

А.Н. БОРИСЕНКО, канд. техн. наук, проф. НТУ "ХПИ",
О.В. ЛАВРИНЕНКО, аспирант НТУ "ХПИ",
П.С. ОБОД, аспирант НТУ "ХПИ"

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЦИЛИНДРО-ПОРШНЕВОЙ ГРУППЕ И МЕХАНИЗМЕ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Выполнено имитационное моделирование циклических процессов, сопровождающих работу цилиндро-поршневой группы механизма газораспределения дизель-генератора, с использованием единичной ступенчатой и экспоненциальной функции со сдвигом во времени. Частота следования импульсов энергии, создаваемых цилиндро-поршневой группой, впускными и выпускными клапанами соответствует частоте вращения вала, а их число за один оборот соответствует числу цилиндров генератора. По виду амплитудно-частотного и фазо-частотного спектров импульсной последовательности делается вывод о техническом состоянии агрегата. Ил. 5. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: моделирование, циклические процессы, цилиндро-поршневая группа, механизм газораспределения, дизель-генератор.

Постановка проблемы. Техническое диагностирование дизель-генераторов (ДГ) имеет важное практическое значение, поскольку предотвращает эксплуатацию энергоустановки с дефектами или неисправностями, что, в свою очередь, способствует экономии топлива и сохранению окружающей среды. Весьма важными узлами, определяющими работу ДГ, являются цилиндро-поршневая группа (ЦПГ) и механизм газораспределения (МГР), в частности, впускные и выпускные клапаны. Таким образом, оценка технического состояния указанных узлов имеет существенное значение для обеспечения высоких технико-экономических и экологических показателей ДГ. Решение такой задачи весьма затруднительно без проведения математического, имитационного или физического моделирования и определения соответствующих диагностических признаков.

Анализ литературы. В работах [1 – 5] рассмотрены вопросы диагностирования ЦПГ по неравномерности вращения коленчатого вала и оценки технического состояния МГР по термодинамическим параметрам, полученным после обработки значительного объема экспериментальных данных. При отсутствии же таковых решение задач диагностики оказывается затруднительным или даже невозможным.

Цель статьи – разработка имитационной модели циклических процессов в ЦПГ и МГР ДГ и получение диагностических признаков, с помощью которых можно оценивать техническое состояние впускных и выпускных клапанов и ЦПГ силовой установки без проведения объемных экспериментов на реальных объектах.

Для моделирования последовательности импульсов, характеризующих импульсы энергии в процессе рабочего цикла в исследуемом дизеле, использовалась функция вида $xe^{-\alpha x}U(x)$.

Исходя из этой функции, а также с учетом конструктивных особенностей дизеля и круговой диаграммы работы его ЦПГ, последовательность импульсов энергии за один рабочий цикл дизеля может быть представлена выражением [6, 7, 8]

$$\xi_{ц}(t) = \sum_{k_{ц}=1}^{16} [t - (k_{ц} - 1)h] e^{-\alpha[t - (k_{ц} - 1)h]} U[t - (k_{ц} - 1)h], \quad (1)$$

где $k_{ц}$ – номер цилиндра; h – длительность рабочего хода в соответствующем цилиндре; α – коэффициент, характеризующий степень затухания импульса; $U[t - (k_{ц} - 1)h]$ – единичная функция Хевисайда, которая определяется следующим образом:

$$U[t - (k_{ц} - 1)h] = \begin{cases} 0 & \text{при } t < (k_{ц} - 1)h, \\ 1 & \text{при } t \geq (k_{ц} - 1)h. \end{cases} \quad (2)$$

Моделирование выхода из строя соответствующего цилиндра осуществляется путем обнуления на определенном временном интервале функции, характеризующей импульс энергии, которая поступает за счет работы исследуемого цилиндра. Проиллюстрировать это можно следующим образом.

Выход из строя первого цилиндра можно смоделировать путем обнуления первого слагаемого, входящего в выражение (1), т.е. при $k_{ц} = 1$. Подобным образом моделируется выход из строя и последующих цилиндров. Аналитически это представлено следующим образом

$$te^{-\alpha t} U(t) \equiv 0 \text{ при } k_{ц} = 1; \quad (3)$$

$$(t - h)e^{-\alpha(t-h)} U(t - h) \equiv 0 \text{ при } k_{ц} = 2; \quad (4)$$

.....

$$(t - 15h)e^{-\alpha(t-15h)} U(t - 15h) \equiv 0 \text{ при } k_{ц} = 16. \quad (5)$$

На рис. 1 показана соответствующая одному рабочему циклу дизеля импульсная последовательность, смоделированная по выражению (1) с помощью ЭВМ при $\alpha = 2$ и $h = 1$.

