

zaliznichnogo transportu im. akad. V. Lazarjana. - 2011. - №36. - S. 36-41. 4. V. A. Karachinov *Televizionnyye metody diagnostiki forsunkov* / V. A. Karachinov, S. V. Il'in, S. B. Toricin, D. V. Karachinov // *Vestnik Novgorodskogo gos-go un-ta.* - 2004. - №26. - S. 155-160. 5. Fajnljeb B. N. *Metody ispytaniy i is-sledovaniy toplivnoj apparatury avtotrak-tornyh dizelej* / B. N. Fajnljeb, I. G. Golubkov, L. A. Kolchev. - M.: Mashinostroenie, 1965. - 176s. 6. Vitman L. A. *Raspylivanie zhidkosti forsunkami* / L. A. Vitman, B. D. Kal'cnel'son, I. I. Paleev.; pod red. S. S. Kutateladze. - M.: Jenergoizdat, 1962. - 264s. 7. *Podacha i raspylivanie topliva v dize-ljah*; pod red. I. V. Astahova. - M.: Mashino-stroenie, 1972. - 359s. 8. Kutovoj V. A. *Vprysk topliva v dizeljah* / V. A. Kutovoj. - M.: Mashinostroenie, 1981. - 119s. 9. Panasenov N. S. *O vlijanii turbulentnoj zhidkoj strui na*

raspylivanie / N. S. Panase-nov. - *ZhTF*, - 1951. - HHI. - №2. - S.1012-1020. 10. Zhuravlev A. V. *Raspoznvanie gruppyykh malorazmernih ob#ektov na izobrazhenijah v uslovijah minimal'noj apriornoj informacii o prirode ob#ektov* / A. V. Zhuravlev, S. I. Ivashov, V. V. Razevig // *Tr. 50-j nauch. prakt. konf. MFTI, Ch. 3. - Ajerofizika i kosmicheskie issle-dovaniya, T.1.* - M.:Dolgoprudnyj. - 2007. - S. 35-36. 11. Kostjuk Ju. L. *Algoritmy vektoriza-cii cvetnyh rastrovnyh izobrazhenij na osnove trianguljacii i ih realizacija* / Ju. L. Kostjuk, A. B. Kon, Ju. L. Novikov // *Vestn.ik Tomsk. gos. un-ta.* - 2003. - №280. - S. 275-280. 12. Bratuta Je. G. *Diagnostika kapel'nyh potokov pri vnesnih vozdeystvijah* / Je. G. Bra-tuta. - H.: Viwa shk., 1987. - 144s.

УДК 621.436

А.Е. Свистула, д-р техн. наук, Г.Д. Матиевский, инж.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ

Постановка задачи исследования

Использование дизеля как первичного двигателя для привода «всережимных» электрических генераторов в гибридных энергетических установках и развитие электронных систем управления открывает возможность получения заданной мощности на оптимальном, по расходу, топлива скоростном режиме и позволяет добиться существенной экономии топлива.

Для выбора оптимального режима работы энергетической установки с дизелем необходимо располагать оптимизационными характеристиками дизеля и потребителя (генератора).

В рамках данной статьи будем рассматривать оптимизационную скоростную характеристику дизеля (ОСХД). Под ОСХД будем понимать зависимость частоты вращения коленчатого вала от мощности, построенной в абсолютных или относительных величинах, и обеспечивающей наименьший расход топлива для заданного значения мощности.

Подобная характеристика объединяет оптимальные по расходу топлива режимы работы двигателя, принадлежащие характеристикам постоянной мощности (ХПМ). Последние представляют зависимость эффективного расхода топлива (и других показателей) от частоты n при условии поддержания заданного постоянного значения мощности двигателя.

