

# Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.432

doi: 10.18698/0536-1044-2020-2-26-34

## Исследование вибродинамических характеристик двигателей с отключаемыми цилиндрами

**А.И. Яманин**

ФГБОУ «Ярославский государственный технический университет»

## On Vibrational and Dynamic Characteristics of Engines with Deactivated Cylinders

**A.I. Yamanin**

Yaroslavl State Technical University

Рассмотрены некоторые особенности динамики двигателей внутреннего сгорания с отключаемыми цилиндрами, применение которых может способствовать уменьшению эксплуатационного расхода топлива и выбросов токсических веществ с отработавшими газами на частичных скоростных и нагрузочных режимах. Расчетным путем (с использованием твердотельного моделирования, симуляции движения в среде программных продуктов для исследования динамики механизмов, а также метода конечных элементов) определены показатели равномерности хода и крутящего момента, виброперемещения и виброскорости различных точек конструкции при низко- и высокочастотной вибрации. Показано, что при отключении различного числа цилиндров (в разной степени) ухудшается равномерность крутящего момента двигателя, увеличиваются нагрузки на подшипники коленчатого вала, а также средние квадратичные значения виброскоростей опор при низкочастотной вибрации и виброскоростей боковых стенок картера при высокочастотной вибрации, причем на режимах малых частот вращения вала и нагрузок. При наличии несомненных преимуществ двигателей с отключаемыми цилиндрами по экономичности и экологичности перед полноразмерными двигателями одновременного комплексного улучшения их вибродинамических характеристик не происходит.

**Ключевые слова:** отключение цилиндров, равномерность крутящего момента, подшипники коленчатого вала, низкочастотная вибрация, высокочастотная вибрация

The article examines some features of dynamics of engines with shut-off cylinders. This technology can promote reduction of fuel consumption and emission of toxic substances with exhaust fumes at partial speed and loading modes. However, the dynamics of such engines have hardly been considered in previous works. Using calculations (solid state modeling, simulation of motion using software for studying dynamics of mechanisms, as well as the finite element method), the indicators of uniformity of stroke and torque, vibration displacement and vibration velocity of various points of the structure at low- and high-frequency vibration are determined. It is shown that when deactivating a different number of cylinders, the uniformity of the engine torque worsens (to a varying degree) and the load on the crankshaft bearings increases. The average quadratic values of vibration

velocity of the bearings at low-frequency vibration and the vibration velocity of the lateral walls of the housing parts at high-frequency vibration increases as well. While engines with deactivated cylinders definitely have advantages in efficiency and environmental performance, they do not improve vibrational and dynamic characteristics, which is particularly evident at low rotational speeds of the shaft and at small loads.

**Keywords:** cylinder shut-off, torque uniformity, crankshaft bearings, low-frequency vibration, high-frequency vibration

Одним из способов существенного снижения эксплуатационного расхода топлива транспортных поршневых двигателей внутреннего сгорания (далее двигателей), особенно длительно работающих на частичных скоростных и нагрузочных режимах и холостом ходу, является отключение на этих режимах части цилиндров или пропуск вспышек. Этот способ представляет собой разновидность управления мощностью двигателя регулированием его рабочего объема, известен уже достаточно давно.

Одновременно с уменьшением расхода топлива происходит снижение суммарного выброса токсических веществ с отработавшими газами. Такой эффект достигается тем, что для получения меньшей мощности неотключенные цилиндры продолжают работать на режимах, когда удельный эффективный расход топлива минимален.

Этот эффект неоднократно подтвержден многочисленными экспериментальными исследованиями [1–3]. Так, на рис. 1 приведена зависимость удельного расхода топлива  $g_e$  от скорости движения автомобиля  $v_a$  при работе трех и восьми цилиндров дизельного двигателя 8ЧН13/14 (ЯМЗ-238) с одинаковой мощностью [3]. Многие известные фирмы внедрили отключение части цилиндров в серийное производство.

В многочисленных исследованиях отключения цилиндров основное внимание уделено оценке экономии топлива и механических потерь, снижению выбросов токсических веществ, теплообмену, управлению [4] и т. д. Однако столь же важное значение имеют задачи обеспечения надежности и равномерности хода, уменьшения виброакустической активности двигателя и пр.

Это должно гарантировать соответствие показателей судовых двигателей по уровням шума и вибрации нормативам Российских морского и речного регистров судоходства, показателей автомобильных двигателей — правилам R51 Европейской экономической комиссии ООН и т. д. Этим вопросам уделено крайне мало внимания.

