

БАЗОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УПРАВЛЕНИЯ ТОПЛИВОПОДАЧЕЙ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ, ОСНАЩЕННОГО СИСТЕМОЙ ПРОПУСКА ПОДАЧ ТОПЛИВА

BASIC CHARACTERISTIC OF FUEL CONTROL OF A TRACTOR DIESEL ENGINE EQUIPPED WITH A FUEL SKIPPING SYSTEM

Э.М. ГАЙСИН, к.т.н.

Башкирский государственный аграрный университет,
Уфа, Россия, gaisin@inbox.ru

E.M. GAJSIN, PhD in Engineering

Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia, gaisin@inbox.ru

В статье рассматривается проблема повышения экономичности работы тракторных дизелей на режимах малых нагрузок и оборотов. Эффективным способом является недопущение уменьшения цикловой подачи топлива по мере снижения нагрузки. На практике это реализуется путем отключения части цилиндров (прекращения подачи топлива в часть цилиндров) по мере снижения нагрузки. Однако при таком способе отключения из-за ступенчатого изменения удельного расхода топлива появляются нереализованные зоны, на которых можно получить дополнительную экономию топлива. Плавного изменения удельного расхода топлива можно достичь прекращением (пропуском) отдельных порций (впрысков) топлива не в одних и тех же цилиндрах, а распределяя по всем цилиндрам. Для реализации такого метода регулирования топливная система должна позволять производить единичные пропуски впрысков топлива с разной периодичностью и в любых цилиндрах, что возможно только в топливных системах с электронным управлением. В электронный блок должна быть заложена базовая характеристика управления пропуском порций топлива.

Цель – разработка базовой характеристики управления топливоподачей дизеля для регулирования режимов работы пропуском порций топлива. Базовая характеристика управления пропуском порций топлива была получена с использованием скоростных и регуляторных характеристик топливного насоса дизеля. Базовая характеристика представляет собой матрицу данных, включающую число реализованных порций (до пропуска порции) и номер пропускаемой порции за реализуемыми порциями. Результаты экспериментальных исследований характеристик топливного насоса дизельного двигателя 2Ч105×120 подтвердили работоспособность топливной системы по базовой характеристике, полученной предлагаемым методом.

Ключевые слова: пропуск подачи топлива, скоростная характеристика, регуляторная характеристика.

The article discusses the problem of improving the efficiency of tractor diesel engines at low loads and rotations. An effective way is to prevent the cyclic fuel supply from decreasing as the load lowers. Practically this is done by turning off part of the cylinders (stopping the supply of fuel to part of the cylinders) as the load decreases. However, with this shutdown method, due to a stepwise change in the specific fuel consumption the unrealized zones appear, where additional fuel economy can be obtained. A smooth change in specific fuel consumption can be achieved by stopping (skipping) individual fuel supplies (injections) not in the same cylinders, but by distributing them across all cylinders. To implement this method of regulation, the fuel system must allow producing single stoppings of fuel injections with different intervals and in any cylinders, which is possible only in electronically controlled fuel systems. In the electronic unit the basic characteristic of the control of fuel supply must be incorporated. The goal is to develop a basic characteristic of the diesel fuel supply control to regulate operating modes by skipping fuel supply. The basic characteristic of the fuel flow control was obtained using the speed and regulatory characteristics of the diesel fuel pump. The basic characteristic is a data matrix including the amount of supply actions (before the supply skip) and the number of supply action skipped after supply actions done. The results of experimental studies of the characteristics of the fuel pump of a 2CH105kh120 diesel engine confirmed the efficiency of the fuel system according to the basic characteristic obtained by the proposed method.

Keywords: fuel supply skipping, speed characteristic, regulatory characteristic.

Введение

Дизельные двигатели, применяемые в тракторах, работают на разных диапазонах нагрузок и оборотов. Выявлено, что даже на основных сельскохозяйственных операциях приблизительно 80 % времени они работают с нагрузкой, близкой к номинальной, а 20 % – на режимах холостого хода и малого газа. При переходе на режимы малых нагрузок и оборотов экономические показатели существенно ухудшаются. Объясняется это резким снижением – по мере уменьшения нагрузок – не только давления впрыскивания, но и цикловой подачи топлива, когда усиливается относительное влияние на процесс смесеобразования и сгорания более грубо распыливаемого топлива в начальном и конечном участках процесса впрыскивания, соответствующих подъему и посадке иглы распылителя форсунки [1, 2].