В работах [1, 2] предложен поиск оптимальной частоты n_{opt} на ХПМ, основанный на предположении наличия минимума удельного эффективного расхода топлива g_e или максимума КПД η_e на

типовой нагрузочной характеристике при (0,7-0,8) $N_{e ном}$ для любой частоты n в диапазоне ее изменения от номинальной $n_{ном}$ до n_m , соответствующей максимальному крутящему моменту. Поиск n_{opt} сводился к определению частоты, для которой при заданном значении мощности $N_{e const}$ загрузка двигателя составляет (70-80) % по отношению к мощности на внешней скоростной характеристике (ВСХ). Такой подход предопределил поиск n_{opt} для мощностей меньших (0,7-0,8) $N_{e ном}$. Для значений мощностей от номинальной до (0,7-0,8) $N_{e ном}$ оптимальная частота принималась равной $n_{ном}$, т.е. работа дизеля осуществляется по нагрузочной характеристике на номинальной частоте с уменьшающимся расходом топлива g_e (рис. 1).

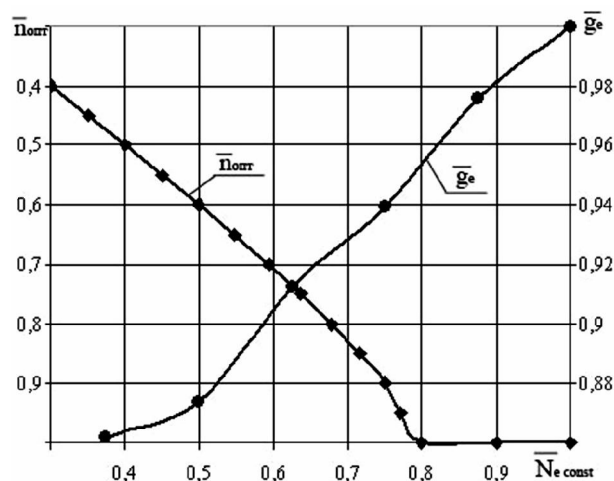


Рис. 1. Зависимости оптимальной частоты n_{opt} и потенциального снижения расхода топлива от мощности $\bar{N}_{e const}$

Однако для некоторых двигателей в особенности с газотурбинным наддувом (ГТН) по ряду соображений максимум КПД η_e (или минимум g_e) по нагрузочным характеристикам на высоких частотах вращения не достигается. Наблюдается монотонное медленное увеличение η_e в области высоких нагрузок более $(0,7...0,8) N_{e\text{ ном}}$ без достижения перегиба функции $\eta_e = f(N_e)$. Максимум КПД η_e приходится на режим полной загрузки двигателя, находящийся на внешней скоростной характеристике. В связи с принятым постоянством частоты вращения по оптимизационной характеристике $\bar{n}_{\text{опт}} = 1$ (т.е. $n_{\text{опт}} = n_{\text{ном}}$) в диапазоне мощностей $[N_{e\text{ ном}} \div (0,7...0,8) N_{e\text{ ном}}]$ не удастся реализовать эффект снижения расхода топлива. Необходима корректировка зависимости $n_{\text{опт}}$ от $N_{e\text{ const}}$ на указанном участке изменения мощности.

В данной статье проводится оценка правильности выбранной оптимизации частоты вращения коленчатого вала по методике, предлагаемой в [1-4], обсуждается выбор направлений корректировки зависимости $n_{\text{опт}} = f(N_{e\text{ const}})$, раскрываются особенности работы дизеля по оптимизационной характеристике, учет которых важен для решения задач снижения расхода топлива и токсичности отработавших газов (ОГ).

Критерием правильности выбора оптимизационной характеристики является сравнение эффективных КПД по оптимизационной и внешней скоростной характеристикам. При равных мощностях КПД η_e по оптимизационной характеристике должен быть выше, чем по ВСХ. Оценка эффекта снижения расхода топлива оптимизацией $n_{\text{опт}} = f(N_{e\text{ const}})$ осуществляется сравнением эффективных КПД по оптимизационной характеристике и нагрузочной при $n = n_{\text{ном}}$ при условии равных мощностей.

