

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ И МОМЕНТА НАГРУЗКИ НА ВАЛУ ДИЗЕЛЬ-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ В ФАЗУ УПРАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

**А.Н. Борисенко**, доктор технических наук, профессор Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" (НТУ "ХПИ")

**С.А. Литвиненко**, старший преподаватель НТУ "ХПИ", г. Харьков



А.Н. Борисенко



С.А. Литвиненко

*Анализируется методическая погрешность линейного и нелинейного преобразования угловой скорости вала и момента нагрузки в угол опережения топливоподачи дизель-генератора (ДГ), что возникает в переходных режимах его работы при резких изменениях момента нагрузки на его валу и различных управляющих и выходных сигналах системы управления силовой установкой.*

*The methodical uncertainty of linear and nonlinear transformation of angular speed of shaft and of load moment on lead angle of fuel supply of diesel generator (DG) that occurs in operational transient modes due to the abrupt changes of load moment on its shaft and in different control and output signals of the control system of power plant, is analyzed in the article.*

**Постановка проблемы.** В ряде работ, например [1–3], показано, что с целью повышения технико-экономических показателей двигателей внутреннего сгорания фазу топливоподачи необходимо изменять в зависимости от некоторых параметров режима его работы, в том числе момента нагрузки на его коленчатом валу.

**Анализ литературы** показывает, что в последние годы интенсивно ведутся работы по созданию многофункциональных электронных топливоподающих систем дизелей и бензиновых двигателей и уже имеется оснащение такими системами серийно выпускаемых агрегатов [4–6]. Однако оптимизация технико-экономических показателей силовых установок с помощью таких систем достигается, как правило, в установившихся, а не в переходных режимах работы этих установок. Отчасти это

объясняется недостаточной точностью поддержания требуемого закона изменения фазы топливоподачи в функции момента нагрузки двигателя в указанных режимах, кроме того, в ряде случаев не учитывается влияние на погрешность формирования фазы топливоподачи некоторых факторов, являющихся в одних условиях второстепенными, а в других – достаточно весомыми.

**Цель статьи** – произвести сравнительный анализ методической погрешности линейного и нелинейного преобразования угловой скорости и момента нагрузки дизель-генератора (ДГ) в угол опережения топливоподачи в переходных режимах работы агрегата с учетом углового ускорения вала и его начальной скорости в момент прохода в верхнюю мертвую точку, длительности импульса задания фазы топливоподачи и момента изменения нагрузки относительно момента начала подачи топлива.

При анализе погрешности будем принимать за основу положения работ [7–9]. Напомним, что в динамике погрешность формирования фазы впрыскивания топлива вызвана тем, что угловая скорость вала в начале и в конце данного оборота различна, если предположить, что крутящий момент дизеля скачкообразно изменяется непосредственно перед появлением импульса  $t_{\text{мр}}$  впрыска топлива. В этом случае, который в дальнейшем для краткости назовем “случаем А”, можно констатировать следующее: поскольку крутящий момент уже скачкообразно изменился до некоторого нового постоянного значения, то можно считать момент нагрузки  $M_H = \text{const}$ , кроме того, поскольку впрыск топлива происходит вблизи верхней мертвой точки (ВМТ), то согласно [7] можно записать

$$\theta = \left( t_{\text{и}} + \frac{K_p M_H K_V}{K_U} \right) \omega_{\text{ВМТ}}, \quad (1)$$

где  $\omega_{\text{ВМТ}}$  – угловая скорость вала при заходе поршня в верхнюю мертвую точку;  $K_p$  – коэффициент преобразования момента нагрузки в длительность импульса;  $K_V$  – первый коэффициент преобразования напряжения в частоту;  $K_U$  – второй коэффициент преобразования напряжения в частоту.

Тогда с учетом (1) относительную методическую погрешность формирования фазы впрыскивания топлива в переходных режимах с помощью способа [7] можно представить выражением [9]

$$\delta = \frac{\pi - S_1 \left( \omega_{\text{HMT}} + \frac{\varepsilon}{2} S_1 \right)}{\omega_{\text{BMT}} \left( t_{\text{и}} + \frac{K_p M_H K_v}{K_{\text{и}}} \right)} - 1, \quad (2)$$

где

$$S_1 = (\omega_0 + \omega_{\text{HMT}}) \left( \frac{\omega_0 - \omega_{\text{HMT}}}{\varepsilon} - t_{\text{и}} \right) - \frac{2K_p M_H K_v \omega_0}{K_{\text{и}}};$$

$$\omega_{\text{BMT}} = \sqrt{\omega_0^2 + 4\varepsilon\pi};$$

$\varepsilon$  – угловое ускорение вала;  $\omega_0$  – начальная угловая скорость вала;  $t_{\text{и}}$  – длительность импульса задержки.

