

УДК 621.43.004.58

А. Н. Борисенко, А. Б. Богаевский, А. Н. Сергиенко, Е. Б. Ахиезер, С. М. Дюндик

### ДИАГНОСТИКА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО ФЛУКТУАЦИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

*Предложены методика и алгоритм диагностической оценки динамики крутящего момента, мощности, их распределения по цилиндрам с учетом характера флуктуации частоты вращения коленчатого вала на установившемся режиме работы двигателя внутреннего сгорания для выявления разрегулирования систем или неисправного цилиндра.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* диагностика, флуктуация, девиация, ресурс двигателя, расход топлива.

**Постановка проблемы.** В настоящее время на транспортных средствах и стационарных установках гражданского и военного назначения широко используются многоцилиндровые двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Эффективность применения боевых машин, автомобилей, тягачей и др. зависит от стабильности показателей ДВС, которые можно выявить при диагностике. ДВС – машина циклического действия. Характер вращения коленчатого вала ДВС тесно связан с рабочим процессом в цилиндрах, а мгновенная угловая скорость вала – величина переменная даже на идеально отрегулированном ДВС, т. е. всегда имеет место флуктуация частоты вращения. Флуктуацию частоты вращения коленчатого вала целесообразно использовать в качестве динамического параметра, поскольку таким образом возможно получить значительный объем информации о работе ДВС, используя простейшие датчики. Например, по флуктуации частоты вращения вала ДВС при его прокрутке можно определить компрессию и величину силы трения в цилиндро-поршневой группе.

**Анализ исследований и публикаций.** Вопросам анализа состояния и диагностики ДВС постоянно уделяют внимание практически все производители транспортной техники и стационарных устройств, имеющих привод от ДВС [1], а также подразделения их ремонта и технического обслуживания. Неравномерность и различие мощности, развиваемой каждым цилиндром, приводит к росту нагруженности конструкции, снижению технических показателей ДВС. Диагностика двигателя позволяет своевременно выявить нарушения и отклонения в его работе, своевременно и с минимальными затратами восстановить агрегат, а при необходимости – прогнозировать остаточный ресурс и рационально спланировать использование машины. Для реализации поставленной задачи целесообразно использовать опыт теоретических исследований крутильных колебаний, возникающих при работе ДВС [2] и существующие методы измерения и обработки сигналов при проведении исследований [3].

**Цель статьи** – разработать методику и алгоритм диагностики динамики крутящего момента, мощности и распределения их по цилиндрам с учетом характера флуктуации частоты вращения вала в установившемся режиме работы ДВС для выявления разрегулированного или неисправного цилиндра, т. е. для обеспечения диагностирования ДВС без его разборки.

**Изложение основного материала.** Флуктуация частоты вращения коленчатого вала ДВС обусловлена его крутильными колебаниями, которые в общем случае описываются системой уравнений вида [2]:

$$I_i \ddot{\varphi}_i - \frac{1}{l_{i+1,i}} (\varphi_{i+1} - \varphi_i) + \frac{1}{l_{i,i-1}} (\varphi_i - \varphi_{i-1}) = M_i,$$

где  $I_i$  и  $\varphi_i$  – момент инерции и угол закрутки  $i$ -й массы;  $l_{i+1,i}$  – податливость соединения между  $i$  и  $(i+1)$ -й массами коленчатого вала;  $M_i$  – крутящий момент, создаваемый на валу ДВС  $i$ -м цилиндром.

Для решения этой системы уравнений применим преобразование Лапласа. Разрешенную относительно  $\varphi_i$  в операторной форме при нулевых начальных условиях систему можно записать следующим образом:

$$\varphi_i(P) = \frac{1}{IIP^2 + 2} [IM_i(P) + \varphi_{i+1}(P) + \varphi_{i-1}(P)]. \quad (1)$$

Система уравнений (1) приводится с помощью простых преобразований к уравнению вида:

© А. Н. Борисенко, А. Б. Богаевский, А. Н. Сергиенко, Е. Б. Ахиезер, С. М. Дюндик

$$\varphi_i(P) = \sum_{i=1}^m H_{i,1}(P) M_i(P), \quad (2)$$

где  $H_{i,1}(P)$  – передаточная функция  $i$ -го цилиндра на первую массу;  $m$  – число масс (число цилиндров).

