

Способ выравнивания мощностей цилиндров многоцилиндрового тепловозного 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. Способ выравнивания мощностей цилиндров многоцилиндрового тепловозного дизеля // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 3. — С. 103–117. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-103-117

Аннотация

Цель: Уменьшение трудоемкости и повышение точности выравнивания мощностей цилиндров многоцилиндрового тепловозного дизеля за счет применения в качестве диагностического параметра, характеризующего неравномерность мощностей цилиндров, энергии низкочастотной полосы спектра сигнала мгновенной угловой скорости коленчатого вала. **Методы:** В работе использованы методы математического моделирования мгновенной угловой скорости коленчатого вала дизеля, математического моделирования рабочего процесса дизеля, цифровой обработки сигнала, спектрального анализа, дифференциального исчисления, оптимизации многомерных недифференцируемых функций. **Результаты:** Предложен и обоснован способ выравнивания мощностей цилиндров многоцилиндрового тепловозного дизеля, основанный на непрерывном контроле спектра сигнала мгновенной угловой скорости коленчатого вала. Энергия низкочастотной полосы спектра сигнала МУС КВ может использоваться в качестве диагностического параметра, характеризующего неравномерность нагрузок цилиндров. Минимизация его значения последовательной коррекцией цикловой подачи и УОПТ обеспечивает уменьшение указанной неравномерности. **Практическая значимость:** Предлагаемый способ может применяться при регулировке 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. В двигателях, оборудованных системами электронного управления топливоподачей, использование энергии низкочастотной полосы спектра сигнала МУС в качестве диагностического параметра позволяет полностью автоматизировать процесс выравнивания нагрузок цилиндров. Результатом применения предлагаемого способа будет сокращение продолжительности и трудоемкости реостатных испытаний тепловозов, а также повышение надежности и экономичности тепловозов за счет равномерного нагружения цилиндров дизеля.

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

Постановка задачи

Одним из основных условий надежной и экономичной работы многоцилиндрового дизеля является равномерная нагрузка цилиндров во всех режимах его работы. Нарушение этого условия в режиме холостого хода и малых нагрузок

может приводить к увеличению амплитуды упругих колебаний дизеля на опорах за счет усиления низкочастотных гармоник в спектре неуравновешенной нормальной силы, действующей на остов дизеля. Следствием неравномерной нагрузки цилиндров в режимах средней и большой мощности является перегрузка одних цилиндров при одновременной недогрузке других, что отрицательно сказывается как на экономичности двигателя, так и на его надежности.

Выравнивание нагрузки по цилиндрам является одной из основных (наряду с обкаткой и проверкой срабатывания защитных устройств) и трудоемких операций, выполняемых в процессе полных реостатных испытаний тепловозного дизель-генератора или тепловоза в целом после ремонтов большого объема, а также в процессе контрольных реостатных испытаний тепловоза после текущего ремонта.

Согласно руководству по эксплуатации дизеля [1], эта операция 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.

Результат выполнения операции во многом определяется точностью и трудоемкостью измерения указанных параметров.

Точность контроля температуры ОГ на выходе из цилиндров при использовании штатного (бортового) термокомплекта дизеля зависит от состояния термопар, канала измерения, а также точности измерения температуры холодного спая. Неблагоприятное сочетание этих факторов часто приводит к значительной погрешности измерения с отклонением результатов в меньшую сторону от истинных значений. При наличии такой погрешности результатом выравнивания нагрузок по цилиндрам будет значительная перегрузка цилиндра с неисправным каналом измерения температуры ОГ.

Отложение нагара на защитном чехле термопары увеличивает ее тепловую инерционность, что приводит к увеличению времени и количества топлива, затрачиваемых на регулировку дизеля.

Использование съемного термокомплекта связано со значительными затратами времени на установку термопар. Кроме того, основная приведенная погрешность измерения температуры новым термокомплектом типа ТКД-50М достигает величины ± 15 градусов [2], что сопоставимо с допуском на разброс значений температур по цилиндрам (например, для дизелей типа Д50 он составляет 30 градусов). При этом метрологическая поверка термокомплекта как средства измерения не предусмотрена.

Измерение максимальных давлений цикла представляет собой одну из наиболее трудоемких операций, выполняемых при испытании дизеля под нагрузкой. Результат ее во многом зависит от состояния каналов индикаторных кранов в крышках цилиндров, самих индикаторных кранов, а также максиметра. Причем последнее может изменяться в процессе измерения вследствие закоксовывания фильтра и дроссельного отверстия на входе в манометр твердыми частицами нагара, выбрасываемыми из каналов в крышке цилиндра.

Крышки цилиндров многих высокооборотных дизелей средней и даже большой мощности (например, дизелей семейства ДМ-185 производства ООО «Уральский дизель-моторный завод», г. Екатеринбург) не оборудованы индикаторными кранами, что исключает возможность непосредственного контроля внутрицилиндрового давления.

Таким образом, представляется весьма актуальной задача разработки эффективного метода выравнивания нагрузок (индикаторной работы) и максимальных давлений цикла по цилиндрам многоцилиндрового дизеля, не связанного с ресурсоемкими и не всегда достоверными прямыми измерениями параметров рабочего процесса в цилиндрах дизеля.

