

УДК 621.43:629.3

doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-95-107

Контроль технического состояния цилиндропоршневой группы тепловозного дизеля в период предпусковой холодной прокрутки

В.В. Грачев¹, А.В. Грищенко¹, Ф.Ю. Базилевский¹,
М.В. Федотов², М.Н. Панченко¹

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

² Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава

Monitoring the locomotive diesel cylinder-piston group technical condition during the pre-start cold cranking

V.V. Grachev¹, A.V. Grischenko¹, F.Y. Bazilevsky¹,
M.V. Fedotov², M.N. Panchenko¹

¹ Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University

² Design and Technological Institute of the Rolling Stock

Высокооборотные дизельные двигатели небольшой размерности (с диаметром цилиндра до 210 мм) находят все более широкое применение в качестве первичных двигателей автономных локомотивов различного назначения. Характерной конструктивной особенностью многих из них является отсутствие индикаторных кранов для подключения средств измерения внутрицилиндрового давления (максиметра или датчика давления), что исключает возможность использования для контроля технического состояния цилиндропоршневой группы таких двигателей методов диагностирования, основанных на анализе индикаторной диаграммы рабочего процесса в цилиндре. Это обстоятельство обуславливает актуальность поиска иных подходов к решению этой задачи. Один из таких подходов основан на контроле параметров сигнала мгновенной угловой скорости коленчатого вала и силы тока стартерного электродвигателя при холодной прокрутке двигателя. На основании анализа изменения мгновенной угловой скорости коленчатого вала и силы тока стартерного электродвигателя в режиме холодной прокрутки при стендовых испытаниях тепловозного дизеля предложены диагностические параметры, признаки и критерии для контроля работоспособности цилиндров дизеля. Эффективность предложенных критериев подтверждена анализом результатов холодной прокрутки дизеля с открытыми индикаторными кранами отдельных цилиндров. Использование таких диагностических критериев позволит повысить эксплуатационную надежность и уменьшить расходы на техническое обслуживание тепловозов за счет рационального планирования объемов работ на плановых видах ремонта.

Ключевые слова: коленчатый вал, мгновенная угловая скорость, ток стартерного электродвигателя, среднецикловая угловая скорость, среднецилиндровая угловая скорость, зубья модулятора

High-speed diesel engines of small dimensions (with the cylinder diameter of up to 210 mm) are increasingly used as prime movers in the autonomous locomotives of various purposes. Characteristic design feature of many of them lies in the absence of indicator valves to connect devices measuring the intra-cylinder pressure (maximum meter or pressure sensor). It excludes the possibility of using diagnostic methods based on the indicator

analysis to control technical state of the cylinder-piston group of such engines based on analyzing diagrams of the working process inside the cylinder. This circumstance determines relevance of searching for other approaches to solve this problem. One of such approaches is based on monitoring parameters of the signal of the crankshaft instantaneous angular velocity and the starter motor current in the engine cold cranking mode. Based on analyzing alteration in the crankshaft instantaneous angular speed and the starter motor current in the cold cranking mode during bench testing of the locomotive diesel, diagnostic parameters, indicators and criteria to monitor the diesel cylinders performance were proposed. Effectiveness of the proposed criteria was confirmed by analysis of the results of the diesel engine cold scrolling with the opened indicator cocks of individual cylinders. Using the proposed diagnostic criteria would improve operational reliability and reduce cost of the diesel locomotive maintenance through rational planning the scope of work within the scheduled repair operations.

Keywords: crankshaft, instantaneous angular speed, starter motor current, medium-cycle angular speed, medium-cylinder angular speed, modulator teeth, starter motor operation

Высокооборотные дизельные двигатели (далее дизели) небольшой размерности (с диаметром цилиндра до 210 мм) отечественного и зарубежного производства находят все более широкое применение в качестве первичных двигателей автономных локомотивов различного назначения [1–3].

Характерной конструктивной особенностью многих из них является отсутствие индикаторных кранов (ИК) для подключения средств измерения внутрицилиндрового давления (максиметра или датчика давления), что исключает возможность использования для контроля технического состояния (ТС) цилиндропоршневой группы (ЦПГ) таких дизелей методов диагностирования, базирующихся на анализе индикаторной диаграммы рабочего процесса в цилиндре [4].

Это обстоятельство обуславливает актуальность поиска иных подходов к решению указанной задачи. Один из них основан на контроле параметров сигнала мгновенной угловой скорости (МУС) коленчатого вала (КВ), который можно выполнять как на работающем дизеле, так и при его холодной прокрутке стартерным электродвигателем (СЭД).

Очевидно, задачу контроля состояния ЦПГ можно решить в режиме холодной прокрутки, когда на изменение МУС не влияет работа топливной аппаратуры цилиндров. В этом режиме, помимо сигнала МУС, в качестве диагностического параметра можно использовать силу тока СЭД [5, 6].

Технические средства для контроля силы тока стартера при холодной прокрутке дизеля, включенные в состав большинства мотор-тестеров, широко применяются при диагности-

ровании малолитражных автомобильных дизельных и бензиновых двигателей. Диагностирование, как правило, сводится к визуальному анализу кривой силы тока, отображаемой на экране тестера или другого устройства [7].

В то же время контроль ТС по сигналу МУС в практике реального диагностирования поршневых двигателей внутреннего сгорания средней и большой мощности применяют намного реже, при том что, судя по количеству публикаций, эта тема давно и постоянно вызывает интерес специалистов в области диагностики [8–11].

Однако, как показывает анализ, содержание большей части этих публикаций сведено к постановке задачи и обоснованию возможности ее решения с применением отдельных параметров сигнала МУС (как правило, мгновенных значений угловой скорости и ускорения) на основе результатов его моделирования или приближенного расчета.

Поэтому принципиальная возможность использования сигнала МУС и силы тока СЭД для контроля ТС транспортных двигателей сомнения не вызывает, однако проблема ее реализации при решении практических задач по-прежнему остается актуальной.

Причем актуальность ее отнюдь не ограничивается областью малоразмерных высокооборотных дизелей. Задача непрерывного оперативного контроля ТС цилиндров в процессе эксплуатации актуальна для дизелей любого типа, поскольку ее решение позволит повысить эффективность стационарных средств диагностики и уменьшить затраты на техническое обслуживание за счет рационального планирования объемов работ.

Цель работы — сравнительный анализ диагностических параметров, определение диагностических признаков и критериев для контроля ТС цилиндров тепловозного дизеля Д50 по сигналу МУС и силе тока СЭД в процессе предпусковой холодной прокрутки (далее холодная прокрутка) по результатам стендовых испытаний.

Описание экспериментальной установки.

Испытательный стенд включал в себя дизель-генератор 2ДГ50 в составе дизеля Д50 (6ЧН31,8/33) [12] и тягового генератора постоянного тока МПТ 84/39 [13] независимого возбуждения с серийной пусковой обмоткой, в период пуска дизеля, выполняющего функцию СЭД. В качестве пускового источника энергии применяли силовой выпрямитель ВКСМ-1000-1-1 с напряжением холостого хода 60 В.

