

УДК 621.431.73

Экспериментальная проверка способа выравнивания мощностей цилиндров многоцилиндрового дизеля

В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский, М. Н. Панченко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Грачев В. В., Грищенко А. В., Базилевский Ф. Ю., Панченко М. Н. Экспериментальная проверка способа выравнивания мощностей цилиндров многоцилиндрового дизеля // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 4. — С. 24–36. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-24-36

Аннотация

Цель: Экспериментальная проверка способа выравнивания мощностей цилиндров многоцилиндрового дизеля, основанного на минимизации энергии низкочастотной полосы амплитудного спектра сигнала мгновенной угловой скорости коленчатого вала дизеля. **Методы:** В работе использованы методы цифровой обработки сигналов, спектрального анализа, дифференциального исчисления, оптимизации многомерных недифференцируемых функций, обработки результатов эксперимента. **Результаты:** Выполненные экспериментальные исследования на стендовой дизель-генераторной установке в составе тепловозного дизеля Д50 (6ЧН31,8/33) и тягового генератора МПТ 84/39 подтверждают возможность использования предложенного ранее способа выравнивания мощностей цилиндров многоцилиндрового дизеля, основанного на контроле энергии низкочастотной полосы амплитудного спектра сигнала мгновенной угловой скорости коленчатого вала. Предложен показатель неравномерности мощностей цилиндров, выполнена оценка его чувствительности к изменению цикловой подачи и угла опережения подачи топлива в отдельные цилиндры дизеля. **Практическая значимость:** Экспериментально подтверждена возможность применения предлагаемого способа выравнивания мощностей цилиндров многоцилиндрового дизеля для регулировки топливной аппаратуры после ремонта дизелей как с электронными системами управления топливоподачей, так и с гидромеханической топливной аппаратурой. Применение данного способа исключает необходимость измерения температуры отработавших газов и давления вспышки в цилиндрах для настройки топливной аппаратуры, что особенно важно для высокооборотных дизелей, в конструкции крышек цилиндров которых не предусмотрены индикаторные краны.

Ключевые слова: Дизель, мгновенная угловая скорость, амплитудный спектр, энергия спектра, цикловая подача топлива, максимальное давление цикла, кривая внутрицилиндрового давления, среднеиндикаторное давление, мощность цилиндра.

Постановка задачи

Одним из основных условий надежной и экономичной работы многоцилиндрового дизеля является равномерная нагрузка цилиндров во всех режимах его работы. Согласно руководству по эксплуатации дизеля [1], выравнивание нагрузок цилиндров сводится к выравниванию значений температуры $t_{ог}$ отработавших газов (ОГ) коррекцией величины цикловой подачи топлива и значений максимального давления цикла (p_z) посредством изменения угла опережения подачи топлива (УОПТ) в отдельных цилиндрах. При этом контроль текущих значений температуры $t_{ог}$ осуществляется с использованием термопар, устанавливаемых в выпускные патрубки цилиндров, а давление p_z измеряется с помощью максиметра, присоединяемого к индикаторному крану.

Как показано в [2], такая технология выполнения одной из основных (наряду с обкаткой и настройкой регулятора) операций полных реостатных испытаний тепловозного дизель-генератора и тепловоза в целом после ремонтов большого объема характеризуется целым рядом недостатков. Там же предложен способ выравнивания мощностей по цилиндрам дизеля, основанный на контроле спектра сигнала мгновенной угловой скорости (МУС) вращения коленчатого вала дизеля и минимизации энергии спектра в полосе $k_c \leq k < z \cdot k_c$, где k_c — порядок гармоники цикловой частоты, z — количество цилиндров дизеля.

Задачей настоящей работы является экспериментальная проверка указанного способа.

Выбор метода исследования

Экспериментальная проверка способа выравнивания мощностей цилиндров дизеля выполнялась на стендовой дизель-генераторной установке тепловозной лаборатории кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. Установка включает тепловозный дизель Д50 (6ЧН31,8/33) и тяговый генератор МПТ 84/39, нагружаемые на водяной реостат. Дизель оборудован системой электронного управления впрыском топлива ЭСУВТ.01.06-00 производства ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов) [3].

Для формирования дискретного сигнала МУС используется выходной сигнал импульсного датчика угловой скорости коленчатого вала системы ЭСУВТ, установленного на приводной шестерне распределительного вала топливных насосов высокого давления с количеством зубьев, равным 120. Для измерения напряжения датчика используется многофункциональный модуль ввода и вывода USB-4716 (Advantech Co) [4] с частотой дискретизации 100 кГц.

Фрагмент сигнала датчика приведен на рис. 1.