Так, известна статья [5], где рассмотрена низкочастотная вибрация двигателя 12ЧН14/14, работающего с несколькими отключенными цилиндрами (ОЦ). В ней сделан вывод, что более предпочтительным является отключение трех цилиндров (что не вполне понятно). В литературе есть разночтения по поводу того, в каких двигателях — с большим или малым числом цилиндров — отключение последних является целесообразным.

В работе [6] выполнен расчет суммарного крутящего момента двигателя 8ЧН13/14. Более известны публикации об аварийных отключениях цилиндров: многие заводские инструкции содержат рекомендации по эксплуатации двигателя в случае увеличения неравномерности хода, вибрации и др. [7]. Очевидно, что при отключении части цилиндров изменяются условия нагруженности подшипников коленчатого вала (КВ), причем в разной степени, зависящей от числа ОЦ.

Цель работы — сравнительная оценка степени неравномерности хода, нагрузок на подшипники КВ, параметров низко- и высокочастотной вибрации двигателей одинаковой мощности

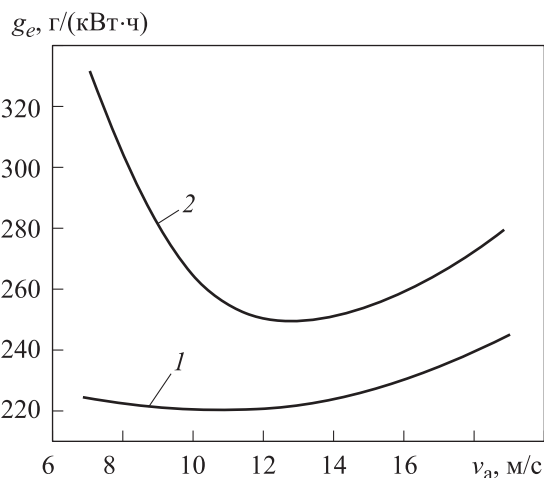


Рис. 1. Зависимость удельного расхода топлива  $g_e$  от скорости движения автомобиля  $v_a$  при работе трех (1) и восьми (2) цилиндров дизельного двигателя 8ЧН13/14 (ЯМЗ-238) с одинаковой мощностью

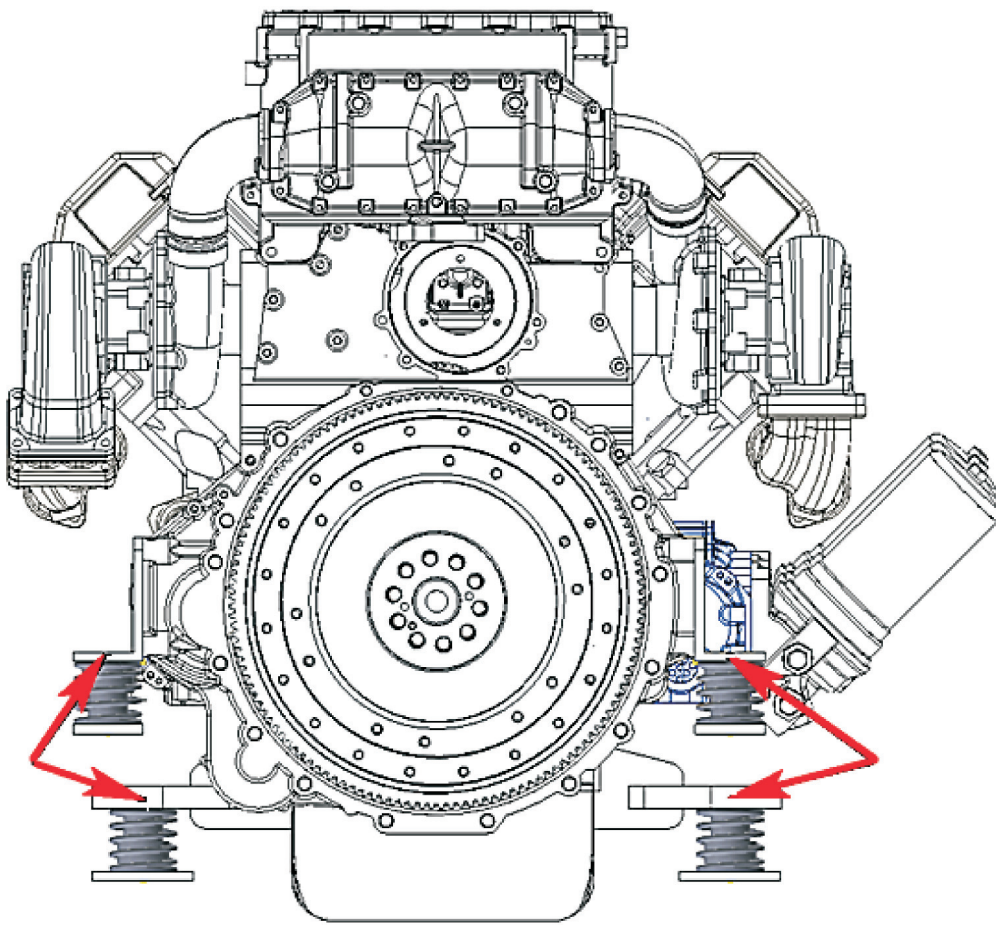


Рис. 2. Твёрдотельная модель двигателя 12ЧН14/14 на упругих опорах, полученная с помощью ПП Autodesk Inventor Professional

