

УДК 621.436

doi: 10.18698/0536-1044-2020-1-43-50

Формирование статических характеристик дизельного двигателя

А.Г. Кузнецов, С.В. Харитонов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Formation of Static Characteristics of a Diesel Engine

A.G. Kuznetsov, S.V. Kharitonov

Bauman Moscow State Technical University

Использование современных систем топливоподачи и электронных блоков для управления дизельным двигателем позволяет ему формировать характеристики, ориентированные на конкретных потребителей энергии. В этих условиях вид характеристик двигателя определяется работой системы воздухообеспечения. Рассмотрено формирование статических характеристик перспективного дизельного двигателя Д500 для тепловозных и судовых энергетических установок. Моделирование режимов работы дизеля выполнено на компьютерных моделях в программных комплексах MATLAB/Simulink и Дизель-РК. Приведены варианты протекания внешней скоростной характеристики дизеля при различных способах регулирования турбокомпрессора: использовании турбины изменяемой геометрии и регистровом наддуве. Ограничение подачи топлива проведено по коэффициенту избытка воздуха и максимальному давлению в цилиндрах двигателя. Для турбины изменяемой геометрии получена матрица положений лопаток направляющего аппарата из условия оптимизации режимов дизеля по топливной экономичности. Показаны возможности получения экономической характеристики дизеля, на режимах которой в тепловозных и судовых энергетических установках достигается минимальный расход топлива.

Ключевые слова: дизельный двигатель, внешняя скоростная характеристика, моделирование режимов работы, топливная экономичность, регулирование турбокомпрессора, лопатки направляющего аппарата

The introduction of modern diesel fuel supply systems and the use of electronic components in control systems provide new possibilities for shaping engine characteristics targeted at specific energy consumers. Under these conditions, the type of engine characteristics is determined by the operation of the air supply system. This work examines the formation of static characteristics for a promising D500 diesel engine for train and ship power plants. Modeling of the diesel operation modes is carried out on computer models in the MATLAB/Simulink and Diesel-RK software packages. Variants of the full-load curves of the diesel engine are presented for different ways of turbocharger control: using a turbine of variable geometry and with sequential turbocharging. The fuel supply is limited according to the air-fuel ratio and the maximum pressure in the engine cylinders. For a variable geometry turbine, a matrix of the positions of the guide vane blades is obtained from the condition of optimizing diesel modes for fuel efficiency. Possibilities to obtain the efficiency characteristic that would provide the minimal fuel consumption for train and ship power plants are shown.

Keywords: diesel engine, external speed characteristic, modeling of operating modes, fuel efficiency, turbocharger control, guide vane blades

Формирование требуемых характеристик двигателя внутреннего сгорания (ДВС) является важным этапом его разработки и подготовки для практического использования. Вид характеристик ДВС должен соответствовать конкретному типу потребителя энергии и условиям эксплуатации энергетической установки (ЭУ). Применение новых систем топливоподачи и электронных программируемых устройств для управления ДВС открывает ему новые возможности в формировании характеристик [1–3].

Как показывает практика, ДВС, имеющие одинаковые размерность и конструктивное исполнение, могут существенно отличаться друг от друга по мощности и виду эксплуатационных характеристик. Примером являются дизельные двигатели (далее дизели) фирмы Liebherr [4]. Так, варианты 12-цилиндровой V-образной модификации дизеля D9512 имеют существенные различия по мощности и виду универсальной характеристики. Особенно важна возможность формирования необходимых характеристик их среднеоборотных моделей.

Большой интерес представляют перспективные российские разработки в области двигателестроения. В последние годы появилось несколько принципиально новых семейств дизелей для различных сфер применения. Одной из перспективных моделей является дизель Д500 размерностью 26,5/31 с V-образным расположением цилиндров производства ОАО «Коломенский завод» [5]. Модификации дизелей с 12, 16 и 20 цилиндрами предназначены для использования на водном и железнодорожном транспорте, а также на электростанциях.

Цель работы — проведение расчетного исследования возможностей формирования характеристик дизеля Д500 транспортного назначения.

