

УДК 621.436

## Оценка качества работы тепловозного дизеля применением управляемых клапанов

О. Р. Хамидов, Б. Т. Кулманов

Ташкентский государственный университет транспорта, Республика Узбекистан, 100022, Ташкент, ул. Темирийулчилар, 1

**Для цитирования:** Для цитирования: *Хамидов О. Р., Кулманов Б. Т.* Оценка качества работы тепловозного дизеля применением управляемых клапанов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 577–585. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-577-585

### Аннотация

**Цель:** Оценка качества работы тепловозного дизеля с применением управляемых клапанов. **Методы:** Используются программное обеспечение и методы анализа данных для оценки качества работы тепловозного дизеля путем регулирования и управления фаз газораспределения. В процессе оптимизации управления приводом значения эффективного КПД рассматривались в качестве критерия оптимальности управления. **Результаты:** Были исследованы режимы работы дизеля реального тепловоза, и анализировано распределение его рабочего времени по позициям контроллера машиниста. С помощью математической модели дизеля рассчитаны основные технико-экономические параметры исследуемого объекта с изменением фаз газораспределения и расхода воздуха. Анализированы и составлены графики, характеризующие эффективность изменения фаз газораспределения в виде зависимости относительного эффективного КПД от цикловой подачи для двух промежуточных режимов работы дизеля с варьированием расхода воздуха. **Практическая значимость:** Результаты проведенных исследований могут быть использованы в инженерно-конструкторских работах по замене серийных приводов газораспределения на автоматические управляемые приводы.

**Ключевые слова:** Управляемые приводы газораспределения, эффективный КПД, фазы газораспределения, дизель, клапан.

### Введение

При проектировании тепловозных дизелей все основные технико-экономические показатели рассчитываются на номинальных режимах двигателя. К сожалению, двигатели внутреннего сгорания тепловозов в основном работают не в номинальных режимах. Режимы работы дизеля зависят от многих факторов, таких как состояние подвижного состава, состояние профиля пути, способ организации перевозочных работ, ведение режима локомотива и др. Для основных силовых агрегатов и узлов тепловоза ненорми-

нальные режимы являются нерасчетными и неоптимальными. Как следствие — рабочие процессы работы поршневой машины на этих режимах тоже протекают неоптимально [1].

Для показательного представления на рис. 1 приведен режим работы дизеля реального тепловоза UzTE16M3 № 034 секции «А» приписки локомотивного депо Карши. Длительность экспериментальной поездки — 10 часов.

График наглядно показывает долю рабочего времени дизеля на всех позициях контроллера машиниста.

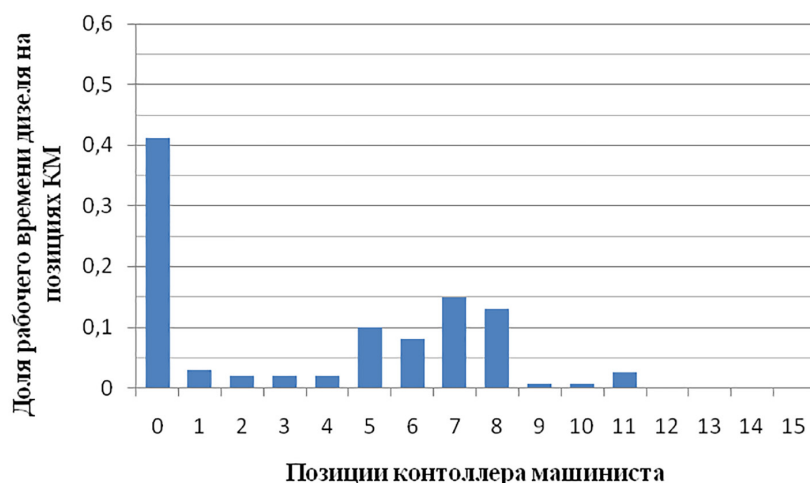


Рис. 1. Распределение рабочего времени дизеля по позициям КМ

Диаграмма показывает, что существенная доля рабочего времени дизеля тепловоза не совпадает с номинальным режимом, что приводит к ухудшению газообменного процесса, снижению эффективного КПД и качества смесеобразования на промежуточных позициях.