с ОЦ и полноразмерных двигателей, работающих на частичных скоростных и нагрузочных режимах (без рассмотрения двигателей, в которых реализован пропуск вспышек топлива).

Указанные задачи решены расчетным путем. Крутящий момент и нагрузки на подшипники КВ определены по традиционной методике динамического расчета [8] с использованием твердотельных моделей двигателей. На рис. 2 приведена твердотельная модель двигателя 12ЧН14/14 на упругих опорах (обозначенных стрелками), полученная с помощью программного продукта (ПП) Autodesk Inventor Professional.

Низкочастотная вибрация исследована при симуляции работы двигателей в среде ПП для расчета динамики механических и мехатронных систем [9], а высокочастотная вибрация — методом конечных элементов в среде ПП ANSYS/LS-DYNA (соответствующая методика неоднократно апробирована [10]).

В качестве возмущающих сил рассмотрены индикаторные диаграммы, рассчитанные в среде

ПП Diesel-RK. Основанием для расчета индикаторных диаграмм, соответствующих частичным нагрузкам, служило равенство работ [11], совершаемых в этих условиях полноразмерным двигателем и двигателем той же мощности с соответствующим числом ОЦ (для этого использованы возможности ПП Diesel-RK по формированию соответствующих законов подачи топлива).

Для 12-цилиндрового двигателя с неравномерным чередованием рабочих ходов (что обусловлено углом развала цилиндров, равным  $90^\circ$ , и схемой заклинки шести кривошипов в виде трехлучевой звезды), работающего с различным числом ОЦ, определены степени неравномерности крутящего момента  $\delta_M$  и хода:

$$\delta_M = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ср}}}; \quad \delta_\omega = \frac{A_{\text{изб}}}{J\omega_{\text{ср}}^2},$$

где  $M_{\max}$  и  $M_{\text{ср}}$  — максимальное и среднее значения крутящего момента;  $A_{\text{изб}}$  — избыточная работа крутящего момента;  $J$  — момент

инерции подвижных звеньев кривошипно-шатунного механизма;  $\omega_{cp}$  — средняя угловая скорость КВ.

Предполагалось, что в ОЦ отсутствуют газообмен (т. е. впускные и выпускные клапаны удерживаются открытыми) и подача топлива. Причем на поршни ОЦ действуют только силы инерции поступательно движущихся масс.

Возможно отключение цилиндров при сохранении газообмена (когда клапаны работают в штатном режиме) и прекращении подачи топлива в ОЦ. При этом на поршни ОЦ действуют газовая сила и сила инерции поступательно движущихся масс. Однако индикаторная диаграмма газовой силы является симметричной и включает в себя только линии изобарных процессов впуска и выпуска и политропических сжатия и расширения воздуха.

С точки зрения механических потерь предпочтительнее отключение цилиндров без газообмена, но при этом усложняется конструкция механизма газораспределения. Внедрение электромагнитного привода клапанов сдерживается ростом размеров, массы управляющих электромагнитов и необходимостью их охлаждения [12]. Правда, в публикации [11] замечено, что эффект от остановки клапанов не является столь значительным вследствие потерь на трение в кривошипно-шатунном механизме и гидравлических потерь при движении воздуха через открытые клапаны.

В табл. 1 приведены значения отношения степени неравномерности крутящего момента двигателя 12ЧН14/14 с ОЦ  $(\delta_M)_z$  к таковой для двигателя без ОЦ  $(\delta_M)_0$  при различных значениях частоты вращения КВ  $n$ . Здесь и далее индекс «0» соответствует полноразмерному двигателю, индекс «z» — двигателю с ОЦ. Значения параметра  $(\delta_M)_0$  приняты за единицу. Пример расчетных кривых показан на рис. 3.