В соответствии с этим эффективным способом существенного повышения экономичности работы тракторных двигателей может стать недопущение уменьшения цикловой подачи топлива по мере снижения нагрузки. На практике это реализуется путем отключения части цилиндров. Отключение цилиндров в основном производится прекращением подачи топлива в часть цилиндров по мере снижения нагрузки. При этом на остающиеся работать цилиндры впрыскивается топливо с увеличенной цикловой подачей для преодоления возникшей нагрузки от выключенных цилиндров. Однако при таком способе отключения из-за ступенчатого изменения удельного расхода топлива появляются нереализованные зоны, на которых можно получить дополнительную экономию топлива.

Плавного изменения удельного расхода топлива можно достичь прекращением (пропуском) отдельных подач (впрысков) топлива не в одних и тех же цилиндрах, а распределяя по всем цилиндрам. При этом величины реализованных цикловых подач будут иметь постоянное значение на всем диапазоне регулирования [5].

Для реализации такого метода регулирования топливная система должна позволять производить единичные пропуски впрысков топлива с разной периодичностью и в любых цилиндрах. Очевидно, что это возможно только в топливных системах с электронным управлением. В электронный блок должна быть заложена базовая характеристика управления пропуском подачи топлива.

Цель исследований

Разработка базовой характеристики управления топливоподачей дизеля для регулирования режимов работы пропуском подачи топлива.

Материалы и методы

Расчетно-экспериментальные исследования проводились с использованием программы Microsoft Excel и стенда для испытания и регулировки топливных насосов высокого давления КИ-22210-УХЛ4.

Результаты и обсуждение

Базовая характеристика управления пропуском подачи топлива может быть получена с использованием скоростных и регуляторных характеристик топливного насоса дизеля, которые представлены на рис. 1.

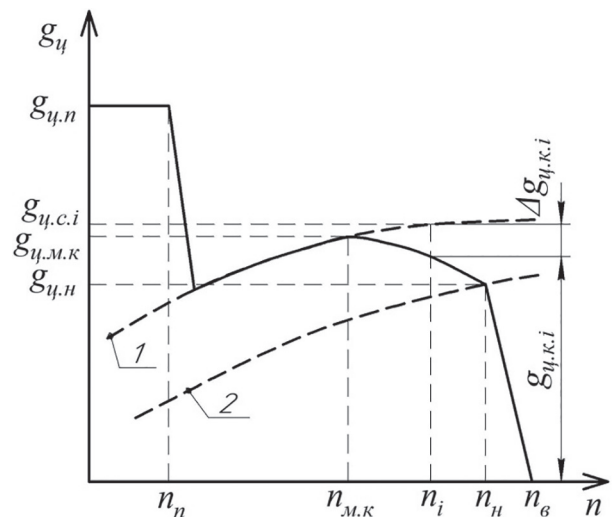


Рис. 1. Скоростные (1 и 2) и регуляторная характеристики топливных систем непосредственного действия:

$n_n, n_{м.к}, n_n$ и n_v – частоты вращений, соответственно, при пуске, максимальном крутящем моменте, номинальном режиме и при выключении подачи; $g_{ц.п}, g_{ц.м.к}$ и $g_{ц.н}$ – цикловые подачи, соответственно, при пуске, максимальном крутящем моменте и номинальном режиме

Из рисунка видно, что при пуске n_n и до режима максимального крутящего момента $n_{м.к}$ пропуска подачи топлива не может быть. Величины цикловых подач на этих режимах можно обеспечить применяемыми на сегодняшний день способами (изменением рейки (дозатора) насоса).

Пропуск подачи топлива можно реализовать от режима максимального крутящего мо-

мента $n_{м.к}$ до полного выключения подачи $n_{в}$. При частоте вращения максимального крутящего момента $n_{м.к}$ рейка (дозатор) насоса фиксируется в положении, обеспечивающем цикловую подачу $g_{ц.м.к}$. Далее на всем диапазоне до полного выключения положение рейки (дозатора) не меняется.

Рассмотрим более подробно случай при частоте вращения n_i .

Число реализованных подач m (до пропуска подачи) должно быть таким, чтобы каждая убавленная на величину $\Delta g_{ц.к.i}$ подача позволила собрать одну пропущенную подачу:

$$m = \frac{g_{ц.к.i}}{\Delta g_{ц.к.i}} = \frac{g_{ц.к.i}}{g_{ц.с.i} - g_{ц.к.i}}, \quad (1)$$

где $g_{ц.к.i}$ – текущее значение цикловой подачи на корректорной ветви регуляторной характеристики; $g_{ц.с.i}$ – текущее значение цикловой подачи на скоростной характеристике.

