

УДК 621.314-621.391

**БОРИСЕНКО А.Н.**, д.т.н., НТУ «ХПІ»  
**СЕРГИЕНКО А.Н.**, аспірант, НТУ «ХПІ»  
**ГАЛУЦКИХ А.Д.**, інж., НТУ «ХПІ»

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВС

Ідентифікація дефектів, побудова вирішальних правил і формування сукупностей, що навчають, для систем управління і діагностики ДВЗ на базі теорії ЛПВП.

**Постановка проблемы.** Обеспечение наилучших технико-экономических и экологических показателей ДВС тесно связано с поддержанием на должном уровне технического состояния агрегатов и качества работы систем регулирования, которые в процессе эксплуатации изменяются. В связи с этим возникает необходимость непрерывного контроля технического состояния силовой установки в процессе эксплуатации по соответствующим информативным параметрам и диагностическим признакам, которые необходимо выбрать с учетом экспериментальных данных.

**Анализ литературы** показывает, что диагностирование дизелей производят либо по сигналам множества датчиков режимных параметров агрегата [1, 2], либо по сигналу одного датчика неравномерности вращения вала [3-6], что удобнее в плане привязки к объекту, но усложняет процесс обработки информации. Глубина диагностирования при этом существенно зависит от выбора математической модели диагностического сигнала. Например, в работах [5,6] в качестве таковой был использован линейный периодический случайный процесс (ЛПСП), низшие моменты которого (дисперсия и корреляционная функция) используются в качестве диагностических признаков, и позволяют обнаружить неисправный цилиндр.

**Цель работы** – на базе математической модели ЛПСП, описывающей процесс неравномерности вращения вала дизеля с учетом случайного его характера и физической природы явлений, происходящих в ДВС, теоретически обосновать, а затем экспериментально проверить новые информативные параметры, характеризующие техническое состояние дизелей, на основании предложенных параметров построить обучающие совокупности (образы) и разработать решающие правила, которые с большей точностью позволяют выявить дефекты в дизельном ДВС.

По своей физической природе дизель-генератор (ДГ) является объектом циклического действия и угловая скорость его коленчатого вала содержит три составляющие: постоянную (среднее значение), переменную (отклонение мгновенной скорости от среднего значения, что может охарактеризовано дисперсией) и импульсную составляющую, имеющую место при резких изменениях тока генератора. Поскольку указанная угловая скорость подвержена влиянию множества случайных факторов (подача топлива, воздухообеспечение, изменение нагрузки и т.д.), ее можно рассматривать как случайный процесс  $\{\xi(t) \ t \in (-\infty, \infty)\}$ , к которому в качестве математической модели в полной мере подходит ЛПСП [5, ... ,8].

Определения и основные характеристики ЛПСП. Согласно [5, ... ,8], случайный процесс  $\{\xi(t) \ t \in (-\infty, \infty)\}$  называется периодическим в широком смысле, если

существует такое  $T > 0$ , для которого одномерная и двумерная функции распределения удовлетворяют условиям:

$$F(x; t) = F(x; t + T),$$

$$F(x_1; x_2; t_1, t_2) = F(x_1, x_2; t_1 + T, t_2 + T),$$

$$t_1, t_2 \in (-\infty, \infty)$$

ЛПСИ имеет моменты высшего порядка (включая и коэффициенты асимметрии и эксцесса), которые можно использовать в качестве диагностических признаков для уточнения технического состояния двигателя.

С целью получения сигнала угловой скорости коленчатого вала ДГ была проведена серия экспериментальных работ на агрегатах типов 10Д100 и Д70, в ходе которых упомянутый сигнал снимался либо с индуктивного датчика, установленного вблизи венца валоповоротной шестерни или специальной измерительной шестерни, либо с оптоэлектронного датчика типа ПДФ-3, который устанавливался на свободном конце вала дизеля. Для определения типа распределения процесса изменения скорости вала (рис.1), реализации были обработаны с использованием гистограммного анализа с последующим сглаживанием полученных гистограмм по методу наименьших квадратов [9]. Отметим, что тахограммы на рис.1-4, 6, 7 были записаны на шлейфовый осциллограф в установившемся режиме работы ДГ, причем для синхронизации использовался сигнал отметчика верхней мертвой точки первого цилиндра (этот сигнал на графиках не показан).

На рис. 1 приведена осциллограмма девиации угловой скорости вала ДГ типа 10Д100 без дефектов, работающего в номинальном режиме, гистограмма распределения угловой скорости и сглаживающая кривая, построенная по методу наименьших квадратов. Общий объем выборки данных за один оборот вала составляет 1500 точек.