При «жестких» фазах газораспределения пропускная способность клапанов, характеризуемая величиной «время — сечение», при увеличении  $n_d$  уменьшается, что отрицательно сказывается на процессах газообмена, особенно для высокооборотных двигателей.

Наиболее распространены механизмы с механическим клапаным пружинным приводом и нерегулируемыми фазами газораспределения. При проектировании клапанного механизма необходимо по возможности выполнить условия получения максимально возможного проходного сечения клапанов и снизить поступательно движущиеся массы. Взаимная противоречивость этих требований предопределяет компромиссность выбора окончательного решения. При механическом приводе закон движения клапанов определяется исключительно профилем кулачка распределительного вала, а фазы подбираются из условия оптимального протекания процессов газообмена в двигателе на номинальном режиме. Естественно, что для других эксплуатационных

режимов выбранные фазы являются неоптимальными, что существенно ухудшает среднеэксплуатационные технико-экономические показатели транспортного дизеля.

Дело в том, что в зависимости от режимов работы дизеля меняется характер поведения газов (топливовоздушной смеси и выхлопных газов) в цилиндре и во впускном и выпускном трактах. В процессе работы двигателя постоянно меняется скорость течения, происходят колебания упругой газовой среды различного рода, которые приводят к резонансным положительным или, наоборот, отрицательным застойным явлениям, вследствие чего эффективность и скорость наполнения цилиндров при разных режимах работы двигателя неодинаковы [2–4].

Автор [5] в ряду недостатков двигателей с механическим приводом клапанов отнес следующее.

Во-первых, для каждой новой конструкции двигателя требуется экспериментально подбирать соотношение фаз газораспределения и создать распределительный вал с таким профилем и взаимным расположением толкающих кулачков относительно остальных элементов ГМР, которые наиболее оптимально обеспечивали требования конструкции и назначения разрабатываемого двигателя. Это связано с тем, что в поршневых двигателях, различных по мощности, степени сжатия,

оборотистости, способу смесеобразования и другим конструктивным особенностям, фазы газораспределения также совершенно различны.

Во-вторых, для двигателей с распределительным валом сложность выполнения перечисленных требований в их трудно устранимой противоречивости.

В-третьих, длительная эксплуатация транспортных дизелей на частичных нагрузках и холостом ходу, т. е. при работе на неоптимальных фазах газораспределения, приводит к увеличению забросов газа во впускной ресивер, отложению нагара и в результате к перегреву деталей при переводе двигателя на номинальный режим.

Процессы газообмена занимают до 65–70 % времени, отводимого на рабочий процесс в четырехтактном двигателе. В связи с этим совершенствование механизма газораспределения является эффективным способом увеличения экономичности тепловозных дизелей в эксплуатации [5].

Частично задача управления фаз газораспределения решается с применением сложной механической системы управления раздвижным распредвалом или разнопрофильными кулачками. Но и такие ГРМ тоже не находят широкого применения из-за высокой конструктивной сложности и недостаточно эксплуатационной надежности.

Учесть все параметры, определяющие качество работы системы газообмена во всем диапазоне работы двигателя, представляется возможным при принципиально новом подходе к управлению органами газообмена.

### **Анализ качества работы дизеля в зависимости от изменения фаз газораспределения**

Одним из наиболее эффективных способов повышения протекания рабочих процессов поршневой части дизеля является замена серийных приводов газораспределения на автоматические управляемые приводы.

При внедрении автоматических регулируемых приводов клапанов появится возможность полностью регулировать фазы газораспределения и закон регулирования. Обеспечиваются оптимальные процессы газообмена в зависимости от режима работы дизеля. Появится возможность индивидуально управлять цилиндрами [6–9].

С целью проверки эффективности и целесообразности управления приводом органов газораспределения тепловозного дизеля выполнено математическое моделирование рабочего процесса дизеля в режимах его работы по нагрузочным характеристикам.