Дизель оборудовали системой электронного управления впрыском топлива ЭСУВТ.01-06 производства ООО «ППП Дизельавтоматика» (далее ЭСУВТ) [14]. Для контроля сигнала МУС и синхронизации его с положением КВ дизеля использовали выходные сигналы импульсных преобразователей (датчиков) частоты вращения (ПЧВ) и фазовой отметки (ПФО) системы ЭСУВТ.

Параметры силовой установки в процессе холодной прокрутки КВ (сигналы ПЧВ и ПФО, напряжение и силу тока выпрямителя) измеряли и регистрировали посредством модуля USB4716 компании Advantech Co. Ltd (16-разрядного аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 50 кГц на один

канал) [15]. Обработку сигналов выполняли с помощью специально разработанного программного обеспечения.

Методика обработки сигналов датчиков. Фрагмент временной диаграммы контролируемых сигналов и схема синхронизации сигналов с положением КВ дизеля приведены на рис. 1, где $U_{\text{ПФО}}$ и $U_{\text{ПЧВ}}$ — напряжение ПФО и ПЧВ; I — сила тока генератора (СЭД); φ_3 — угол заклинки.

Ввод сигналов с датчиков осуществляли кадрами длительностью 2 с (10^5 отсчетов на каждый канал) с секундной выдержкой между ними на обработку, сохранение и визуализацию данных. Такая ширина кадра позволяла анализировать рабочий цикл дизеля (два полных оборота КВ) при частоте вращения, большей 120 мин^{-1} .

В процессе обработки кадра на основании инструкции по установке датчика ПФО ЭСУВТ [14] определяли отсчет, соответствующий переднему фронту второго (после широкого) импульса напряжения ПФО, от которого отсчитывался угол поворота коленчатого вала (ПКВ) до внутренней мертвой точки (ВМТ) поршня первого цилиндра, определяемый в процессе монтажа датчика и хранящийся в памяти блока управления ЭСУВТ и называемый углом заклинки.

При этом угловое расстояние между двумя последующими импульсами напряжения датчика ПЧВ принимали постоянным и равным 6° ПКВ (см. рис. 1). В качестве модулятора сигнала датчика использовали приводную шестерню распределительного вала топливных насосов высокого давления с количеством зубьев, рав-

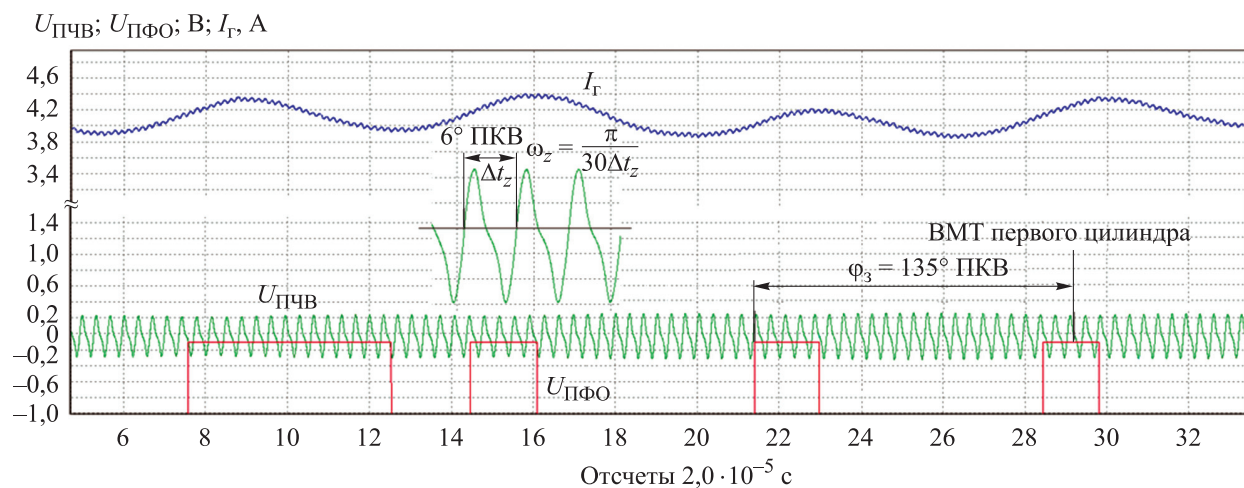


Рис. 1. Фрагмент временной диаграммы контролируемых сигналов

ным 120. Этот момент времени принимали за начало рабочего цикла.

Далее последовательным суммированием отсчетов определяли интервалы времени поворота КВ на один зуб Δt_z (z — порядковый номер зуба модулятора, $z = 1 \dots 120$) между нулевыми значениями переднего фронта двух последующих импульсов напряжения датчика ПЧВ (между двумя зубьями модулятора) и соответствующие им усредненные на интервале Δt_z значения угловой скорости КВ $\omega_z = \pi / (30 \Delta t_z)$ и ускорения $\varepsilon_z = (\omega_z - \omega_{z-1}) / \Delta t_z$.

Средние значения силы тока I_z и напряжения U_z на интервале Δt_z определяли как

$$I_z = \frac{\sum_{j=1}^{N_z} I_j \tau}{\Delta t_z}; \quad U_z = \frac{\sum_{j=1}^{N_z} U_j \tau}{\Delta t_z},$$

где N_z — количество отсчетов на z -м интервале; I_j — сила тока, соответствующая j -му отсчету (j — номер отсчета на секторе угла ПКВ, соответствующем z -му зубу модулятора); U_j — напряжение, соответствующее j -му отсчету; τ — шаг дискретизации сигналов, $\tau = 2,0 \cdot 10^{-5}$ с.

После перебора всех отсчетов цикла (720° ПКВ) вычисляли среднецикловую угловую скорость КВ

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{4\pi}{\sum_{z=1}^{120} \Delta t_z}.$$

Результатом расчета являлись четыре одномерных массива (Δt , ω , I , U) длиной 120 элементов, в которых каждому цилиндру соответ-

ствовал интервал длиной 20 элементов (120° ПКВ), начинающийся от ВМТ поршня соответствующего цилиндра в начале такта рабочего хода.

В работающем цилиндре этот интервал соответствует процессу сгорания и догорания основной части цикловой подачи топлива, поэтому при решении задачи оценки качества рабочего процесса в отдельных цилиндрах он является наиболее информативным.

Однако оценка состояния ЦПГ дизеля в процессе холодной прокрутки практически сводится к определению насосных потерь в цилиндре на тактах сжатия и расширения, вследствие чего существенно больший интерес представляет изменение МУС в конце такта сжатия и начале такта расширения каждого цилиндра.