Выбор и обоснование способа решения задачи

В основу предлагаемого способа выравнивания нагрузок многоцилиндрового дизеля положен контроль сигнала мгновенной угловой скорости коленчатого вала (МУС КВ) дизеля, характер изменения которой в течение рабочего цикла при стабильной нагрузке определяется главным образом изменением давления газов в цилиндре.

Этот параметр широко используется для интегрального контроля технического состояния цилиндро-поршневой группы и системы топливоподачи малоразмерных высокооборотных дизелей [3–5]. С несколько меньшим успехом, несмотря на большое количество предлагаемых решений, он применяется для контроля технического состояния среднеоборотных дизелей средней и большой мощности [6–8].

В качестве диагностического признака, характеризующего текущий уровень неравномерности работы цилиндров, может использоваться распределение энергии в спектре сигнала МУС КВ.

При абсолютно равномерной нагрузке всех цилиндров и отсутствии крутильных колебаний валопровода дизеля энергия гармоники порядка $z \cdot k_c$, где z — количество цилиндров, k_c — порядок гармоники цикловой частоты в спектре сигнала МУС КВ (значение k_c зависит от периода измерения), существенно превосходит энергию гармонической составляющей цикловой частоты и близких к ней гармоник, которая в этом случае стремится к нулю (рис. 1):

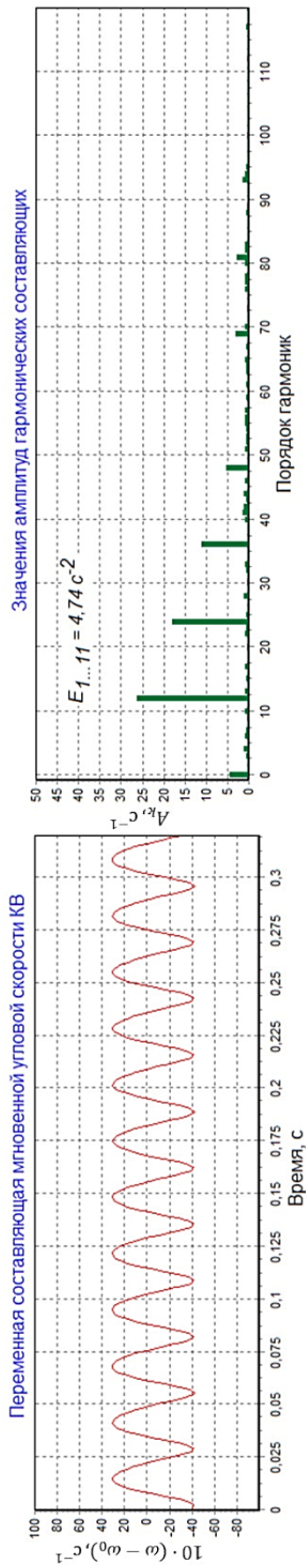


Рис. 1. Переменная составляющая мгновенной угловой скорости КВ 6-цилиндрового дизеля типа Д50 при равномерной работе цилиндров и ее амплитудный спектр ($k_c = 2$)

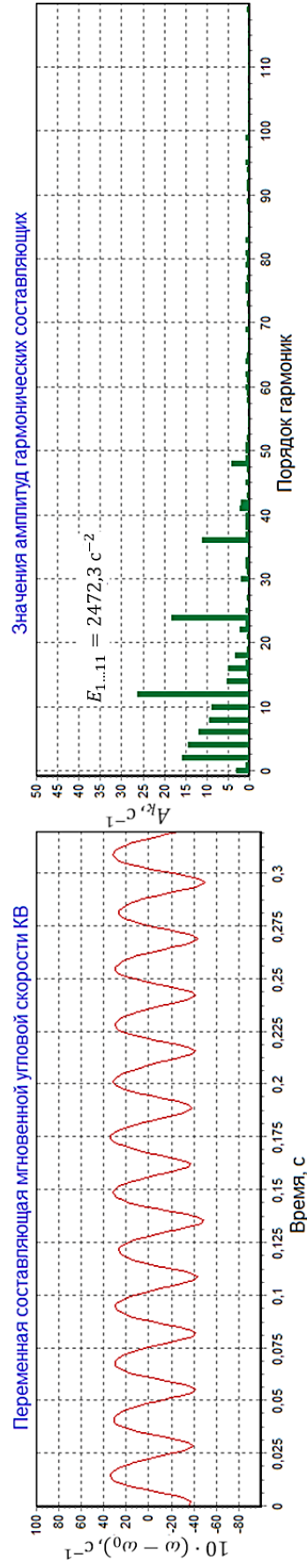


Рис. 2. Переменная составляющая мгновенной угловой скорости КВ 6-цилиндрового дизеля типа Д50 при увеличении индикаторной работы второго цилиндра на 5 % и ее амплитудный спектр ($k_c = 2$)

$$E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c} \rightarrow 0, \quad (1)$$

где $E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c}$ — энергия полосы спектра $k_c \leq k < z \cdot k_c$, c^{-1} .

Временные зависимости сигнала МУС КВ получены на модели валопровода рядного шестицилиндрового тепловозного дизеля типа Д50 [9]. Расчет индикаторных диаграмм осуществлялся в программном комплексе «Дизель-РК» [10].