Моделирование выполнялось для характеристик, соответствующих частотам вращения коленчатого вала 600 и 800 об/мин. С целью повышения достоверности и обеспечения необходимой универсальности применения результатов каждая из характеристик моделировалась для различных фиксированных значений расходов воздуха. План проведения вычислительного эксперимента представлен в таблице.

### **Перечень режимов, в которых выполнялось математическое моделирование рабочего процесса**

Фиксирование расхода воздуха при изменении цикловых подач топлива обуславливает его работу в режимах, существенно отличающихся от номинальных. По этой причине численные значения ряда параметров могут выходить за пределы их аппроксимации в ходе моделирования. Поскольку основной задачей, решаемой в ходе моделирования, является определение качественных характеристик, влияния различных факторов на рабочий процесс дизеля, часть результатов, получаемых в ходе моделирования, анализировалась в относительных единицах. Кроме того, главной задачей моделирования было изучение влияния изменения фаз газораспределения на основные технико-экономические показатели двигателя.

## План проведения вычислительного эксперимента

Начало подъема впускных клапанов									
Обороты КВ (об/мин)		800			600				
Расход воздуха		$G_1 = 1,38 \text{ кг/с}$ (ном.)	$G_2 = 1,24 \text{ кг/с}$ (-10 %)	$G_3 = 1,1 \text{ кг/с}$ (-20 %)	$G_1 = 0,78 \text{ кг/с}$ (ном.)	$G_2 = 0,7 \text{ кг/с}$ (-10 %)	$G_3 = 0,62 \text{ кг/с}$ (-20 %)		
Изменения фазы									
1. Раньше на 10°	2. Раньше на 20°	3. Позже на 10°	4. Позже на 20°	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$
				$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$
				$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$
				$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$
				$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$
				$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$
Окончания посадки впускных клапанов									
1. Раньше на 10°	2. Раньше на 20°	3. Позже на 10°	4. Позже на 20°	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$
				$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$
				$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$
				$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$
				$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$
				$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$
Начало подъема выпускных клапанов									
1. Раньше на 10°	2. Раньше на 20°	3. Позже на 10°	4. Позже на 20°	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$
				$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$
				$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$
				$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$
				$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$
				$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$
Окончания посадки выпускных клапанов									
1. Раньше на 10°	2. Раньше на 20°	3. Позже на 10°	4. Позже на 20°	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$
				$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$
				$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$
				$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$
				$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$
				$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$

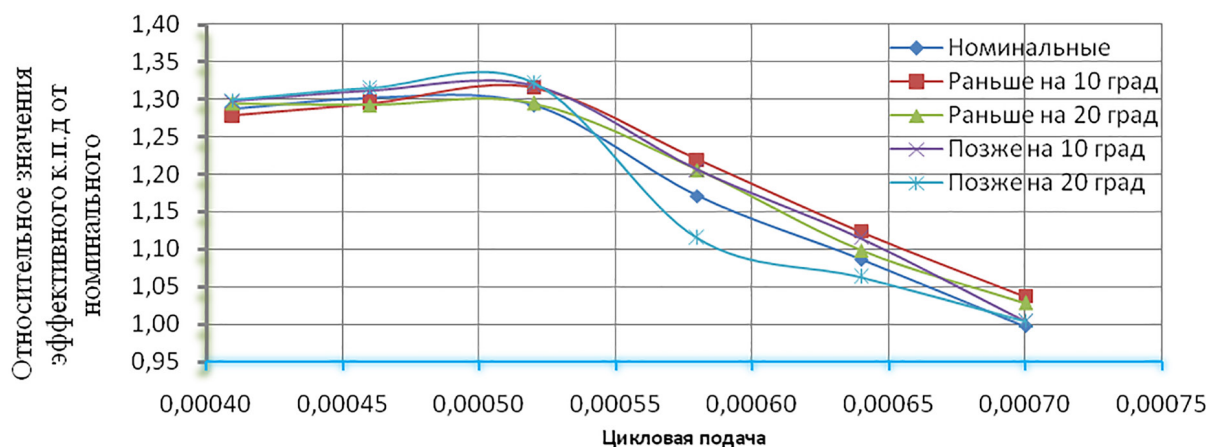


Рис. 1. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах начала открытия впускных клапанов.