Следовательно, методическая погрешность является функцией многих параметров  $\delta = f(\omega_0, \varepsilon, t_{\text{и}}, K_p, M_H, K_{\text{и}}, K_v)$ .

В качестве примера для конкретного режима ее график показан на рис. 1.

Кривые построены для нескольких фиксированных значений углового ускорения вала при плавном изменении начальной угловой скорости

вала и постоянстве всех остальных переменных в случае линейного преобразования угловой скорости и момента нагрузки в фазу топливоподачи (случай “А”).

Исследуем теперь относительную методическую погрешность процесса формирования фазы топливоподачи, описанного в [8].

Поскольку впрыскивание происходит вблизи ВМТ, то в случае установившегося скоростного режима работы агрегата, когда угловая скорость вала такая же, как и при равнопеременном вращении в момент прихода поршня в ВМТ, фазу топливоподачи по аналогии с (1) можно представить следующим образом:

$$\theta = \pi \left( 1 - \frac{2\pi f}{K_{\text{и}} K_p U_{\text{м}} \omega_{\text{BMT}} M_H} \right). \quad (3)$$

Тогда формула для определения относительной методической погрешности будет иметь вид [9]

$$\delta = \frac{1 - 2S_2(\omega_{\text{HMT}} + S_2)}{1 - \frac{2\pi f}{K_{\text{и}} K_p U_{\text{м}} \omega_{\text{BMT}} M_H}} - 1, \quad (4)$$

где

$$S_2 = \frac{f(\omega_{\text{BMT}} - \omega_0)}{K_{\text{и}} K_p U_{\text{м}} M_H \omega_{\text{BMT}} M_H};$$