Передаточные функции возможно получить с помощью графов. Сигнальный граф системы уравнения (1), построенный для верхнего коленчатого вала дизель-генератора (ДГ) 10Д100 (рис. 1, 2), показан на рис. 3.

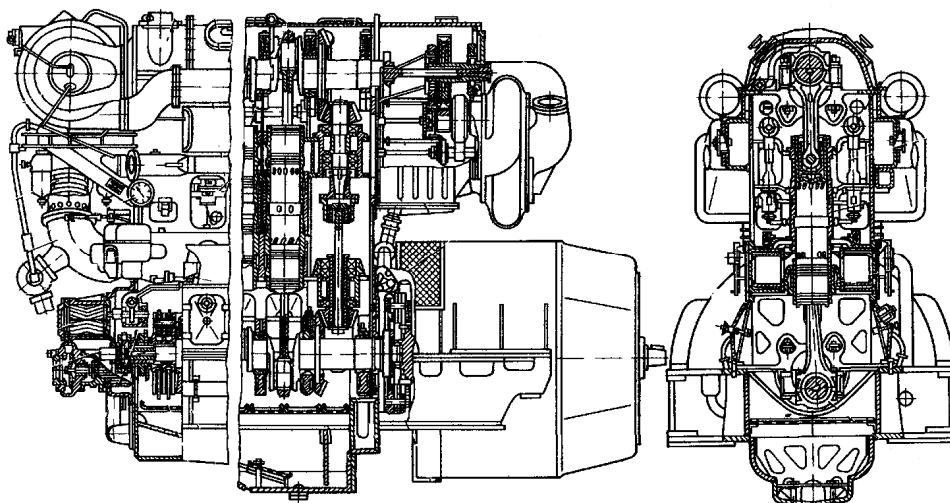


Рис.1. Общий вид дизель-генератора 10Д100

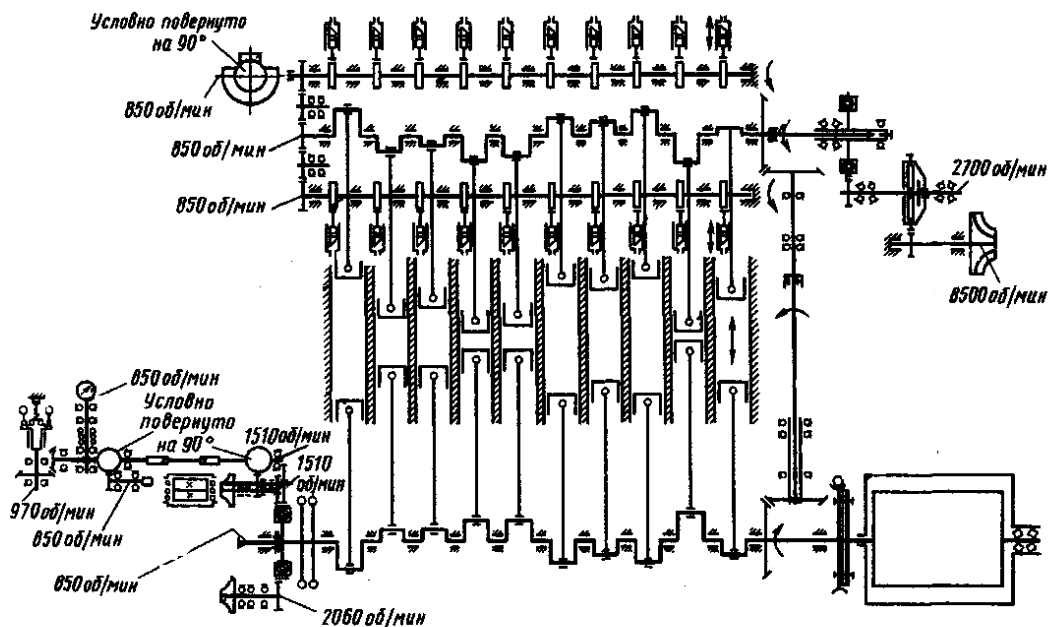


Рис. 2. Кинематическая схема дизель-генератора 10Д100

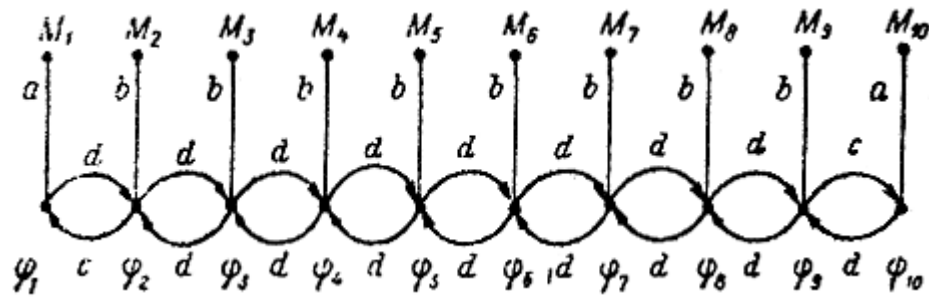


Рис. 3. Сигнальний граф верхнього коленчатого вала ДГ 10Д100

Величина  $a$  вичислюється по формуле:

$$a = 1 / (IP^2 + 1); b = 1 / (11P^2 + 2); c = 1 / (11P^2 + 1); d = 1 / (11P^2 + 2).$$

Из графа, используя топологическую формулу Мезона, получим передаточные функции в виде:

$$H_{1,1}(P) = \frac{a[1 - (dc + 7d^2) + 2d^4 - d^6 + d^8]}{1 - (2cd + 7d^2) + 2cd^3 - d^6 + d^8 - c^2d^8};$$

$$H_{2,1}(P) = \frac{6a[1 - (dc + 6d^2) + d^4 - d^6 + cd^7]}{1 - (2cd + 7d^2) + 2cd^3 - d^6 + d^8 - c^2d^8};$$

$$H_{3,1}(P) = \frac{bcd[1 - (dc + 5d^2) + cd^3 - d^6]}{1 - (2cd + 7d^2) + 2cd^3 - d^6 + d^8 - c^2d^8};$$

$$H_{4,1}(P) = \frac{bcd^2[1 - (dc + 4d^2) + cd^3 - cd^5]}{1 - (2cd + 7d^2) + 2cd^3 - d^6 + d^8 - c^2d^8};$$