Номер пропускаемой подачи за реализуемыми подачами можно определить по следующей зависимости:

$$k = m + 1 = \frac{g_{ц.к.i}}{g_{ц.с.i} - g_{ц.к.i}} + 1 = \frac{g_{ц.с.i}}{g_{ц.с.i} - g_{ц.к.i}}. \quad (2)$$

Число пропускаемых подач в процентах составит:

$$e = \frac{1}{k} 100\% = \frac{1}{m+1} 100\% = \frac{1}{\frac{g_{ц.с.i}}{g_{ц.с.i} - g_{ц.к.i}}} \times 100\% = \frac{g_{ц.с.i} - g_{ц.к.i}}{g_{ц.с.i}} 100\% \quad (3)$$

У современных топливных систем скоростные и регуляторные характеристики таковы, что для участка $n_{м.к} - n_{н}$ могут быть описаны уравнениями параболы:

$$g_{ц.с.i} = a_2 n_i^2 + b_2 n_i + c_2;$$

$$g_{ц.к.i} = a_1 n_i^2 + b_1 n_i + c_1,$$

где n_i – текущее значение частоты вращения; a_1, a_2, b_1, b_2, c_1 и c_2 – постоянные величины.

На участке $n_{н} - n_{в}$ они представляют почти прямые линии и могут записываться соответственно в видах:

$$g_{ц.с.i} = a_4 n_i + b_4;$$

$$g_{ц.п.i} = a_3 n_i + b_3.$$

Подставив полученные выражения в формулы (1)–(3), получим:

для режима $n_{м.к} - n_{н}$:

$$m_k = \frac{a_1 n_i^2 + b_1 n_i + c_1}{a_2 n_i^2 + b_2 n_i + c_2 - a_1 n_i^2 - b_1 n_i - c_1};$$

$$k_k = \frac{a_2 n_i^2 + b_2 n_i + c_2}{a_2 n_i^2 + b_2 n_i + c_2 - a_1 n_i^2 - b_1 n_i - c_1};$$

$$e_k = \frac{a_2 n_i^2 + b_2 n_i + c_2 - a_1 n_i^2 - b_1 n_i - c_1}{a_2 n_i^2 + b_2 n_i + c_2} 100\%;$$

для режима $n_{н} - n_{в}$:

$$m_p = \frac{a_3 n_i + b_3}{a_4 n_i + b_4 - a_3 n_i - b_3};$$

$$k_p = \frac{a_4 n_i + b_4}{a_4 n_i + b_4 - a_3 n_i - b_3};$$

$$e_p = \frac{a_4 n_i + b_4 - a_3 n_i - b_3}{a_4 n_i + b_4} 100\%.$$

Возможен и второй вариант применения метода пропуска подач топлива: от номинальных оборотов $n_{н}$ до полного выключения подачи $n_{в}$ (пропуск подач производится только на регуляторных ветвях). В этом случае величины цикловых подач от пуска до номинального режима необходимо обеспечивать также применяемыми на сегодняшний день способами (изменением рейки (дозатора) насоса), а в зоне пропуска подач величина реализуемой цикловой подачи будет равна $g_{ц.н}$.

На основе представленной методики получения базовой характеристики были проведены расчетно-экспериментальные исследования характеристик топливного насоса дизельного двигателя 2Ч105Ч120. Для топливного насоса данного дизеля $n_{м.к} = 600 \text{ мин}^{-1}$, $n_{н} = 900 \text{ мин}^{-1}$ и $n_{в} = 1020 \text{ мин}^{-1}$.

Вначале были сняты скоростные и регуляторные характеристики при разных положениях рейки топливного насоса. Далее на участке $600 < n \leq 900$ экспериментальные характеристики $g_{ц.с} = f_1(n)$ и $g_{ц.к} = f_2(n)$ были аппроксимированы в среде Microsoft Excel в следующих видах:

$$g_{ц.с} = -0,7 \cdot 10^{-4} \cdot n_i^2 + 0,1289 \cdot n_i + 17,$$

$$g_{ц.к} = -0,7 \cdot 10^{-4} \cdot n_i^2 + 0,0737 \cdot n_i + 50,771.$$

Подставляя их в формулы (1)–(3) получаем:

$$m_k = \frac{-0,7 \cdot 10^{-4} \cdot n_i^2 + 0,0737 \cdot n_i + 50,771}{0,0552 \cdot n_i - 33,771};$$

$$k_k = \frac{-0,7 \cdot 10^{-4} \cdot n_i^2 + 0,1289 \cdot n_i + 17}{0,0552 \cdot n_i - 33,771};$$

$$e_k = \frac{0,0552 \cdot n_i - 33,771}{-0,7 \cdot 10^{-4} \cdot n_i^2 + 0,1289 \cdot n_i + 17} 100 \%.$$