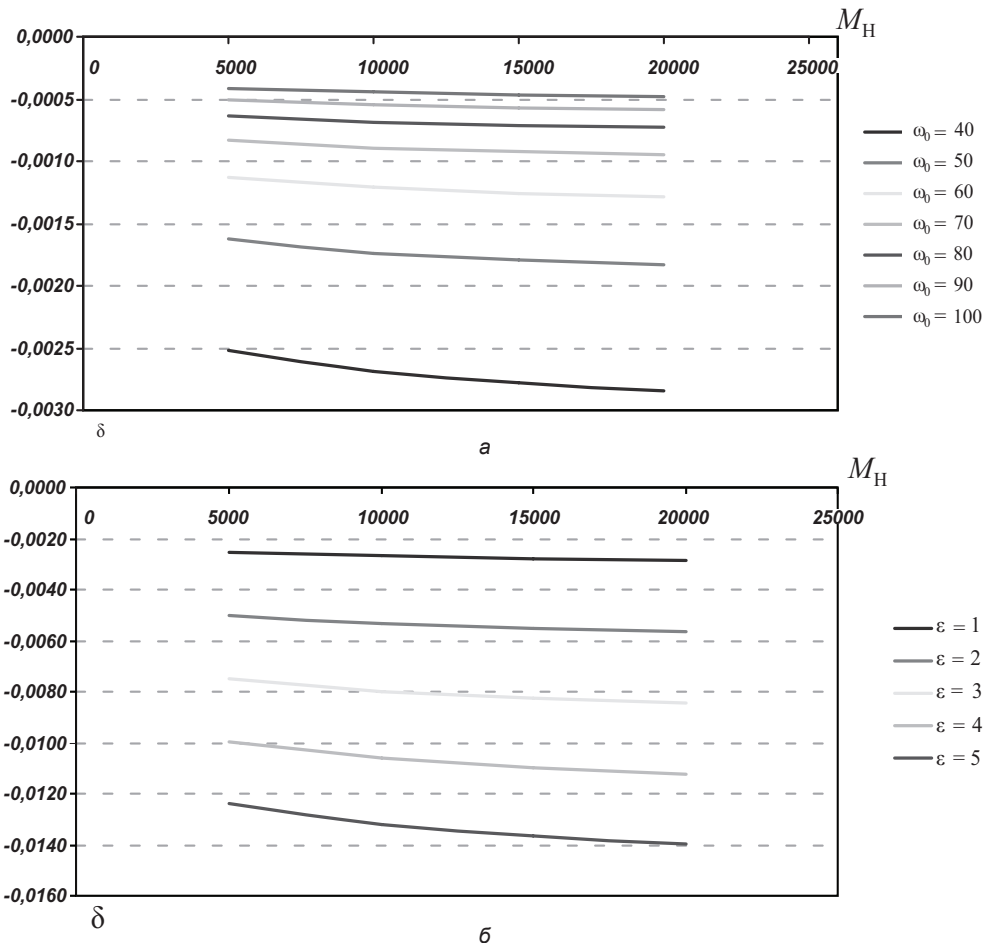


Рис. 1. Зависимость относительной методической погрешности линейного преобразования режимных параметров в фазу топливоподачи в функции момента нагрузки (случай “А”): а – при различных начальных угловых скоростях коленчатого вала ДГ;  $M_H$  [Н·м],  $\omega_0$  [рад/с]; б – при различных угловых ускорениях коленчатого вала ДГ;  $M_H$  [Н·м],  $\varepsilon$  [рад/с<sup>2</sup>]

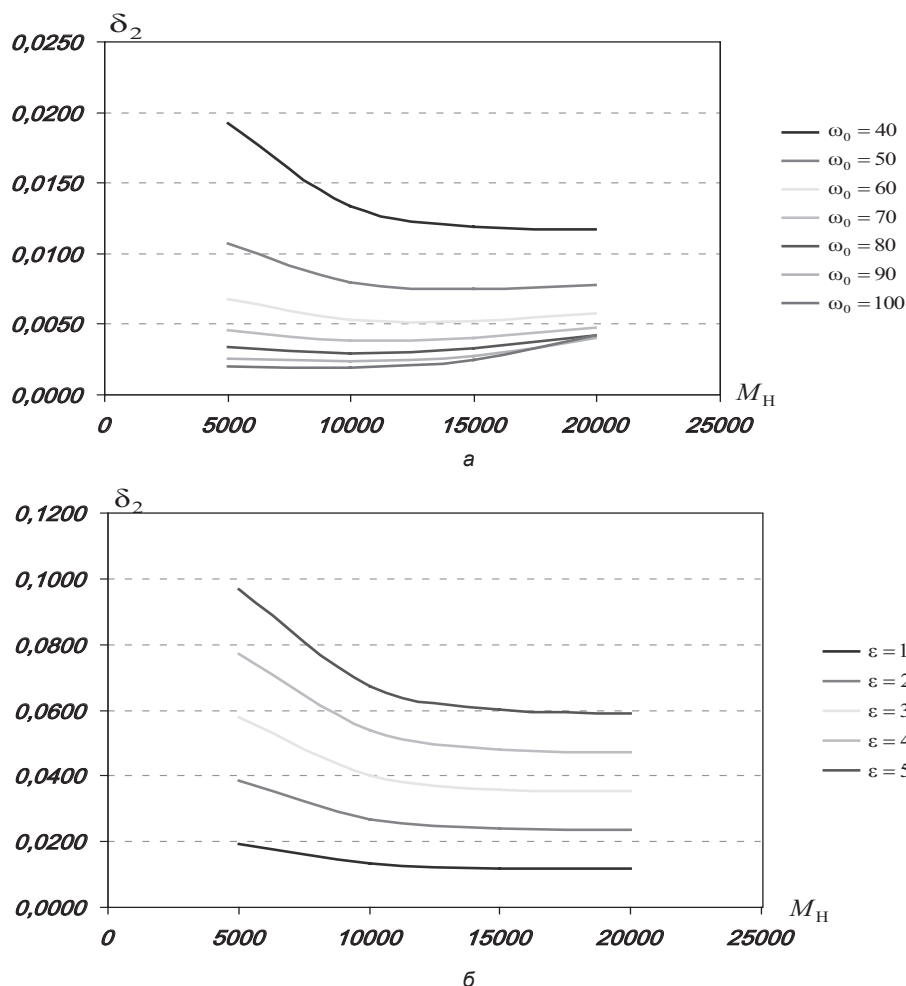


Рис. 2. Зависимость относительной методической погрешности нелинейного преобразования режимных параметров в фазу топливоподачи в функции момента нагрузки (случай “А”): а – при различных начальных угловых скоростях коленчатого вала ДГ;  $M_H$  [Н·м],  $\omega_0$  [рад/с]; б – при различных угловых ускорениях коленчатого вала ДГ;  $M_H$  [Н·м],  $\epsilon$  [рад/с<sup>2</sup>]