Таблица 1

**Значения отношения степеней неравномерности крутящего момента двигателя 12ЧН14/14 при различных значениях частоты вращения его КВ**

$n, \text{мин}^{-1}$	Отношение $(\delta_M)_z/(\delta_M)_0$ при числе ОЦ $z$			
	0	1	4	6
1000	1,00	1,40	2,50	1,91
1300	1,00	1,48	2,80	2,01
1600	1,00	1,69	3,49	3,10
1900	1,00	2,01	6,41	4,52

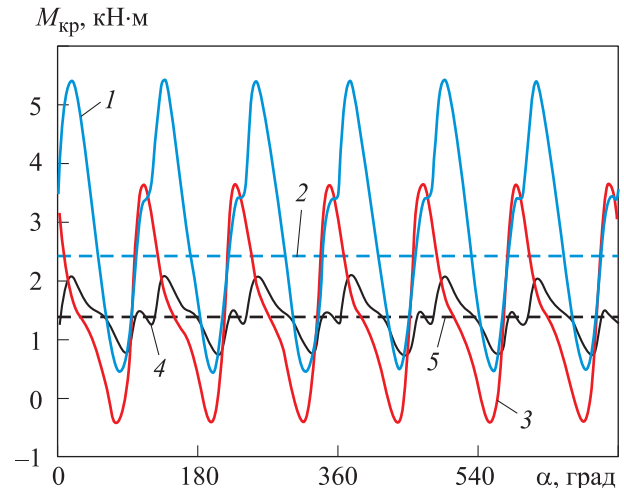


Рис. 3. Зависимость крутящего момента  $M_{кр}$  двигателя 12ЧН14/14 от угла поворота КВ  $\alpha$ : 1 и 2 — суммарный и средний крутящий момент полноразмерного двигателя, работающего по внешней скоростной характеристике (ВСХ); 3 — суммарный крутящий момент двигателя с шестью ОЦ (график среднего крутящего момента в этом случае совпадает с линией 5); 4 и 5 — суммарный и средний крутящий момент полноразмерного двигателя, работающего с нагрузкой 50 %

Оценка нагруженности подшипников КВ проведена по средним нагрузкам  $Q_{cp}$  на них, которые определены по соответствующим векторным диаграммам ( $T-Z$ ), где  $T$  и  $Z$  — тангенциальная и радиальная силы, действующие на кривошип КВ. Геометрия последних при отключении цилиндров заметно изменяется (рис. 4, а и б). При расчете средних нагрузок принято, что газообмен в ОЦ отсутствует.

Результаты расчета приведены в табл. 2, где видно, что в зависимости от числа ОЦ  $z$  отношение средних нагрузок  $(Q_{cp})_z/(Q_{cp})_0$  на коренные шейки и подшипники КВ может как увеличиваться, так и уменьшаться. Обращает на себя внимание тот факт, что при отключении цилиндров и сохранении средней величины возрастает мгновенная нагрузка на подшипник, что, по видимому, может способствовать его более интенсивному изнашиванию (см. рис. 4, б).

Низкочастотная вибрация рассчитана в среде динамического моделирования ПП Autodesk Inventor Professional. Определены виброскорости опор двигателя при симуляции вынужденного движения под действием системы газовых сил (силы инерции при этом учитывались автоматически). Двигатель рассмотрен как система взаимодействующих твердых тел, установленных на упругие опоры. Идентичность массовых и инерционных характеристик

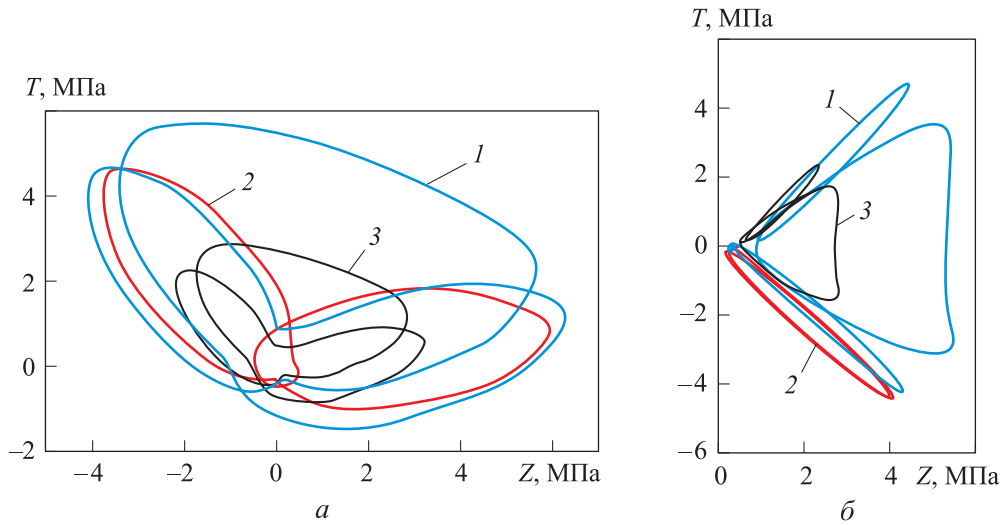


Рис. 4. Векторные диаграммы нагрузок на коренные шейки (а) и подшипник (б) двигателя 12ЧН14/14: 1 и 3 — полноразмерный двигатель, работающий по ВСХ и с нагрузкой 50 %; 2 — двигатель с шестью ОЦ