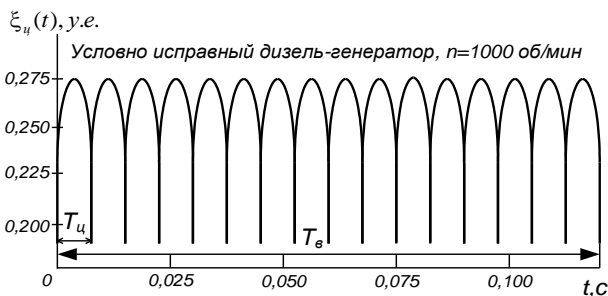


Рис. 1. Последовательность импульсов энергии за один рабочий цикл исправного 16-ти цилиндрового ДГ

Длительность представленной импульсной последовательности $T_{\text{в}}$, как и длительность $T_{\text{ц}}$ импульса энергии в каждом цилиндре, зависит от угловой скорости вращения вала исследуемого ДГ. Оценку области частот, в которой находится основная частотная составляющая, вызванная работой каждого цилиндра, можно выполнить следующим образом. Исходя из обозначений периодов $T_{\text{в}}$ и $T_{\text{ц}}$, показанных на рис. 1, соответствующие им частоты определяются из простых выражений:

$$f_{\text{в}} = \frac{1}{T_{\text{в}}}, \quad T_{\text{ц}} = \frac{T_{\text{в}}}{16}, \quad f_{\text{ц}} = \frac{1}{T_{\text{ц}}} = \frac{16}{T_{\text{в}}}. \quad (6)$$

Если исходить из того, что номинальное число оборотов коленчатого вала исследуемого ДГ составляет $n = 1000$ об/мин, то для номинальной скорости имеют место соотношения: $n_1 = n/2 = 500$ об/мин; $f_{\text{а}} = f_1/60 = 8,3$ Гц; $f = 16 \cdot f_{\text{а}} = 132,8$ Гц (n_1 – частота вращения кулачкового вала топливных насосов, $f_{\text{в}}$ – частота следования импульсов энергии одного цилиндра, $f_{\text{ц}}$ – частота следования импульсов энергии 16-ти цилиндрового ДГ).

АЧС (рис. 2, а) и ФЧС (рис. 2, б), полученные с использованием преобразования Фурье к последовательности (рис. 1), дают наглядное представление о распределении основных частотных составляющих, а также их фазах. Они получены при моделировании условно исправного состояния всех цилиндров исследуемого дизель-генератора.

Одним из важнейших моментов при решении задачи диагностирования является определение диагностических признаков, т.е. параметров, позволяющих однозначно устанавливать изменение состояния диагностируемого узла по изменению этих признаков. Исследуем на предложенной модели (1) поведение ее АЧС и ФЧС при выходе из строя одного или группы цилиндров.

На рис. 3 показана импульсная последовательность при имитации выхода из строя первого левого цилиндра, а на рис. 4 *а*, *б* – соответственно АЧС и ФЧС этой последовательности. Из представленных зависимостей видно, что обнуление одного из импульсов приводит к изменению полученных спектров. В АЧС это проявляется в появлении субгармоник в низкочастотной части спектра и в некотором уменьшении амплитуды основной гармоники. Следует отметить, что этот спектр остается неизменным при имитации выхода из строя любого цилиндра. Таким образом, по АЧС последовательности можно судить только о выходе из строя одного из цилиндров, без указания какого.

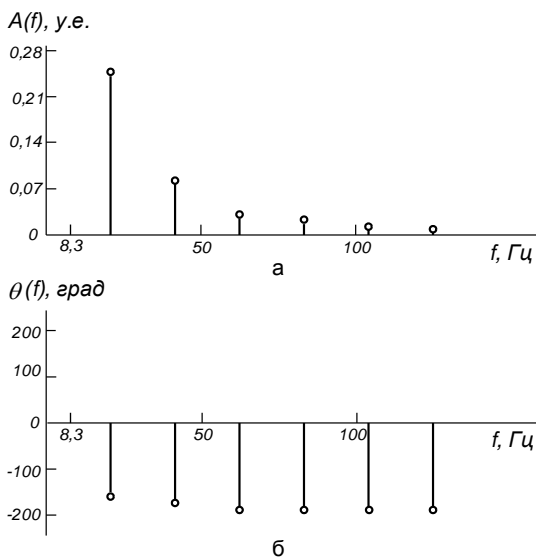


Рис. 2. Результаты обработки импульсов энергии исправного ДГ с помощью быстрого преобразования Фурье: *а* – амплитудно-частотный спектр сигнала; *б* – фазо-частотный спектр сигнала