Расход воздуха — 1,24 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 800 об/мин

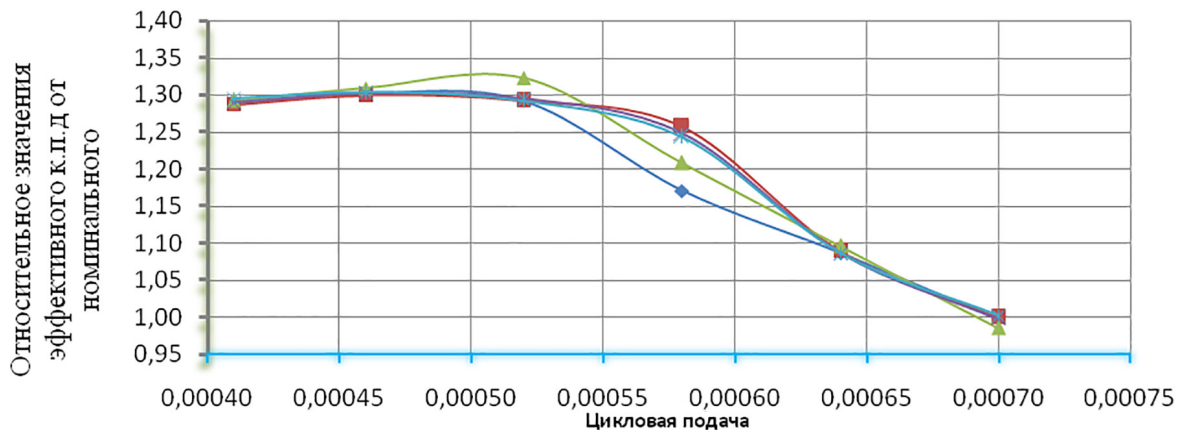


Рис. 2. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах окончания закрытия (посадки) выпускных клапанов. Расход воздуха — 1,24 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 800 об/мин

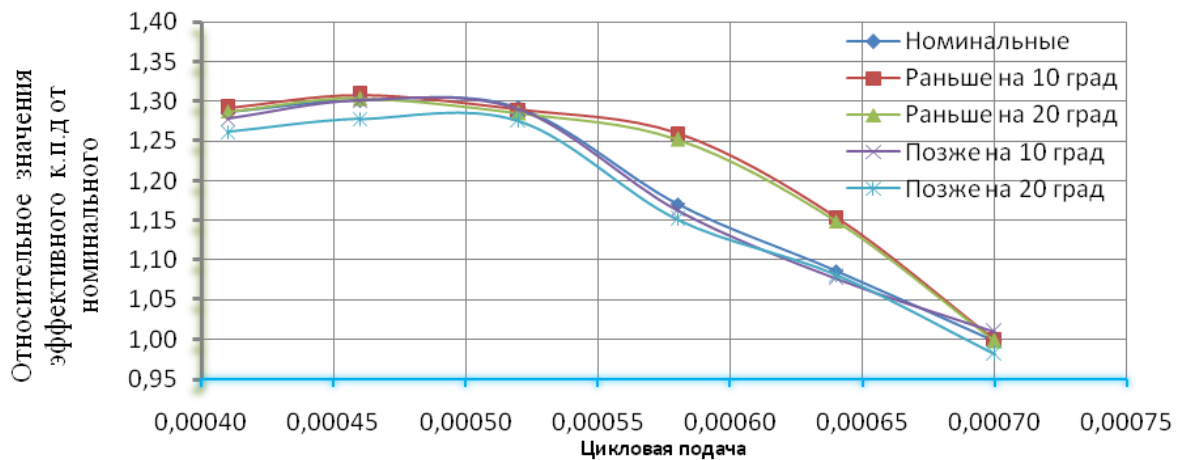


Рис. 3. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах начала открытия выпускных клапанов. Расход воздуха — 1,24 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 800 об/мин

