

Расчет и конструирование машин


УДК 531.8

Управление машинного агрегата с ДВС по экономической характеристике

И.В. Леонов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Efficiency Control of a Machine Unit with Internal Combustion Engine

I.V. LeonovBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: dmit_leonov@gmail.com

i Экономичность машинного агрегата (МА) — одна из важнейших его характеристик. Особую сложность представляет проектирование МА с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), так как этот тип двигателя может развивать одинаковую мощность при различных сочетаниях скоростного и нагрузочного режимов. В связи с этим для снижения расхода топлива на переходных режимах при эксплуатации необходимо управление ДВС по экономической характеристике. Основные динамические и экономические свойства МА закладываются в процессе его проектирования при выборе мощности двигателя и передаточного числа редуктора или коробки передач. Последующие расчеты деталей по критериям прочности и долговечности, как правило, не влияют на динамические качества МА и расход энергии при эксплуатации, если при этих расчетах не происходит значительного увеличения подвижных масс. На удельный расход топлива МА оказывает влияние ряд факторов: КПД рабочей машины, КПД двигателя, передаточное число. Первое условие возможности повышения экономичности МА в процессе проектирования — выбор экономичных двигателя и рабочей машины. Данное условие является необходимым, но недостаточным, его выполнение обеспечивает только потенциальную возможность повышения экономичности МА. Для практической реализации этой возможности необходимо совмещение экономичных режимов двигателя и рабочей машины путем выбора оптимального передаточного числа. В эксплуатационных условиях с этой целью управление МА осуществляется с помощью ЭВМ. Разработан алгоритм оптимального управления дизельного двигателя по критерию экономичности. Проведенные исследования показали, что минимизация расхода топлива МА может быть обеспечена по его экономической характеристике путем выбора оптимального передаточного числа с одновременным воздействием на систему управления скорости дизельного двигателя. Результаты исследования были использованы при создании принципиально новой двухимпульсной системы управления дизеля с турбонаддувом Челябинского тракторного завода, испытания которой подтвердили правильность разработанного алгоритма оптимального управления дизельного двигателя по критерию экономичности.

Ключевые слова: машинный агрегат, расход топлива, система управления, переходный режим, моделирование.

i Efficiency of a machine unit (MU) is one of its most important characteristics. Designing MUs with an internal combustion engine (ICE) is particularly difficult due to the fact that this type of engine can generate the same power at different combinations of speed and load modes. To reduce fuel consumption at transient modes, it is important to control the ICE efficiently. The main dynamic and efficiency properties of the MU are determined at the design stage when selecting the engine power and reduction ratio of the gear box. Subsequent calculations of machine parts for strength and life do not, as a rule, affect the MU dynamic properties and power consumption when it is in operation, as long as there is no appreciable increase in the moving mass. A number of factors have an effect on specific fuel consumption, such as the coefficient of efficiency of the vehicle, coefficient of efficiency of the engine, and reduction ratio. The choice of an efficient engine and working machine is the first condition for the successful increase of the MU efficiency at the designing stage. This condition is necessary but not sufficient. Meeting this condition has only the potential to increase the MU efficiency. To implement it in practice, efficient working modes of the engine and working machine should be combined through choosing an optimal reduction ratio. For this purpose, in running conditions the MU is controlled by a computer. An algorithm of optimal control for a diesel engine conforming to the requirements of efficiency has been developed. The experimental studies have shown that the MU fuel consumption can be minimized through choosing an optimal reduction ratio with a simultaneous effect on the speed control system of the diesel engine. The results of the study have been used when creating an innovative double-impulse control system for a turbo-charging diesel engine by the Chelyabinsk Tractor Factory. The testing of the control system has proved the validity of the developed algorithm of optimal control for the diesel engine conforming to the efficiency requirements.

Keywords: machine unit, fuel consumption, control system, transient mode, modelling.

Экономичность машинного агрегата (МА) — одна из важнейших его характеристик. Основные динамические и экономические свойства МА закладываются в процессе проектирования при выборе типа и мощности двигателя, а также передаточного отношения передаточного механизма. Последующие расчеты по критериям прочности и долговечности, как правило, не

влияют на динамические качества МА и расход энергии при эксплуатации, если при этом не происходит значительного увеличения подвижных масс. Особую сложность представляет проектирование машин с дизельным двигателем, оборудованным системой автоматического регулирования скорости (САРС), поскольку этот тип двигателя может развивать одинаковую мощность при различных сочетаниях скоростного и нагрузочного режимов. В связи с этим для снижения расхода топлива на переходных режимах в условиях эксплуатации необходимо использовать математическую модель алгоритма управления ДВС по экономической характеристике.

Экономичность расхода энергии МА (рис. 1, а, б) часто оценивают критерием в удельных единицах:

$$g = G/\Pi,$$

где G — часовой расход энергии; Π — производительность МА (выработка продукции в единицу времени).