Для участка $900 < n \leq 1020$ (линеаризуя функции $g_{ц,с} = f_3(n)$ и $g_{ц,р} = f_4(n)$) уравнения выглядят:

$$g_{ц,с} = 0,004 \cdot n_i + 72,42;$$

$$g_{ц,р} = -0,5 \cdot n_i + 510.$$

Подставив в формулы (1)–(3) получаем:

$$m_p = \frac{-0,5 \cdot n_i + 510}{0,504 \cdot n_i - 437,58};$$

$$k_p = \frac{0,004 \cdot n_i + 72,42}{0,504 \cdot n_i - 437,58};$$

$$e_p = \frac{0,504 \cdot n_i - 437,58}{0,004 \cdot n_i + 72,42} 100 \%.$$

Используя эти выражения, была получена базовая характеристика управления топливopодачей дизеля 2Ч105Ч120, оснащенного системой пропуска подач топлива. Базовая характеристика представляет собой матрицу данных, которая частично представлена в таблице (для случая внешней регуляторной характеристики).

Как видно из таблицы, значения k не всегда являются целыми числами. Поэтому пред-

варительно следует округлить его значения до целых и уже их использовать для введения в запоминающее устройство регулятора. Эта характеристика была записана в запоминающее устройство микроконтроллера блока управления топливным насосом.

С целью проверки правильности предлагаемого способа получения базовой характеристики на стенде для испытания и регулировки топливных насосов высокого давления КИ-22210-УХЛ4 были проведены исследования экспериментального насоса (рис. 2).

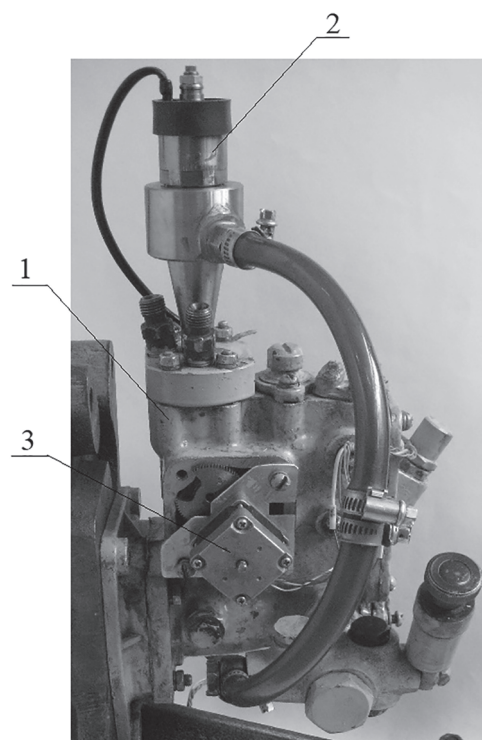


Рис. 2. Экспериментальный насос:
1 – насос высокого давления НД-21/2;
2 – электромагнитный клапан, реализующий пропуск подачи топлива; 3 – шаговый электродвигатель

Таблица

Базовая характеристика

| $n, \text{мин}^{-1}$ | $g_{ц,с}, \text{мм}^3/\text{цикл}$ | $g_{ц,р}, \text{мм}^3/\text{цикл}$ | k | e |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|------|-------|
| 600 | 69,1 | 69,8 | – | – |
| 610 | 69,6 | 69,7 | 94,8 | 0,1 |
| 620 | 70,0 | 69,6 | 84,3 | 0,6 |
| 630 | 70,4 | 69,4 | 70,1 | 1,4 |
| 640 | 70,8 | 69,3 | 45,5 | 2,2 |
| 650 | 71,2 | 69,1 | 33,8 | 3,0 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 1000 | 76,4 | 10,0 | 1,2 | 86,9 |
| 1010 | 76,5 | 5,0 | 1,1 | 93,5 |
| 1020 | 76,5 | 0,0 | 1,0 | 100,0 |

Экспериментальный насос был собран на базе распределительного насоса НД-21/2. В насос были вмонтированы электромагнитный клапан 2 (для реализации пропуска подачи топлива) и шаговый электродвигатель 3 (для изменения положения дозатора плунжерной пары).