Таблица 2

**Значения отношения средних нагрузок на коренные шейки и подшипники КВ двигателя 12ЧН14/14 при отключении части цилиндров**

$z$	$(Q_{cp})_z / (Q_{cp})_0$	$z$	$(Q_{cp})_z / (Q_{cp})_0$
0	1,00	4	0,80...0,93
1	0,68...0,93	5	0,90...1,24
2	0,80...1,00	6	1,00...1,12
3	0,87...0,99	–	–

модели таковым для реального двигателя обеспечена корректным твердотельным моделированием.

Отличием от подобного расчета, описанного в работе [6], является наиболее полное моделирование двигателя со всеми навесными агрегатами и упругими опорами соответствующей жесткости. Пример расчетной виброграммы виброскорости опор двигателя 12ЧН14/14 при частоте вращения КВ  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$  показан на рис. 5, где  $v$  — виброскорость;  $t$  — время.

При обработке виброграмм определены средние квадратические значения (СКЗ) виброскоростей опор. Их значения для полноразмерного двигателя, работающего в режиме ВСХ, приняты за единицу. При сравнении отношений СКЗ виброскоростей  $v_z/v_0$ , соответствующих различным значениям частоты вращения

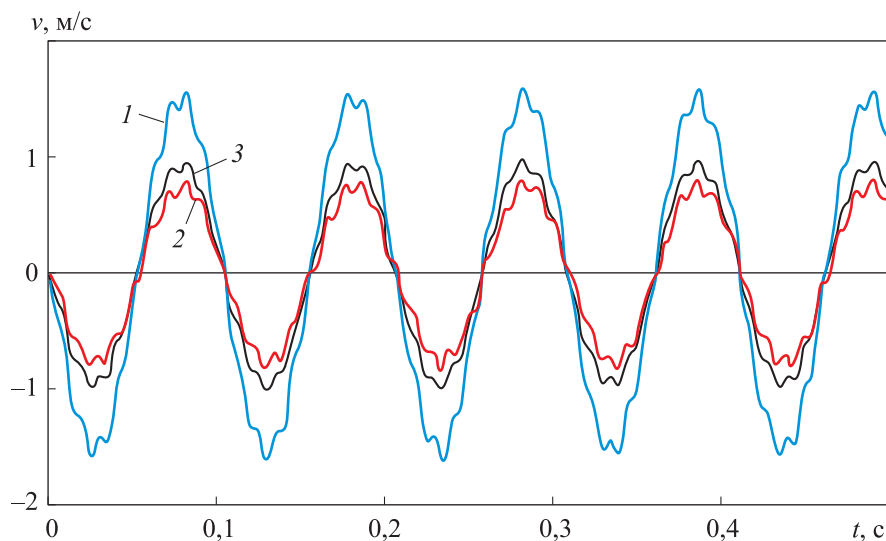


Рис. 5. Расчетная виброграмма виброскорости опор двигателя 12ЧН14/14 при частоте вращения КВ  $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$ :

1 и 3 — полноразмерный двигатель, работающий по ВСХ и с нагрузкой 50 %; 2 — двигатель с шестью ОЦ

вала  $n$  (табл. 3), наблюдается повышение уровня низкочастотной вибрации на малых частотах вращения и нагрузках, т. е. как раз на тех режимах, для которых рекомендовано отключение части цилиндров.

Уменьшение отношения виброскоростей  $v_z/v_0$  достигается только при обеспечении равномерности чередования рабочих ходов (в V-образном 12-цилиндровом двигателе это осуществимо при отключении одного из рядов цилиндров). Возможно, что реализация отключения цилиндров потребует применения в двигателе адаптивных управляемых амортизаторов, что еще в большей степени усложнит его конструкцию.