Методика исследования

Для проведения экспериментальных исследований выбран дизель Д-461ВСИ производства ОАО «ПО АМЗ» (Барнаул), имеющий следующие основные характеристики: число цилиндров - 6; диаметр цилиндра - 130 мм; ход поршня - 140 мм; геометрическая степень сжатия - 16,3; газотурбинный наддув без охлаждения наддувочного воздуха - ТКР-9 (Турботехника); газораспределение - 2 клапана на цилиндр; топливный насос - НТД-27 (АЗТН), $d_{\text{пл}} \times h_{\text{пл}} = 10 \text{ мм} \times 12 \text{ мм}$, установочный угол опережения впрыска - 21 град до ВМТ; форсунки - 204. 1112010-02 (АЗПИ), $(\mu f)_p = 0,25...0,27 \text{ мм}^2$, $P_{\text{фо}} = 25^{+1,2} \text{ МПа}$.

Условия испытаний: барометрическое давление - 100,4 кПа, температура окружающего воздуха - 18...20 °С, относительная влажность - 44 %, температура топлива - 18 °С.

Определялись вредные компоненты на выхлопе: q_{NOx} , ppm – концентрация оксидов азота в приведении к NO_2 ; q_{COx} , % об. - концентрация оксида углерода; N , % - дымность (коэффициент ослабления светового потока, приведенный к шкале дымомера оптического типа, $L = 0,43 \text{ м}$).

Программа исследования включала снятие четырех характеристик:

- перегрузочной ветви внешней скоростной характеристики (от $n_{\text{ном}}$ до n_{min} под нагрузкой);
- двух нагрузочных характеристик на номинальной частоте вала $n_{\text{ном}}$ и на минимально устойчивой частоте n_{min} под нагрузкой;
- оптимизационной скоростной характеристики по заданной зависимости $n/n_{\text{ном}} = f(N_e/N_{e\text{ ном}})$ (рис.1) [2].

Анализ результатов исследования

На рис. 2 отражен типичный характер протекания удельного расхода топлива g_e , температуры отработавших газов t_r , коэффициента избытка воздуха α по нагрузочным ($n=1000$ и 2000 мин^{-1}) и внешней скоростной характеристикам. Оптимизационная характеристика получена в соответствии с рис. 1 [2, 3].

Следует отметить, что по нагрузочной характеристике ($n=2000 \text{ мин}^{-1}$) отсутствует перегиб кривой и, соответственно, минимальное значение g_e в области $(0,7...0,8) N_{e\text{ ном}}$, наблюдается монотонное медленное снижение g_e в области высоких нагрузок более $(0,7...0,8) N_{e\text{ ном}}$ без достижения перегиба функции $g_e = f(N_e)$. Таким образом, в диапазоне $(0,65...1,0) N_{e\text{ ном}}$ минимальный расход топлива g_e находится на перегрузочной ветви ВСХ, в диапазоне $(0,4...0,65) N_{e\text{ ном}}$ минимальный g_e будет располагаться на оптимизационной характеристике, при дальнейшем снижении мощности N_e минимальный g_e соответствует значениям нагрузочной характеристики ($n=1000 \text{ мин}^{-1}$).

Коэффициент избытка воздуха в области больших мощностей по оптимизационной характеристике выше, чем по ВСХ. Температура ОГ по оптимизационной характеристике ниже, чем по перегрузочной ветви ВСХ, но выше, чем по нагрузочным характеристикам. Последнее обстоятельство может быть использовано для эффективной ра-

боты средств нейтрализации вредных выбросов ОГ на выхлопе.