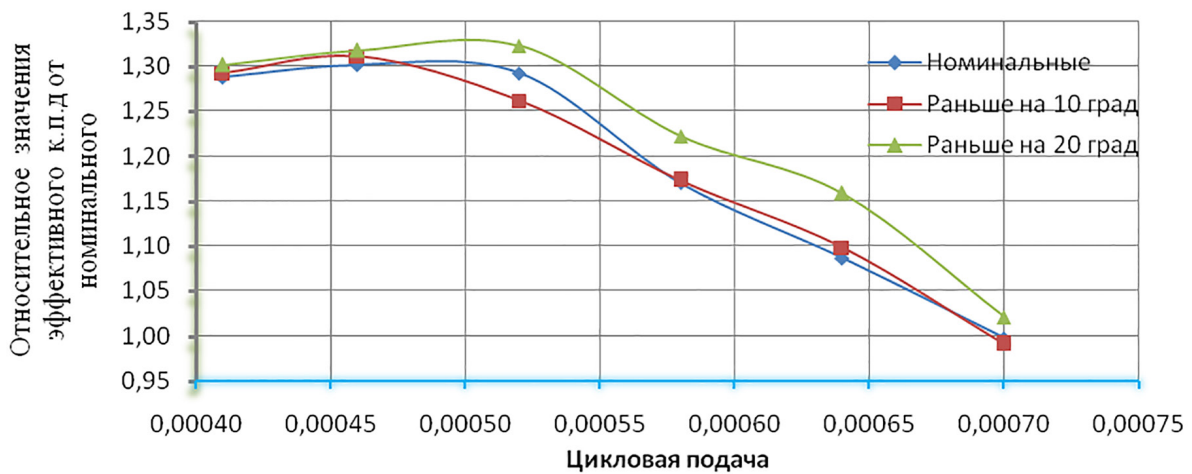


Рис. 4. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах окончания закрытия (посадки) выпускных клапанов. Расход воздуха — 1,24 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 800 об/мин

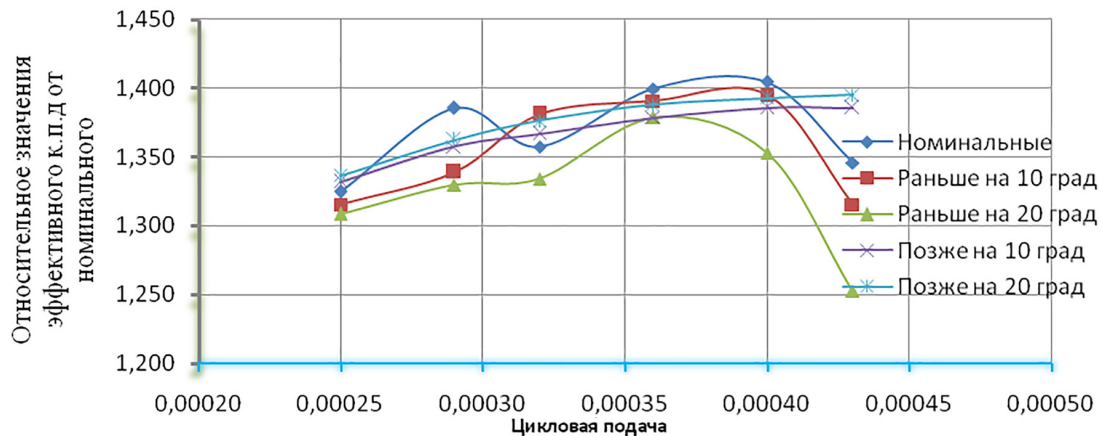


Рис. 5. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах начала открытия впускных клапанов.