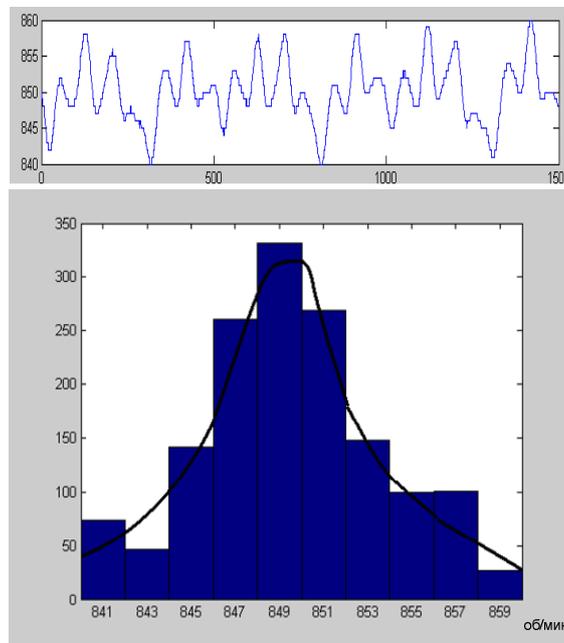


Рисунок 1 – Осциллограмма девиации угловой скорости вала ДГ 10Д100 и гистограмма распределения угловой скорости и сглаживающая кривая (ДВС без дефектов, режим номинальный)

На рис. 2 приведен тахограмма, гистограмма и сглаживающая кривая для агрегата 10Д100, имеющего дефекты в цилиндро-поршневой группе, в частности, задиры. За один оборот вала при этом было снято 3000 точек.

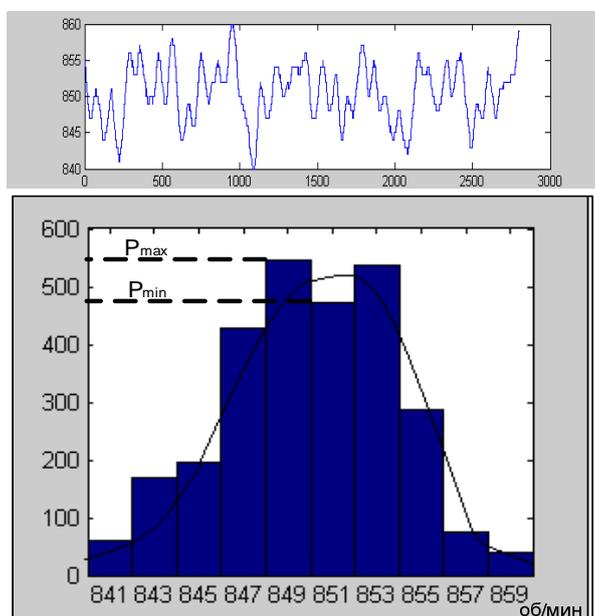


Рисунок 2 – Тахограмма, гистограмма и сглаживающая кривая для агрегата 10Д100 (дефекты в ЦПГ – задиры, режим – номинальный)

На рис. 3, 4 приведены графические иллюстрации для дизельной установки того же типа с дефектами в топливоподающей аппаратуре. Рис. 3 соответствует случаю пониженной цикловой подачи топлива, а рис. 4 – позднему впрыскиванию топлива. За оборот вала регистрировалось 2500 точек.

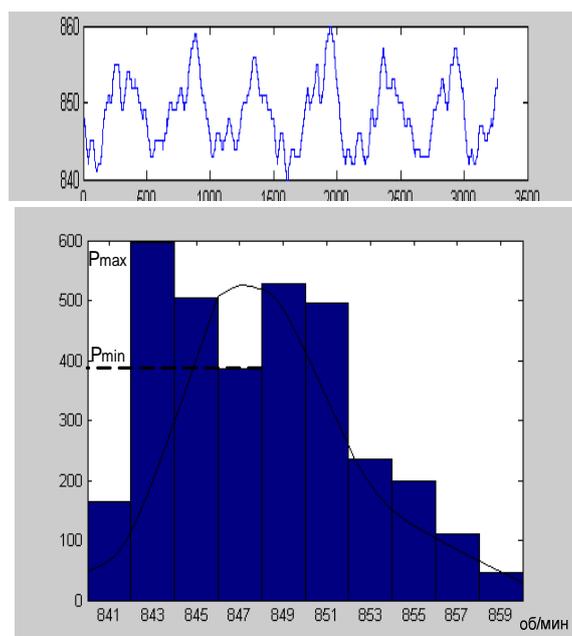


Рисунок 3 – Тахограмма, гистограмма и сглаживающая кривая для агрегата 10Д100 с дефектом в ТНВД – пониженная цикловая подача топлива