Высокочастотная вибрация исследована на конечно-элементной модели двигателя 4ЧН10,5/12,7 (рис. 6). Для сокращения времени расчета навесные агрегаты в ней смоделирова-

Таблица 3

**Значения отношения СКЗ виброскоростей опор двигателя 12ЧН14/14 при различных значениях частоты вращения КВ**

$n, \text{мин}^{-1}$	Отношение $v_z/v_0$ при числе ОЦ $z$				
	0	1	4	5	6
1000	1,00	1,45	1,07	1,53	1,15
1300	1,00	1,15	0,97	1,16	0,91
1600	1,00	0,94	0,98	0,93	0,88
1900	1,00	0,98	1,00	0,96	0,84

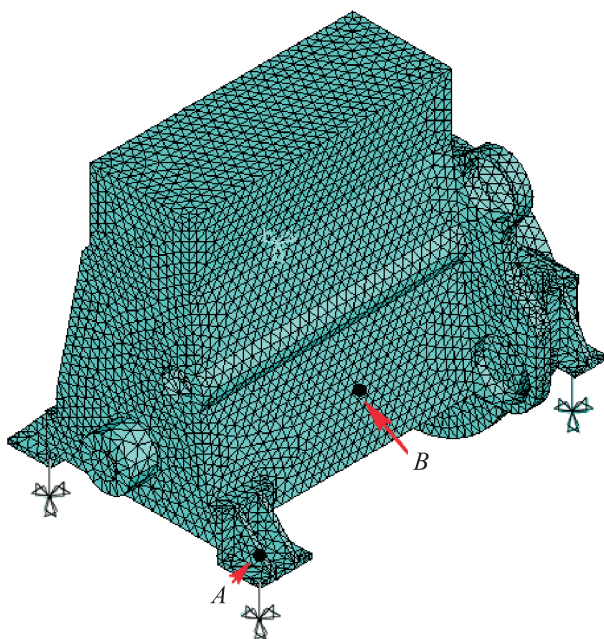


Рис. 6. Конечно-элементная модель двигателя 4ЧН10,5/12,7

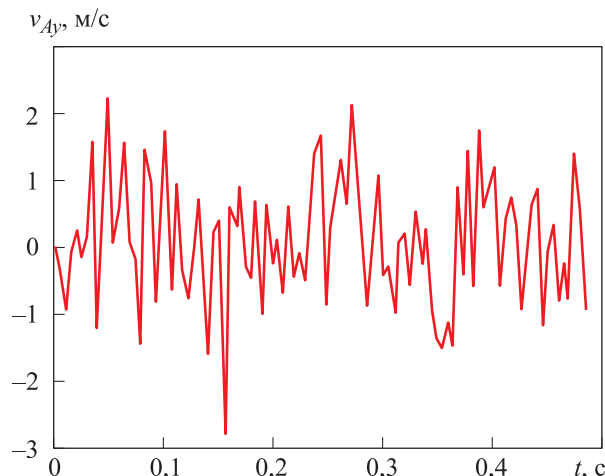


Рис. 7. Расчетная виброграмма виброскорости точки на опорной лапе двигателя 4ЧН10,5/12,7 в вертикальном направлении

ны с помощью специальных нуль-мерных конечных элементов типа точечной массы. Эффективность такого моделирования показана в работе [10].

В ходе расчетов определены виброперемещения и виброскорости точек  $A$  (см. рис. 6) на опорных лапах двигателя в вертикальном направлении  $v_{Ay}$ , точек  $B$  на боковой стенке картера в области среднего коренного подшипника в горизонтальном направлении  $v_{Bx}$  и эквивалентные напряжения в окрестности точек  $B$   $\sigma_{\text{экв}B}$ .

Пример расчетной виброграммы показан на рис. 7. При обработке виброграмм определены СКЗ указанных величин. Их значения для полноразмерного двигателя, работающего в одном из режимов ВСХ (выбрана точка  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ), приняты за единицу. В табл. 4 приведены значения отношений СКЗ виброскоростей точек на опорной лапе  $(v_{Ay})_z/(v_{Ay})_0$ , боковой стенке картера  $(v_{Bx})_z/(v_{Bx})_0$  и эквивалентных напряжений  $(\sigma_{\text{экв}B})_z/(\sigma_{\text{экв}B})_0$  двигателя 4ЧН10,5/12,7 при  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ .

Из табл. 4 следует, что параметры высокочастотной вибрации отдельных точек на корпусе двигателя при уменьшении нагрузки и отключении цилиндров приблизительно одинаковы и в обоих случаях значительно ниже таковых для полноразмерного двигателя, работающего с полной (100%-ной) нагрузкой. При снижении нагрузки это объясняется меньшей интенсивностью возмущающих импульсов, а при отключении цилиндров — увеличением промежутков времени между двумя такими последовательными импульсами.