$$H_{5,1}(P) = \frac{bcd^3[1 - (dc + 3d^2) + cd^3]}{1 - (2cd + 7d^2) + 2cd^3 - d^6 + d^8 - c^2d^8};$$

$$H_{6,1}(P) = \frac{bcd^4[dc + 2d^2 + cd^3]}{1 - (2cd + 7d^2) + 2cd^3 - d^6 + d^8 - c^2d^8};$$

$$H_{7,1}(P) = \frac{bcd^5[1 - (dc + d^2)]}{1 - (2cd + 7d^2) + 2cd^3 - d^6 + d^8 - c^2d^8};$$

$$H_{8,1}(P) = \frac{bcd^6(1 - dc)}{1 - (2cd + 7d^2) + 2cd^3 - d^6 + d^8 - c^2d^8};$$

$$H_{9,1}(P) = \frac{bcd^7}{1 - (2cd + 7d^2) + 2cd^3 - d^6 + d^8 - c^2d^8};$$

$$H_{10,1}(P) = \frac{bcd^8}{1 - (2cd + 7d^2) + 2cd^3 - d^6 + d^8 - c^2d^8};$$

где  $H_{1,1}, H_{2,1}, \dots, H_{10,1}$  – амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) канала передачи крутящего момента от первого цилиндра к первой массе, от второго цилиндра к первой массе и т. д.

Под первой массой подразумевается участок коленчатого вала, сопрягаемый с первым цилиндром. Именно вблизи этого участка производится измерение частоты вращения вала.

После подстановки в выражения передаточных функций значений коэффициентов  $a, b, c, d$  и раскрытия степеней, используя формулу бинома Ньютона, передаточные функции приобретают вид отношения двух степенных полиномов.

АЧХ каналов передач, полученные после замены  $P$  на  $j\omega$ , приведены на рис. 4.