Расход воздуха — 0,78 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 600 об/мин

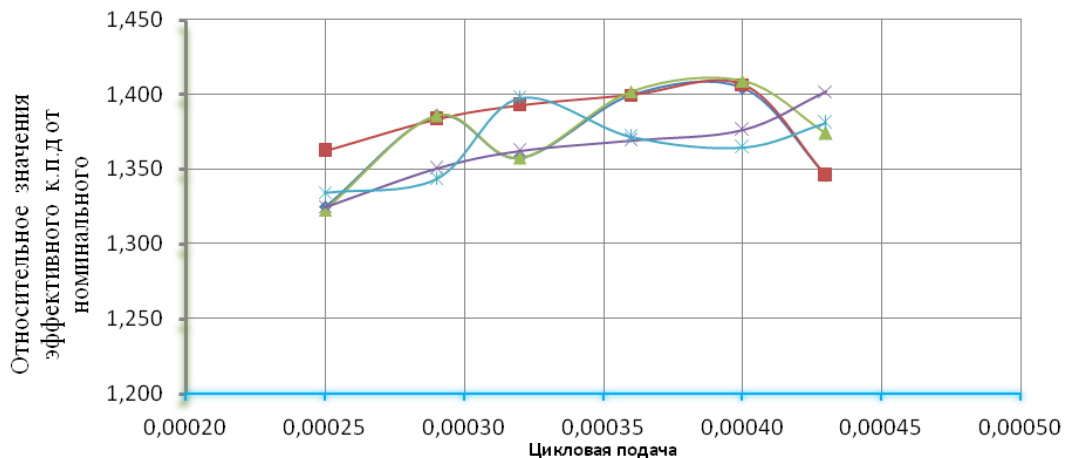


Рис. 6. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах окончания закрытия (посадки) впускных клапанов.

Расход воздуха — 0,78 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 600 об/мин

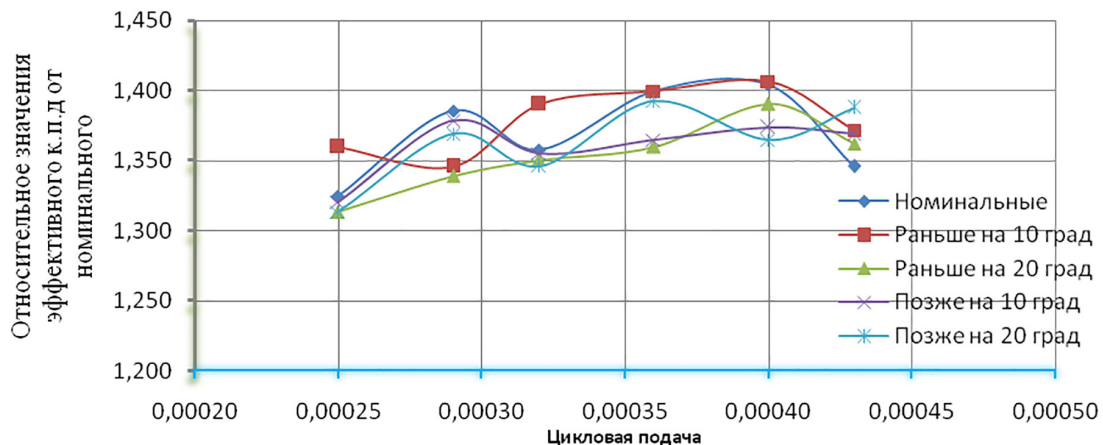


Рис. 7. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах начала открытия выпускных клапанов.

Расход воздуха — 0,78 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 600 об/мин

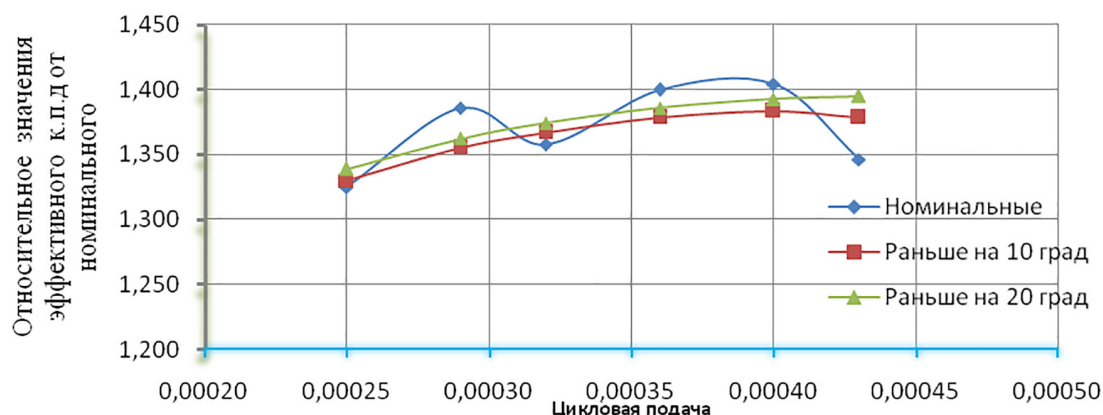


Рис. 8. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах окончания закрытия (посадки) выпускных клапанов. Расход воздуха — 0,78 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 600 об/мин