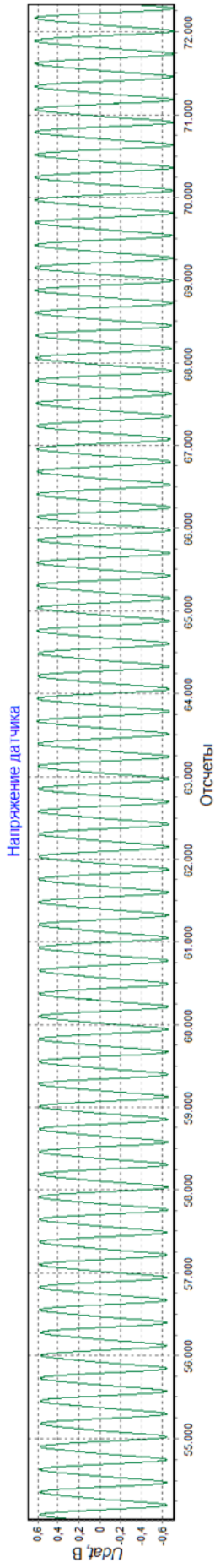


Рис. 1. Выходное напряжение датчика частоты вращения системы ЭСУВТ

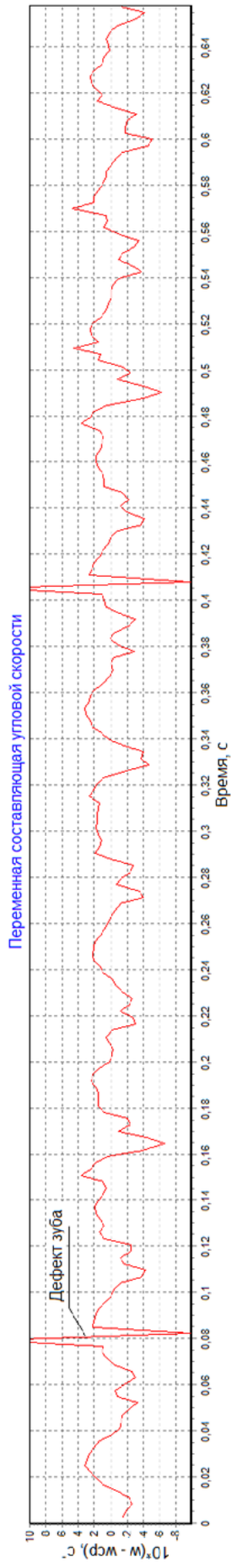


Рис. 2. Изменение МУС коленчатого вала в течение двух рабочих циклов дизеля на второй позиции контроллера ($\omega_{\text{нб}} = 38,22 \text{ c}^{-1}$) под нагрузкой

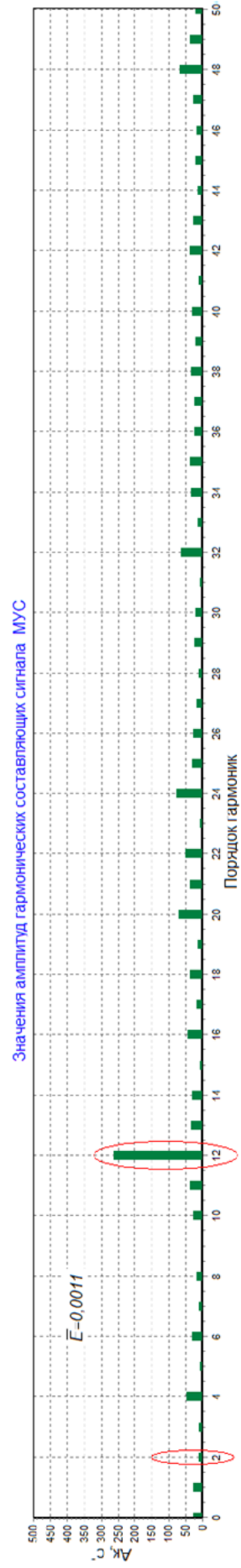


Рис. 3. Амплитудный спектр сигнала МУС КВ, соответствующего двум рабочим циклам дизеля

Мгновенное значение угловой скорости коленчатого вала определялось по формуле:

$$\omega_i = \frac{4 \cdot \pi}{z \cdot \tau_i}, \text{ с}^{-1}, \quad (1)$$

где τ_i — период изменения напряжения датчика частоты вращения, с;
 $z = 120$ — количество зубьев шестерни, на которой установлен датчик.

Поскольку один период изменения напряжения датчика частоты вращения соответствует повороту коленчатого вала (ПКВ) на один зуб приводной шестерни распределительного вала (6 градусов ПКВ), частота дискретизации сигнала МУС составляет 120 отсчетов на рабочий цикл дизеля. Изменение значения МУС в течение двух циклов приведено на рис. 2.

Исходными данными для анализа является массив из 150 000 отсчетов напряжения датчика частоты вращения, загружаемый из модуля ввода сигналов после выполнения цикла измерения.