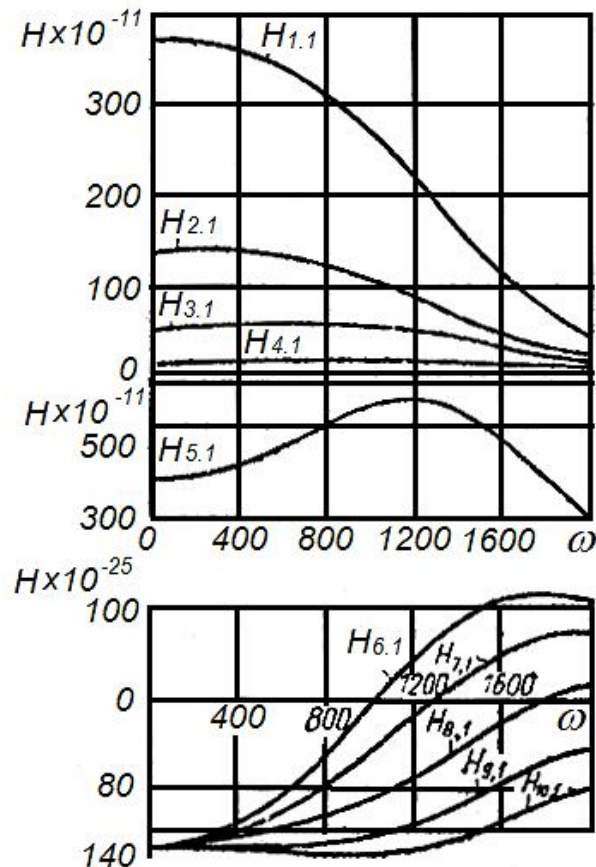


Рис. 4. АЧХ каналов передач крутящего момента  $i$ -го цилиндра

Из сравнительного анализа АЧХ каналов передач видно, что влияния цилиндров на крутильные колебания первой массы различны по величине. Так, если условно принять влияние первого цилиндра на флуктуацию частоты вращения первой массы за единицу, то влияние второго цилиндра оказывается равным 0,36, третьего – 0,14, четвертого – 0,045, пятого – 0,011, шестого – 0,004, седьмого – 0,0039, восьмого – 0,0036, девятого – 0,0034, десятого – 0,0032. Отсюда следует, что оценить амплитуды крутящих моментов цилиндров с шестого по десятый по флуктуации частоты вращения первой массы не представляется возможным, так как их суммарное влияние на колебания этой массы лежит в пределах погрешности измерительной аппаратуры.

Устранить это препятствие можно путем двухканального измерения – одновременно измерять флуктуацию частоты вращения первой и десятой масс, установив дополнительную измерительную шестерню и датчик частоты вращения у десятого цилиндра. Для такого измерения уравнение (2) можно записать в виде:

$$\begin{aligned}\varphi_1(P) &= \sum_{i=1}^5 H_{i,1}(P) \cdot M_i(P); \\ \varphi_{10}(P) &= \sum_{i=6}^{10} H_{i,\omega}(P) \cdot M_i(P).\end{aligned}\tag{3}$$

АЧХ каналов передач, полученные у графа, совпали с АЧХ каналов передач при измерении неравномерности частоты вращения вала в одном сечении:

$$\begin{aligned}H_{1,1}(P) &= H_{10,10}(P); H_{2,1}(P) = H_{9,10}(P); H_{3,1}(P) = H_{8,10}(P); H_{4,1}(P) = H_{7,10}(P); \\ H_{5,1}(P) &= H_{6,10}(P).\end{aligned}$$

Крутящий момент, создаваемый на валу дизеля  $i$ -м цилиндром, представим в виде:

$$M_i(P) = A_i M_i(P) \cdot I^{-P b_i},$$

где  $b_i = \frac{i-1}{10} T$  – фазовое запаздывание рабочего процесса в  $i$ -м цилиндре;  $A_i$  – амплитудный коэффициент, учитывающий уровень разрегулировки  $i$ -го цилиндра относительно первого.

