПИ-регулятором при мгновенном изменении нагрузки будет иметь следующий вид (рис. 4).

Из графиков видно, что длительность ПП и заброс частоты дизеля с электронным ПИ-регулятором для одинаковых отклонений рейки от стационарного положения (x) меньше, чем для дизеля с П-регулятором.

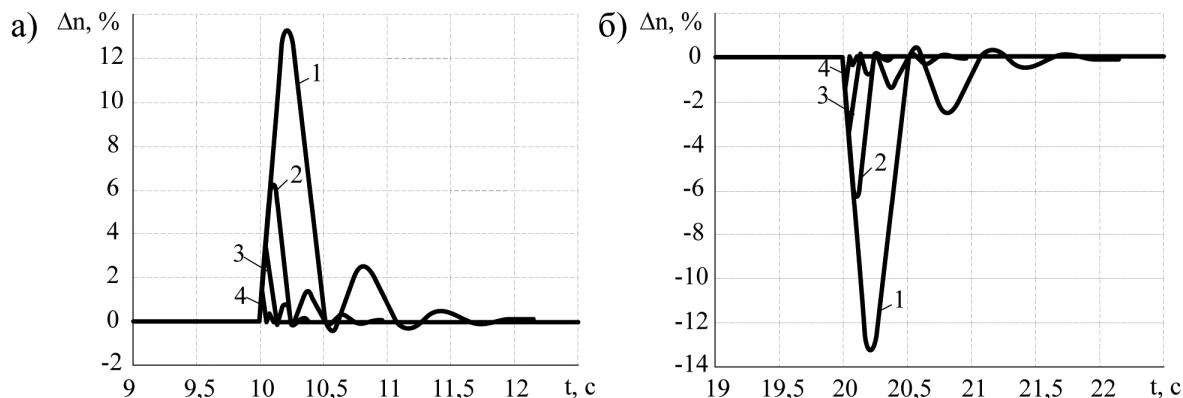


Рис. 4. ПП дизеля с электронным ПИ-регулятором при мгновенном изменении нагрузки: а) уменьшение 100 % нагрузки; б) увеличение 100 % нагрузки. 1 – $\lambda = -10$; 2 – $\lambda = -20$; 3 – $\lambda = -40$; 4 – $\lambda = -100$

Проведенные исследования ПП дизеля 4ЧН14,5/20,5 показали, что оптимальный диапазон изменения λ для П- и ПИ-регуляторов – в пределах от -50 до -10 , так как ток якоря ДПТ не превышает $2,5$ А, отсутствует колебание рейки около установившегося режима и динамические характеристики САРЧ соответствуют ГОСТ 10511-83.

Изменение экологических показателей ПП в зависимости от λ для П- и ПИ-регуляторов представлено на рис. 5.

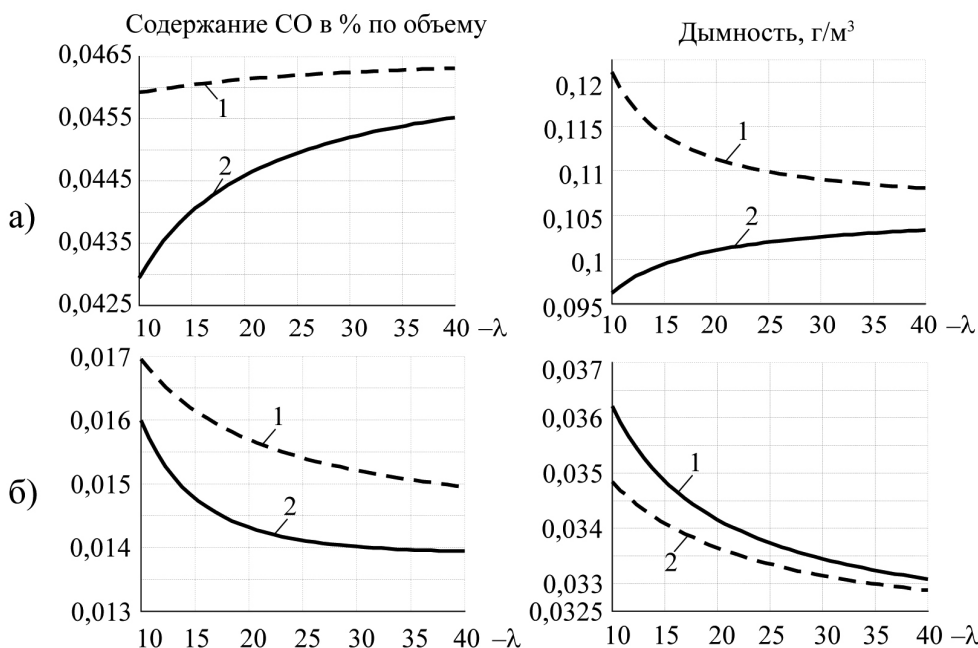


Рис. 5. Изменение экологических показателей ПП дизеля с электронным регулятором в зависимости от λ : а) наброс 100 % нагрузки; б) сброс 100 % нагрузки. 1 – П-регулятор; 2 – ПИ-регулятор

Из графиков видно, что наилучшие экологические показатели получены для $\lambda = -40$ для обоих типов регуляторов.