В процессе оптимизации управления приводом значения эффективного КПД рассматривались в качестве критерия оптимальности управления.

Часть результатов моделирования рабочего процесса дизеля представлены на рис. 1–8, которые наглядно показывают изменения эффективного КПД в зависимости от фаз газораспределения.

### Заключение

Из анализа результатов можно сделать следующие выводы:

Изменение фаз газораспределения оказывает существенное влияние на показатели рабочего процесса дизельного двигателя во всех режимах его работы.

Номинальные значения фаз газораспределения не обеспечивают оптимального качества рабочего процесса дизеля в режимах, отличных от номинальных.

Применение управляемого привода органов газораспределения и оптимизация закона управления ими позволит повысить среднеэксплуатационное значение эффективного КПД дизеля.

### Библиографический список

1. Хамидов О. Р. Совершенствование качества работы тепловозного дизеля путем внедрения управляемых кла-

панов газораспределения / О. Р. Хамидов, Б. Т. Кулманов // DEVELOPMENT AND INNOVATIONS IN SCIENCE. International scientific-online conference. — С. 30–32.

2. Грачев В. В. Локомотивные энергетические установки: основы теории рабочих процессов тепловозных дизелей / В. В. Грачев, В. А. Кручек, А. В. Грищенко и др. — СПб.: Петербургский государственный университет путей Императора Александра сообщений I, 2022.

3. Совин К. Г. Изменяемые фазы газораспределения / К. Г. Совин, Н. О. Богатова // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. — 2018. — № 1-2.

4. Кабышев В. Зачем менять фазы газораспределения / В. Кабышев // Драйв. — 11.07.2007.

5. Соснин Д. А. Автоматизированный электромагнитный привод газораспределительных клапанов поршневого ДВС: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Д. А. Соснин. — М., 2005. — 204 с.

6. Балабин В. Н. Научные основы создания регулируемых приводов газораспределения локомотивных двигателей внутреннего сгорания нового поколения: дисс. ... д-ра техн. наук / В. Н. Балабин. — М.: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), 2010.

7. Кузнецов А. Г. Исследование методов интенсификации переходных процессов дизель-генератора / А. Г. Кузнецов, С. В. Харитонов, Ин Лю // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2018. — № 6. — С. 50–58.

8. Лю Ин Анализ индикаторных диаграмм дизельного двигателя при отключении цилиндров / Ин Лю, А. Г. Кузнецов, С. В. Харитонов // *Двигателестроение*. — 2019. — № 2. — С. 9–16.

9. Лю Ин Анализ рабочего процесса дизельного двигателя при отключении цилиндров / Ин Лю, А. Г. Кузнецов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. — 2019. — № 11. — С. 9–18.

Дата поступления: 25.05.2023

Решение о публикации: 15.06.2023

**Контактная информация:**

ХАМИДОВ Отабек Рустамович — д-р техн. наук, проф.;  
otabek.rustamovich@yandex.ru

КУЛМАНОВ Баходир Тошболтаевич — докторант PhD;  
mexanikuz1986@gmail.com

## Evaluation of Diesel Locomotive Performance Using Controlled Valves

O. R. Khamidov, B. T. Kulmanov

Tashkent University of Transport, 1, Temiryulchilar str., Tashkent, Republic of Uzbekistan

**For citation:** Khamidov O. R., Kulmanov B. T. Evaluation of Diesel Locomotive Performance Using Controlled Valves // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 577–585. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-577-585