После подстановки последнего выражения и замены  $P$  на  $j\omega$  уравнения (3) преобразуются в систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned}\frac{\varphi_{n,1}}{M_{n,1}} \cos(\Phi_{n,1} - \gamma_n) &= \sum_{i=1}^5 A_i H_{i,1}(j\omega) \cos(b_i n \omega); \\ \frac{\varphi_{n,1}}{M_{n,1}} \sin(\Phi_{n,1} - \gamma_n) &= - \sum_{i=1}^5 A_i H_{i,1}(j\omega) \sin(b_i n \omega); \\ \frac{\varphi_{n,10}}{M_{n,1}} \cos(\Phi_{n,10} - \gamma_n) &= \sum_{i=6}^{10} A_i H_{i,10}(j\omega) \cos(b_i n \omega); \\ \frac{\varphi_{n,10}}{M_{n,1}} \sin(\Phi_{n,10} - \gamma_n) &= \sum_{i=6}^{10} A_i H_{i,10}(j\omega) \sin(b_i n \omega).\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

Здесь  $\varphi_{n+1}$  и  $\Phi_{n,1}$ , а также  $M_{n,1}$  и  $\gamma_n$  – амплитуда и фаза  $n$ -й гармоники угла закрутки первой массы, а также крутящего момента, создаваемого на валу первым цилиндром.

После решения системы уравнений (4) легко оценить неравномерность распределения мощности по цилиндрам и выявить разрегулированные или неисправные цилиндры.

Из вышеизложенного очевидно, что для диагностирования ДВС описываемым методом необходимо закрепить на противоположных концах коленчатого вала измерительные шестерни, установить вблизи них датчики частоты, вырабатывающие импульсные сигналы, установить отметчик в. м. т. поршня какого-либо цилиндра (например, первого) и затем производить обработку информации по следующему алгоритму:

- а) определить среднюю частоту вращения вала на основании полученных импульсных сигналов;
- б) определить отклонение мгновенной частоты вращения от средней (флуктуацию частоты) и запомнить его в специальном блоке памяти;
- в) разложить в ряд Фурье и определить  $\varphi_{n,1}$ ,  $\varphi_{n,10}$  и  $\Phi_{n,1}$ ,  $\Phi_{n,10}$ ;
- г) решить систему уравнений (4) и определить  $A_i$ ;
- д) выработать заключение о качестве рабочего процесса в цилиндрах дизеля на основании найденных  $A_i$ .

Для решения системы уравнений (4) использована стандартная подпрограмма, а для оптимизации полученного решения – метод наименьших квадратов.

Процесс диагностики можно полностью автоматизировать, если использовать ПЭВМ. При этом информацию о неравномерности вращения удобно записывать в оперативную память, а программу вычислений – в накопитель.

Измеритель флуктуации частоты вращения коленчатого вала, функциональная схема одного канала которого приведена на рис. 5, выполнен в виде блока-приставки к компьютеру.

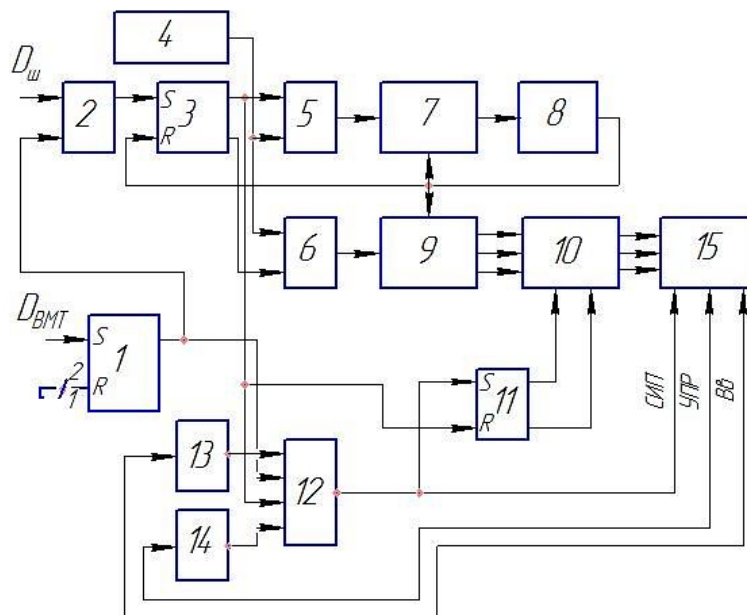


Рис. 5. Функциональная схема устройства для измерения девиации частоты вращения

В основу технической реализации положен метод измерения временных интервалов, соответствующих повороту коленчатого вала на заданные углы. Указанные временные интервалы формируют специальным датчиком, установленным вблизи зубьев измерительной шестерни  $D_{ш}$ . В качестве синхронизирующей серии используется сигнал датчика в. м. т. первого цилиндра  $D_{в.м.т.}$ .