В связи с этим для сохранения структуры массивов (последовательности фрагментов отдельных цилиндров в соответствии с порядком их работы) и повышения их информативности выполняли их циклический сдвиг вправо на 60 позиций.

Пример результатов обработки данных семи рабочих циклов дизеля при холодной прокрутке приведен на рис. 2, где I — сила тока СЭД; U — напряжение пускового источника. Видно, что значения МУС ω в разных циклах одного цилиндра при одних и тех же положениях КВ характеризуются заметным разбросом (более 2%). Анализ данных показывает, что основной причиной этого разброса является изменение средней угловой скорости КВ в процессе холодной прокрутки (от $14,98 \text{ с}^{-1}$ в первом цикле

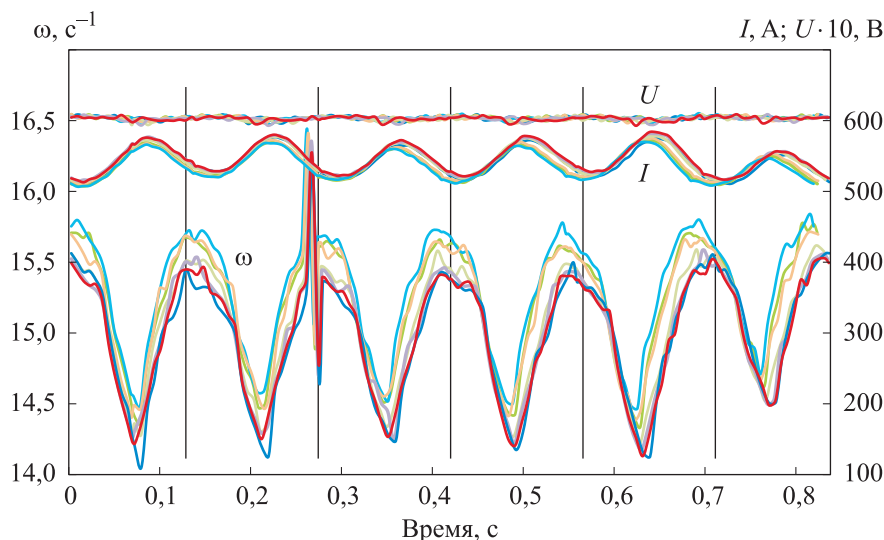


Рис. 2. Пример результатов обработки данных семи рабочих циклов дизеля при холодной прокрутке КВ:

— цикл 1; — цикл 2; — цикл 3; — цикл 4; — цикл 5; — цикл 6; — цикл 7

до $15,95 \text{ с}^{-1}$ в третьем). В циклах с примерно одинаковой средней угловой скоростью КВ относительный разброс значений МУС цилиндров в разных циклах при одном и том же положении КВ не превышает 0,52 %.

Вполне очевидно, что стабилизация среднецикловой угловой скорости КВ в процессе холодной прокрутки является необходимым условием достоверности диагностирования. При его невыполнении форма кривой МУС отдельных цилиндров будет определяться не только их ТС, но и отличным от нуля средним ускорением КВ при его раскрутке.

Выбор диагностических параметров для оценки ТС ЦПГ дизеля. Результаты анализа публикаций показывают, что многие авторы предлагают использовать в качестве диагностического параметра абсолютные мгновенные значения угловой скорости и ускорения КВ [8–11], а также силы тока СЭД в секторе угла ПКВ, соответствующем определенному цилиндру [5, 6].

Изменение во времени МУС и мгновенного углового ускорения КВ в первом из семи циклов холодной прокрутки КВ, отображенных на рис. 2, показано на рис. 3. Изменение указанных параметров в течение рабочего цикла определяется не только соотношением вращающего момента СЭД и момента сопротивления дизеля, но и погрешностями расчета, связанными с отклонениями формы (модуля) зубьев модулятора датчика ПЧВ.

В первую очередь это относится к угловому ускорению КВ, характер изменения которого в процессе рабочего цикла, с одной стороны, свидетельствует о наличии в сигнале информативной составляющей, а с другой — о несколь-

ких факторах, затрудняющих ее выделение и анализ.

В отличие от МУС и мгновенного углового ускорения КВ, определяемых расчетным способом по изменению напряжения датчика ПЧВ, сила тока СЭД непосредственно измерялась шунтом, включенным в цепь питания электродвигателя (в рассматриваемом случае в цепь якоря тягового генератора). Однако, помимо момента сопротивления поршневой машины и вспомогательных агрегатов прокручиваемого дизеля, на силу тока влияет напряжение источника питания, изменение которого при ухудшении ТС стартерной аккумуляторной батареи может существенно превосходить изменение напряжения стендового источника питания, составляющее $\pm 1 \text{ В}$ (см. рис. 2).

Таким образом, абсолютные значения диагностических параметров, измеряемых и вычисляемых в процессе холодной прокрутки дизеля (МУС, мгновенное угловое ускорение КВ, мгновенные значения силы тока СЭД и питающего напряжения) зависят не только от ТС ЦПГ, но и от многих дополнительных факторов, что негативно сказывается на информативности диагностических признаков, которые могут быть сформированы на основе этих параметров.

Влияние неточностей формы зубьев модулятора на результаты диагностирования можно существенно уменьшить, используя в качестве диагностического параметра время поворота КВ на угол, соответствующий одному цилиндру

$$\Delta t_j = \sum_{z=1}^{20} \Delta t_z,$$

или эквивалентную Δt_j среднюю скорость КВ на секторе угла ПКВ, соответствующем j -му цилиндру (далее среднецилиндровая угловая скорость j -го цилиндра),

$$\omega_j^{\text{cp}} = \frac{2\pi}{3\Delta t_j}, \text{ с}^{-1}.$$

Чтобы уменьшить влияние среднецикловой угловой скорости КВ ω_{cp} на результаты диагностирования и повысить чувствительность диагностического параметра, вместо абсолютного значения ω_j^{cp} целесообразно использовать его отклонение от среднецикловой угловой скорости (далее относительное отклонение среднецилиндровой угловой скорости КВ)

$$\bar{\omega}_j^{\text{cp}} = \frac{\omega_j^{\text{cp}} - \omega_{\text{cp}}}{\omega_{\text{cp}}} = \frac{\omega_j^{\text{cp}}}{\omega_{\text{cp}}} - 1.$$

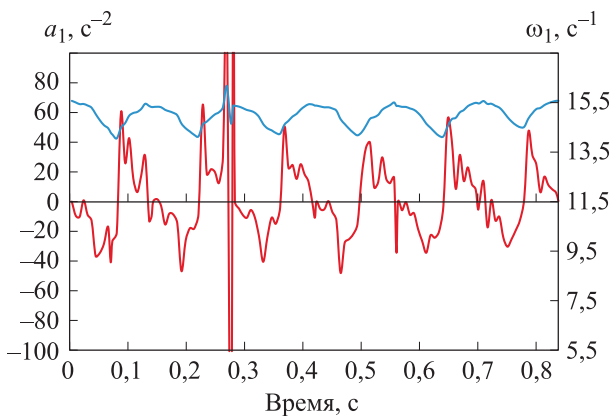


Рис. 3. Изменение во времени МУС ω_1 (—) и мгновенного углового ускорения a_1 (—) в первом цикле холодной прокрутки КВ

Лепестковая диаграмма относительных отклонений среднецилиндровых угловых скоростей КВ $\bar{\omega}_j^{\text{CP}}$ для семи рабочих циклов дизеля при холодной прокрутке КВ показана на рис. 4. Здесь и на последующих рисунках 1...6 — номера цилиндров по порядку работы.