При наличии даже небольших различий рабочего процесса в отдельных цилиндрах период изменения кривой сигнала МУС КВ увеличится до длительности рабочего цикла, т. е. существенно возрастет энергия гармоник порядка k_c , соответствующей цикловой частоте

$$f_{cycle} = 2 \cdot n / \tau, \text{ Гц},$$

где τ — тактность двигателя, n — частота вращения КВ, об/с, и близких к ней, присутствие которых в спектре обусловлено отличием формы кривой МЧВ от синусоиды (рис. 2).

Таким образом, непрерывно контролируя низкочастотный амплитудный спектр сигнала МУС ($0 < k < z \cdot k_c$) и поочередно корректируя цикловую подачу топлива в цилиндры дизеля, можно добиться минимального значения энергии этой полосы спектра:

$$E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c} \rightarrow \min. \quad (2)$$

Как показано выше, именно такое сочетание значений цикловых подач в цилиндры дизеля обеспечивает минимальную разность форм кривых внутрицилиндрового давления, а следовательно, и равномерность нагрузок цилиндров.

Однако, кроме величины цикловой подачи, на форму кривой давления в цилиндре, как и на развиваемую им индикаторную мощность, существенное влияние оказывает значение УОПТ. Этот же параметр во многом определяет уровень динамических и тепловых нагрузок на узлы цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) дизеля, косвенным показателем которых является величина максимального давления цикла P_z (при условии равенства давлений в конце сжатия P_c).

Ограниченный разброс значений P_z по цилиндрам (как правило, в пределах $\pm 2,5\%$) является необходимым условием их равномерной работы. Выравнивание P_z осуществляется изменением величины УОПТ отдельных цилиндров.

Поскольку отклонение значений P_z в отдельных цилиндрах так же, как и отклонение цикловой подачи, приводит к изменению формы кривой давления, оно (отклонение) также будет сопровождаться увеличением энергии гармоник сигнала МУС КВ в низкочастотной области спектра (рис. 3, 4).

Соответственно, выполнение условия (2) за счет коррекции значений УОПТ отдельных цилиндров обеспечит минимально возможный разброс нагрузок по цилиндрам. Величина этого разброса будет определяться текущим качеством организации рабочего процесса в цилиндрах — чем оно выше, тем меньше итоговое значение $E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c}$ и неравномерность работы цилиндров.

Обсуждение предлагаемого способа выравнивания мощностей цилиндров многоцилиндрового дизеля

Выбор частоты дискретизации сигнала мгновенной угловой скорости коленчатого вала

Максимальная частота гармоники, ограничивающей информативный интервал частот, соответствует частоте срабатывания цилиндров дизеля:

$$f_z = z \cdot f_{cycle} = 2 \cdot z \cdot n / \epsilon \quad (3)$$

Согласно теореме Котельникова [11], частота дискретизации, обеспечивающая возможность контроля полосы спектра с границами $]0 \dots f_z[$, должна составлять не менее $2 \cdot f_z$.

В современных электронных системах управления дизельными двигателями количество отсчетов угловой скорости за рабочий цикл, как правило, соответствует числу зубьев h_z зубчатого венца, на котором устанавливается импульсный датчик угловой скорости, т. е. частота дискретизации сигнала угловой скорости коленчатого вала составляет:

$$f_d = h_z \cdot n, \text{ Гц.} \quad (4)$$

Так, для тепловозного дизеля типа Д50 с номинальной частотой вращения 12,5 об/с при установке импульсного датчика угловой скорости на приводной шестерне распределительного вала с $h_z = 120$ [1] частота дискретизации сигнала

МУС составит $f_d = \frac{120 \cdot 12,5}{2} = 750$ Гц, при том что граничная частота информатив-

ного интервала спектра сигнала составит $f_z = 2 \cdot 6 \cdot 12,5 / 4 = 37,5$ Гц, т. е. $f_d \gg 2 \cdot f_z$.

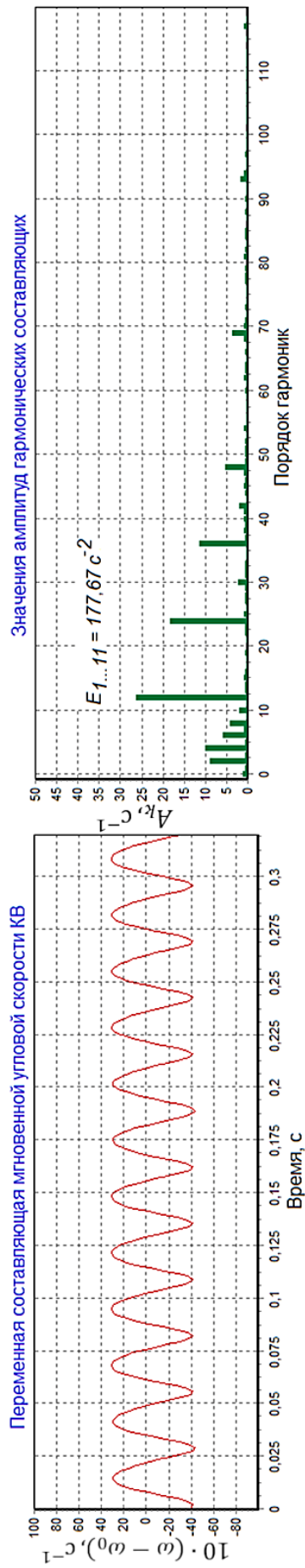


Рис. 3. Переменная составляющая мгновенной угловой скорости КВ 6-цилиндрового дизеля типа Д50 при уменьшении УОПТ третьего цилиндра на 2 градуса (с 23 до 21 градусов ПКВ) и ее амплитудный спектр

