

А.Н. БОРИСЕНКО, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»
Б.И. КУБРИК, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»
О.В. ЛАВРИНЕНКО, стажер-преподаватель НТУ «ХПИ»
Е.В. СОСИНА, ассистент НТУ «ХПИ»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ЛИНЕЙНОГО И НЕЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА В ФАЗУ ТОПЛИВОПОДАЧИ

У статті аналізується методична похибка лінійного і нелінійного перетворення кутової швидкості валу і моменту навантаження в кут випередження топливоподачі дизель-генератора (ДГ), що виникає в перехідних режимах його роботи при різких змінах моменту навантаження на його валу і різних управляючих і вихідних сигналах системи управління силової установки.

The methodical error of linear and nonlinear transformation of angular speed of billow and moment of loading in the corner of passing of serve of fuel dizel-generator (DG), arising up in transient behaviors of its work at the sharp changes of moment of loading on its billow and different handling and output signals of the control system of power-plant, is analysed 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 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 $t_{впр}$ 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 $M_n = const$, кроме того, поскольку впрыск топлива происходит вблизи верхней мертвой точки (ВМТ), то согласно [7] можно записать

$$\theta = \omega_{вмт} \left[t_{II} + \frac{K_p M_n K_v}{K_U} \right], \quad (1)$$

где $\omega_{вмт}$ – 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]

$$\delta_1 = \frac{\pi - S_1 \left(\omega_{вмт} + \frac{\varepsilon}{2} S_1 \right)}{\omega_{вмт} \left(t_{II} + \frac{K_p M_n K_v}{K_U} \right)} - 1, \quad (2)$$

$$\text{где } S_1 = (\omega_0 + \omega_{вмт}) \left(\frac{\omega_{вмт} - \omega_0}{\varepsilon} - t_{II} \right) - \frac{2K_p M_n K_v \omega_0}{K_U}, \quad \omega_{вмт} = \sqrt{\omega_0^2 + 4\varepsilon\pi};$$

ε – угловое ускорение вала;

ω_0 – начальная угловая скорость вала;

t_{II} – длительность импульса задержки.

Следовательно, методическая погрешность является функцией многих параметров $\delta = f(\omega_0, \varepsilon, t_{II}, K_p, M_n, K_U, K_v)$.

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

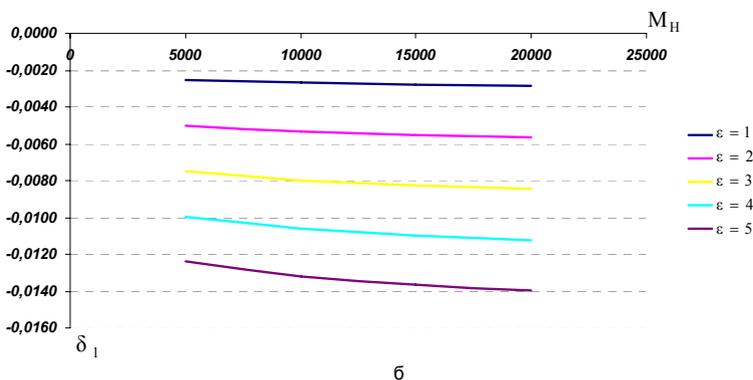
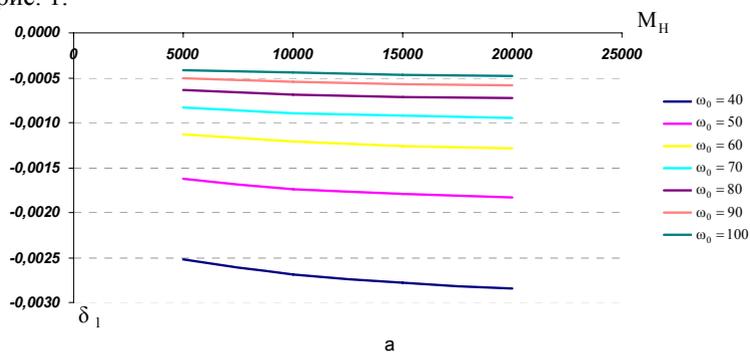


Рисунок 1 – Зависимость относительной методической погрешности линейного преобразования режимных параметров в фазу топливоподачи функции момента нагрузки (случай «А»): а – при различных начальных угловых скоростях коленчатого вала ДГ; M_H [Нм]; ω_0 [рад/с]; б – при различных угловых ускорениях коленчатого вала ДГ; M_H [Нм], ε [рад/с²]

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

$$\theta = \pi \left(1 - \frac{2\pi f}{K_u K_p U_m \omega_{\text{вмт}} M_H} \right). \quad (3)$$

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

$$\delta = \frac{1 - 2S_2 (\omega_{\text{нмт}} + S_2)}{1 - \frac{2\pi f}{K_u K_p U_m \omega_{\text{вмт}} M_H}} - 1, \quad (4)$$

$$\text{где } S_2 = \frac{f (\omega_{\text{вмт}} - \omega_0)}{K_u K_p U_m \omega_{\text{вмт}} M_H};$$

f – частота квантующих импульсов;