На рис. 3 приведены графики выброса COx, NOx и дымности ОГ от мощности по нагрузочным, ВСХ и оптимизационной характеристикам. Наибольшие значения всех трех компонентов (COx, NOx и дымности) наблюдаются в диапазоне мощности (0,45...0,9) $N_{e\text{ ном}}$ при работе двигателя по перегрузочной ветви ВСХ. Значения выброса COx, NOx и дымности ОГ по оптимизационной характеристике значительно меньше, так значения выброса COx практически находятся на одном уровне со значениями COx по нагрузочной характеристике ($n=2000\text{ мин}^{-1}$). Выход NOx ниже, чем по перегрузочной ветви ВСХ (по причине большего значения коэффициента избытка воздуха). По аналогичной же причине ниже значение дымности N в указанном диапазоне мощностей. Достаточно высокое значение температуры t_r на выхлопе (рис. 2) по оптимизационной характеристике позволяет дополнительно эффективно снизить содержание NOx внешними средствами нейтрализации.

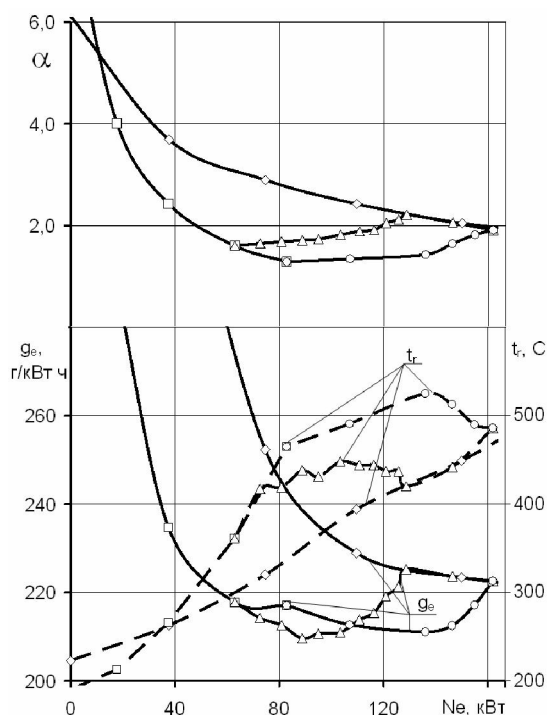


Рис. 2. Зависимость удельного расхода топлива, температуры газов, коэффициента избытка воздуха от мощности по нагрузочным, ВСХ и оптимизационной характеристикам -□- нагрузочная $n=1000\text{ мин}^{-1}$; -◇- нагрузочная $n=2000\text{ мин}^{-1}$; -○- ВСХ; -△- оптимизационная

На рис. 4 приведены относительные значения частоты \bar{n} и расхода топлива \bar{g}_e от мощности \bar{N}_e по нагрузочным, перегрузочной ветви ВСХ и оптимизационной характеристикам, позволяющие определить значения оптимальной частоты \bar{n}_{opt} , потенциального снижения расхода топлива \bar{g}_e в режиме постоянной мощности.