При одинаковом состоянии ЦПГ всех цилиндров их среднецилиндровые угловые скорости КВ будут равны среднецикловой угловой скорости КВ ω_{CP} , вследствие чего диаграмма будет иметь вид правильного шестиугольника, вершины которого совпадают с нулевыми метками осей диаграммы (штриховая линия).

Изменение ТС отдельных цилиндров приводит к искажению формы шестиугольника, вытягивая его в сторону вершин, соответствующих цилиндрам с увеличенными значениями $\bar{\omega}_j^{\text{CP}}$.

Относительное отклонение среднего значения силы тока на секторе угла ПКВ, соответствующем j -му цилиндру (среднецилиндровой силы тока j -го цилиндра), I_j^{CP} от среднего значения силы тока за цикл (далее относительное отклонение среднецилиндровой силы тока) I_{CP} (А) можно определить по выражению, аналогичному формуле (1):

$$\bar{I}_j^{\text{CP}} = \frac{I_j^{\text{CP}} - I_{\text{CP}}}{I_{\text{CP}}} = \frac{I_j^{\text{CP}}}{I_{\text{CP}}} - 1,$$

где

$$I_j^{\text{CP}} = \frac{\sum_{z=1}^{20} I_z \Delta t_z}{\sum_{z=1}^{20} \Delta t_z}, \text{ А.}$$

Лепестковая диаграмма относительных отклонений средних значений силы тока на секторах угла ПКВ, соответствующих j -м цилиндрам, показана на рис. 5.

Очевидно, как и для диаграммы относительных отклонений среднецилиндровых угловых скоростей КВ (см. рис. 4), при одинаковом ТС ЦПГ всех шести цилиндров диаграмма на рис. 5 будет представлять собой правильный шестиугольник, вершины которого совпадают с нулевыми метками осей диаграммы (штриховая линия).

При уменьшении отрицательной работы сжатия в одном из цилиндров возрастает угловая скорость КВ на секторе угла ПКВ, соответствующем этому цилиндру, что приводит к снижению силы тока СЭД. В результате значение \bar{I}_j^{CP} для этого цилиндра становится отрицательным, в то время как для других цилин-

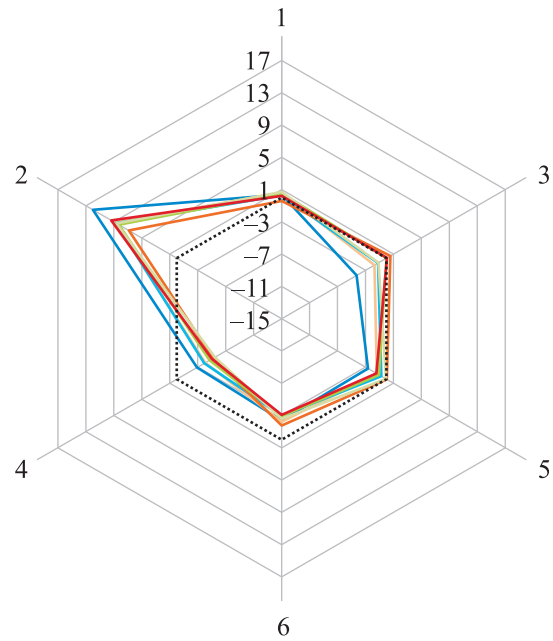


Рис. 4. Диаграмма относительных отклонений среднецилиндровых угловых скоростей КВ $\bar{\omega}_j^{\text{CP}} \cdot 10^3$ в исходном состоянии ЦПГ дизеля:
— цикл 1; — цикл 2; — цикл 3; — цикл 4;
— цикл 5; — цикл 6; — цикл 7

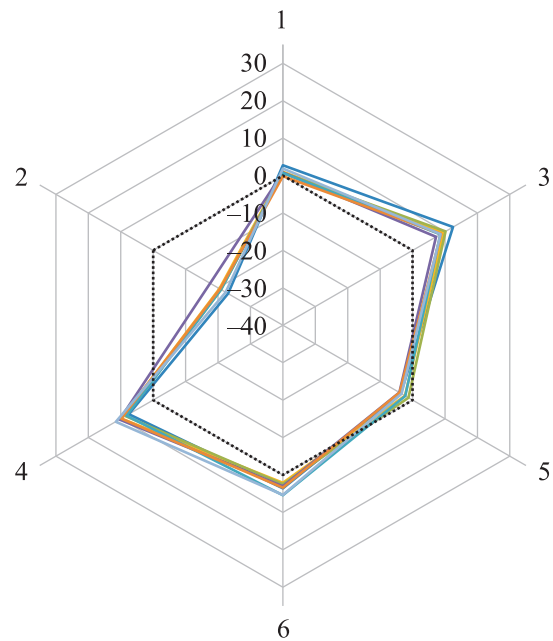


Рис. 5. Диаграмма относительных отклонений среднецилиндровых сил тока $\bar{I}_j^{\text{CP}} \cdot 10^3$ на секторах угла ПКВ, соответствующих j -м цилиндрам, в исходном состоянии ЦПГ дизеля:
— цикл 1; — цикл 2; — цикл 3; — цикл 4;
— цикл 5; — цикл 6; — цикл 7

дров эти разности смещаются в область положительных значений либо остаются вблизи нулевой линии, т. е. форма диаграммы искажается.

Обсуждение предложенных диагностических параметров. Для проверки эффективности предложенных диагностических параметров выполнена холодная прокрутка КВ дизеля при открытом ИК каждого из цилиндров.

Диаграммы относительных отклонений среднецилиндровых угловых скоростей КВ $\bar{\omega}_j^{cp} \cdot 10^3$ при холодной прокрутке КВ с открытым ИК шестого (ИК6), пятого (ИК5) и второго (ИК2) цилиндров приведены на рис. 6, а–в.