$f$  – частота квантующих импульсов;  $\omega_{HMT}$  – угловая скорость вала при заходе поршня в нижнюю мертвую точку;  $U_m$  – амплитуда напряжения на электромагнитной форсунке.

Таким образом, методическая погрешность также зависит от ряда факторов. На рис. 2 приведены графики для конкретного режима, когда ускорение имеет несколько фиксированных значений, угловая скорость изменяется непрерывно в достаточно широком диапазоне, все остальные параметры неизменны, угловая скорость и момент нагрузки нелинейно преобразуются в фазу топливоподачи для случая “А”. Из графиков следует, что методическая погрешность растет при увеличении ускорения и падает с ростом угловой скорости вала.

Исследуем методическую погрешность процессов формирования фазы топливоподачи в другом случае (в случае “Б”), когда момент на валу двигателя скачкообразно изменяется до нового значения сразу же после прекращения импульса впрыска топлива в данном обороте вала и сохраняет свое новое значение как минимум до окончания топливоподачи в следующем обороте вала. В соответствии с этим вместо выражений (1) и (2) запишем [7, 9]

$$\theta = \omega_{BMT} \left[ t_{И} + \frac{K_p K_v M_H (1 + \chi)}{K_U} \right],$$

$$\delta = \frac{\pi - S_3 \left( \omega_{HMT} + \frac{\epsilon}{2} S_3 \right)}{\omega_{BMT} \left[ t_{И} + \frac{K_p K_v M_H (1 + \chi)}{K_U} \right]} - 1, \quad (4)$$

где

$$S_3 = (\omega_0 + \omega_{HMT}) \left( \frac{\omega_{HMT} - \omega_0}{\epsilon} - t_{И} \right) - \frac{2 K_p K_v \omega_0 M_H (1 + \chi)}{K_U};$$

$\chi$  – относительное изменение момента нагрузки дизеля.

Для процесса формирования фазы топливоподачи, описанного в [8], по аналогии, с учетом (3), запишем

$$\theta = \pi \left( 1 - \frac{2\pi f}{K_U K_p U_m \omega_{HMT} M_H (1 + \chi)} \right);$$

$$\delta = \frac{1 - 2S_4 (\omega_{BMT} + \pi S_4)}{1 - \frac{2\pi f}{K_U K_p U_m \omega_{BMT} M_H (1 + \chi)}} - 1, \quad (5)$$