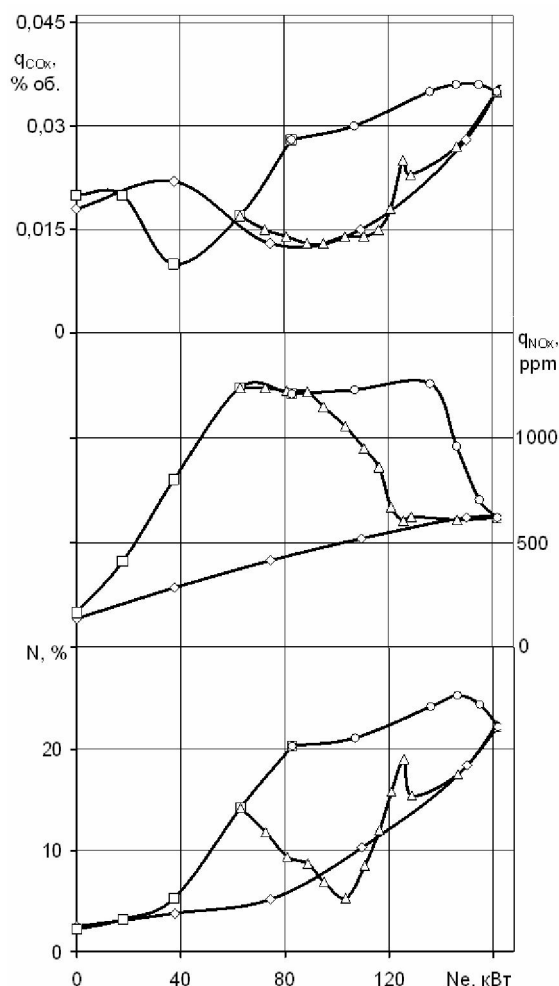


Рис. 3. Зависимость выхода COx, NOx и дымности ОГ от мощности по нагрузочным, ВСХ и оптимизационной характеристикам -□- нагрузочная $n=1000\text{ мин}^{-1}$; -◇- нагрузочная $n=2000\text{ мин}^{-1}$; -○- ВСХ; -△- оптимизационная

Минимальный расход топлива \bar{g}_e наблюдается в диапазоне (0,65...1,0) $\bar{N}_{e\text{ ном}}$ по перегрузочной ветви ВСХ, что отличается от рекомендаций [2, 3] (рис. 1) по причине нетипичности нагрузочной характеристики этого двигателя при высоких частотах вращения.

При дальнейшем снижении мощности в диапазоне $0,4 \bar{N}_{e\text{ ном}} < \bar{N}_{e\text{ const}} < 0,65 \bar{N}_{e\text{ ном}}$ оптималь-

ной по расходу топлива следует считать оптимизационную характеристику и выбирать частоту вращения, следуя [2, 3] (рис. 1). При $\bar{N}_{e\text{ const}} < 0,4 \bar{N}_{e\text{ ном}}$ следует считать оптимальной нагрузочную характеристику.

Таким образом, как и указывалось выше, в диапазоне мощностей (0,65...1,0) $\bar{N}_{e\text{ ном}}$ не удастся реализовать эффект снижения расхода топлива по оптимизационной характеристике по сравнению с перегрузочной ветвью ВСХ. Оптимальной по удельному эффективному расходу топлива в данном диапазоне мощности является ВСХ. Возможна дальнейшая корректировка зависимости $n_{\text{опт}}$ от $N_{e\text{ const}}$ на указанном участке изменения мощности.

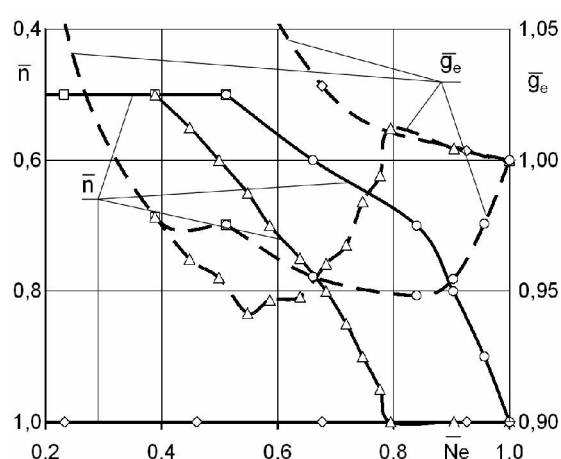


Рис. 4. Зависимости относительной оптимальной частоты \bar{n} и потенциального снижения расхода топлива \bar{g}_e от мощности \bar{N}_e по нагрузочным, ВСХ и оптимизационной характеристикам $n=1000 \text{ мин}^{-1}$; $n=2000 \text{ мин}^{-1}$; \square - нагрузочная $n=1000 \text{ мин}^{-1}$; \diamond - нагрузочная $n=2000 \text{ мин}^{-1}$; \triangle - ВСХ; \diamond - оптимизационная