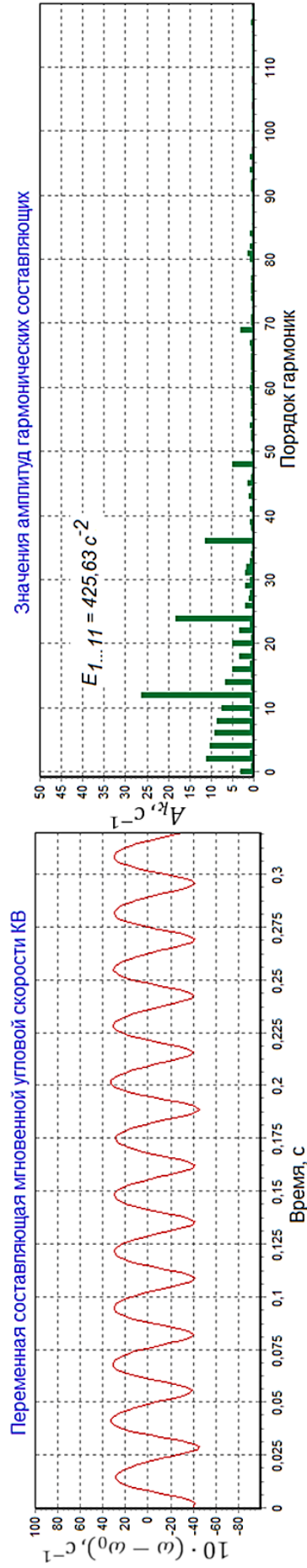


Рис. 4. Переменная составляющая мгновенной угловой скорости КВ 6-цилиндрового дизеля типа Д50 при увеличении УОПТ третьего цилиндра на 2 градуса (с 23 до 25 градусов ПКВ) и ее амплитудный спектр

Для 16-цилиндрового тепловозного дизеля типа Д49 с номинальной частотой вращения 16,67 об/с при установке импульсного датчика угловой скорости на зубчатом венце пластинчатой муфты привода тягового генератора, имеющем 124 зуба, частота дискретизации сигнала МУС составит $f_d = 124 \cdot 16,67 \approx 2067$ Гц, при том что частота высшей гармоники информативной полосы спектра сигнала равна $f_z = 2 \cdot 16 \cdot 16,67 / 4 = 133,36$ Гц.

Таким образом, контроль информативной полосы спектра сигнала МУС КВ может быть реализован в современных электронных системах управления двигателем при условии, что, во-первых, количество h_z зубьев венца, на котором устанавливается датчик угловой скорости КВ, превосходит $4 \cdot z / \tau$, и, во-вторых, частота дискретизации выходного сигнала датчика и алгоритм обработки результатов его измерения, реализованный в системе управления, достаточны для формирования массива отсчетов мгновенной угловой скорости КВ с допустимой погрешностью. Для серийных среднеоборотных тепловозных дизелей требуемая частота дискретизации сигнала датчика не превышает 100 кГц.

Чувствительность метода

Как следует из рис. 1 и 2, изменение индикаторной работы в одном из цилиндров на 5 % приводит к увеличению энергии информативной полосы спектра в 520 раз (с 4,74 до 2472,3 с⁻²).

На рис. 5 приведена расчетная (модельная) зависимость энергии $E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c}$ информативной полосы спектра и ее производной от относительного изменения среднеиндикаторного давления второго цилиндра. Из него следует, что изменение среднеиндикаторного давления в цилиндре на один процент приводит к относительному изменению значения $E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c}$ в 1,59–20,8 раз, причем бóльшая чувствительность соответствует меньшим отклонениям среднеиндикаторного давления, что упрощает процесс выравнивания мощностей по цилиндрам и повышает его точность.

Однако в процессе выравнивания мощностей корректируются не среднеиндикаторные давления, а значения цикловой подачи топлива, поэтому чувствительность метода зависит также от степени влияния цикловой подачи топлива на величину среднеиндикаторного давления.

На рис. 6 приведены расчетные зависимости относительного изменения среднеиндикаторного давления от относительного изменения цикловой подачи топлива в номинальном режиме работы дизеля типа Д50.