Как видно из рисунков, снижение газоплотности цилиндра приводит к некоторому повы-

шению $\bar{\omega}_j^{cp}$ неисправного цилиндра и резкому снижению этого параметра для следующего по порядку работы цилиндра, т. е. к увеличению разности

$$\Delta \bar{\omega}_j^{cp} = (\bar{\omega}_j^{cp} - \bar{\omega}_{j+1}^{cp}).$$

Величину $\Delta \bar{\omega}_j^{cp}$ можно использовать в качестве диагностического признака ТС ЦПГ j -го цилиндра. Диагностическим критерием, позволяющим сделать вывод об изменении ТС ЦПГ отдельных цилиндров, является увеличение

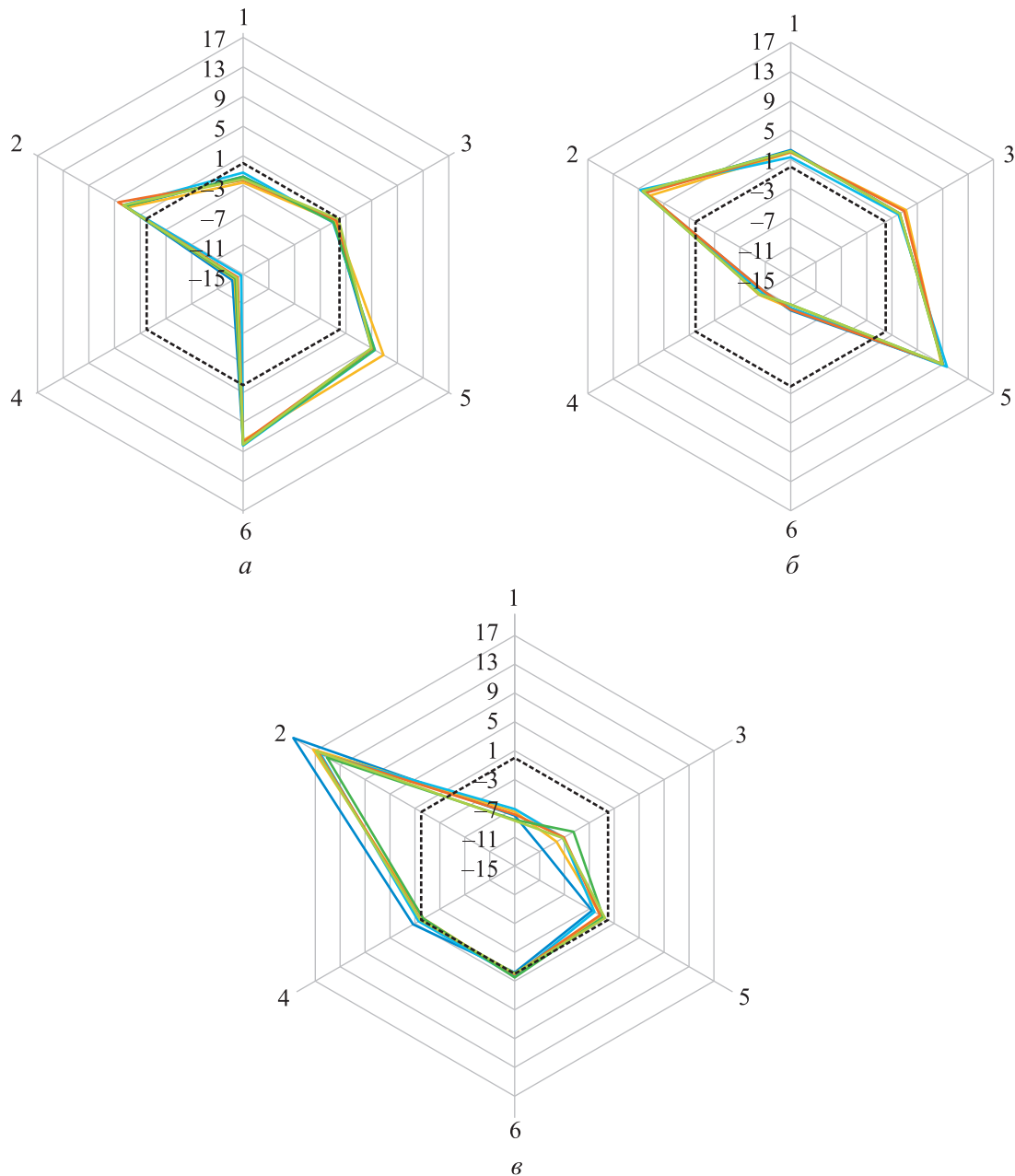


Рис. 6. Диаграммы относительных отклонений среднецилиндровых угловых скоростей $\bar{\omega}_j^{cp} \cdot 10^3$ при холодной прокрутке КВ с открытым ИК6 (а), ИК5 (б) и ИК 2 (в):
 — цикл 1; — цикл 2; — цикл 3; — цикл 4; — цикл 5; — цикл 6

разности $\Delta\bar{\omega}_j^{\text{cp}}$ цилиндров в процессе эксплуатации дизеля.

Усредненные значения диагностических параметров $\bar{\omega}_j^{\text{cp}}$, соответствующие рис. 6, а–в, и значения диагностических признаков $\Delta\bar{\omega}_j^{\text{cp}}$ цилиндров дизеля в различных ТС приведены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, при ухудшении ТС одного из цилиндров значение его диагностического признака $\Delta\bar{\omega}_j^{\text{cp}}$ по сравнению с исходным состоянием резко увеличивается, а значения аналогичных признаков других цилиндров уменьшаются. Необходимо подчеркнуть, что диагностическим критерием, характеризующим изменение ТС цилиндра, является изменение значения признака $\Delta\bar{\omega}_j^{\text{cp}}$ по отношению к исходному (эталонному) ТС.

Возможность оценки текущего ТС цилиндров только по текущей диаграмме $\bar{\omega}_j^{\text{cp}}$ (без эталонной диаграммы) в общем случае требует

дополнительного исследования, так как значения $\bar{\omega}_j^{\text{cp}}$ отдельных цилиндров определяются не только их газоплотностью, но и линейными размерами камер сжатия, установленных при сборке, а также фазами газораспределения.

Как видно из рис. 4, в исходном ТС работа на такте сжатия во втором цилиндре ниже, чем в остальных пяти. Этот вывод подтвержден результатами измерения давления сжатия в процессе холодной прокрутки КВ (табл. 2). Но поскольку значение давления сжатия в дизеле этого типа не нормируется (тем более в режиме холодной прокрутки), такие результаты не могут служить основанием для вывода об отказе цилиндра.