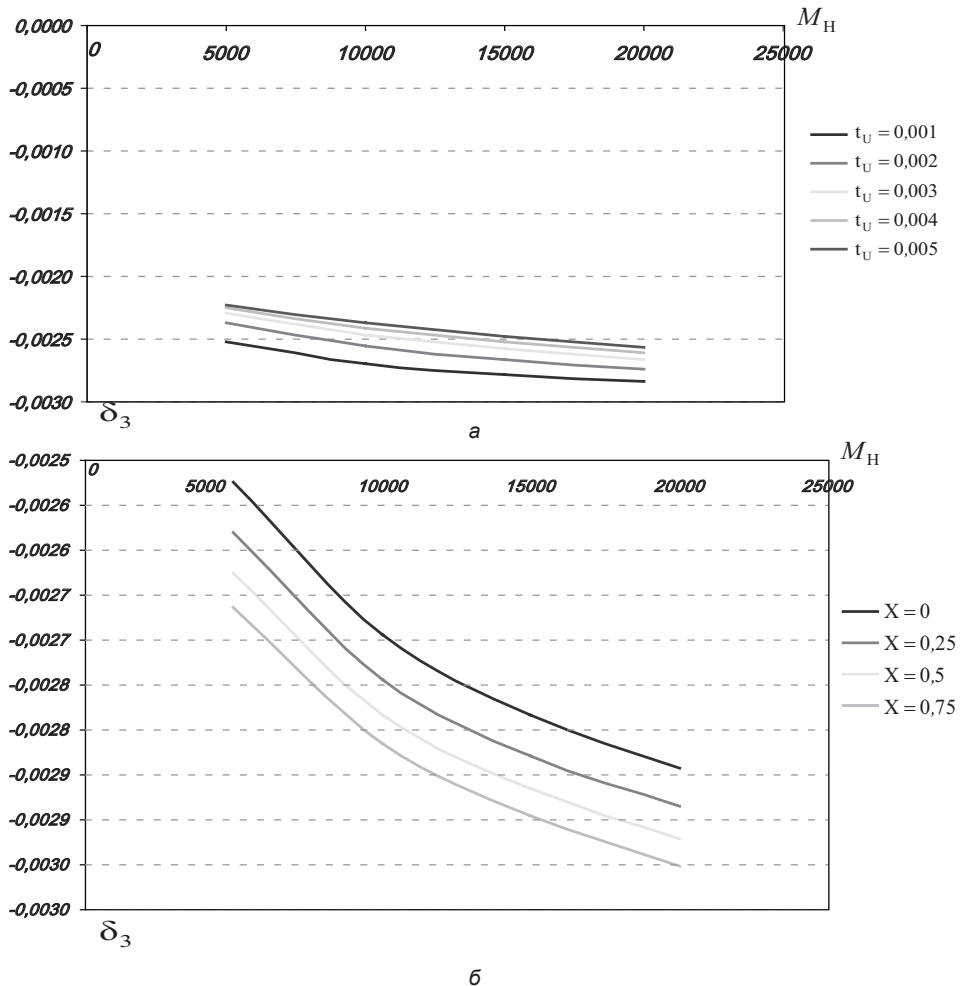


Рис. 3. Зависимость относительной методической погрешности линейного преобразования режимных параметров в фазу топливоподачи в функции момента нагрузки (случай "Б"): а – при различных начальных длительностях импульса управления;  $M_H$  [Н·м],  $t_U$  [с]; б – при различных относительных изменениях момента нагрузки;  $M_H$  [Н·м]

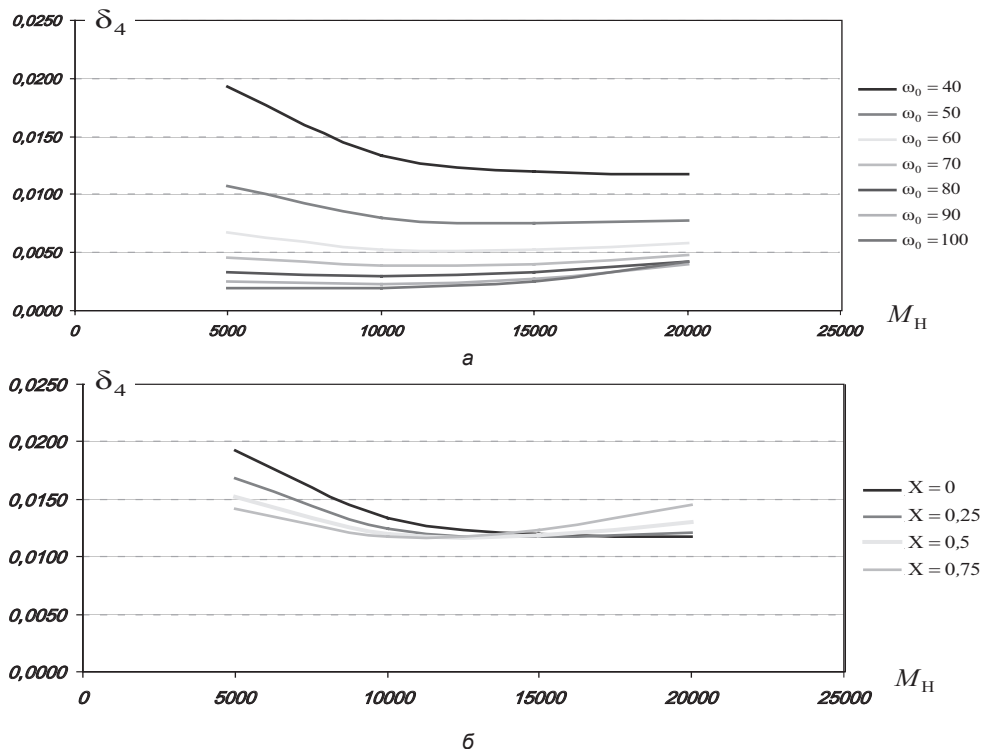


Рис. 4. Зависимость относительной методической погрешности нелинейного преобразования режимных параметров в фазу топливоподачи в функции момента нагрузки (случай "Б"): а – при различных начальных угловых скоростях коленчатого вала ДГ;  $M_H$  [Н·м];  $\omega_0$  [рад/с]; б – при различных относительных изменениях момента нагрузки;  $M_H$  [Н·м]