### Summary

**Purpose:** Evaluation of the quality of diesel locomotive operation using controlled valves. **Methods:** Software and data analysis methods are used to evaluate the performance of a diesel locomotive by adjusting and controlling the valve timing. In the process of optimizing drive control, the efficiency values have been considered as a criterion for the optimality of control. **Results:** The operating modes of the diesel engine of a real diesel locomotive have been investigated and the distribution of its working time by the positions of the driver's controller has been analyzed. Using a mathematical model of a diesel engine, the main technical and economic parameters of the object under study have been calculated with a change in the valve timing and air flow. Graphs have been analyzed and compiled that characterize the efficiency of changing the valve timing in the form of a dependence of the relative efficiency from cyclic supply for two intermediate modes of diesel operation with varying air consumption. **Practical significance:** The results of the conducted research can be used in engineering and design work to replace serial gas distribution drives with automatic controlled drives.

**Keywords:** Controlled gas distribution drives, efficiency, valve timing, gas distribution phases, diesel, valve.

### References

1. Grachev V. V., Kruchek V. A., Grishchenko A. V. et al. *Lokomotivnye energeticheskie ustanovki: osnovy teorii rabochikh protsessov teplovozykh dizeley* [Locomotive power plants: fundamentals of the theory of working processes of diesel engines]. Saint Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey Imperatora Aleksandra soobshcheniy I Publ., 2022. (In Russian)

2. Sovin K. G., Bogatova N. O. *Izmenyaemye fazy gazoraspredeleniya* [Variable valve timing].

*Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont* [Agricultural machinery: maintenance and repair]. 2018, Iss. 1-2. (In Russian)

3. Kabyshev V. *Zachem menyat' fazy gazoraspredeleniya* [Why change the valve timing]. *Drayv* [Drive]. 11.07.2007. (In Russian)

4. Sosnin D. A. *Avtomatizirovannyy elektromagnitnyy privod gazoraspredelitel'nykh klapанov porshneвого DVS: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03* [Automated electromagnetic drive of gas distribution valves of a



reciprocating internal combustion engine: dis. ... cand. tech. Sciences]. Moscow, 2005, 204 p. (In Russian)

5. Balabin V. N. *Nauchnye osnovy sozdaniya reguliruemyykh privodov gazoraspredeleniya lokomotivnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya novogo pokoleniya: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific foundations for creating adjustable gas distribution drives for locomotive internal combustion engines of a new generation]. Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya (MIIT) Publ., 2010. (In Russian)

6. Khamidov O. R., Kulmanov B. T. *Sovershenstvovanie kachestva raboty teplovoznogo dizelya putem vnedreniya upravlyaemykh klapanov gazoraspredeleniya* [Improving the quality of diesel locomotive operation by introducing controlled gas distribution valves]. DEVELOPMENT AND INNOVATIONS IN SCIENCE. International scientific-online conference, pp. 30–32. (In Russian)

7. Kuznetsov A. G., Kharitonov S. V., Lyu In. *Issledovanie metodov intensivatsii perekhodnykh protsessov dizel'-generatora* [Research methods for intensification of diesel generator transient processes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*

[News of higher educational institutions. Mechanical engineering]. 2018, Iss. 6, pp. 50–58. (In Russian)

8. Lyu In, Kuznetsov A. G., Kharitonov S. V. *Analiz indikatornykh diagramm dizel'nogo dvigatelya pri otklyuchenii tsilindrov* [Analysis of indicator diagrams of a diesel engine when cylinders are turned off]. *Dvigatelsestroenie* [Engine building]. 2019, Iss. 2, pp. 9–16. (In Russian)

9. Lyu In, Kuznetsov A. G. *Analiz rabocheho protsessa dizel'nogo dvigatelya pri otklyuchenii tsilindrov* [Analysis of the working process of a diesel engine when the cylinders are turned off]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Engineering]. 2019, Iss. 11, pp. 9–18. (In Russian)

Received: May 25, 2023

Accepted: June 15, 2023

**Author's information:**

Otabek R. KHAMIDOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; otabek.rustamovich@yandex.ru

Bakhodir T. KULMANOV — PhD Student; mexanikuz1986@gmail.com