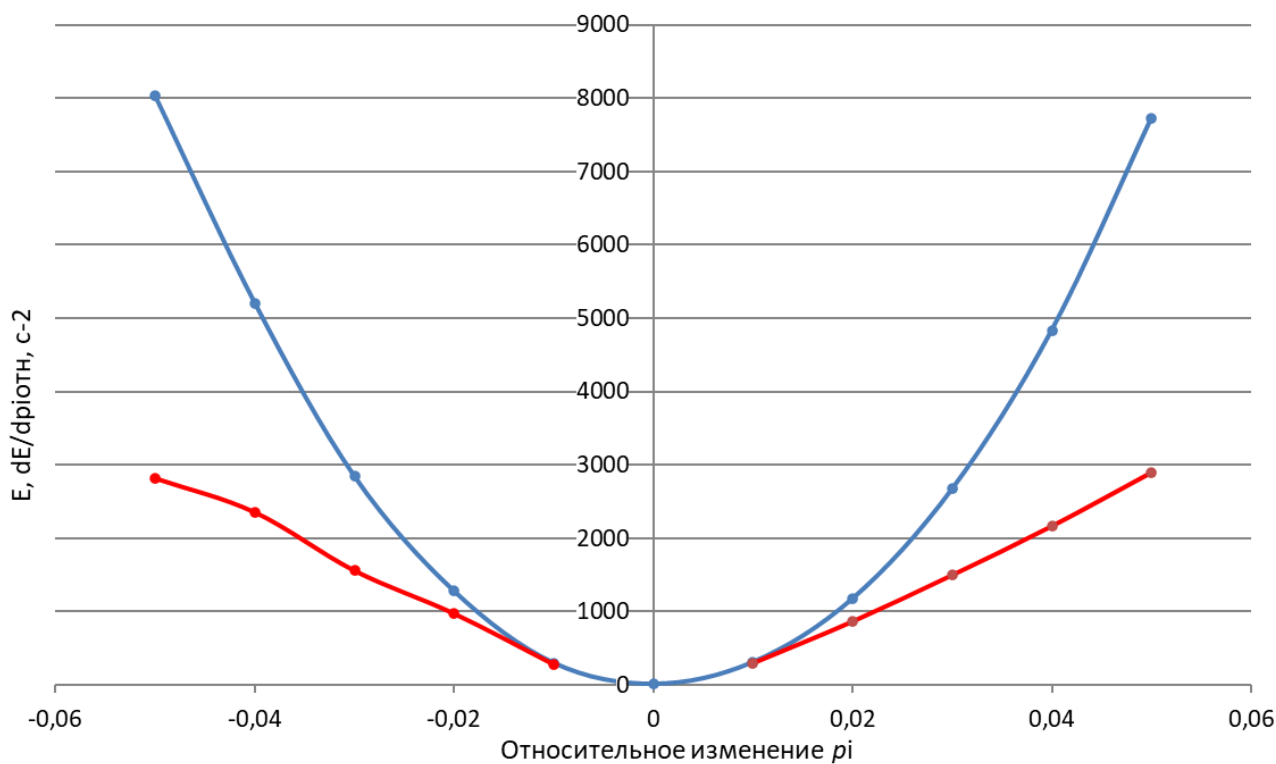


Рис. 5. Изменение энергии информативной полосы спектра сигнала МУС $E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c}$

(1) и ее производной $\frac{dE_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c}}{dp_i}$ (2) от относительного изменения среднеиндикаторного давления \bar{p}_i во втором цилиндре

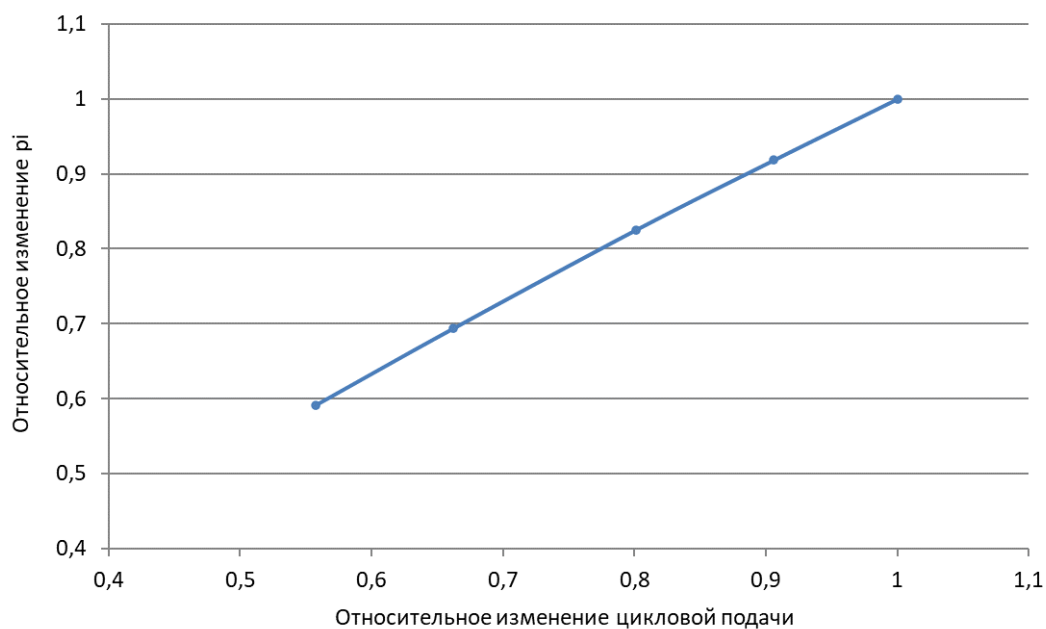


Рис. 6. Зависимость относительного изменения среднеиндикаторного давления от относительного изменения цикловой подачи топлива