Последовательным перебором значений напряжения датчика с использованием зависимости (1) формируется массив ΔW из 240 отсчетов (два рабочих цикла дизеля) переменной составляющей сигнала МУС $\Delta W_i = 10 \cdot (\omega_i - \omega_{\text{ср}})$, $i = 1 \dots 240$, где $\omega_{\text{ср}}$ — среднее значение угловой скорости за два рабочих цикла (рис. 2).

Для интегральной оценки неравномерности нагрузки цилиндров дизеля используется амплитудный спектр переменной составляющей сигнала МУС, полученный в результате применения быстрого преобразования Фурье [5] к массиву ΔW (рис. 3). Первая (основная) гармоника этого спектра соответствует двум рабочим циклам дизеля, следовательно, одному циклу соответствует вторая (цикловая) гармоника. Порядок цилиндровой гармоники превосходит порядок цикловой в шесть раз, т. е. изменение МУС вследствие срабатывания отдельных цилиндров характеризуется амплитудой двенадцатой гармоники.

В [2] показано, что при равномерной нагрузке цилиндров амплитуда цикловой гармоники будет стремиться к нулю при одновременном увеличении амплитуды цилиндровой гармоники. Таким образом, текущий уровень неравномерности нагрузки цилиндров может оцениваться отношением значений амплитуды второй и двенадцатой гармоник спектра:

$$\bar{E} = \frac{A_2}{A_{12}}. \quad (2)$$

При равномерной нагрузке цилиндров $\bar{E} \rightarrow 0$.

Наряду с амплитудным спектром сигнала МУС в каждом режиме работы дизеля фиксировались температуры отработавших газов (ОГ) на выходе из цилиндров. Для контроля использовался дизельный термокомплект типа ТКД50 с термомпарами типа ХК.

Результаты исследования

Перед началом экспериментальных исследований была выполнена регулировка нагрузки цилиндров в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации системы ЭСУВТ.01.06-00 [3] и дизеля Д50 [1] посредством коррекции цикловых подач и углов опережения подачи топлива (УОПТ) в отдельные цилиндры. Контроль нагрузки цилиндров осуществлялся по величине температуры отработавших газов (ОГ) $t_{ог}$ на выходе из цилиндров и максимальных давлений цикла p_z .

Значения температуры ОГ при работе дизеля под нагрузкой на второй позиции контроллера машиниста ($\omega_{ср} = 38,22 \text{ с}^{-1}$, эффективная мощность $P_e = 76 \text{ кВт}$) после выполнения регулировок приведены в первой строке табл. 1. Там же указаны значения показателя неравномерности нагрузки цилиндров \bar{E} (2) для десяти последовательных двухцикловых фрагментов переменной составляющей сигнала МУС.

Амплитудный спектр сигнала МУС для этого режима работы дизеля показан на рис. 3.

На рис. 4–6 приведены примеры спектра переменной составляющей двухцикловых фрагментов сигнала МУС при изменении цикловой подачи топлива в отдельные цилиндры.

Значения температуры ОГ на выходе из цилиндров и показателя неравномерности нагрузки цилиндров \bar{E} (2) для различных вариантов изменения цикловой подачи в отдельные цилиндры приведены в строках 2–12 табл. 1.

Качество рабочего процесса в цилиндре, цилиндровая индикаторная мощность, а также уровень нагрузок на детали цилиндро-поршневой группы, помимо цикловой подачи топлива, во многом определяются также величиной угла опережения подачи топлива (УОПТ) в цилиндр [6]. Изменение УОПТ приводит к изменению формы индикаторной диаграммы рабочего процесса в цилиндре и кривой сигнала МУС, которое должно приводить к увеличению амплитуды цикловой гармоники в его спектре [2].

В табл. 2 приведены результаты экспериментальной проверки влияния изменения УОПТ в отдельные цилиндры на величину показателя неравномерности нагрузок цилиндров (2). На рис. 7–9 представлены примеры спектра сигнала МУС КВ при различных вариантах изменения значения УОПТ отдельных цилиндров.

Обсуждение результатов

Как следует из результатов, представленных в табл. 1 и на рис. 4–6, изменение цикловой подачи в отдельные цилиндры на 10 % приводит к изменению показателя неравномерности нагрузки цилиндров (2) в 6–50 раз, что свидетельствует о высокой чувствительности предложенного показателя к величине цикловой подачи топлива в цилиндры и возможности использования его для выравнивания нагрузок цилиндров многоцилиндрового дизеля.

Изменение УОПТ в отдельных цилиндрах также приводит к изменению формы индикаторной диаграммы рабочего процесса, кривой сигнала МУС КВ и, как следствие, к изменению энергии цикловой гармоники спектра сигнала. Как следует из результатов, приведенных в табл. 2 и на рис. 7–9, чувствительность показателя неравномерности нагрузки цилиндров к изменению УОПТ существенно меньше, чем к изменению цикловой подачи. Однако, как показывают результаты моделирования рабочего процесса [2], влияние УОПТ на энергию низкочастотной полосы спектра МУС возрастает по мере отклонения значения УОПТ от оптимального для текущего режима работы цилиндра.