Проведенные по разработанной математической модели расчетные исследования ПП дизеля с опытными электронными П- и ПИ-регуляторами показали результаты, отличающиеся от экспериментальных на $2,5-10\%$. Теоретические исследования параметров ПП с $\lambda = (-10...-50)$ для П-регулятора определили $t = 0,25-1,5$ с и $\Delta n = 9-45$ мин⁻¹, а с использованием ПИ-регулятора показали колебания длительности ПП при сбросе и набросе нагрузки в пределах $t = 0,1-1,5$ с, а сброс частоты в диапазоне $n_{заб} = 2-18$ мин⁻¹.

Теоретические и экспериментальные исследования токсичности ОГ показали, что выброс сажи за время ПП для $\lambda = -50$ по сравнению с опытным вариантом электронного регулятора

Расчет и конструирование

($\lambda = -10$) уменьшился на 16 %, а выброс CO снизился на 10 % для П-регулятора и на 15 и 8 % для ПИ-регулятора. Сравнительный анализ показателей дизеля с П- и ПИ-регуляторами в зависимости от характеристики ПП при $\tau = -1/\lambda = 0,025-0,1$ с показал, что дымность дизеля с ПИ-регулятором на 8 % меньше, чем с П-регулятором при примерно одинаковых выбросах CO.

Результаты расчетных исследований параметров ПП дизеля 4ЧН14,5/20,5 с электронным П-регулятором отличаются от опытных данных при сбросе и набросе 100 % нагрузки: по длительности ПП – на 10 %, по статической погрешности частоты вращения – на 2,0 %, по дымности отработавших газов – на 8 %.

Литература

1. Синтез динамических параметров дизеля с электронным регулятором частоты вращения / В.С. Гун, В.С. Морозова, В.В. Шешуков, А.Е. Марьин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2009. – Вып. 13. – № 13(144). – С. 68–72.
2. Гун, В.С. Улучшение динамики и экологических показателей переходных процессов дизеля с электронным управлением подачи топлива: дис. ... канд. техн. наук / В.С. Гун. – Челябинск, 2009. – 218 с.
3. Вибе, И.И. Новое о рабочем цикле двигателей / И.И. Вибе. – М.; Свердловск: МАШГИЗ, 1962. – 271 с.
4. Algorithmic maintenance of a diesel engine electronic fuel controller by criterion of the contents of soot in exhaust gas / S.P. Gladyshev, V.M. Bunov, V.S. Morozova et al. // SAE Technical Paper Series. – 2007. – № 07 PFL-452. – P. 1–6.
5. Березин, С.Р. Расчет на ЭВМ газообмена и воздухообмена комбинированных ДВС / С.Р. Березин. – М.: МВТУ, 1986.
6. Бунов, В.М. Повышение эффективности процесса сгорания в тракторных дизелях совершенствованием элементов систем впуска и управления топливоподачей: дис. ... д-ра техн. наук / В.М. Бунов. – М., 1999. – 289 с.
7. Крутов, В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания / В.И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1989. – 416 с.

Поступила в редакцию 17 февраля 2012 г.

Морозова Вера Сергеевна. Доктор технических наук, профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – впрыскивание топлива в дизелях, экология транспорта. E-mail: polyacko_2002@list.ru

Vera S. Morozova. The doctor of engineering sciences, professor “Automobile transport exploitation” department, South Ural state university. The area of scientific interests – fuel injection in diesel engine, ecology of transport. E-mail: polyacko_2002@list.ru

Гун Валентина Сергеевна. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – впрыскивание топлива в дизелях, экология транспорта, автомобильная электроника. E-mail: vgoun@mail.ru

Valentina S. Goun. The candidate of engineering science, senior lecturer of the ERES department, South Ural state university. The area of scientific interests – fuel injection in diesel engine, ecology of transport, automotive electronics. E-mail: vgoun@mail.ru

Гун Алексей Анатольевич. Доктор философии (Ph.D по физике), физический факультет, Принстонский университет. Область научных интересов – квантовая механика, нелинейная оптика. E-mail: alexei.goun@gmail.com

Alexei A. Goun. Ph.D Phisic, department of physics, Princeton university. The area of scientific interests – the quantum mechanics, nonlinear optics. E-mail: alexei.goun@gmail.com

Поляцко Владимир Леонидович. Ассистент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – экология транспорта. E-mail: polyacko_2002@list.ru

Vladimir L. Polyacko. Assistant of “Automobile transport exploitation” department, South Ural state university. The area of scientific interests – ecology of transport. E-mail: polyacko_2002@list.ru