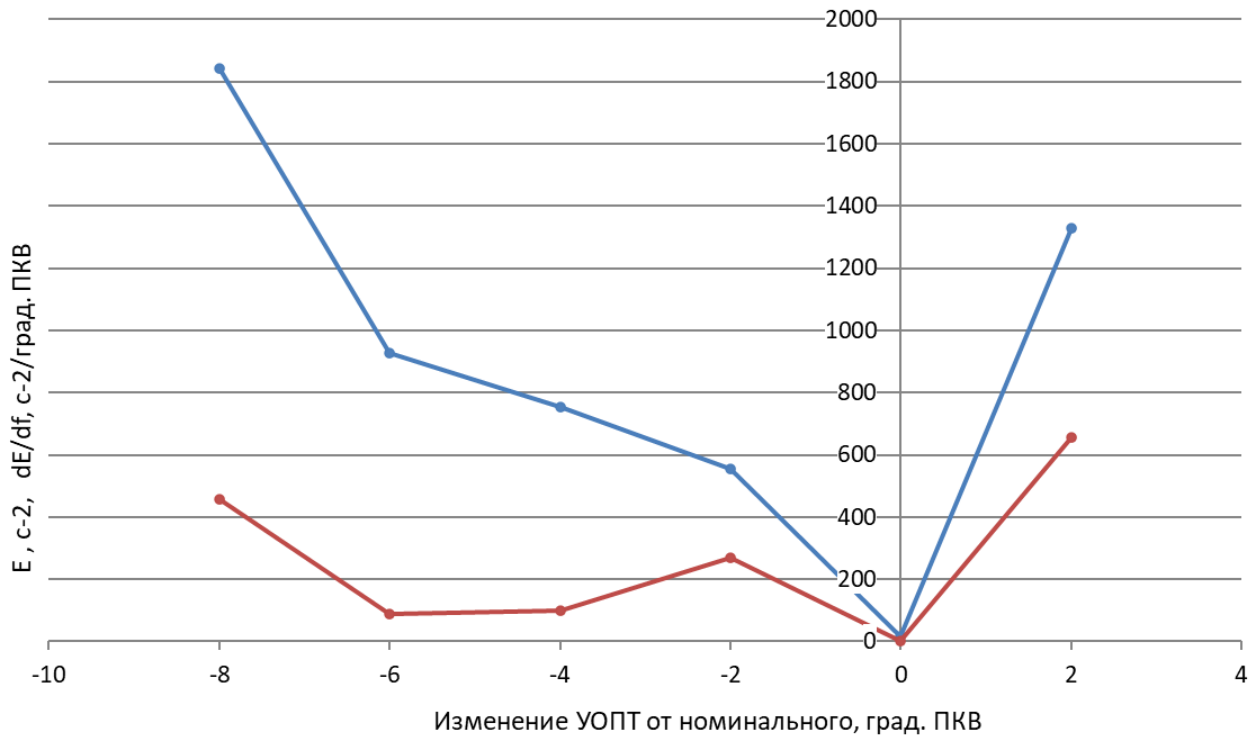


Рис. 7. Зависимость показателя $E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c}$ (1) и его производной $\frac{dE_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c}}{d\psi}$ от изменения УОПТ

Как следует из рисунка, относительное изменение среднеиндикаторного давления пропорционально относительному изменению цикловой подачи с коэффициентом пропорциональности, близким к единице, поэтому выводы о чувствительности показателя $E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c}$ к изменению среднеиндикаторного давления справедливы и для цикловой подачи.

На рис. 7 представлена зависимость показателя $E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c}$ и его производной от величины отклонения УОПТ от его номинального значения.

Как следует из рис. 3, 4, 7, чувствительность показателя к изменению УОПТ вполне достаточна для эффективного выравнивания форм кривых давления в цилиндрах коррекцией момента начала подачи топлива. При изменении значения УОПТ на два градуса энергия информативной полосы спектра изменится в 37–90 раз, причем реакция на изменение УОПТ усиливается при его увеличении, т. е. при изменении в неблагоприятном в отношении динамических нагрузок на узлы цилиндро-поршневой группы дизеля направлении, что позволяет избежать ошибочных изменений угла опережения.

Реализация способа

Наиболее удобно использовать предлагаемый метод выравнивания мощностей цилиндров 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:

$$E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c} = f(\overline{\Delta g}_{\text{ц } i=1 \dots z}, \overline{\Delta \varphi}_{\text{опт } i=1 \dots z}), \quad (5)$$

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

Задача решается любым из известных методов оптимизации недифференцируемых функций, например методом Хука — Дживса [12].

Задача может решаться в автоматическом режиме посредством программного модуля, встроенного в сервисную программу системы электронного управления топливоподачей.

Минимизацию функции (4) целесообразно осуществлять в два этапа.

Первый из них выполняется при условии $\Delta \varphi_{\text{опт } i=1 \dots z} = \text{const}$, т. е. ищется локальный минимум функции (4), соответствующий установленным на предыдущем этапе значениям УОПТ цилиндров, только за счет последовательных пошаговых изменений значений $\overline{\Delta g}_{\text{ц } i=1 \dots z}$ в последовательности, определяемой применяемым методом в зависимости от изменения значения $E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c}$, вычисляемого после каждого шага.