Ответить на вопрос, какой именно из цилиндров вышел из строя, можно по ФЧС исследуемой последовательности (1). Сравнив рис. 4, б и 5, а, ..., *n*, где показаны ФЧС последовательности (1) при выходе из строя различных цилиндров видим, что имитация отказа определенного цилиндра приводит к соответствующему изменению ФЧС, т.е. определенному номеру вышедшего из строя цилиндра соответствует вполне определенный ФЧС. На основании физической конкретизации параметров модели, которая описывает спектры упомянутых сигналов, в качестве диагностических признаков при диагностике ЦПГ дизель-электрического генератора могут быть использованы: для определения выхода из строя какого-либо одного цилиндра – наличие

субгармоник $d_j, j = \overline{1,15}$ в АЧС девиации угловой скорости вала; для определения номера вышедшего из строя цилиндра – фазовые углы $\alpha_j^0, j = \overline{1,15}$ для соответствующих субгармоник в ФЧС девиации угловой скорости вала.

Полученная информация о номере неисправного цилиндра совместно с результатами контроля ряда параметров режима и рабочего процесса агрегата используется в дальнейшем для конкретизации неисправного узла.

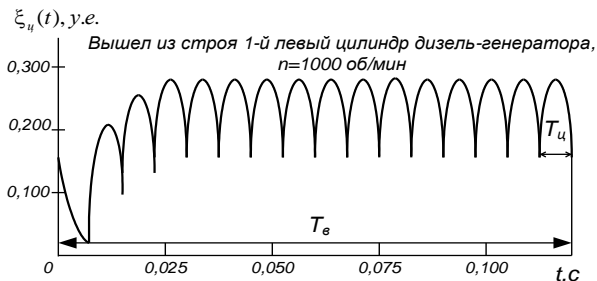


Рис. 3. Последовательность импульсов энергии 16-тицилиндрового ДГ при отключенном первом левом цилиндре

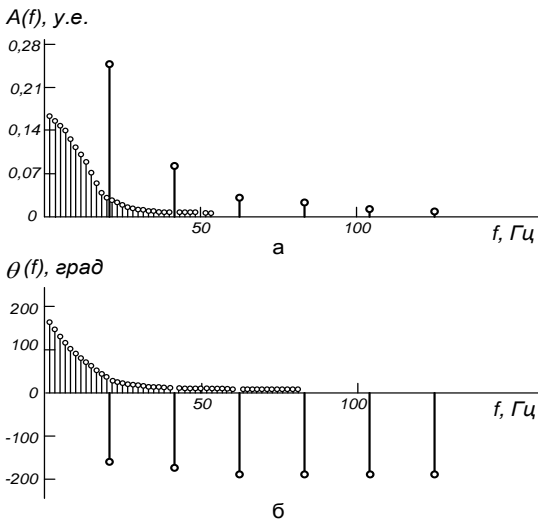


Рис. 4. Результаты обработки импульсов энергии ДГ с отключенным первым левым цилиндром с помощью быстрого преобразования Фурье: а – амплитудно-частотный спектр сигнала; б – фазочастотный спектр сигнала