Поэтому невысокая чувствительность показателя неравномерности нагружения цилиндров (2) к изменению УОПТ большинства цилиндров является следствием их предварительной регулировки.

Вместе с тем даже изменение показателя (2) в 2–9 раз при изменении УОПТ на 5 гр. ПКВ позволяет эффективно применять предлагаемый способ выравнивания нагрузок цилиндров для регулировки дизелей в процессе их испытаний.

Наибольший эффект от его применения может быть получен при настройке и регулировке двигателей, оборудованных системами электронного управления топливоподачей.

В этом случае задача выравнивания мощностей сводится к задаче минимизации значения функции $(2 \cdot z)$ переменных вида:

$$\bar{E} = f\left(\overline{\Delta g}_{\text{ци}i=1..z}, \overline{\Delta \varphi}_{\text{опт}i=1..z}\right), \quad (3)$$

где $\overline{\Delta g}_{\text{ци}i=1..z}$, $\overline{\Delta \varphi}_{\text{опт}i=1..z}$ — относительные изменения соответственно цикловой подачи топлива и УОПТ в 1...z цилиндры дизеля.

Задача решается любым из известных методов оптимизации недифференцируемых функций, например методом Хука — Дживса [7].

Минимизацию функции (4) целесообразно осуществлять в два этапа.

Первый из них выполняется при условии $\overline{\Delta \varphi}_{\text{опт}i=1..z} = \text{const}$, т. е. ищется локальный минимум функции (3), соответствующий установленным на предыдущем этапе значениям УОПТ цилиндров, только за счет изменений значений $\overline{\Delta g}_{\text{ци}i=1..z}$ в последовательности, определяемой применяемым методом оптимизации в зависимости от изменения значения \bar{E} , вычисляемого после каждого шага.

На втором этапе ищется локальный минимум, соответствующий установленным на предыдущем этапе значениям $\overline{\Delta g}_{\text{ци}i=1..z}$, т. е. при условии $\overline{\Delta g}_{\text{ци}i=1..z} = \text{const}$. Поиск осуществляется последовательными изменениями $\overline{\Delta \varphi}_{\text{опт}i=1..z}$, также с обязательным контролем изменения \bar{E} после каждого шага.

Этапы повторяются до стабилизации значения целевой функции (3).

Особенностью такого подхода к реализации предлагаемого способа является значительное количество шагов изменения $\overline{\Delta g}_{\text{ци}i=1..z}$ и $\overline{\Delta \varphi}_{\text{опт}i=1..z}$, необходимых для поиска минимума функции (3).

ТАБЛИЦА 1. Значения температуры ОГ (°С) и показателя неравномерности нагрузки при различных вариантах изменения цикловой подачи в отдельные цилиндры

Реж.	Описание	Температура ОГ в цилиндрах						Отсчеты \bar{E}								Среднее $\bar{E}_{\text{ср}}$
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	\bar{E}_1	\bar{E}_2	\bar{E}_3	\bar{E}_4	\bar{E}_5	\bar{E}_6	\bar{E}_7	\bar{E}_8	
0	Норма	175	190	175	175	175	190	0,0022	0,000358	0,00241	0,000203	0,0116	0,00528	0,00198	0,00107	0,00313
1	+10 % цил. 2	170	195	175	175	175	185	0,0167	0,0136	0,0245	0,0130	0,0137	0,0203	0,0111	0,0194	0,0165
2	+20 % цил. 3	170	190	195	170	170	185	0,0124	0,0244	0,00413	0,00772	0,0229	0,00486	0,00918	0,0124	0,0122
3	+10 % цил. 4	170	190	175	180	175	185	0,0577	0,0469	0,03914	0,0446	0,0399	0,0307	0,0622	0,0438	0,0456
4	+10 % цил. 5	175	190	175	175	180	185	0,0371	0,0372	0,0162	0,0312	0,00806	0,0344	0,0131	0,0203	0,0247
5	-30 % цил. 6	180	195	180	185	190	155	0,0468	0,0855	0,0671	0,0468	0,0440	0,0552	0,0605	0,0580	0,0580
6	-10 % цил. 1	165	190	180	175	185	190	0,0478	0,0560	0,107	0,0775	0,0671	0,0524	0,0554	0,0719	0,0669
7	-10 % цил. 2	180	175	180	175	175	190	0,0213	0,0169	0,00826	0,0197	0,0245	0,0162	0,0198	0,0250	0,0190
8	-10 % цил. 3	185	190	165	175	175	195	0,0246	0,0325	0,0544	0,0204	0,0237	0,0465	0,0211	0,0238	0,0309
9	-10 % цил. 4	185	190	180	165	175	195	0,0112	0,00511	0,00377	0,00118	0,0256	0,00774	0,00471	0,0108	0,00875
10	-10 % цил. 5	185	190	175	175	165	195	0,0542	0,0403	0,0425	0,0546	0,0530	0,0391	0,0571	0,0381	0,0474
11	-10 % цил. 6	185	190	180	180	175	175	0,0939	0,0964	0,121	0,0746	0,108	0,127	0,0922	0,0835	0,0996