Дизель Д500 оборудован топливной аппаратурой разделенного типа с индивидуальными топливными насосами высокого давления и дискретным воздействием на цикловую подачу электромагнитными клапанами, установленными в нагнетательных трубопроводах этих насосов. Такая система способна подавать любое требуемое количество топлива при различных режимах работы дизеля, поэтому основным способом формирования его характеристик является направленное воздействие на систему воздухообеспечения.

Для проведения расчетного исследования в программных комплексах MATLAB/Simulink

[6] и Дизель-РК [7] составлены компьютерные модели 12-цилиндрового дизеля Д500 номинальной мощностью 4412 кВт при частоте вращения коленчатого вала (далее частота вращения) $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ с рассматриваемым типом топливной аппаратуры и возможностями регулирующих воздействий на топливоподачу. В каждом ряду цилиндров V-образного дизеля установлены турбокомпрессоры (ТК) АВВ TPR56 [8] системы наддува, планируемые для применения в этой модификации ДВС.

На первом этапе исследования проведен анализ возможности формирования внешней скоростной характеристики (ВСХ) дизеля. Установившиеся режимы дизеля, соответствующие тепловозной характеристике железнодорожного транспорта и винтовой характеристике для судовых условий, расположены ниже ВСХ.

Однако целесообразно рассмотреть возможность достижения максимальной мощности дизеля на ВСХ, так как запас мощности необходим для интенсификации переходных процессов при изменении режимов работы ЭУ в случае увеличения нагрузки или задаваемой частоты вращения.

Ограничивают подачу топлива в режимах ВСХ дизеля значения максимального давления сгорания p_z по условиям прочности и коэффициента избытка воздуха α по условиям протекания рабочего процесса (недопустимой дымности отработавших газов) [9–11].

Линия 1, показанная на рис. 1, соответствует ВСХ дизеля Д500, построенной в координатах «частота вращения n — крутящий момент M », при штатной работе обоих ТК. Ограничение по топливоподаче выбиралось исходя из допустимого значения коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,4$. Такой подход соответствует использованию пневмокоррекции при работе дизеля.

При частоте вращения $n = 300 \dots 600 \text{ мин}^{-1}$ крутящий момент практически не изменяется, так как турбинам не хватает энергии отработавших газов для эффективной раскрутки роторов ТК. Давление наддува низкое, поэтому мощность и крутящий момент дизеля невелики. Полученные режимы ВСХ до частоты вращения $n = 750 \text{ мин}^{-1}$ неприемлемы для нормальной работы дизеля, вследствие чего необходимо использовать регулируемый турбонаддув.

Линия 2, показанная на рис. 1, получена для ВСХ при работе турбин с изменяемым положением лопаток направляющего аппарата (НА).

При таком варианте развиваются достаточная частота вращения ТК и давление наддува, поэтому крутящий момент возрастает [12, 13]. С учетом пневмокоррекции по коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 1,4$ увеличиваются доступное значение топливоподачи и крутящий момент двигателя.

Эффективность регулирования НА турбины проявляется на режимах частичных частот вращения, где уменьшение угла расположения направляющих лопаток НА обеспечивает увеличение силы давления отработавших газов на лопатки колеса турбины. По сравнению с работой дизеля без регулирования обоих ТК наблюдается значительное повышение крутящего момента при частоте вращения $n = 400 \dots 700 \text{ мин}^{-1}$.

Как показали расчеты, при частичных режимах энергии отработавших газов недостаточно для нормальной работы двух ТК. В связи с этим целесообразно рассмотреть вариант регистрового наддува, когда весь поток газов направлен на один ТК, а другой агрегат наддува отключен. Работе дизеля при использовании одного нерегулируемого ТК с учетом пневмокоррекции по коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 1,4$ соответствует линия 3, показанная на рис. 1.

Доступный крутящий момент при частоте вращения $n = 500 \dots 700 \text{ мин}^{-1}$ больше, чем в двух предыдущих вариантах турбонаддува. При малой нагрузке до частоты вращения $n = 700 \text{ мин}^{-1}$, когда количества отработавших газов недостаточно для привода двух турбин, функционирование одного агрегата наддува наиболее эффективно.