Выводы

1 В работе выполнена экспериментальная проверка методики [2, 3] определения оптимальной частоты $n_{\text{опт}} = f(N_{e\text{ const}})$ по характеристикам постоянной мощности при (0,4...1,0) $N_{e\text{ ном}}$ для нетиповой нагрузочной характеристики с монотонным снижением удельного расхода топлива g_e , предлагается выбор направлений корректировки зависимости $n_{\text{опт}} = f(N_{e\text{ const}})$, раскрываются особенности работы дизеля по оптимизационной характеристике, учет которых важен для решения задач снижения расхода топлива и токсичности ОГ.

2 Получена зависимость относительной оптимальной частоты \bar{n} и потенциального снижения

расхода топлива \bar{g}_e от мощности \bar{N}_e для двигателя, имеющего нагрузочную характеристику без достижения перегиба функции $g_e = f(N_e)$. В диапазоне мощностей менее 0,40 $\bar{N}_{e\text{ ном}}$ – это нагрузочная характеристика, в диапазоне мощностей (0,40...0,65) $\bar{N}_{e\text{ ном}}$ – это оптимизационная зависимость по [2, 3] (рис. 1), в диапазоне мощностей (0,65...1,0) $\bar{N}_{e\text{ ном}}$ – это, в первом приближении, перегрузочная ветвь ВСХ.

3 Показано снижение выброса COx, NOx и дымности ОГ по оптимизационной характеристике по сравнению с перегрузочной ветвью ВСХ. Достаточно высокое значение температуры ОГ t_r на выхлопе по оптимизационной характеристике позволяет дополнительно эффективно снизить содержание NOx внешними средствами нейтрализации.

Список литературы:

1. Матиевский Г. Д. Анализ показателей работы дизеля по характеристике постоянной мощности / Г. Д. Матиевский, С. П. Кулманаков // Ползуновский вестник. – 2010. – № 1. – С. 13-20.
2. Матиевский Г. Д. Использование внешней скоростной характеристики дизеля для анализа показателей работы на режимах постоянной мощности / Г. Д. Матиевский, А. Н. Любимов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – №2. – С. 260-267.
3. Матиевский Г. Д. Скоростная характеристика дизеля в режиме постоянной мощности / Г. Д. Матиевский // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сб. статей; АлтГТУ. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 84- 89.
4. Свистула А. Е. Анализ и улучшение показателей работы дизеля на режимах постоянной мощности / А. Е. Свистула, Г. Д. Матиевский // 5-е Луканские чтения. Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе: тр. научн.-практ. конф./ МАДИ – М: МАДИ, 2011. – С.21-22.

Bibliography (transliterated):

1. Matievskij G. D. Analiz pokazatelej ra-boty dizelja po harakteristike postojannoj mow-nosti / G. D. Matievskij, S. P. Kulmanakov // Pol-zunovskij vestnik. – 2010. – № 1. – S. 13-20.
2. Matievskij G. D. Ispol'zovanie vneshnej skorostnoj harakteristiki dizelja dlja analiza pokazatelej raboty na rezhimah postojannoj mow-nosti / G. D. Matievskij, A. N. Ljubimov // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. – 2010. – №2. – S. 260-267.
4. Matievskij G. D. Skorostnaja harakteri-stika dizelja v rezhime postojannoj mow-nosti / G. D. Matievskij // Povyshenie jekologicheskoj bezo-pasnosti avto-traktornoj tehnik: sb. statej; AltGTU. – Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2010. – S. 84- 89.
5. Svistula A. E. Analiz i uluchshenie pokaza-telej raboty dizelja na rezhimah postojannoj mow-nosti / A. E. Svistula, G. D. Matievskij // 5-e Lu-kaninskie chtenija. Reshenie jenergojeko-logicheskikh problem v avtotransportnom komplekse: tr. na-uchn.-prakt. konf./ MADI – M: MADI, 2011. – S.21-22.