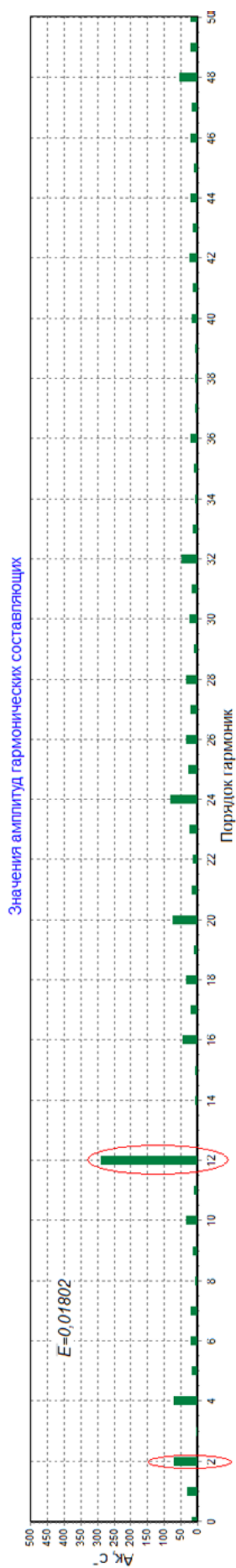


Рис. 4. Амплитудный спектр сигнала МУС при увеличении цикловой подачи в 4-й цилиндр на 10 % (режим 3 в табл. 1)

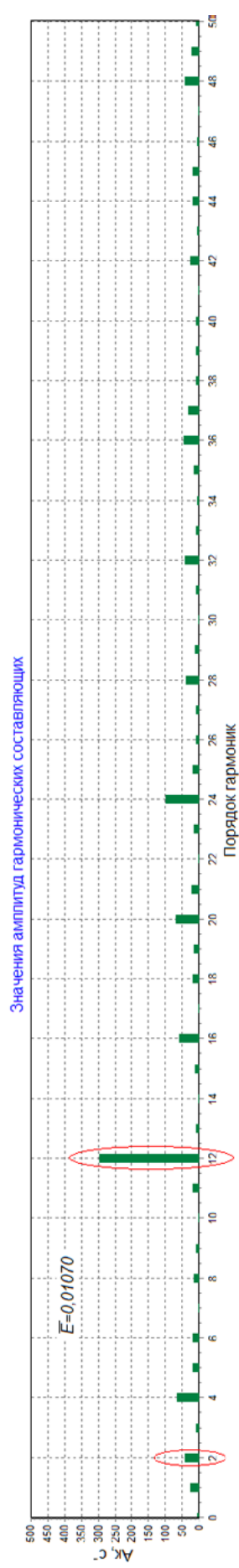


Рис. 5. Амплитудный спектр сигнала МУС при увеличении цикловой подачи в 5-й цилиндр на 10 % (режим 4 в табл. 1)

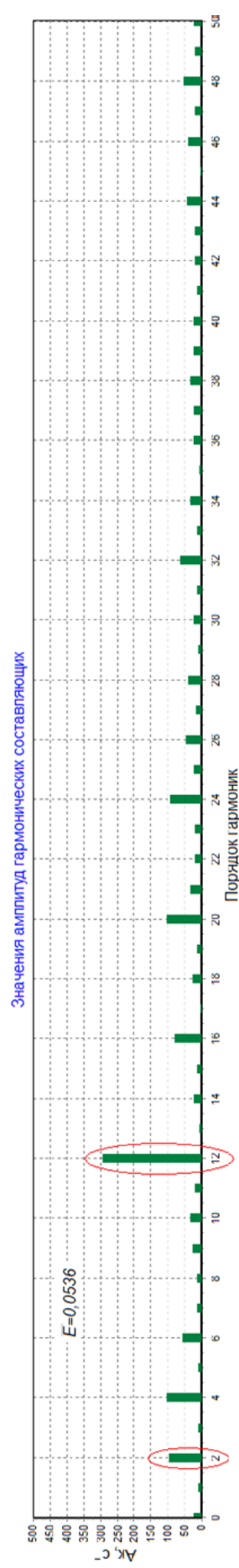


Рис. 6. Амплитудный спектр сигнала МУС при уменьшении цикловой подачи в 6-й цилиндр на 10 % (режим 11 в табл. 1)