При большей частоте вращения воздуха от одного ТК не хватает для питания дизеля и доступный крутящий момент значительно снижается. Если при $n = 730 \text{ мин}^{-1}$ провести подключение второго ТК, то становится возможным выйти на характеристику 1 с большими значениями крутящего момента, когда питание дизеля осуществляется двумя ТК. Такой вариант организации наддува обеспечивает наибольшие значения крутящего момента дизеля во всем диапазоне частот вращения с учетом пневмокоррекции.

Проведенные расчеты показали, что с точки зрения ограничения топливоподачи по коэффициенту избытка воздуха наибольшие доступные крутящие моменты на ВСХ могут быть получены либо при использовании турбин с регулируемым НА, либо при комбинированном

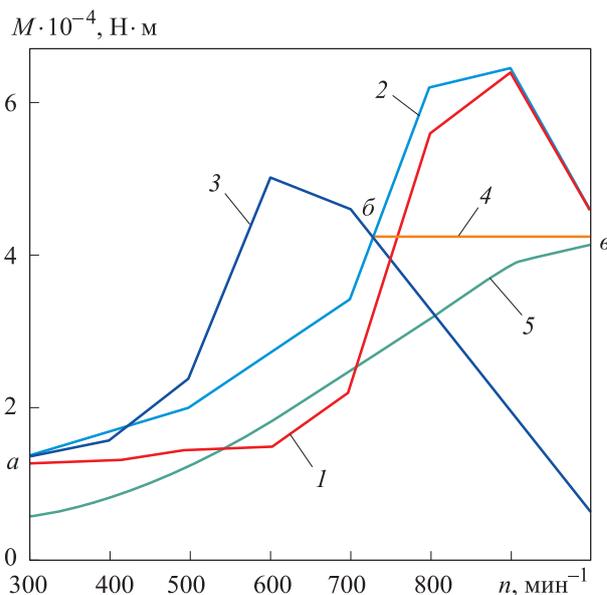


Рис. 1. ВСХ дизеля Д500 при различных режимах его работы

наддуве, когда при частоте вращения $n < 730 \text{ мин}^{-1}$ работает один ТК, а при большей частоте вращения оба ТК функционируют в штатном режиме.

Здесь необходимо отметить, что практическая реализации регистрового наддува сопряжена с определенными техническими сложностями. Требуется рациональный алгоритм подключения второго ТК, обеспечивающий надежный переход к штатной работе системы наддува при увеличении частоты вращения. Поэтому вариант регулируемого НА турбин более предпочтителен.

Если на режимах частичной частоты вращения ограничение подачи топлива на ВСХ происходит по значению коэффициента избытка воздуха α , то на режимах больших нагрузок решающим показателем становится максимальное давление сгорания p_z . Линия 4, приведенная на рис. 1, получена с учетом максимального давления в цилиндре $p_z \leq 20 \text{ МПа}$.

Расчеты показали, что при частоте вращения $n > 700 \text{ мин}^{-1}$ два ТК обеспечивают дизель достаточным количеством воздуха, но достижение больших крутящих моментов сопряжено с превышением допустимого давления p_z .

В результате проведенного расчетного анализа ВСХ 12-цилиндрового дизеля Д500 с использованием двух ТК АВВ ТРР56 с регулируемым НА соответствует линия *абв* (см. рис. 1), состоящая из двух участков: *аб* ($n = 300 \dots 700 \text{ мин}^{-1}$), когда ограничение подачи топлива

осуществляется по значению коэффициента избытка воздуха, и b_v ($n = 700 \dots 1000 \text{ мин}^{-1}$) с ограничением подачи топлива по максимальному давлению сгорания.

Недостаточное снабжение дизеля воздухом в частотном диапазоне $n = 300 \dots 750 \text{ мин}^{-1}$ при двух нерегулируемых ТК свидетельствует о том, что для 12-цилиндровой модификации дизеля Д500, возможно, имеет смысл использовать ТК большей размерности. Применение регулируемого НА турбин обеспечит снабжение рассмотренного дизеля необходимым количеством воздуха турбокомпрессорами АВВ ТРР56.

Наличие регулируемого наддува открывает новые возможности по влиянию на рабочий процесс дизеля во всем диапазоне возможных режимов его работы [14–16].