где

$$S_4 = \frac{f(\omega_{\text{вмг}} - \omega_0)}{K_{\text{и}} K_{\text{р}} \omega_0 M_{\text{н}} (1 + \chi) U_{\text{м}}}.$$

Результаты расчетов по формулам (4), (5) приведены в виде кривых на рис. 3 и 4 для конкретного случая, когда момент нагрузки составляет 50 % номинального значения, угловое ускорение имеет несколько фиксированных значений, угловая скорость изменяется в широком диапазоне (имеющем место в реальных условиях эксплуатации), а преобразование  $\omega$  и  $M_{\text{н}}$  в фазу топливоподачи для случая “Б” происходит линейно (рис. 3) и нелинейно (рис. 4).

Из графиков видно, что модуль относительной методической погрешности падает с ростом начальной угловой скорости вала и растет с увеличением углового ускорения.

Из рис. 1–4 следует, что модуль относительной методической погрешности при линейном преобразовании режимных параметров ДГ в фазу  $\theta$  с ростом  $M_{\text{н}}$  увеличивается, а при нелинейном преобразовании — уменьшается. При этом точность линейного преобразования выше точности нелинейного преобразования. В большинстве случаев крутизна кривой  $\delta(M_{\text{н}})$  зависит от начальной угловой скорости  $\omega_0$ , углового ускорения  $\epsilon$ , длительности импульса задержки  $t_{\text{и}}$  и изменения момента нагрузки  $\chi$ .

**Выводы.** Линейное преобразование параметров режима работы двигателя в фазу топливоподачи обладает более высокой, по сравнению с нелинейным преобразованием, точностью в переходных режимах работы силовой установки, особенно при значительных скачках момента нагрузки.

**Перспективы дальнейших исследований.** Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение точности преобразования режимных параметров дизель-генератора в фазу топливо-

подачи для повышения не только его технико-экономических, но и экологических показателей.

#### Список литературы

1. Барсуков С.И. Топливоподающие системы дизелей с электронным управлением / С.И. Барсуков. — Омск, Зап.-Сиб. книж. изд-во, 1976. — 140 с.
2. Пинский Ф.И. Электрогидравлическое управление впрыскиванием топлива / Ф.И. Пинский // Двигатели внутреннего сгорания: обзорная информация. — М., 1983. — № 4-73-4. — С. 36.
3. Круттов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания / В.И. Круттов. — М.: Машиностроение, 1982. — 416 с.
4. Пинский Ф.И. Оптимизация работы дизелей электронным управлением впрыска топлива: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ф.И. Пинский. — М., 1987. — 32 с.
5. Покровский Г.П. Электроника в системах подачи топлива в автомобильных двигателях / Г.П. Покровский. — М.: Машиностроение, 1990. — 176 с.
6. Итоги науки и техники. Двигатель внутреннего сгорания. Т. 4 / под ред. В.А. Лурье, В.А. Мангушева, И.В. Маркова [и др.]. — М., 1985. — 284 с.
7. А. с. № 1573226 СССР. Способ управления впрыска топлива двигателя внутреннего сгорания / А.Н. Борисенко. — Оpubл. 1990, Бюл. № 23.
8. А. с. № 1513166 СССР. Способ управления впрыском топлива в двигатель внутреннего сгорания / А.Н. Борисенко. — Оpubл. 1989, Бюл. № 37.
9. Борисенко А.Н. Синтез математических моделей процесса преобразования момента нагрузки дизель-генератора в фазу топливоподачи и анализа ее математической погрешности / А.Н. Борисенко, Б.И. Кубрик, Е.С. Мирошниченко // Вестник НТУ “ХПИ”. Автоматика и приборостроение. — 2003. — № 21. — С. 7–12.