ТАБЛИЦА 2. Значения температуры ОГ (°С) и показателя неравномерности нагрузки при различных вариантах изменения УОПГ в отдельных цилиндрах

Реж.	Описание	Температура ОГ в цилиндрах						Отсчеты \bar{E}								Среднее $\bar{E}_{\text{ср}}$
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	\bar{E}_1	\bar{E}_2	\bar{E}_3	\bar{E}_4	\bar{E}_5	\bar{E}_6	\bar{E}_7	\bar{E}_8	
0	Норма	175	190	175	175	175	190	0,000908	0,00165	0,00302	0,00352	0,00169	0,00831	0,00214	0,00058	0,00273
1	-5 гр. цил. 1	180	195	175	175	175	190	0,0315	0,0193	0,0309	0,0321	0,0295	0,0255	0,0379	0,0205	0,0284
2	+5 гр. цил. 1	165	190	175	175	175	190	0,0143	0,0111	0,0175	0,0310	0,0124	0,00422	0,00998	0,0101	0,0138
3	-5 гр. цил. 3	175	190	180	175	180	190	0,0344	0,0351	0,0411	0,0430	0,0375	0,0317	0,0271	0,0408	0,0363
4	+5 гр. цил. 3	180	190	165	175	180	190	0,0254	0,0209	0,0208	0,0315	0,0189	0,0164	0,0262	0,01925	0,0224
5	+5 гр. цил. 5	175	190	175	175	170	195	0,0204	0,0255	0,0252	0,0229	0,0130	0,0224	0,0219	0,0187	0,0213
6	-5 гр. цил. 6	175	190	175	175	185	205	0,0302	0,0271	0,0457	0,0282	0,0345	0,0353	0,0317	0,0503	0,0354
7	+5 гр. цил. 6	175	190	175	175	185	185	0,00620	0,00839	0,00258	0,00899	0,0104	0,0120	0,00759	0,0180	0,00927
8	-5 гр. цил. 4	175	190	175	185	185	195	0,0273	0,0238	0,0285	0,0216	0,0223	0,0224	0,0187	0,0268	0,0240
9	+5 гр. цил. 4	175	190	175	165	185	195	0,00866	0,0103	0,0111	0,0127	0,00629	0,00824	0,00955	0,0119	0,00985
10	-5 гр. цил. 2	180	205	175	185	185	195	0,0222	0,0164	0,0124	0,00917	0,00848	0,0184	0,00881	0,0116	0,0134
11	+5 гр. цил. 2	175	185	180	185	185	195	0,0131	0,0387	0,0173	0,00853	0,0183	0,0166	0,0313	0,00859	0,0190

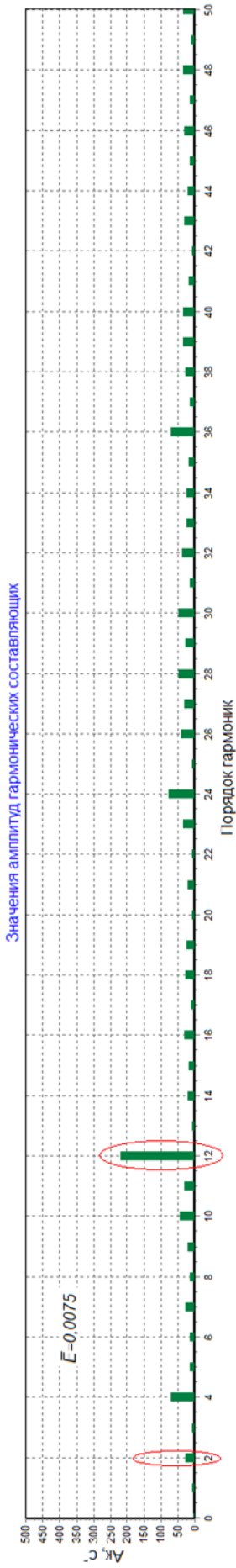


Рис. 7. Амплитудный спектр сигнала МУС при уменьшении УОПТ в 1-м цилиндре на 5 гр. ПКВ (режим 1 в табл. 2)

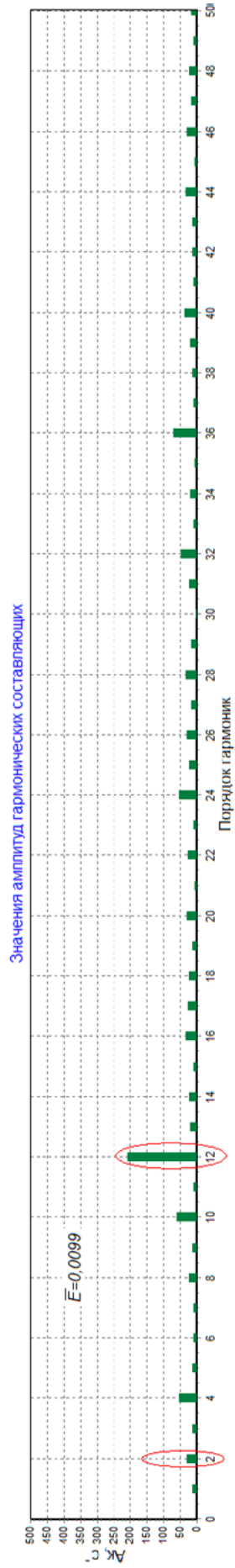


Рис. 8. Амплитудный спектр сигнала МУС при увеличении УОПТ в 3-м цилиндре на 5 гр. ПКВ (режим 4 в табл. 2)