Таблица 4

Значения отношений СКЗ виброскоростей точек на опорной лапе, боковой стенке картера и эквивалентных напряжений двигателя 4ЧН10,5/12,7 при  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$

Двигатель	$(v_{Ay})_z / (v_{Ay})_0$	$(v_{Bx})_z / (v_{Bx})_0$	$(\sigma_{\text{эквB}})_z / (\sigma_{\text{эквB}})_0$
Полноразмерный с нагрузкой 100 %	1,000	1,000	1,000
Полноразмерный с нагрузкой 50 %	0,692	0,578	0,643
Имеющий два ОЦ	0,654	0,616	0,671

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что при отключении цилиндров ухудшаются нагруженность коренных подшипников КВ, равномерность хода и низкочастотная вибрация двигателя. Это может способствовать уменьшению комфортабельности транспортного средства, а также росту динамических нагрузок на его подмоторную конструкцию.

Изменение высокочастотной вибрации при отключении цилиндров представляется более благоприятным, в связи с чем (судя по снижению поперечной вибрации стенок картера и напряжений в них) можно ожидать некоторого уменьшения структурного шума двигателя и повышения вибропрочности его корпусных

деталей. Эти заключения подтверждены рядом ранее опубликованных работ, в частности [5, 6]. Представляется, что подобные предпроектные исследования целесообразны при решении вопроса о внедрении на тот или иной двигатель системы отключения цилиндров.

### Вывод

При наличии несомненных преимуществ двигателей с отключаемыми цилиндрами по экономичности и экологичности перед полноразмерными двигателями одновременного комплексного улучшения их вибродинамических характеристик не происходит.

### Литература

- [1] Мищенко Н.И., Шляхов В.С., Супрун В.Л., Подлесный А.Г. Автомобильные двигатели с отключаемыми цилиндрами. Конструкции, анализ. *Вестник СевНТУ*, 2011, № 122, с. 163–166.
- [2] Патрахальцев Н.Н., Никишин И.А., Петруня И.А. Повышение экономичности малых нагрузок дизеля Камаз-740 изменением его рабочего объема. *Грузовик*, 2013, № 5, с. 31–34.
- [3] Петруня И.А. *Повышение эксплуатационной топливной экономичности транспортных дизелей изменением их рабочего объема*. Дис. ... канд. техн. наук, Москва, 2015. 133 с.
- [4] Евстифеев Б.В., Соин Ю.В., Ким Ф.Г. Улучшение эксплуатационной экономичности тепловозного дизеля 6ЧН21/21 с отключаемыми цилиндрами. *Двигателестроение*, 1991, № 8–9, с. 55–56.
- [5] Горбунов В.В. Влияние отключения цилиндров дизеля ЯМЗ-8401 на его вибрацию и топливную экономичность. *Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования*, 2004, № 1, с. 54–56.
- [6] Зеер В.А., Мартынов А.А. Моделирование кривошипно-шатунного механизма ДВС с отключаемыми цилиндрами. *Известия Томского политехнического института*, 2008, т. 312, № 4, с. 40–44.
- [7] *Режим работы дизеля с отключенным цилиндром*. URL: <http://mirmarine.net/svm/seu/286-rezhim-raboty-dizelya-s-otklyuchennym-tsilindrom> (дата обращения 15 апреля 2019).
- [8] Яманин А.И. *Динамические расчеты поршневых двигателей в среде Microsoft Office Excel*. Ярославль, Изд-во ЯГТУ, 2014. 111 с.
- [9] Яманин А.И. *Динамические расчеты поршневых двигателей в среде Autodesk Inventor Professional*. Ярославль, Изд-во ЯГТУ, 2013. 112 с.

- [10] Новиков Д.С. *Анализ вибрации двигателя в составе автомобильного силового агрегата*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2013. 151 с.
- [11] Кустов И.А., Федянов Е.А. Уточнение основанной на понятии удельной работы методики априорной оценки эффективности регулирования рабочего объема двигателя отключением цилиндров. *Энерго- и ресурсосбережение. Промышленность и транспорт*, 2019, № 1(26), с. 57–60.
- [12] Балабин В.Н. Проблемы внедрения электромагнитного привода клапанов газораспределения современных локомотивных ДВС. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2015, № 2–1, с. 14–19. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6365> (дата обращения 15 июня 2019).