$\omega_{\text{нмт}}$ – 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]

$$\theta = \omega_{\text{вмт}} \left[t_H + \frac{K_p K_v M_H (1 + \chi)}{K_U} \right],$$

$$\delta = \frac{\pi - S_3 \left(\omega_{\text{нмт}} + \frac{\varepsilon}{2} S_3 \right)}{\omega_{\text{вмт}} \left[t_H + \frac{K_p K_v M_H (1 + \chi)}{K_U} \right]} - 1, \quad (5)$$

$$\text{где } S_3 = (\omega_0 + \omega_{нмт}) \left(\frac{\omega_{нмт} - \omega_0}{\varepsilon} - t_H \right) - \frac{2K_p K_v \omega_0 M_H (1 + \chi)}{K_U};$$

χ – относительное изменение момента нагрузки дизеля.

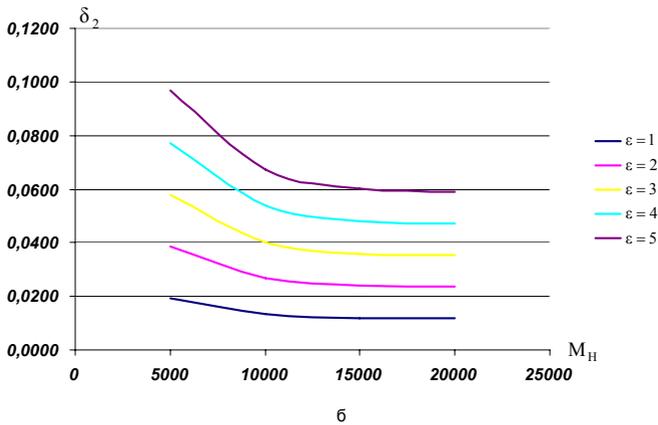
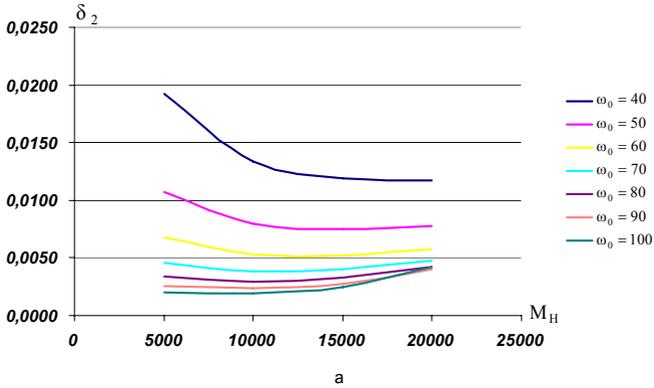


Рисунок 2 – Зависимость относительной методической погрешности нелинейного преобразования режимных параметров в фазу топливоподачи в функции момента нагрузки (случай «А»): а– при различных начальных угловых скоростях коленчатого вала ДГ; M_H [Нм]; ω_0 [рад/с]; б – при различных угловых ускорениях коленчатого вала ДГ; M_H [Нм], ε [рад/с²]

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

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

$$\delta = \frac{1 - 2S_4(\omega_{\text{взм}} + \pi S_4)}{1 - \frac{2\pi f}{K_U K_p U_m \omega_{\text{взм}} M_n (1 + \chi)}} - 1, \quad (6)$$

где $S_4 = \frac{f(\omega_{\text{взм}} - \omega_0)}{K_H K_p \omega_0 M_n (1 + \chi) U_m}$.

Результаты расчетов по формулам (5), (6) 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 ω и M_n в фазу топливоподачи для случая «Б» происходит линейно (рис. 3) и нелинейно (рис. 4).