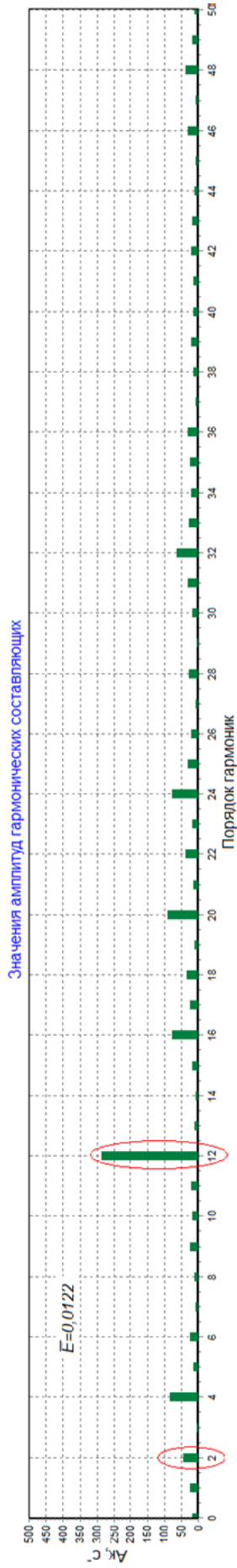


Рис. 9. Амплитудный спектр сигнала МУС при уменьшении УОПТ в 4-м цилиндре на 5 гр. ПКВ (режим 8 в табл. 2)

При реализации его в системе электронного управления впрыском это не имеет большого значения, однако для топливной аппаратуры с механическим управлением топливоподачей такая реализация предлагаемого способа представляется неприемлемой вследствие значительной трудоемкости операций коррекции как топливоподачи в отдельные цилиндры, так и в особенности значений УОПТ.

Количество поисковых операций и, соответственно, трудоемкость настройки могут быть существенно уменьшены при наличии косвенного способа сравнительной оценки нагруженности отдельных цилиндров по параметрам сигнала МУС.

Выводы

Результаты выполненных экспериментальных исследований подтверждают возможность использования амплитудного спектра сигнала МУС КВ для контроля неравномерности нагрузки цилиндров многоцилиндрового дизеля и ее уменьшения.

В качестве показателя неравномерности нагрузки цилиндров может использоваться отношение энергии цикловой и цилиндровой гармонических составляющих спектра.

Данный показатель обладает высокой чувствительностью к изменению цикловой подачи топлива в отдельные цилиндры. Чувствительность его к изменению значения УОПТ цилиндра возрастает по мере отклонения угла от номинального значения для текущего режима работы цилиндра.

В отсутствие методики оценки относительной нагрузки отдельных цилиндров представляется предпочтительным применение данного способа снижения неравномерности нагрузок цилиндров для дизелей, оборудованных системами электронного управления топливоподачей.

Библиографический список

1. Дизель-генераторы 1-ПДГ4Д, 1-ПДГ4Д-1. Руководство по эксплуатации 1-ПДГ4Д РЭ-1-ЛУ. — Пенза, 2013. — 266 с.
2. Грачев В. В. Способ выравнивания мощностей цилиндров многоцилиндрового теплового дизеля / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский и др. // Бюллетень результатов научных исследований. СПб.: ПГУПС, 2022. — Вып. 3.
3. Система электронного управления подачей топлива ЭСУВТ.01/ЭСУВТ.01.00.000 РЭ. Руководство по эксплуатации. — Саратов, 2012. — 82 с.
4. USB-4716: Multifunction USB Module. — URL: https://www.advantech.ru/products/1-2mlkno/usb-4716/mod_a3ab933c-c6d3-49eb-9d25-58cacecdef7a (дата обращения: 09.08.2022).
5. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. — СПб.: Питер, 2002. — 606 с.

6. Грачев В. В. Локомотивные энергетические установки: основы теории рабочих процессов тепловозных дизелей / В. В. Грачев, В. А. Кручек, А. В. Грищенко и др. — СПб.: ПГУПС, 2021. — 84 с.

7. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2 книгах. Кн. 1. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. — М.: Мир, 1986. — 346 с.