На втором этапе ищется локальный минимум, соответствующий установленным на предыдущем этапе значениям $\overline{\Delta g}_{\text{ц } i=1 \dots z}$, т. е. при условии $\overline{\Delta g}_{\text{ц } i=1 \dots z} = \text{const}$. Поиск осуществляется последовательными изменениями $\Delta \varphi_{\text{опт } i=1 \dots z}$, также с обязательным контролем изменения $E_{k \geq k_c}^{k < z \cdot k_c}$ после каждого шага.

Этапы повторяются до стабилизации значения целевой функции (5).

Особенностью такого подхода к реализации предлагаемого метода является значительное количество шагов изменения $\overline{\Delta g}_{\text{ц } i=1 \dots z}$ и $\Delta \varphi_{\text{опт } i=1 \dots z}$, необходимых для поиска минимума функции (5), однако при реализации его в системе электронного управления впрыском это не имеет большого значения.

В то же время эта особенность не позволяет использовать такой подход к реализации метода для двигателей с гидромеханической топливной аппаратурой, поскольку операции коррекции цикловой подачи топлива и в особенности УОПТ в такой ТА весьма трудоемки.

Выводы

1. Выравнивание мощностей цилиндров многоцилиндрового дизеля является трудоемкой операцией, существующая технология выполнения которой требует непрерывного контроля температуры отработавших газов и многократного измерения давления вспышки в цилиндрах.

2. Спектр сигнала мгновенной угловой скорости коленчатого вала определяется формой кривых внутрицилиндрового давления и является источником информации о неравномерности нагрузок цилиндров многоцилиндрового дизеля.

3. Энергия низкочастотной полосы спектра сигнала МУС КВ может использоваться в качестве диагностического параметра, характеризующего неравномерность нагрузок цилиндров. Минимизация его значения последовательной коррекцией цикловой подачи и УОПТ обеспечивает уменьшение указанной неравномерности.

4. В двигателях, оборудованных системами электронного управления топливоподачей, использование энергии низкочастотной полосы спектра сигнала МУС в качестве диагностического параметра позволяет полностью автоматизировать процесс выравнивания нагрузок цилиндров.

5. Применение предлагаемого способа исключает необходимость контроля температуры отработавших газов по цилиндрам и измерения давления вспышки в цилиндрах для их настройки, что особенно важно для высокооборотных дизелей, в конструкции крышек цилиндров которых не предусмотрены индикаторные краны.

Библиографический список

1. Дизель-генераторы 1-ПДГ4Д, 1-ПДГ4Д-1. Руководство по эксплуатации 1-ПДГ4Д РЭ-1-ЛУ. — Пенза, 2013. — 266 с.

2. Термокомплект дизельный ТКД50М. — URL: <http://neva-diesel.com/mkd-50m-termo-dielnyu-komplekt> (дата обращения: 18.02.2022).

3. Saad A. In-cylinder gas flow characteristics study of CI engine under motoring and pre-ignition firing conditions using a high-speed PIV / A. Saad, S. Hardeep, I. Mitsuhsa et al. // Alexandria Engineering Journal. — 2022. — Vol. 61. — Iss. 8. — Pp. 6441–6455. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821008048> (дата обращения: 12.04.2022).

4. Taixiong Z. Real-time combustion torque estimation and dynamic misfire fault diagnosis in gasoline engine / Z. Taixiong, Z. Yu, L. Yongfu et al. // Mechanical Systems and Signal Processing — 2019. — Vol. 126. — Pp. 521–535. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327019301396> (дата обращения: 25.03.2022).

5. Taglialatela F. Determination of combustion parameters using engine crankshaft speed / F. Taglialatela, M. Lavorgna, E. Mancaruso et al. // Mechanical Systems and Signal Processing — 2013. — Vol. 38. — Iss. 2. — Pp. 628–633. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S088832701300006X> (дата обращения: 15.05.2022).

6. Espadafor F. J. J. Measurement and analysis of instantaneous torque and angular velocity variations of a low speed two stroke diesel engine / Francisco J. Jiménez Espadafor, José A. Becerra Villanueva, Daniel Palomo Guerrero et al. // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2014. — Vol. 49. — Iss. 1–2. — Pp. 135–153. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327014001228> (дата обращения: 22.05.2022).

7. Guerrero D. P. Torsional system dynamics of low speed diesel engines based on instantaneous torque: Application to engine diagnosis / D. P. Guerrero, F. J. Jimenes-Espadafor // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2019. — Vol. 116. — Pp. 858–878. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327018303893> (дата обращения: 08.05.2022).

8. Bulatovic Z. M. Measurement and analysis of angular velocity variations of twelve-cylinder diesel engine crankshaft / Z. M. Bulatovic, M. S. Stavljanin, M. V. Tomic et al. // Mechanical Systems and Signal Processing — 2011. — Vol. 25. — Iss. 8. — Pp. 3043–3061. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327011001749> (дата обращения: 05.04.2022).

9. Аврунин А. Г. Тепловозные и судовые двигатели Д50 / А. Г. Аврунин, В. В. Аринкин, Н. Н. Андреев и др. — М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1952. — 276 с.

10. Кулешов А. С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания / А. С. Кулешов, Л. В. Грехов. — М.: МГТУ, 2000. — 64 с.

11. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. — СПб.: Питер, 2002. — 606 с.

12. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. — М.: Мир, 1986. — 346 с.

Дата поступления: 14.07.2022

Решение о публикации: 01.08.2022

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

Method for Equalization of Cylinder Powers of Multi-Cylinder Locomotive Diesel

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. A Method for Equalization of Cylinder Powers of Multi-Cylinder Locomotive Diesel. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 3, pp. 103–117. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-103-117

Summary

Purpose: Labor intensity reduction and equalization accuracy improvement of cylinder powers of a multi-cylinder diesel locomotive on account of application as a diagnostic parameter, characterizing cylinder power unevenness, — the energy of low-frequency band of spectrum for crankshaft instantaneous angular velocity (CIAV) signal. **Methods:** Methods of mathematical modeling of diesel crankshaft instantaneous angular velocity, mathematical modeling of diesel engine working process, digital signal processing, spectral analysis, differential calculus and multidimensional non-differentiable function optimization are used in the work. **Results:** Method for equalization of cylinder powers of a multi-cylinder diesel locomotive that's based on a continuous monitoring of the spectrum of crankshaft instantaneous angular velocity signal is proposed and justified. Energy of low-frequency band of the signal spectrum of CIAV can be used as a diagnostic parameter, characterizing cylinder load unevenness. The parameter value minimization by means of sequential correction of cyclic fuel supply and fuel advance angle ensures the decrease in the pointed unevenness. **Practical importance:** The proposed method can be used when adjusting fuel equipment after the repair of a diesel engine as with electronic fuel supply control systems as well as with hydromechanical fuel equipment. The use of the given method excludes the necessity of temperature measurement for exhaust gases and flash pressure measurement in cylinders for fuel equipment adjustment that's especially important for high-speed diesel engines which cylinder heads' construction doesn't provide for indicator cocks. In the engines equipped with electronic fuel control systems, the use of IAV signal spectrum low-frequency band energy as a diagnostic parameter makes it possible to automate fully the equalization process for cylinder load. The result of the proposed method application will be the reduction in the duration and labor intensity of diesel locomotives rheostat tests as well as the rise in diesel locomotives reliability and efficiency at the expense of uniform loading of diesel cylinders.

Keywords: Diesel, instantaneous angular velocity, intra-cylinder pressure curve, mean indicator pressure, amplitude spectrum, spectrum energy, fuel cyclic supply, cycle maximum pressure.

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. *Termokomplekt dizel'nyy TKD50M* [Thermal kit diesel TKD50M]. Available at: <http://nevadiesel.com/mkd-50m-termodizelnyy-komplekt> (accessed: February 18, 2022). (In Russian)
3. Saad A., Hardeep S., Mitsuhisa I. In-cylinder gas flow characteristics study of CI engine under motoring and pre-ignition firing conditions using a high-speed PIV. *Alexandria Engineering Journal*.

2022, vol. 61, I. 8, pp. 6441–6455. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821008048> (accessed: April 12, 2022).

4. Taixiong Z., Yu Z., Yongfu L. Real-time combustion torque estimation and dynamic misfire fault diagnosis in gasoline engine. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019, vol. 126, pp. 521–535. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327019301396> (accessed: March 25, 2022).

5. Taglialatela F., Lavorgna M., Mancaruso E. Determination of combustion parameters using engine crankshaft speed. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013, vol. 38, I. 2, pp. 628–633. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S088832701300006X> (accessed: May 15, 2022).

6. Espadafor F. J. J., etc. Guerrero Measurement and analysis of instantaneous torque and angular velocity variations of a low speed two stroke diesel engine. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2014, vol. 49, I. 1–2, pp. 135–153. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327014001228> (accessed: May 22, 2022).

7. Guerrero D. P., Jimenes-Espadafor F. J. Torsional system dynamics of low speed diesel engines based on instantaneous torque: Application to engine diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019, vol. 116, pp. 858–878. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327018303893> (accessed: May 08, 2022).

8. Bulatovic Z. M., Stavljanin M. S., Tomic M. V. Measurement and analysis of angular velocity variations of twelve-cylinder diesel engine crankshaft. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011, vol. 25, I. 8, pp. 3043–3061. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327011001749> (accessed: April 05, 2022).

9. Avrunin A. G., Arinkin V. V., Andreev N. N. *Teplovozyne i sudovye dvigateli D50* [Diesel locomotive and ship engines D50]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noy literatury Publ., 1952. 276 p. (In Russian)

10. Kuleshov A. S. *Matematicheskoe modelirovanie i komp'yuternaya optimizatsiya toplivopodachi i rabochikh protsessov dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Mathematical modeling and computer optimization of fuel supply and working processes of internal combustion engines]. Moscow: MGTU Publ., 2000. 64 p. (In Russian)

11. Sergienko A. B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. St. Petersburg: Piter Publ., 2002. 606 p. (In Russian)

12. Rekleytis G. *Optimizatsiya v tekhnike* [Optimization in technology]. Moscow: Mir Publ., 1986. 346 p. (In Russian)

Received: July 14, 2022

Accepted: August 01, 2022

Author's information:

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

Aleksandr V. GRISCHENKO — D. Sci. in Engineering, Professor; sanklok@mail.ru

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

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