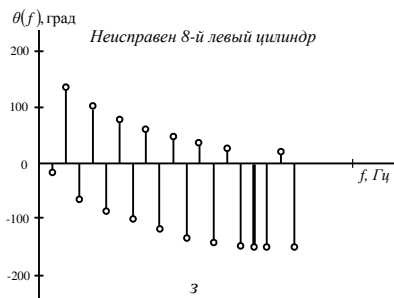
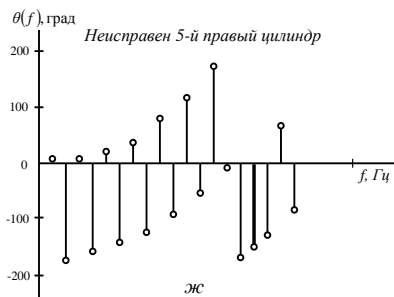
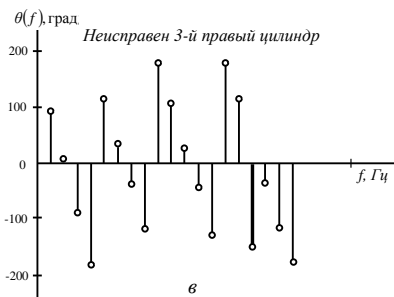
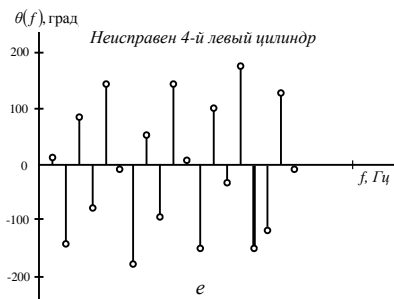
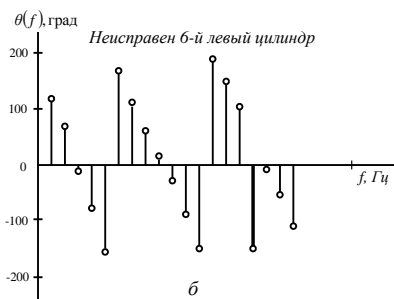
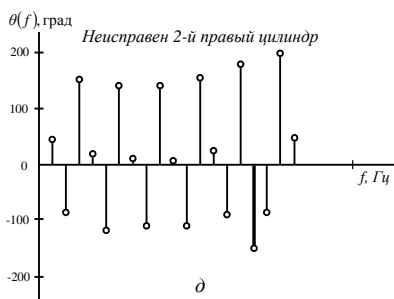
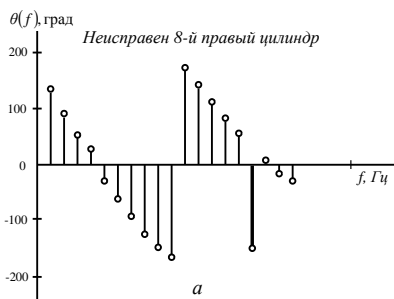


Рис. 5. ФЧС информативного сигнала при различных состояниях ДГ

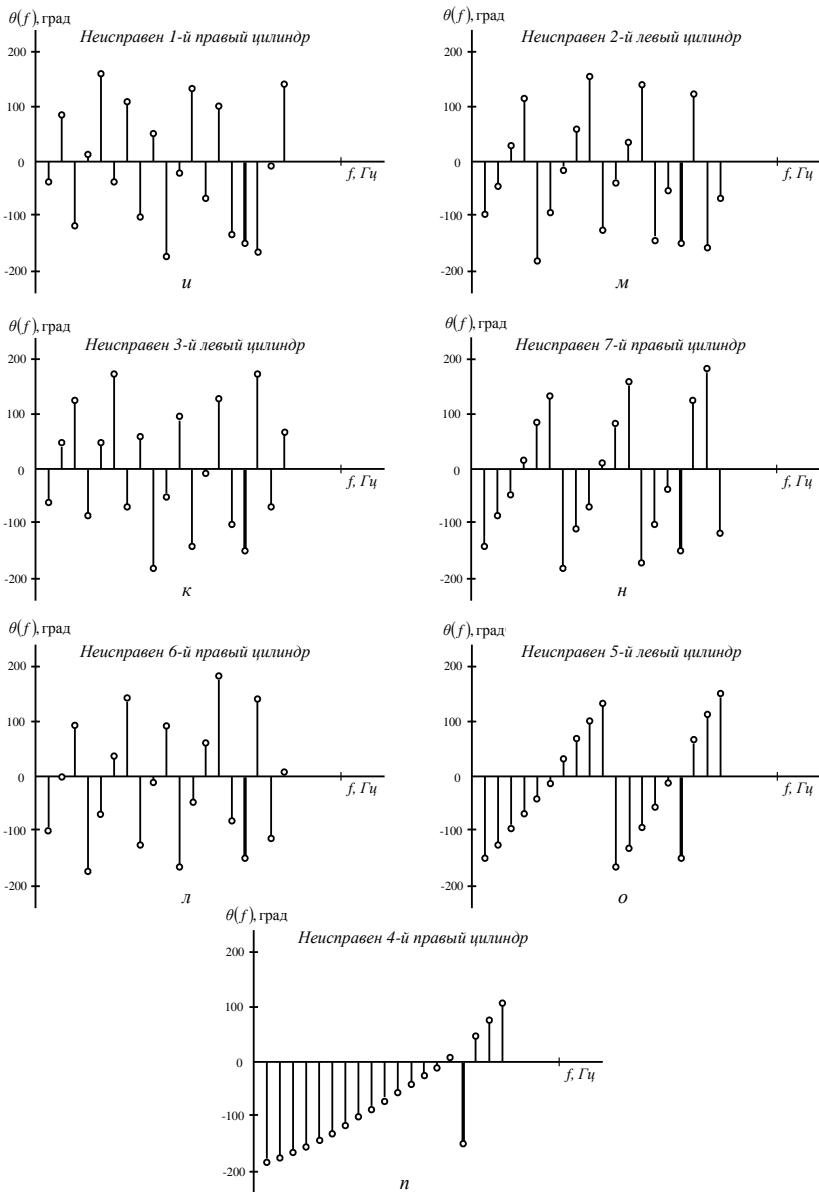


Рис. 5. Продолжение

Выводы. В результате имитационного моделирования циклических процессов, сопровождающих работу ЦПГ и МГР, удалось получить