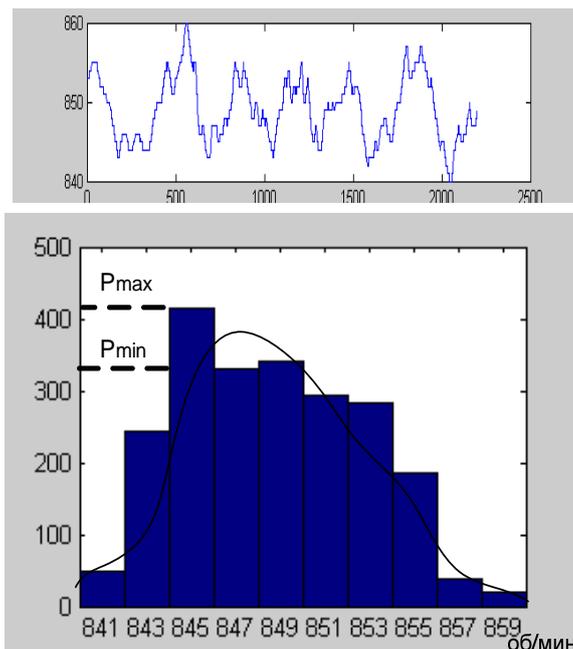


Рисунок 4 – Тахограмма, гистограмма и сглаживающая кривая для агрегата 10Д100 с отклонением угла впрыска топлива – поздний впрыск

Для этих кривых найдены асимметрия и эксцесс [7], которые были приняты в качестве диагностических признаков.

$$k = \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{(n-1)^3 \cdot (G_x)^3}} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^3,$$

$$j = \frac{n}{(n-1)^2 \cdot (G_x)^4} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^4 - 3,$$

где  $n$  - число измерений;

$x_i$  -  $i$ -я измеренная величина;

$m_x$  – математическое ожидание измеренной величины;

$G_x$  – среднеквадратическое отклонение измеренной величины.

Именно эти параметры были выбраны в качестве координат диагностического пространства, в котором по количественным оценкам  $k$  и  $j$  были построены обучающие совокупности.

После обработки 387 гистограмм со сглаживающими кривыми были сформированы обучающие совокупности, соответствующие различным техническим состояниям ДГ. Это иллюстрируется рис.5.

В частности, область I соответствует дизель-генератору без дефектов; области II – агрегату с дефектами цилиндра-поршневой группы, причем в случае  $k > 0$  имеют место неплотности, а в случае  $k < 0$  – задиры; область IV соответствует отклонению цикловой подачи топлива от требуемого значения, причем в случае  $k > 0, j < 0$  – цикловая подача топлива ниже нормы, а при  $k < 0, j > 0$  – выше нормы; область IV означает отклонение фазы топливоподачи от нормы: при  $k > 0$  - ниже нормы, при  $k < 0$  - выше нормы.

Была выполнена статистическая обработка осциллограмм мгновенной угловой скорости коленчатого вала ДГ 10Д100, в котором поочередно отключался тот или иной