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3.

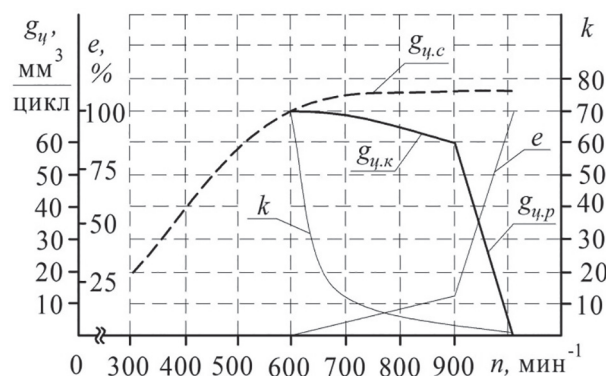


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований характеристик топливного насоса дизеля 2Ч105Ч120

Как видно из представленных данных, все экспериментальные точки попали на расчетные. Блок управления четко обеспечивает выключение рассчитанной пропускаемой подачи.

Выводы

Регулирование режимов работы тракторного дизеля пропуском отдельных подач топлива позволяет получить дополнительную экономию топлива по сравнению с классическим отключением цилиндров. Для реализации такого метода регулирования топливная система должна позволять производить единичные пропуски впрысков топлива с разной периодичностью и в любых цилиндрах, что возможно реализовать только в топливных системах с электронным управлением. В электронный блок должна быть заложена базовая характеристика управления пропуском подачи топлива, которая может быть получена с использованием скоростных и регуляторных характеристик топливного насоса дизеля.

Результаты экспериментальных исследований характеристик топливного насоса дизельного двигателя 2Ч105Ч120 показали, что приведенная методика вполне пригодна для разработки базовых характеристик для дизелей с регулированием режимов работы пропуском подачи топлива.

Литература

1. Баширов Р.М. Скоростные характеристики топливоподающих систем тракторных двигателей. Ульяновск, 1976. 90 с.
2. Баширов Р.М. Автотракторные двигатели: конструкция, основы теории и расчета: учебник. Уфа: Башкирский ГАУ, 2017. 336 с.
3. Баширов Р.М., Габдрафиков Ф.З., Инсафудинов С.З. Последовательное отключение цилиндров как метод повышения эффективности работы тракторного дизеля // Достижения аграрной науки – производству: сборник. Уфа: Башкирский ГАУ, 2004. С. 20–23.
4. Гайсин Э.М. Повышение топливной экономичности тракторных дизелей регулированием режимов их работы пропуском подачи топлива: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург – Пушкин, 2007. 129 с.
5. Потапов В.И., Гайсин Э.М., Галиуллин Р.Р., Рожков А.С. Регулирование режимов работы тракторных дизелей пропуском подачи топлива // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 2. С. 61–66.

References

1. Bashirov R.M. Skorostnye harakteristiki toplivopodayushchih sistem traktornyh dvigatelej [Speed characteristics of fuel supply systems of tractor engines]. Ul'yanovsk, 1976. 90 p.
2. Bashirov R.M. Avtotraktornye dvigateli: konstrukciya, osnovy teorii i rascheta [Autotractor engines: design, the basics of theory and calculation]: uchebnik. Ufa: Bashkirskij GAU Publ., 2017. 336 p.
3. Bashirov R.M., Gabdrafikov F.Z., Insafuddinov S.Z. Sequential shutdown of cylinders as a method of increasing the efficiency of tractor diesel. Dostizheniya agrarnoj nauki – proizvodstvu: sbornik [Achievements of agricultural science for production: digest]. Ufa: Bashkirskij GAU Publ., 2004, pp. 20–23 (in Russ.).
4. Gajsin E.M. Povyshenie toplivnoj ekonomichnosti traktornyh dizelej regulirovaniem rezhimov ih raboty propuskom podachi topliva: dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving the fuel economy of tractor diesels by regulating their operation modes by skipping fuel supply: Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. Sankt-Peterburg-Pushkin, 2007. 129 p.
5. Potapov V.I., Gajsin E.M., Galiullin R.R., Rozhkov A.S. Regulation of tractor diesel engine operation by skipping fuel supply. Traktory i sel'hozmashiny. 2019. No 2, pp. 61–66 (in Russ.).