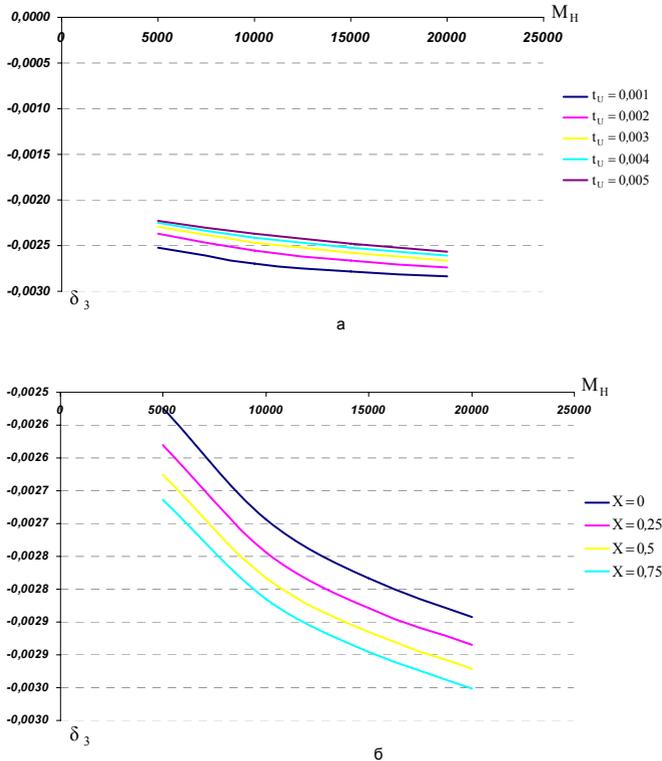


Рисунок 3 – Зависимость относительной методической погрешности линейного преобразования режимных параметров в фазу топливоподачи в функции момента нагрузки (случай «Б»): а – при различных начальных длительностях импульса управления; M_H [Нм], t_i [с]; б – при различных относительных изменениях момента нагрузки; M_H [Нм]

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

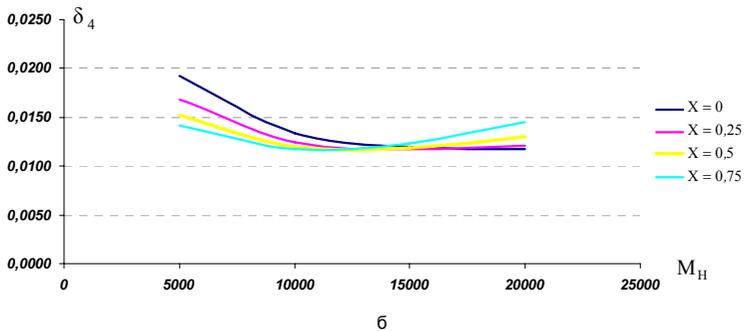
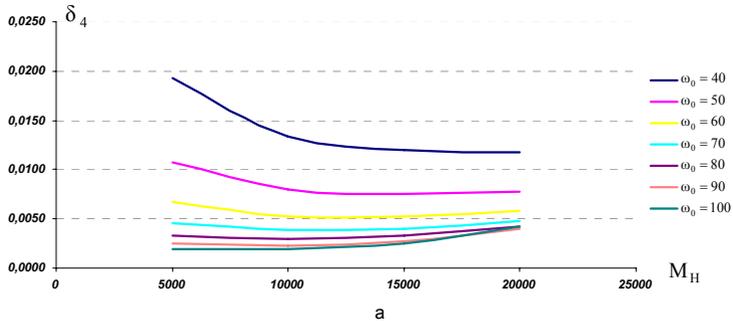


Рисунок 4 – Зависимость относительной методической погрешности нелинейного преобразования режимных параметров в фазу топливоподдачи в функции момента нагрузки (случай «Б»): а – при различных начальных угловых скоростях коленчатого вала ДГ; M_H [Нм]; ω_0 [рад/с]; б – при различных относительных изменениях момента нагрузки; M_H [Нм]

Из рисунков 1–4 следует, что модуль относительной методической погрешности при линейном преобразовании режимных параметров ДГ в фазу θ с ростом M_H увеличивается, а при нелинейном преобразовании – уменьшается. При этом точность линейного преобразования выше точности нелинейного преобразования. В большинстве случаев крутизна кривой $\delta(M_H)$ зависит от начальной угловой скорости ω_0 , углового ускорения ε , длительности импульса задержки t_u и изменения момента нагрузки χ .

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

Список литературы: 1. Барсуков С.И. Топливоподающие системы дизелей с электронным управлением. Омск, Западно-сибирское книжное издательство, 1976, 140 с. 2. Пинский Ф.И., Электрогидравлическое управление впрыскиванием топлива // Двигатели внутреннего сгорания. Обзорная информация. № 4-73-4.М.:1983, с.36. 3. Круттов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. М.Жмашиностроение, 1982, с.416. 4. Пинский Ф.И. Оптимизация работы дизелей электронным управлением впрыска топлива. Автореф. Дисс. док-ра техн. наук, М.:1987, 32 с. 5. Покровский Г.П. Электроника в системах подачи топлива в автомобильных двигателях, М.:Машиностроение, 1990,176с. 6. Итоги науки и техники. Двигатель внутреннего сгорания. т.4. Под ред. В.А.Турье, В.А.Мангушев, И.В.Маркова и др., М.1985. 284с. 7. Борисенко А.Н. Способ управления впрыска топлива двигателя внутреннего сгорания. А.С. (СССР) №1573226, опубл. Б.И.№23,1990. 8. Борисенко А.Е. Способ управления впрыском топлива в двигатель внутреннего сгорания. А.С. СССР. №1513166, опубл. Б.И.№37, 1989. 9. Вестник НТУ «ХПИ» «Автоматика и приборостроение», №21, 2003 г. с. 7-12.

Поступила в редакцию 08.03.2011