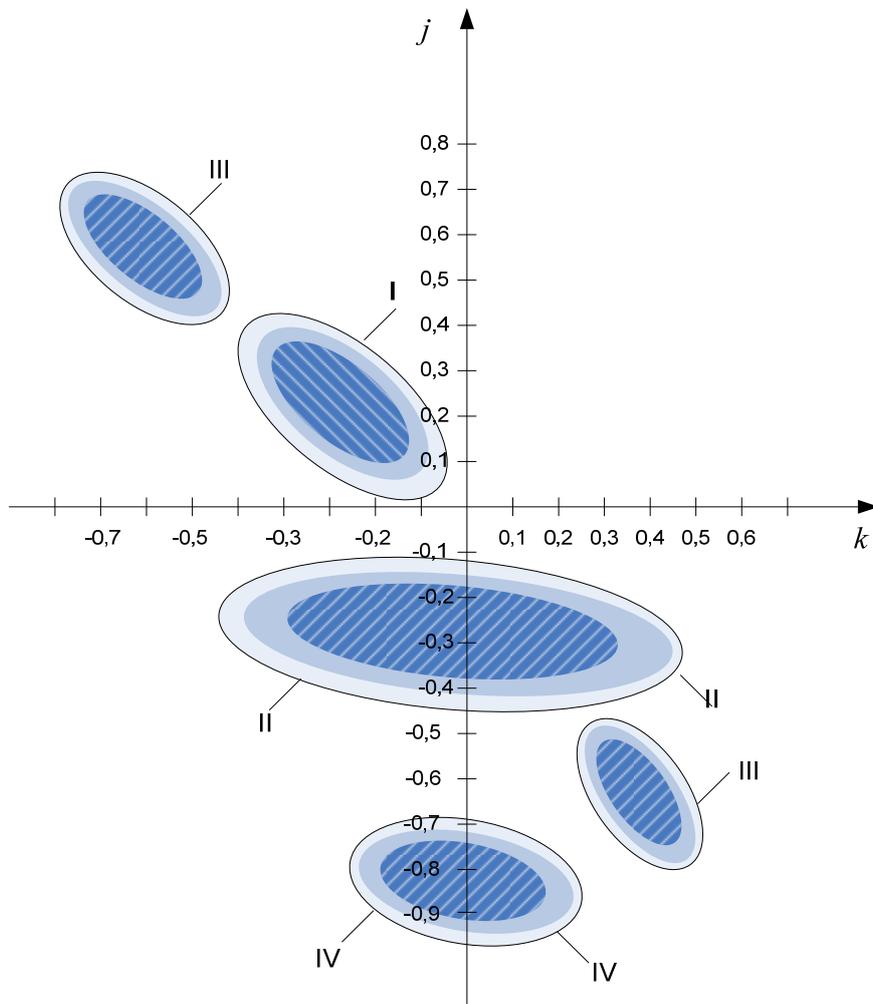


Рисунок 5 – Обучающие совокупности, соответствующие различным техническим состояниям ДГ

цилиндр путем установки в нулевое положение соответствующей рейки топливного насоса. В качестве примера на рис.6 приведены гистограмма и сглаживающая кривая при отключенном первом цилиндре, а на рис.7 – при отключенном втором цилиндре. Анализируя полученные гистограммы, можно отметить следующее.

При отсутствии дефектов у ДГ гистограмма и сглаживающая кривая имеют единственный экстремум (максимум) в точке, соответствующей настройке регулятора скорости (на рис.1 – это 850 об/мин). При наличии дефектов, как видно из рис. 2, 3, 4, на гистограмме между двух максимумов (большой из которых обозначен  $P_{max}$ ), имеется минимум (обозначенный  $P_{min}$ ) вблизи точки, соответствующей настройке регулятора скорости. У дизеля с дефектами, но всеми работающими цилиндрами, коэффициент работоспособности  $K_{pc} = \frac{P_{min}}{P_{max}}$  составляет не менее 0,5. Если же у дизеля отключен хотя

бы один цилиндр, то  $K_{pc} < 0,5$ . Например, рис. 6 соответствует  $K_{pc} = 0,43$ , а рис.7 соответствует  $K_{pc} = 0,27$ . Такое расхождение значений  $K_{pc}$  объясняется, по-видимому, неполной идентичностью отключаемых (первого и второго) цилиндров.

По величине коэффициента  $K_{pc}$  можно судить о техническом состоянии ДГ, то есть его можно использовать как дополнительный диагностический признак.