Устройство содержит: два R–S триггера 1 и 3; генератор высокой частоты 4 (частота выходных колебаний стабилизирована кварцевым резонатором); схемы совпадения 2, 5, 6 и 12; два счетчика импульсов 7 и 9; ждущий мультивибратор 8; коммутатор кодов 10; счетный триггер 11; инверторы 13 и 14; ПЭВМ 15. В ПЭВМ используют шины для подачи синхронизирующей импульсной последовательности (СИП), ввода данных (ВВ) и управления (УПР).

Погрешность измерителя девиации частоты имеет две составляющие: методическую, представляющую собой погрешность вычисления, и аппаратную, обусловленную конечностью частоты генератора.

Аппаратурная погрешность представляет собой погрешность квантования, среднеквадратичное значение которой:

$$\sigma = \frac{F}{\sqrt{6f}}, \quad (5)$$

где  $f_z$  – частота колебаний выходного сигнала генератора высокой частоты;  $F$  – частота выходного сигнала датчика, установленного вблизи измерительной шестерни.

Методическая погрешность представляет погрешность дискретизации, для абсолютного значения которой справедливо выражение, полученное ранее:

$$\Delta_d = \frac{2}{T} \operatorname{Re} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^T \cos(zn\omega t) \Delta\omega(t) dt \right],$$

где  $T$  – период дискретизируемой функции;  $z$  – число интервалов дискретизации;

$\Delta\omega(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n \sin(n\omega t + \Phi_n)$  – девиация частоты вращения коленчатого вала.

Отсюда получим относительную погрешность дискретизации в виде:

$$\delta_D = \frac{\pi \sum_{n=z}^{\infty} \varphi_n \sin \Phi_n}{2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi_n}{n} \cos \Phi_n}. \quad (6)$$

Таким образом, суммарная среднеквадратичная погрешность измерителя с учетом выражений (5) и (6) будет определяться по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{F^2}{6f_z^2} + \frac{\pi^2}{4} \left( \frac{\sum_{n=z}^{\infty} \varphi_n \sin \Phi_n}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi_n}{n} \cos \Phi_n} \right)^2}.$$

При использовании измерительных шестерен, имеющих 91 зуб, полная погрешность измерения флуктуации частоты вращения не превышает 0,06 %. Для оценивания точности определения распределения крутящего момента по цилиндрам было проведено цифровое моделирование влияния погрешности измерения флуктуации на точность определения  $A_i$ . Для указанной величины  $\sigma$  максимальное значение погрешности определения  $A_i$  не превышает 2,2 % (для пятого и шестого цилиндров) и снижается по мере приближения цилиндра к измерительным шестерням.

### Выводы

Описанная методика и устройство на базе ПЭВМ реализованы в диагностике ДГ 10Д100, на котором измерительные шестерни устанавливались на верхнем коленчатом валу (см. рис. 1, 2). Эксперимент показал, что реализация методики в диагностике ДГ 10Д100 обеспечивает регистрацию отклонения мощности от нормы на 5 % для первого, второго, девятого и десятого цилиндров и на 15 % – для остальных.

Своевременная диагностика ДВС с использованием предложенного алгоритма будет способствовать повышению ресурса двигателя и снижению расхода топлива.

Изложенная методика может быть использована для диагностирования различных типов двигателей автомобилей и специальной техники.

### Список использованных источников

1. Борисенко, А. Н. Теория и практика компьютеризированных информационно-измерительных систем для управления и диагностики дизель-генераторов [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / А. Н. Борисенко. – К., 2010. – 285 с.
2. Истомин, П. А. Крутильные колебания в судовых ДВС [Текст] / П. А. Истомин. – Л. : Судостроение, 1968. – 204 с.
3. Горлач, А. А. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике [Текст] / А. А. Горлач, М. Я. Минц, В. И. Чинков. – К. : Техника, 1985. – 152 с.

*Стаття надійшла до редакції 17.09.2012 р.*