## References

- [1] Mishchenko N.I., Shlyakhov V.S., Suprun V.L., Podlesnyy A.G. Automobile engines with switchable cylinders. Designs, analysis. *Vestnik SevNTU*, 2011, no. 122, pp. 163–166 (in Russ.).
- [2] Patrakhal'tsev N.N., Nikishin I.A., Petrunya I.A. Improving the efficiency of small loads of the Kamaz-740 diesel by changing its working volume. *Gruzovik*, 2013, no. 5, pp. 31–34 (in Russ.).
- [3] Petrunya I.A. *Povysheniye ekspluatatsionnoy toplivnoy ekonomichnosti transportnykh dizeley izmeneniyem ikh rabocheho ob'yema*. Kand. Diss. [Increase in operational fuel economy of transport diesels by changing their working volume. Cand. Diss.]. Moscow, 2015. 133 p.
- [4] Evstifeyev B.V., Soin Yu.V., Kim F.G. Improving the operational efficiency of diesel engine 6CHN21/21 with switchable cylinders. *Dvigatestroyeniye*, 1991, no. 8–9, pp. 55–56 (in Russ.).
- [5] Gorbunov V.V. The effect of disabling the cylinders of the YaMZ-8401 diesel engine on its vibration and fuel efficiency. *RUDN journal of engineering researches*, 2004, no. 1, pp. 54–56 (in Russ.).
- [6] Zeyer V.A., Martynov A.A. Modeling the crank mechanism of ICE with switchable cylinders. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 4, pp. 40–44 (in Russ.).
- [7] *Rezhim raboty dizelya s otklyuchennym tsilindrom* [Engine mode with cylinder off]. Available at: <http://mirmarine.net/svm/seu/286-rezhim-raboty-dizelya-s-otklyuchennym-tsilindrom> (accessed 15 April 2019).
- [8] Yamanin A.I. *Dinamicheskiye raschety porshnevykh dvigateley v srede Microsoft Office Excel* [Dynamic piston engine calculations in Microsoft Office Excel]. Yaroslavl, YASTU publ., 2014. 111 p.
- [9] Yamanin A.I. *Dinamicheskiye raschety porshnevykh dvigateley v srede Autodesk Inventor Professional* [Dynamic Design of Piston Engines in Autodesk Inventor Professional]. Yaroslavl, YASTU publ., 2013. 112 p.
- [10] Novikov D.S. *Analiz vibratsii dvigatelya v sostave avtomobil'nogo silovogo agregata*. Kand. Diss. [Analysis of engine vibration in an automobile powertrain. Cand. Diss.]. Moscow, 2013. 151 p.
- [11] Kustov I.A., Fedyanov E.A. Refining the method based on the concept of specific work for estimate of the effectiveness variable displacement engine disconnecting the cylinders. *Energo- i resursoberezheniye. Promyshlennost' i transport*, 2019, no. 1(26), pp. 57–60 (in Russ.).
- [12] Balabin V.N. Problems of implementation of the electromagnetic valve timing on modern locomotive engines. *Mezhdunar. zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2015, no. 2–1, pp. 14–19. Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6365> (accessed 15 June 2019).



## Информация об авторе

**ЯМАНИН Александр Иванович** — доктор технических наук, профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания. ФГБОУ «Ярославский государственный технический университет» (150023, Ярославль, Российская Федерация, Московский проспект, 88, e-mail: a\_yam@mail.ru).

## Information about the author

**YAMANIN Aleksandr Ivanovich** — Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Internal Combustion Engines Department. Yaroslavl State Technical University (150023, Yaroslavl, Russian Federation, Moskovskiy Ave., Bld. 88, e-mail: a\_yam@mail.ru).

### Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Яманин А.И. Исследование вибродинамических характеристик двигателей с отключаемыми цилиндрами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 2, с. 26–34, doi: 10.18698/0536-1044-2020-2-26-34

### Please cite this article in English as:

Yamanin A.I. On Vibrational and Dynamic Characteristics of Engines with Deactivated Cylinders. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 2, pp. 26–34, doi: 10.18698/0536-1044-2020-2-26-34



## В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие под редакцией В.А. Сорокина, Д.А. Ягодникова «Технология производства ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе»

Изложены основы технологии изготовления ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе (РПДТ). Приведена классификация характеристик режимов работы отдельных агрегатов и РПДТ в целом, а также действующих на них силовых и тепловых нагрузок, обуславливающих выбор функциональных конструкционных материалов. Представлены данные о физико-механических и теплофизических свойствах металлических и композиционных конструкционных материалов, используемых при изготовлении элементов конструкции РПДТ. Рассмотрены основные технологические процессы и операции формообразования деталей, в том числе инновационные, и показаны примеры внедрения в конструирование и технологию изготовления РПДТ систем автоматизированного проектирования.

В учебном пособии использованы материалы научно-исследовательских работ, выполняемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ, ИПХФ РАН, а также данные зарубежных научных периодических изданий.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Авиационная и ракетно-космическая техника», специальности «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» направления подготовки дипломированных специалистов «Двигатели летательных аппаратов», а также для инженеров, работающих в области ракетно-космической техники.

### 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; www.baumanpress.ru