Диаграммы относительных отклонений среднецилиндровых сил тока $\bar{I}_j^{\text{cp}} \cdot 10^3$ при холодной прокрутке КВ с открытым ИК шестого (ИК6), пятого (ИК5) и второго (ИК2) цилиндров приведены на рис. 7, а–в. Как видно из

Таблица 1

Значения диагностических признаков $\Delta\bar{\omega}_j^{\text{cp}}$ цилиндров дизеля в различных ТС

Номер цилиндра	$\bar{\omega}_j^{\text{cp}} \cdot 10^3$	$\Delta\bar{\omega}_j^{\text{cp}} \cdot 10^3$	Номер цилиндра	$\bar{\omega}_j^{\text{cp}} \cdot 10^3$	$\Delta\bar{\omega}_j^{\text{cp}} \cdot 10^3$
<i>В исходном ТС</i>			<i>При открытом ИК6</i>		
1	0,335	1,423	1	-1,696	-1,159
3	-1,088	-0,049	3	-0,538	-5,175
5	-1,039	1,527	5	4,638	-1,931
6	-2,566	1,906	6	6,569	18,299
4	-4,472	-13,417	4	-11,731	-14,749
2	8,945	8,610	2	3,0186	4,715
<i>При открытом ИК5</i>			<i>При открытом ИК2</i>		
1	1,881	-0,524	1	-6,637	-0,733
3	2,404	-6,820	3	-5,904	-4,928
5	9,224	19,838	5	-0,976	-1,168
6	-10,613	-0,130	6	0,192	0,222
4	-10,483	-18,453	4	-0,030	-13,705
2	7,969	6,089	2	13,675	20,312

Таблица 2

Результаты измерения давления сжатия в цилиндрах

Режим	Давление сжатия, МПа, в цилиндрах					
	1	2	3	4	5	6
Холодная прокрутка ($\omega = 14,778 \text{ c}^{-1}$)	2,65	2,20	2,95	2,95	3,00	2,85
Холостой ход ($\omega = 31,4 \text{ c}^{-1}$)	2,85	2,65	3,10	3,10	3,20	2,95

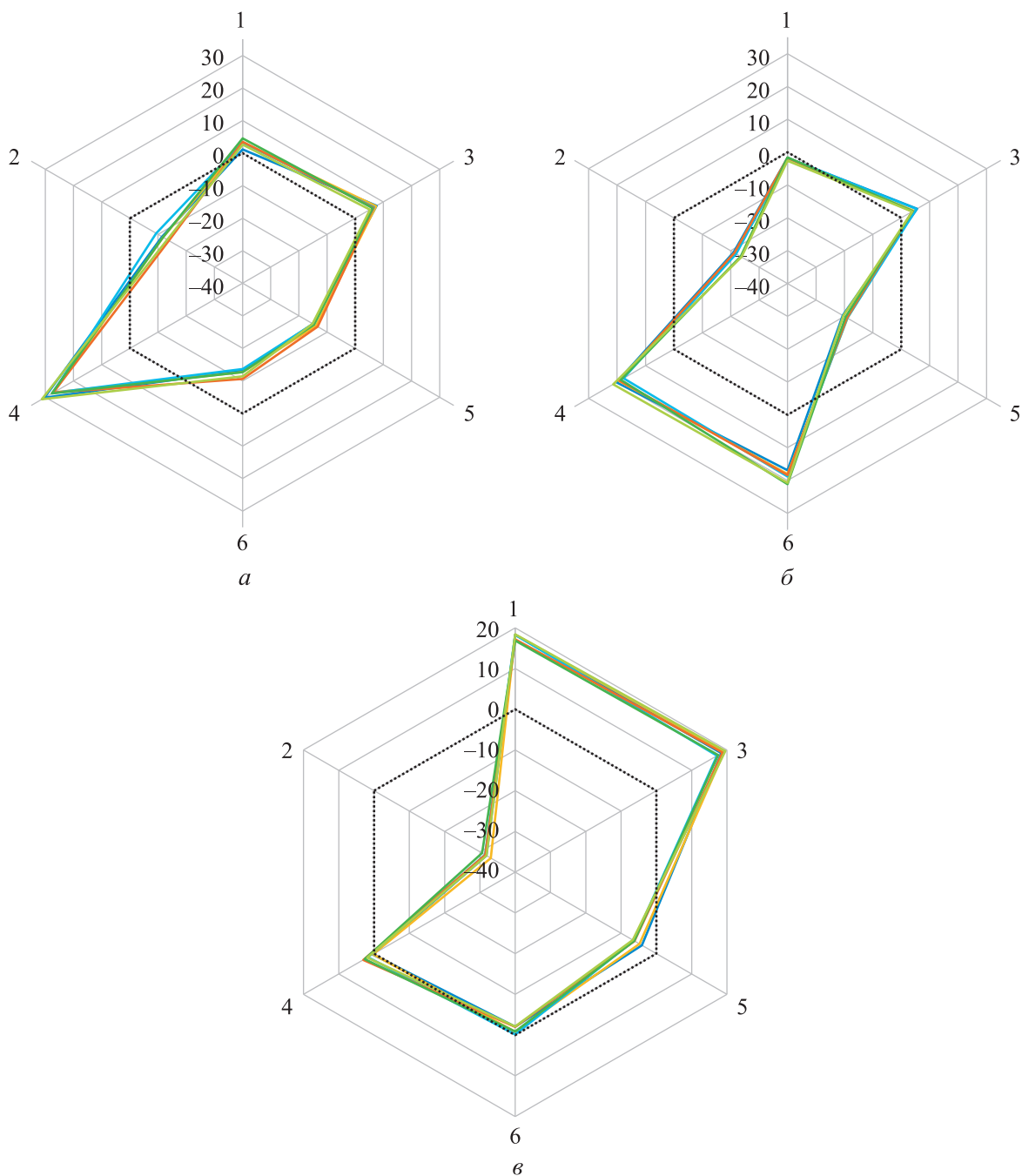


Рис. 7. Диаграммы относительных отклонений среднецилиндровых сил тока $\bar{I}_j^{cp} \cdot 10^3$ при холодной прокрутке КВ с открытым ИК6 (а), ИК5 (б) и ИК2 (в):
 — цикл 1; — цикл 2; — цикл 3; — цикл 4; — цикл 5; — цикл 6

рисунков, уменьшение газоплотности цилиндра вполне ожидаемо приводит к одновременному уменьшению относительного отклонения силы тока \bar{I}_j на секторе этого цилиндра и увеличению его на секторе следующего по порядку работы цилиндра.

Таким образом, в качестве диагностического признака можно использовать

$$\Delta \bar{I}_j^{cp} = (\bar{I}_{j+1}^{cp} - \bar{I}_j^{cp}).$$

Диагностическим критерием является увеличение значения $\Delta \bar{I}_j^{cp}$ в процессе эксплуатации дизеля. Значения диагностических признаков $\Delta \bar{I}_j^{cp}$ цилиндров дизеля в различных ТС приведены в табл. 3.