На втором этапе исследования проведена оптимизация режимов дизеля по топливной экономичности. Режим работы дизеля рассмотрен как сочетание частоты вращения n и крутящего момента M , которому соответствует определенная цикловая подача топлива g_u . Критерием оптимальности принят эффективный удельный расход топлива g_e , варьируемым параметром — угол положения лопаток НА турбины φ .

Сетка исследуемых режимов получена путем разбиения поля режимов дизеля со следующими шагами: по частоте вращения $\Delta n = 100 \text{ мин}^{-1}$, по цикловой подаче топлива $\Delta g_u = 0,5 \text{ г/цикл}$. На каждом исследованном режиме определялся угол положения лопаток НА турбины φ_{\min} (%), при котором достигался минимальный эффективный удельный расход топлива $g_{e\min}$. Максимальное значение $\varphi = 100 \%$

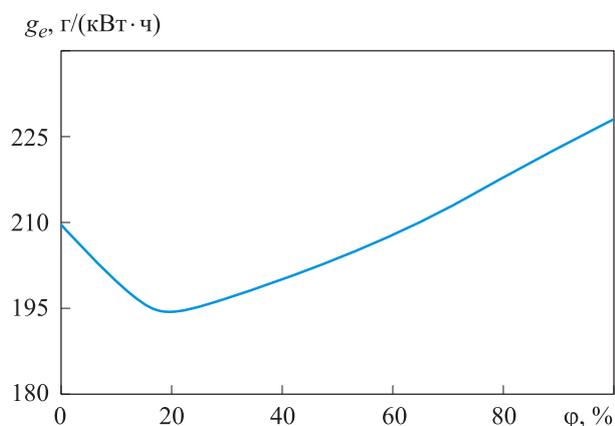


Рис. 2. Определение оптимального положения НА турбины в режиме работы дизеля с частотой вращения $n = 800 \text{ мин}^{-1}$ и крутящим моментом $M = 28\,000 \text{ Н} \cdot \text{м}$

соответствовало полному открытию проходного сечения НА.

Процесс оптимизации проиллюстрирован на рис. 2, где для примера показана зависимость эффективного удельного расхода топлива g_e от угла положения лопаток НА турбины φ на режиме работы дизеля с частотой вращения $n = 800 \text{ мин}^{-1}$ и крутящим моментом $M = 28\,000 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Минимальное значение эффективного удельного расхода топлива $g_{e\min} = 195 \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$ получено при угле положения лопаток НА турбины $\varphi = 20 \%$, которое и выбрано в качестве φ_{\min} для данного режима. Из рис. 2 видно, насколько значительное влияние на эффективный удельный расход топлива оказывает такой регулируемый параметр, как угол положения лопаток НА турбины.

Результаты оптимизационных расчетов. На рис. 3 показана поверхность значений угла положения лопаток НА турбины φ_{\min} (%), при которых достигается минимальный эффективный удельный расход топлива $g_{e\min}$ для данного режима работы дизеля. Как видно из рис. 3, на режимах малых частот вращения и нагрузок НА открыт частично, с увеличением этих параметров его надо открывать больше.

На рис. 4 в трехмерном пространстве параметров дизеля (частоты вращения n , крутящего момента M , угла положения лопаток НА турбины φ) показано, как минимальный эффективный удельный расход топлива $g_{e\min}$ меняется в зависимости от режима работы дизеля.

Цвет точки характеризует значение минимального эффективного удельного расхода топлива на каждом режиме. Изменение цвета от зеленого к красному показывает увеличение $g_{e\min}$. По сути, матрица точек на рис. 4 аналогична универсальной характеристике дизеля с линиями постоянных значений g_e . Различие состоит в том, что здесь показано качественное изменение минимального эффективного удельного расхода топлива $g_{e\min}$ для разных режимов работы дизеля при оптимальном угле положения лопаток НА турбины φ_{opt} .