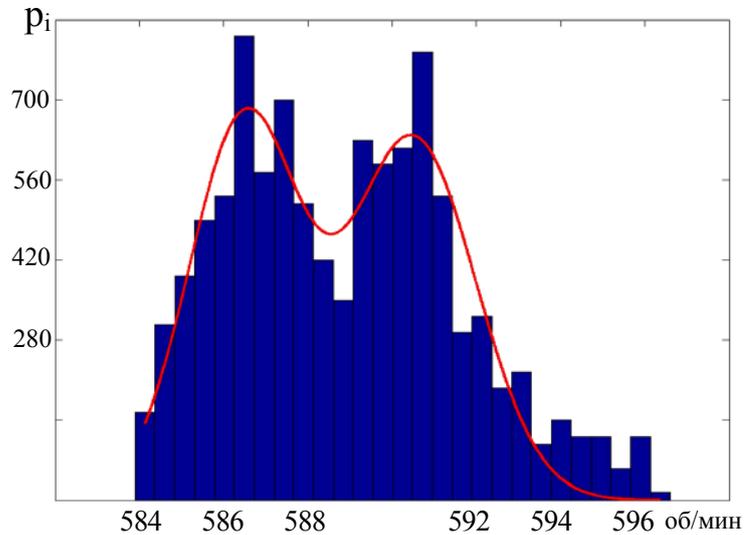


Рисунок 6 – Гистограмма и сглаживающая кривая при отключенном первом цилиндре

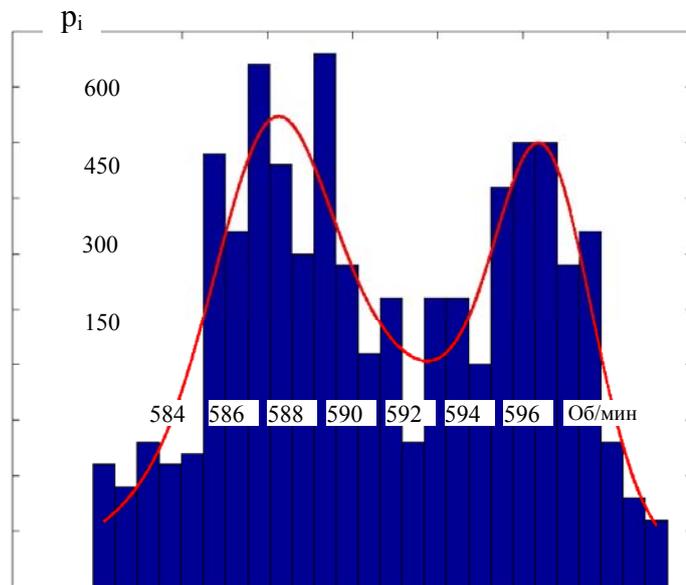


Рисунок 7 – Гистограмма и сглаживающая кривая при отключенном втором цилиндре

**Выводы**

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали:

1. В качестве диагностических признаков технического состояния ЦПГ дизеля эффективно можно использовать коэффициенты асимметрии и эксцесса, а также коэффициент работоспособности  $K_{рс}$ .
2. В качестве диагностического пространства для формирования обучающих совокупностей предложено использовать плоскость, осями координат в которой используются коэффициенты асимметрии и эксцесса.
3. В выбранном диагностическом пространстве предложен способ построения образов, соответствующих следующим техническим состояниям узлов ЦПГ:
  - условно исправны;
  - наличие задиров;
  - наличие неплотностей.
4. Предложен способ выявления разрегулировки цикловой подачи и фазы впрыска топлива.
5. Полученные результаты целесообразно использовать при разработке алгоритма управления подачей топлива ДВС.

**Список литературы:** 1. *Станиславский Л.В.* Техническое диагностирование дизелей.- Киев, Донецк // Вища школа. Главное издательство, 1983. – 135 с. 2. *Ле Ван Диет.* Модели и алгоритмы технического диагностирования силовых дизельных установок в процессе эксплуатации.- Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург, 2006. – 24 с. 3. *Марченко Б.Г., Мыслович М.В.* Теория диагностики энергоагрегатов по девиации вращающихся узлов и ее практическая реализация на дизель-электрических генераторах. Часть 1. модели динамики цилиндрических мощностей на валу дизель-электрического генератора. // Техн. электродинамика. – 1998. – № 5 – С. 36-40. 4. *Марченко Б.Г., Мыслович М.В.* Теория диагностики энергоагрегатов по девиации вращающихся узлов и ее практическая реализация на дизель-электрических генераторах. Часть 2. Построение оценок линейных ПКСП, описывающих динамику цилиндрических мощностей на валу дизель-электрического генератора. // Техн. электродинамика. – 1998. – № 6. – С. 39-42. 5. *Марченко Б.Г., Мыслович М.В.* Теория диагностики энергоагрегатов по девиации вращающихся узлов и ее практическая реализация на дизель-электрических генераторах. Часть 3. Физическая конкретизация параметров модели и имитационное моделирование динамики цилиндрических мощностей на валу дизель-электрического генератора. // Техн. электродинамика. – 1999. – №1. – С. 59-63. 6. *Марченко Б.Г., Мыслович М.В.* Теория диагностики энергоагрегатов по девиации вращающихся узлов и ее практическая реализация на дизель-электрических генераторах. Часть 4. Экспериментальная проверка методики диагностики цилиндрической группы дизель-электрического генератора. // Техн. электродинамика. – 1999. – № 4. – С. 40-45. 7. Вопросы статистической теории радиолокации / *П.А. Бакут, И.А. Большаков* и др.: под ред. *Г.П. Татаковского*. – Т.1. – М.: Сов. Радио, 1963. – 424 с. 8. *А.Н. Борисенко, С.А. Литвиненко.* Вопросы выбора информативных параметров и диагностических признаков для систем управления и диагностики дизель-генераторов. – Харьков //Вестник НТУ ХПИ, 2008. 9. *Дьяконов В.П., Круглов В.В.* Математические пакеты расширения MATLAB: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001.