Согласно данным табл. 3, повышение утечек заряда из цилиндра приводит к увеличению значения $\Delta \bar{I}_j^{cp}$ цилиндра по сравнению с исходным ТС, но в меньшей степени, чем $\Delta \bar{\omega}_j^{cp}$, что дает основание для вывода о меньшей

Таблица 3

Значения диагностических признаков $\Delta \bar{I}_j^{\text{CP}}$ цилиндров дизеля в различных ТС

Номер цилиндра	$\bar{I}_j^{\text{CP}} \cdot 10^3$	$\Delta \bar{I}_j^{\text{CP}} \cdot 10^3$	Номер цилиндра	$\bar{I}_j^{\text{CP}} \cdot 10^3$	$\Delta \bar{I}_j^{\text{CP}} \cdot 10^3$
<i>В исходном ТС</i>			<i>При открытом ИК6</i>		
1	0,839	8,005	1	3,058	3,548
3	8,843	-11,717	3	6,606	-21,106
5	-2,874	6,491	5	-14,500	2,104
6	3,617	6,102	6	-12,396	40,892
4	9,719	-30,180	4	28,496	-40,391
2	-20,461	21,300	2	-11,895	11,895
<i>При открытом ИК5</i>			<i>При открытом ИК2</i>		
1	-1,885	6,409	1	17,894	0,544
3	4,524	-24,136	3	18,438	-24,179
5	-19,612	38,597	5	-5,741	4,390
6	18,985	0,430	6	-1,351	3,021
4	19,415	-41,600	4	1,670	-33,393
2	-22,185	20,300	2	-31,723	49,618

чувствительности признака $\Delta \bar{I}_j^{\text{CP}}$ к изменению ТС цилиндра.

Одной из причин этого является заметный сдвиг фазы изменения тока СЭД по отношению к изменению МУС КВ, составляющий примерно 25° ПКВ (см. рис. 1), вследствие индуктивности обмоток СЭД. Этот сдвиг будет возрастать по мере увеличения количества цилиндров и средней угловой скорости прокрутки КВ, что может отрицательно сказаться на эффективности применения признака $\Delta \bar{I}_j^{\text{CP}}$ для контроля ТС многоцилиндровых высокооборотных дизелей.

Выводы

1. Регистрация и анализ параметров сигналов МУС и силы тока СЭД в процессе холодной прокрутки являются эффективным способом оперативного контроля работоспособности ЦПГ цилиндров двигателей внутреннего сгорания в части герметичности и линейной величины камеры сжатия, регулировки фаз газораспределения.

2. Наиболее информативным фрагментом рабочего цикла цилиндра в режиме холодной прокрутки является симметричный относительно ВМТ цилиндра ПКВ сектор величиной,

равной для четырехтактного двигателя отношению 4π к числу цилиндров.

3. Использование в качестве диагностического параметра относительного отклонения средней угловой скорости КВ на секторе угла ПКВ, соответствующем каждому из цилиндров, позволяет уменьшить влияние формы зубьев венца модулятора импульсного датчика на точность определения МУС.

4. Диагностическими признаками, связанными с текущим состоянием ЦПГ цилиндра, являются разности отклонений средних угловых скоростей и сил тока соседних по порядку работы цилиндров.

5. Диагностическим критерием, характеризующим ухудшение ТС ЦПГ цилиндра относительно исходного (эталонного) состояния, является увеличение значений $\Delta \bar{\omega}_j^{\text{CP}}$ и $\Delta \bar{I}_j^{\text{CP}}$ в процессе эксплуатации.

6. Оценка возможности использования предложенных диагностических параметров и признаков для прогнозирования изменения ТС ЦПГ цилиндров требует дополнительных исследований с использованием математического моделирования процесса холодной прокрутки.

Литература

- [1] Уральский дизель-моторный завод представил дизельный двигатель нового поколения — ДМ-185. *sdelanounas.ru: веб-сайт*. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/64560/> (дата обращения: 15.12.2022).
- [2] «ПУЛ транс» начала испытания тепловоза новой модели ТЭМ14М. *sdelanounas.ru: веб-сайт*. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/139673/> (дата обращения: 15.12.2022).
- [3] Тепловоз ТЭМ9. Руководство по эксплуатации 026.00.01.000–02РЭ. Москва, ООО «ЦИР СТМ», 2012. 333 с.
- [4] Комплекс диагностики и настройки дизелей КДН «Магистраль». *tehtrans-d.ru: веб-сайт*. URL: <https://tehtrans-d.ru/catalog/tretja-kategorija/kompleks-dagnostiki-i-nastroyki-dizelej-kdn-magistral.html> (дата обращения: 15.12.2022).
- [5] Бабошин А.А., Косарев А.С., Малышев В.С. Оценка технического состояния двигателей внутреннего сгорания по току, потребляемому стартером при прокрутке двигателя. *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*, 2013, т. 16, № 1, с. 33–39.
- [6] Нечаев В.В., Воробьев Е.В., Тарасенко А.А. Методики технического диагностирования цилиндропоршневой группы дизелей холодной пусковой прокруткой коленчатого вала. *Инженерный вестник Дона*, 2018, № 3. URL: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5118
- [7] Губертус Г. *Диагностика дизельных двигателей*. Москва, За рулем, 2007. 176 с.
- [8] Bulatovic Z.M., Stavljanin M.S., Tomic M.V. et al. Measurement and analysis of angular velocity variations of twelve-cylinder diesel engine crankshaft. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2011, vol. 25, no. 8, pp. 3043–3061, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2011.05.002>
- [9] Taraza D., Henein N.A., Bryzik W. Diesel engine diagnosis based on analysis of the Crankshaft's speed variation. *SAE Tech. Pap.*, 1998, no. 982540, doi: <https://doi.org/10.4271/982540>
- [10] Lin T.R., Tan A.C.C., Ma L. et al. Condition monitoring and fault diagnosis of diesel engine instantaneous angular speed analysis. *Proc. Inst. Mech. Eng. C*, 2014, vol. 229, no. 2, pp. 304–315, doi: <https://doi.org/10.1177/0954406214533253>
- [11] Трюбер С.С. Диагностика мощных дизельных двигателей по неравномерности частоты вращения. *Вестник СГТУ*, 2007, № 1, с. 64–71.
- [12] Аврунин А.Г., Аринкин В.В., Андреев Н.Н. и др. *Тепловозные и судовые дизели Д50*. Москва, МашГИЗ, 1952. 276 с.
- [13] Марченко В.С., Сергеев А.А., Иванченко В.Т. и др. *Электрооборудование тепловозов*. Москва, Академкнига, 2003. 248 с.
- [14] *Система электронного управления подачей топлива*. ЭСУВТ.01. Руководство по эксплуатации. Саратов, РЖД, 2012. 82 с.
- [15] USB-4716. Multifunction USB module. *advantech.ru: веб-сайт*. URL: https://www.advantech.ru/products/1-2mlkno/usb-4716/mod_a3ab933c-c6d3-49eb-9d25-58cacecdef7a (дата обращения: 09.08.2022).