диагностические признаки (АЧС, ФЧС) и установить, что АЧС позволяет выявить факт наличия дефекта, а ФЧС – выявить цилиндр с дефектом, что удовлетворяет поставленному заданию.

Список литературы: 1. *Марченко А.П.* Двигуни внутрішнього згоряння / *А.П. Марченко* – Харків: Прапор, 2004. – 364 с. 2. *Станиславский Л.В.* Техническое диагностирование дизелей / *Л.В. Станиславский* – К.: Вища школа, 1983. – 135 с. 3. *Борисенко А.Н.* Современные системы и средства контроля технического состояния дизельных двигателей / *А.Н. Борисенко, П.С. Обод, О.В. Лавриненко* // Вестник НТУ "ХПИ". – 2008. – № 56. – С. 26 –34. 4. *Ильина И.В.* Построение обобщенных моделей процессов изнашивания основных типов узлов судовых ДВС / *И.В. Ильина, Е.Н. Климов, А.С. Кобелева* // Двигателестроение. – 2007. – № 3. – С. 11 – 13. 5. *Гребенников А.С.* Диагностирование двигателей по изменению угловой скорости коленчатого вала / *А.С. Гребенников* // Двигателестроение. – 2007. – № 1. – С. 39 – 40. 6. Математическое моделирование в энергетике: Материалы Всесоюзной науч.-техн. конф. "Математическое моделирование" / ИМПЭ, Академия наук УССР. – Киев, 1990. – 216 с. 7. Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: материалы V Междунар. науч.-техн. конф. / Украина, ХГПУ; Венгрия, Мишкольцкий ун-т; Германия, Магдебургский ун-т. – Х.: ХГПУ, 1997. – 36 с. 8. *Борисенко А.Н.* Имитационное моделирование девиации угловой скорости вала дизель-генератора и получение информативных параметров для систем управления и диагностики на базе гистограммного анализа / *А.Н. Борисенко, П.С. Обод, Е.В. Халанская* // Вестник НТУ "ХПИ". – 2008. – Вып. 31. – С. 14–20.

Статья представлена д.т.н. проф. НТУ "ХПИ" Кондрашовым С.И.

УДК 621.436.2.001.57

Імітаційне моделювання циклічних процесів у циліндро-поршневій групі й механізм газорозподілу дизель-генератора / Борисенко А.М., Лавріненко О.В., Обод П.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – № 43. – С. 10 – 17.

Виконано імітаційне моделювання циклічних процесів, що супроводжують роботу циліндро-поршневої групи механізму газорозподілу дизель-генератора, з використанням однієї сідчастості та експонентної функції зі зрушенням у часі. Частота проходження імпульсів енергії, створюваних циліндро-поршневою групою, впускними й випускними клапанами відповідає частоті обертання вала, а їхнє число за один оборот відповідає числу циліндрів генератора. По вигляду амплітудно-частотного і фазо-частотного спектрів імпульсної послідовності робиться висновок про технічний достаток агрегату. Іл.: 5. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: моделювання, циклічні процеси, циліндро-поршнева група, механізм газорозподілу, дизель-генератор.

UDK 621.436.2.001.57

Imitating modelling of cyclic processes in piston-cylinder-unit and device of gas distribution of a diesel engine / Borisenko A.N., Lavrinenko O.V., Obod P.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2009. – № 43. – P. 10 – 17.

Imitating modelling of the cyclic processes accompanying work of piston-cylinder-unit of the gas distribution device a diesel engine, with use individual step and exponential functions with shift in time is executed. Frequency of following of energy impulses created by piston-cylinder-unit, inlet and final valves corresponds to rotation frequency of a shaft, and their number for one turn corresponds to number of cylinders of the generator. By the form peak-frequency and phase-frequency spectra of pulse sequence the conclusion about a technical condition of the unit becomes. By appearance of amplitude-frequency spectrum of impulsive sequence drawn conclusion about the technical state of aggregate. Figs.: 5. Refs.: 8 titles.

Key words: modelling, cyclic processes, piston-cylinder-unit, device of gas distribution, a diesel engine.

Поступила в редакцію 09.10.2009