В тепловозных и судовых ЭУ, где энергия от ДВС передается к движителю (колесам или винту) через электрическую трансмиссию, баланс между отдельными частями этой установки соблюдается только по мощности. Так как мощность определяется произведением крутя-

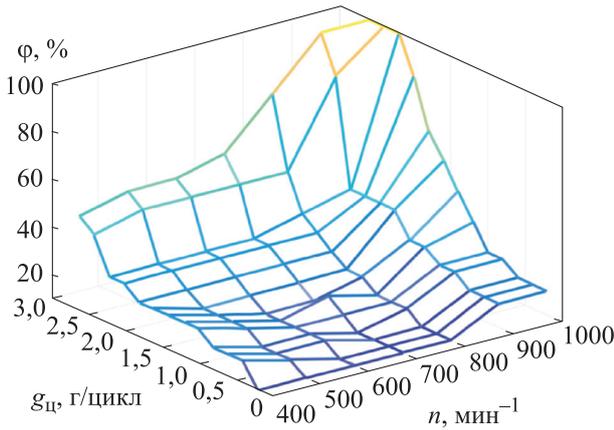


Рис. 3. Матрица оптимальных значений угла положения лопаток НА турбины

щего момента на угловую скорость, в таких ЭУ можно осуществить развязку режимов работы дизеля и движителя по частоте вращения и крутящему моменту при сохранении мощности. Это открывает дополнительные возможности оптимизации режимов дизеля по выбранному критерию.

В соответствии с выбранным критерием топливной экономичности исследованы возможности организации работы 12-цилиндрового дизеля Д500 в составе дизель-электри-

ческих тепловозных и судовых ЭУ с минимальным расходом топлива.

На рис. 5 в виде набора точек зеленого и красного цвета дана проекция поверхности значений $g_{e\min}$, соответствующих оптимальным углам положения лопаток НА турбины на поле режимов дизеля. В этом поле есть экономическая характеристика, образованная режимами минимального эффективного удельного расхода топлива при различных значениях мощности: $0,2P_{\max}$; $0,4P_{\max}$; $0,6P_{\max}$; $0,8P_{\max}$.

На рис. 5 экономической характеристике соответствует синяя линия, проходящая через точки светло-зеленого цвета, в которых получены минимальные значения эффективного удельного расхода топлива. Оранжевые линии постоянной мощности в параметрах режима двигателя «частота вращения n — крутящий момент M » имеют вид гипербол.

Для каждой мощности двигателя режим минимального расхода топлива соответствует точке пересечения гиперболы с экономической характеристикой. Экономическая характеристика показана также на рис. 4 (синяя линия) и рис. 1 (линия 5). Здесь можно увидеть значения углов положения лопаток НА турбины на режимах экономической характеристики.