Дата поступления: 31.08.2022

Решение о публикации: 06.11.2022

Контактная информация:

ГРАЧЕВ Владимир Васильевич — д-р техн. наук, проф.; v_grach@mail.ru

ГРИЩЕНКО Александр Васильевич — д-р техн. наук, проф.; sanklok@mail.ru

БАЗИЛЕВСКИЙ Федор Юрьевич — канд. техн. наук, доц.; f_basilevski@mail.ru

ПАНЧЕНКО Максим Николаевич — канд. техн. наук, доц.; panchenko_m@mail.ru

Experimental Verification of Equalization Method for the Outputs of Multi-Cylinder Diesel Engine Cylinders

V. V. Grachev, A. V. Grischenko, F. Yu. Bazilevskiy, M. N. Panchenko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Grachev V. V., Grischenko A. V., Bazilevskiy F. Yu., Panchenko M. N. Experimental Verification of Equalization Method for the Outputs of Multi-Cylinder Diesel Engine Cylinders. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 4, pp. 24–36. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-24-36

Summary

Purpose: The purpose of the present work is to test experimentally equalization method for the outputs of multi-cylinder diesel engine cylinders basing on energy minimization of amplitude spectrum low-frequency band for diesel crankshaft instantaneous angular speed signal. **Methods:** The work uses the methods of digital signal processing, spectral analysis, differential calculus, multidimensional undifferentiated function optimization, experimental results processing. **Results:** The fulfilled experimental studies at bench diesel generator device as a part of locomotive diesel D50 (6CH31,8/33) and traction generator MPT 84/39 ensure the possibility to use proposed earlier method for power equalization for the cylinders of multi-cylinder diesel engine basing on energy control of amplitude spectrum low-frequency band of crankshaft instantaneous angular speed signal. Unrvenness index for cylinder power is proposed, its sensitivity to cyclic supply change and the advance angle of fuel supply to diesel engine individual cylinders is estimated. **Practical importance:** The possibility to apply being proposed equalization method for the powers of multi-cylinder diesel engine cylinders for to adjust fuel equipment after diesel engine repair as with the systems of electronic fuel supply control as well as with hydromechanical fuel equipment has been confirmed experimentally. The use of given method eliminates the need to measure the temperature of exhaust gases and flash pressure in cylinders for fuel equipment adjustment that's especially important for high-speed diesel engines which cylinder cover construction doesn't imply indicated valves.

Keywords: Diesel, instantaneous angular speed, amplitude spectrum, spectrum energy, cyclic fuel supply, cycle maximal pressure, intra-cylinder pressure curve, average indicated pressure, cylinder power.

References

1. *Dizel'-generatory 1-PDG4D, 1-PDG4D-1. Rukovodstvo po ekspluatatsii 1-PDG4D RE-1-LU* [Diesel generators 1-PDG4D, 1-PDG4D-1. Operation manual 1-PDG4D RE-1-LU]. Penza, 2013, 266 p. (In Russian)
2. Grachev V. V., Grishchenko A. V., Bazilevskiy F. Yu. Sposob vyravnivaniya moshchnostey tsilindrov mnogotsilindrovogo teplovoznogo dizelya [Method for equalizing the power of cylinders of a multi-cylinder diesel engine]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, I. 3. (In Russian)
3. *Sistema elektronnoy upravleniya podachey topliva ESUVT.01/ESUVT.01.00.000 RE. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electronic fuel supply control system ESUVT.01/ESUVT.01.00.000 RE. Manual]. Saratov, 2012, 82 p. (In Russian)
4. *USB-4716: Multifunction USB Module* [USB-4716: Multifunction USB Module]. Available at: https://www.advantech.ru/products/1-2mlkno/usb-4716/mod_a3ab933c-c6d3-49eb-9d25-58cacecdef7a (accessed: August 9, 2022). (In Russian)
5. Sergienko A. B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. St. Petersburg: Piter Publ., 2002, 606 p. (In Russian)
6. Grachev V. V., Kruchek V. A., Grishchenko A. V. *Lokomotivnye energeticheskie ustanovki: osnovy teorii rabochikh protsessov teplovoznnykh dizeley* [Locomotive power plants: fundamentals of the theory of working processes of diesel locomotives]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, 84 p. (In Russian)
7. Rekleytis G., Reyvindran A., Regsdel K. *Optimizatsiya v tekhnike: v 2 knigakh. Kn. 1* [Optimization in technology: in 2 books. Book. 1]. Moscow: Mir Publ., 1986, 346 p. (In Russian)

Received: August 31, 2022

Accepted: November 06, 2022

Autor's information:

Vladimir V. GRACHEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; v_grach@mail.ru

Alexander V. GRISCHENKO — Dr. Sci. in Engineering, Professor; sanklok@mail.ru

Fedor Yu. BAZILEVSKIY — PhD in Engineering, Associate Professor; f_basilevski@mail.ru

Maxim N. PANCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; panchenko_m@mail.ru