References

- [1] *Uralskiy dizel-motornyy zavod predstavil dizelnyy dvigatel novogo pokoleniya — DM-185* [Ural Diesel Engine Plant presented DM-185 — a new generation diesel engine]. *sdelanounas.ru: website*. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/64560/> (accessed: 15.12.2022). (In Russ.).
- [2] «PUL trans» *nachala ispytaniya teplovoza novoy modeli TEM14M* ["PUL Trans" started testing a TEM14M – a new model of diesel locomotive]. *sdelanounas.ru: website*. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/139673/> (accessed: 15.12.2022). (In Russ.).
- [3] *Teplovoz TEM9. Rukovodstvo po ekspluatatsii 026.00.01.000–02RE* [TEM9 diesel locomotive. Operating manual 026.00.01.000–02RE]. Moscow, ООО «TsIR STM» Publ., 2012. 333 p. (In Russ.).
- [4] *Kompleks diagnostiki i nastroyki dizeley KDN «Magistral»* ["Magistral" complex for diagnostics and adjustment of diesel engines]. *tehtrans-d.ru: website*. URL:

- <https://tehtrans-d.ru/catalog/tretja-kategorija/kompleks-diagnostiki-i-nastrojki-dizelej-kdn-magistral.html> (accessed: 15.12.2022). (In Russ.).
- [5] Baboshin A.A., Kosarev A.S., Malyshev V.S. Assessment of technical condition of the internal combustion engine according to the current consumed by the starter motor when scrolling. *Vestnik MGTU* [Vestnik of MSTU], 2013, vol. 16, no. 1, pp. 33–39. (In Russ.).
- [6] Nechaev V.V., Vorobyev E.V., Tarasenko A.A. Techniques for technical diagnosis of cylinder–piston group of diesel engines with cold starting cranking of the crankshaft. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2018, no. 3. URL: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5118 (in Russ.).
- [7] Günther H. *Dieseldiagnose*. Vogel, 2001. 251 p. (Russ. ed.: *Diagnostika dizelnykh dvigateley*. Moscow, Za rulem Publ., 2007. 176 p.)
- [8] Bulatovic Z.M., Stavljanin M.S., Tomic M.V. et al. Measurement and analysis of angular velocity variations of twelve–cylinder diesel engine crankshaft. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2011, vol. 25, no. 8, pp. 3043–3061, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2011.05.002>
- [9] Taraza D., Henein N.A., Bryzik W. Diesel engine diagnosis based on analysis of the Crankshaft’s speed variation. *SAE Tech. Pap.*, 1998, no. 982540, doi: <https://doi.org/10.4271/982540>
- [10] Lin T.R., Tan A.C.C., Ma L. et al. Condition monitoring and fault diagnosis of diesel engine instantaneous angular speed analysis. *Proc. Inst. Mech. Eng. C*, 2014, vol. 229, no. 2, pp. 304–315, doi: <https://doi.org/10.1177/0954406214533253>
- [11] Tryuber S.S. Powerful diesel engine diagnostics methods based on rotational speed non-uniformity. *Vestnik SGTU*, 2007, no. 1, pp. 64–71. (In Russ.).
- [12] Avrunin A.G., Arinkin V.V., Andreev N.N. et al. *Teplovoznnye i sudovye dizeli D50* [D50 diesel and marine diesel engines]. Moscow, MashGIZ Publ., 1952. 276 p. (In Russ.).
- [13] Marchenko V.S., Sergeev A.A., Ivanchenko V.T. et al. *Elektrooborudovanie teplovozov* [Electrical equipment of diesel locomotives]. Moscow, Akademkniga Publ., 2003. 248 p. (In Russ.).
- [14] *Sistema elektronnoy upravleniya podachey topliva*. ESUVT.01. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electronic fuel feeding control system. ESUVT.01. Operating manual]. Saratov, RZhd Publ., 2012. 82 p. (In Russ.).
- [15] USB–4716. Multifunction USB module. *advantech.ru: website*. URL: https://www.advantech.ru/products/1-2mlkno/usb-4716/mod_a3ab933c-c6d3-49eb-9d25-58cacecdef7a (accessed: 09.08.2022).

Статья поступила в редакцию 06.03.2023

Информация об авторах

ГРАЧЕВ Владимир Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство». Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (190031, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Московский проспект, д. 9, e-mail: v_grach@mail.ru).

ГРИЩЕНКО Александр Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство». Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (190031, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Московский проспект, д. 9, e-mail: grishenko_av@mail.ru).

Information about the authors

GRACHEV Vladimir Vasilievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Locomotives and Locomotive Equipment. Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University (190031, St. Petersburg, Russian Federation, Moskovskiy Prospekt, Bldg. 9, e-mail: v_grach@mail.ru).

GRISCHENKO Alexander Vasilievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Locomotives and Locomotive Equipment. Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University (190031, St. Petersburg, Russian Federation, Moskovskiy Prospekt, Bldg. 9, e-mail: grishenko_av@mail.ru).

БАЗИЛЕВСКИЙ Федор Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство». Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (190031, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Московский проспект, д. 9, e-mail: f_basilevski@mail.ru).

ФЕДОТОВ Михаил Владимирович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией диагностики. Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (140402, Коломна, Российская Федерация, ул. Октябрьской революции, д. 410, e-mail: fedotov-mv@vnikti.com).

ПАНЧЕНКО Максим Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство». Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (190031, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Московский проспект, д. 9, e-mail: panchenko_m@mail.ru).

BASILEVSKY Fedor Yurievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Locomotives and Locomotive Equipment. Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University (190031, St. Petersburg, Russian Federation, Moskovskiy Prospekt, Bldg. 9, e-mail: f_basilevski@mail.ru).

FEDOTOV Mikhail Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Head of the Diagnostics Laboratory, Scientific, Research. Design and Technological Institute of the Rolling Stock (140402, Kolomna, Russian Federation, Oktyabrskoy Revolyutsii ul., Bldg. 410, e-mail: fedotov-mv@vnikti.com).

PANCHENKO Maksim Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Locomotives and Locomotive Equipment. Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University Locomotives (190031, St. Petersburg, Russian Federation, Moskovskiy Prospekt, Bldg. 9, e-mail: panchenko_m@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Грачев В.В., Грищенко А.В., Базилевский Ф.Ю., Федотов М.В., Панченко М.Н. Контроль технического состояния цилиндропоршневой группы тепловозного дизеля в период предпусковой холодной прокрутки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 9, с. 95–107, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-95-107

Please cite this article in English as:

Grachev V.V., Grischenko A.V., Bazilevsky F.Y., Fedotov M.V., Panchenko M.N. Monitoring the locomotive diesel cylinder-piston group technical condition during the pre-start cold cranking. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 9, pp. 95–107, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-95-107



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие
«Основы законодательной метрологии»**

Автор А.С. Завгородний

Содержит материалы лекционной части курса «Метрология и радиоизмерения», включающие основы законодательной метрологии. Пособие снабжено справочной информацией и памятками для разработчиков технической документации в части метрологического обеспечения средств радиотехнических измерений.

Для студентов, обучающихся по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>