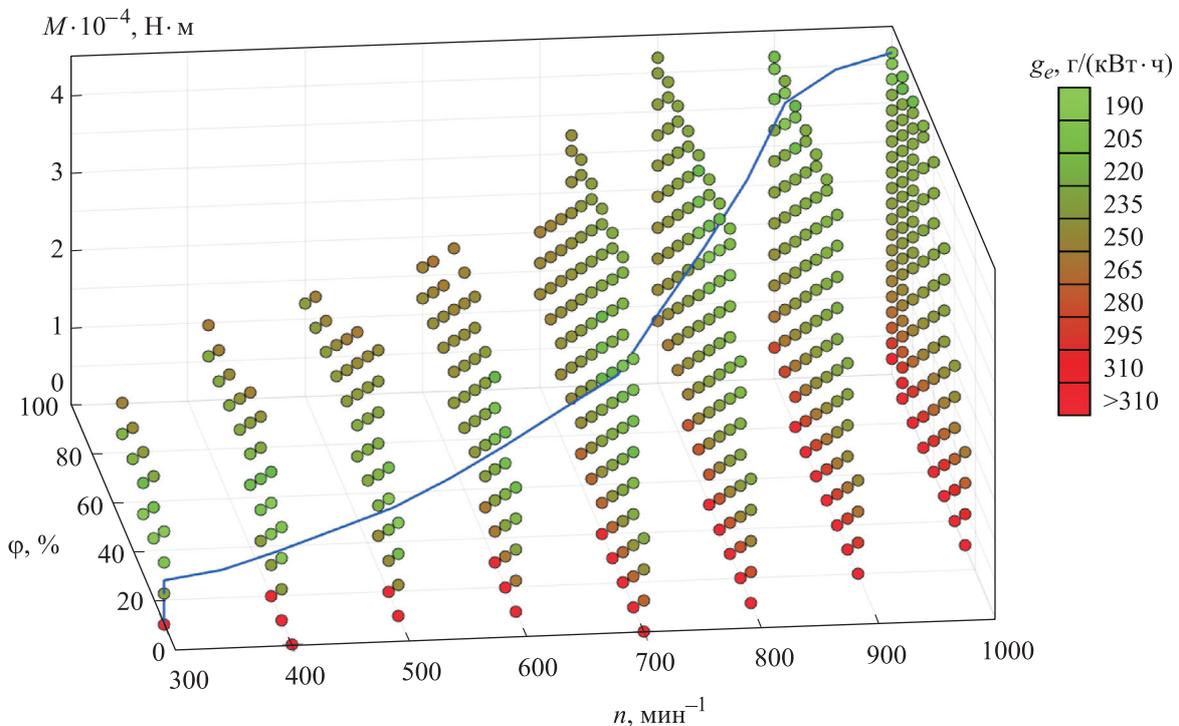


Рис. 4. Изменение минимального эффективного удельного расхода топлива для разных режимов работы дизеля при оптимальном угле положения лопаток НА турбины

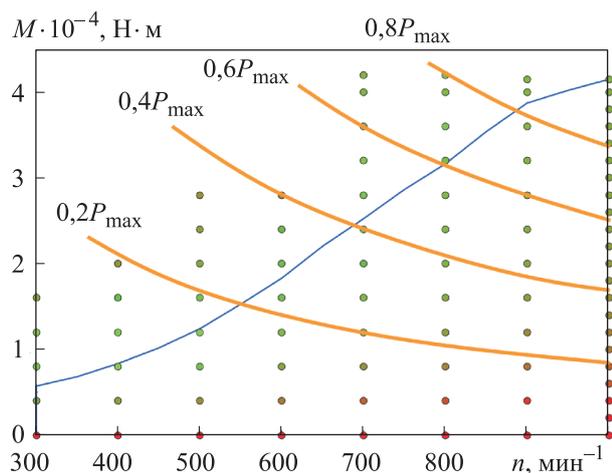


Рис. 5. Экономическая характеристика дизеля Д500

Приведенная на рис. 4 и 5 экономическая характеристика дизеля Д500 определена в результате оптимизации его работы как по углу положения лопаток НА турбины, так и по наилучшему сочетанию частоты вращения и крутящего момента при заданной мощности.

В транспортных ЭУ с электрической трансмиссией необходимую мощность движителя можно получить при различных сочетаниях частоты вращения и крутящего момента дизеля. Если режимы тепловозной или судовой характеристики будут лежать на предлагаемой экономической характеристике, то дизель будет работать на них с минимальным расходом топлива. Для судовых условий применения дизеля представляет интерес также анализ возможных режимов ЭУ при работе на винт регулируемого шага.

Для практической реализации предложенных характеристик и параметров дизеля необходимо использовать электронный блок в системе управления ЭУ. В МГТУ им. Н.Э. Баумана ведется разработка системы комплексного адаптивного управления дизелями, предназначенной для различных сфер применения.

Литература

- [1] Леонов И.В. Алгоритм управления экономичностью силового агрегата с дизельным двигателем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2018, № 1(118), с. 83–91, doi: 10.18698/0236-3941-2018-1-83-91
- [2] Надеев А.И., Буй Н.Х., Головки С.В., Свирипов Ф.В. Моделирование судовой дизеля как объекта управления на базе нечеткой логики. *Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология*, 2012, № 1, с. 109–116.
- [3] Kadu S.B., Patil C.Y. Design and Implementation of Stable PID Controller for Interacting Level Control System. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 79, pp. 737–746, doi: 10.1016/j.procs.2016.03.097

Структура системы управления ориентирована на комплексное регулирование параметров дизеля для соответствия современным экономическим и экологическим требованиям. Изготовлен образец электронного блока, который в составе системы управления прошел успешные испытания на одноцилиндровом отсеке дизеля Д500.

В разработанной системе управления реализованы каналы воздействия на системы топливоподачи и турбонаддува. Для экспериментальной проверки результатов расчетного исследования по формированию характеристик дизеля представляет интерес проведение испытаний новой системы управления на развернутом двигателе.

Выводы

1. Формирование характеристик ДВС в соответствии с типом потребителей энергии — актуальная задача двигателестроения. При использовании современных систем топливоподачи и управления основным способом формирования характеристик ДВС является регулирование системы воздухообеспечения.

2. Методом расчетного исследования на компьютерной модели проведено формирование статических характеристик 12-цилиндровой модификации дизеля Д500. Показан возможный вид его ВСХ при использовании штатной системы наддува, турбокомпрессоров с регулируемым НА турбины и регистрового наддува.

3. Для системы наддува с регулируемым НА турбины выполнена оптимизация режимов работы дизеля по топливной экономичности. Получена матрица углов положения лопаток НА.

4. Для варианта использования дизеля в тепловозной и судовой ЭУ с электрической трансмиссией определена экономическая характеристика, обеспечивающая работу дизеля с минимальным расходом топлива.

- [4] *Liebherr D9512*. URL: <https://www.liebherr.com/shared/media/components/documents/combustion-engines/liebherr-combustion-engines-product-line-brochure-en-web.pdf> (accessed 14 June 2019).
- [5] *Коломенский завод. Дизельный двигатель Д500*. URL: http://www.kolomnadiesel.com/catalog/diesels/section_detail.php?SECTION_ID=18 (дата обращения 14 июля 2018).
- [6] *MATLAB. Simulink*. URL: <https://matlab.ru/products/simulink> (дата обращения 14 июня 2019).
- [7] Malastowsky N.S., Barchenko F.B., Grekhov L.V., Kuleshov A.S. Shaping of injection rate for reducing emission level of high-speed engine. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11(23), pp. 11189–11198.
- [8] *ABB TPR56*. URL: <https://new.abb.com/turbocharging/turbochargers/tp56> (дата обращения 14 июня 2019).
- [9] Di Sarli V., Di Benedetto A. Modeling and simulation of soot combustion dynamics in a catalytic diesel particulate filter. *Chemical Engineering Science*, 2015, vol. 137, pp. 69–78, doi: 10.1016/j.ces.2015.06.011
- [10] Di Sarli V., Landi G., Lisi L., Saliva A., Di Benedetto A. Catalytic diesel particulate filters with highly dispersed ceria: Effect of the soot-catalyst contact on the regeneration performance. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, vol. 197, pp. 116–124, doi: 10.1016/j.apcatb.2016.01.073
- [11] Kim G., Moon S., Lee S., Min K. Numerical Analysis of the Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engines with Multiple Injection Strategies Using a Modified 2-D Flamelet Model. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 1292, doi: 10.3390/en10091292
- [12] Feneley A., Pesyridis A., Andwari A. Variable Geometry Turbocharger Technologies for Exhaust Energy Recovery and Boosting. A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 71, pp. 959–975, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.125
- [13] Park Y., Park I., Min K., Sunwoo M. Model-Based feedforward control of the VGT in a diesel engine based on empirical models of compressor and turbine efficiencies. *International Journal of Automotive Technology*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 561–570, doi: 10.1007/s12239-015-0057-7
- [14] Lee W., Schubert E., Li Y., Li S., Bobba D., Sarlioglu B. Overview of Electric Turbocharger and Supercharger for Downsized Internal Combustion Engines. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, vol. 3, pp. 36–47, doi: 10.1109/TTE.2016.2620172
- [15] Altosole M., Campora U., Figari M., Laviola M., Martelli M. A Diesel Engine Modelling Approach for Ship Propulsion Real-Time Simulators. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, vol. 7, doi: 10.3390/jmse7050138
- [16] Boccardo G., Millo F., Piano A., Arnone L., Manelli S., Fagg S., Gatti P., Herrmann O.E., Queck D., Weber J. Experimental investigation on a 3000 bar fuel injection system for a SCR-free non-road diesel engine. *Fuel*, 2019, vol. 243, pp. 342–351, doi: 10.1016/j.fuel.2019.01.122

References

- [1] Leonov I.V. Efficiency Control Algorithm of Diesel Power Unit. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2018, no. 1(118), pp. 83–91 (in Russ.), doi: 10.18698/0236-3941-2018-1-83-91
- [2] Nadeyev A.I., Buy N.Kh., Golovko S.V., Svirepov F.V. Modelling of the ship diesel engine as an object of control on the basis of fuzzy logic. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: marine engineering and technologies*, 2012, no. 1, pp. 109–116 (in Russ.).
- [3] Kadu C.B., Patil C.Y. Design and Implementation of Stable PID Controller for Interacting Level Control System. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 79, pp. 737–746, doi: 10.1016/j.procs.2016.03.097
- [4] *LIEBHERR D9512*. Available at: <https://www.liebherr.com/shared/media/components/documents/combustion-engines/liebherr-combustion-engines-product-line-brochure-en-web.pdf> (accessed 14 June 2019).
- [5] *Kolomenskiy zavod. Dizel'nyy dvigatel' D500* [Kolomna plant. Diesel engine D500]. Available at: http://www.kolomnadiesel.com/catalog/diesels/section_detail.php?SECTION_ID=18 (accessed 14 July 2018).

- [6] MATLAB. Simulink. Available at: <https://matlab.ru/products/simulink> (accessed 14 June 2019).
- [7] Malastowsky N.S., Barchenko F.B., Grekhov L.V., Kuleshov A.S. Shaping of injection rate for reducing emission level of high-speed engine. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11(23), pp. 11189–11198.
- [8] ABB TPR56. Available at: <https://new.abb.com/turbocharging/turbochargers/tp56> (accessed 14 June 2019).
- [9] Di Sarli V., Di Benedetto A. Modeling and simulation of soot combustion dynamics in a catalytic diesel particulate filter. *Chemical Engineering Science*, 2015, vol. 137, pp. 69–78, doi: 10.1016/j.ces.2015.06.011
- [10] Di Sarli V., Landi G., Lisi L., Saliva A., Di Benedetto A. Catalytic diesel particulate filters with highly dispersed ceria: Effect of the soot-catalyst contact on the regeneration performance. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, vol. 197, pp. 116–124, doi: 10.1016/j.apcatb.2016.01.073
- [11] Kim G., Moon S., Lee S., Min K. Numerical Analysis of the Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engines with Multiple Injection Strategies Using a Modified 2-D Flamelet Model. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 1292, doi: 10.3390/en10091292
- [12] Feneley A., Pesyridis A., Andwari A. Variable Geometry Turbocharger Technologies for Exhaust Energy Recovery and Boosting. A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 71, pp. 959–975, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.125
- [13] Park Y., Park I., Min K., Sunwoo M. Model-Based feedforward control of the VGT in a diesel engine based on empirical models of compressor and turbine efficiencies. *International Journal of Automotive Technology*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 561–570, doi: 10.1007/s12239-015-0057-7
- [14] Lee W., Schubert E., Li Y., Li S., Bobba D., Sarioglu B. Overview of Electric Turbocharger and Supercharger for Downsized Internal Combustion Engines. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, vol. 3, pp. 36–47, doi: 10.1109/TTE.2016.2620172
- [15] Altosole M., Campora U., Figari M., Laviola M., Martelli M. A Diesel Engine Modelling Approach for Ship Propulsion Real-Time Simulators. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, vol. 7, doi: 10.3390/jmse7050138
- [16] Boccardo G., Millo F., Piano A., Arnone L., Manelli S., Fagg S., Gatti P., Herrmann O.E., Queck D., Weber J. Experimental investigation on a 3000 bar fuel injection system for a SCR-free non-road diesel engine. *Fuel*, 2019, vol. 243, pp. 342–351, doi: 10.1016/j.fuel.2019.01.122

Статья поступила в редакцию 16.09.2019

Информация об авторах

КУЗНЕЦОВ Александр Гаврилович — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kuzag441@mail.ru).

ХАРИТОНОВ Сергей Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: devilfess@mail.ru).

Information about the authors

KUZNETSOV Aleksandr Gavriilovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Thermal Physics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kuzag441@mail.ru).

KHARITONOV Sergei Viktorovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Thermal Physics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: devilfess@mail.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Кузнецов А.Г., Харитонов С.В. Формирование статических характеристик дизельного двигателя. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 1, с. 43–50, doi: 10.18698/0536-1044-2020-1-43-50

Please cite this article in English as:

Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V. Formation of Static Characteristics of a Diesel Engine. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 1, pp. 43–50, doi: 10.18698/0536-1044-2020-1-43-50