При нулевой производительности $\Pi = 0$ удельный расход энергии бесконечно велик у любого типа машин, поэтому использовать эту оценку в инженерных расчетах неудобно (см. рис. 1). Часто ее заменяют оценкой КПД (рис. 1, в). Например, для ДВС [1]

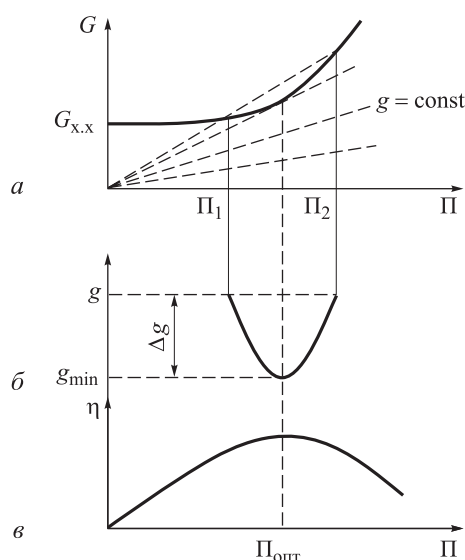


Рис. 1. Зависимость абсолютного часового G (а), удельного g (б) расходов энергии и КПД (в) от производительности машины

$$\eta = \frac{3600}{Q_n g_e}$$

Здесь Q_n — низшая теплота сгорания топлива; g_e — удельный расход топлива ДВС, т. е. расход топлива ДВС на единицу эффективной мощности W_e в течение 1 ч, $g_e = G/W_e$.

Зависимость удельного расхода энергии g (см. рис. 1, б) получается перестроением зависимости абсолютного расхода G . Она имеет минимальное значение при оптимальной производительности $\Pi_{\text{опт}}$, которая может быть определена как абцисса точки касания прямой, проведенной из начала координат, к кривой G [2].

Характер изменения удельного расхода топлива g объясняется следующими факторами:

1) увеличение удельного расхода энергии левее минимума g происходит за счет непропорционального увеличения удельных потерь энергии на трение;

2) увеличение удельного расхода энергии правее оптимальной производительности $\Pi_{\text{опт}}$ свидетельствует о снижении качества рабочего процесса МА (ДВС).

Оптимальный режим $\Pi_{\text{опт}}$ по критерию удельного расхода топлива аналитическим способом может быть найден из условия равенства нулю первой производной $g = 0$:

$$\Pi_{\text{опт}} \frac{\partial G}{\partial \Pi}(\Pi_{\text{опт}}) - G(\Pi_{\text{опт}}) = 0,$$

или

$$\frac{\partial G}{\partial \Pi}(\Pi_{\text{опт}}) = \frac{G}{\Pi_{\text{опт}}} = g_{\min},$$

где g_{\min} — минимальный удельный расход энергии на оптимальном режиме.

Таким образом, на оптимальном по удельному расходу энергии режиме, характеризующимся оптимальной производительностью $\Pi_{\text{опт}}$, значение производной функции абсолютного расхода энергии $\partial G/\partial \Pi(\Pi_{\text{опт}})$ равно минимальному удельному расходу энергии g_{\min} . Равенство $\partial G/\partial \Pi(\Pi_{\text{опт}}) = g_{\min}$ имеет следующий физический смысл. Производная абсолютного расхода энергии представляет собой касательную к функции абсолютного расхода энергии G , проведенную из начала координат. На рис. 1, а представлено семейство расчетных зависимостей $G = f(\Pi, g)$ для постоянного удельного расхода энергии $g = \text{const}$, при котором зависимость абсолютного расхода энергии от производительности является линейной $G_i = g\Pi_i$ и представляет прямую, проходящую

через начало координат с коэффициентом пропорциональности, равным удельному расходу энергии g .

Рассмотрим верхнюю прямую $G_i = g\Pi_i$ при более высоком удельном расходе энергии $g = \text{const} > g_{\min}$, которая соответствует возрастанию удельного расхода энергии на $\Delta g = g - g_{\min}$ по отношению к минимальному удельному расходу энергии g_{\min} . Пересечение верхней прямой $G_i = g\Pi_i$, $g = \text{const} > g_{\min}$ с реальной характеристикой $G = f(\Pi)$ в двух точках Π_1 и Π_2 свидетельствует о том, что между ними на экспериментальной кривой $G = f(\Pi)$ должна находиться точка оптимальной производительности $\Pi_{\text{опт}}$ по критерию экономичности расхода энергии с наименьшим удельным расходом энергии g_{\min} .

Потребителя интересует минимизация абсолютного расхода энергии G по сравнению с минимально возможным расходом. Представим такую оценку в виде разности реального абсолютного расхода энергии при реальном удельном расходе $G_i(\Pi) = g\Pi_i$ и возможного расхода при минимальном удельном расходе $G_i = g_{\min}\Pi_i$. Назовем этот критерий абсолютным перерасходом энергии:

$$\Delta G(\Pi) = \Delta G(\Pi) - \Pi g_{\min} = (g - g_{\min})\Pi = \Pi \Delta g(\Pi),$$

где Δg — прирост удельного расхода по сравнению с минимальным значением g_{\min} , $\Delta g = (g - g_{\min})$.

Чем больше от оптимальной производительности $\Pi_{\text{опт}}$ будет отклоняться режим работы МА, тем больше будут перерасходы энергии (абсолютные потери энергии ΔG) по сравнению с минимально возможными расходами (при работе с минимальными удельными расходами энергии g_{\min} при оптимальной производительности $\Pi_{\text{опт}}$) [3]:

$$G_{\text{опт}} = g_{\min}\Pi_{\text{опт}}.$$

Аппроксимируем зависимость абсолютного расхода энергии квадратичным сплайном:

$$G_i(\Pi_i) = C_0 + C_1\Pi_i + C_2\Pi_i^2, \quad (1)$$

тогда выражение удельного расхода энергии примет вид

$$g_i = \frac{C_0}{\Pi_i} + C_1 + C_2\Pi_i.$$

Здесь C_0 , C_1 , C_2 — коэффициенты степенного ряда, определяемые по характеристике расхода энергии G . Например, при $\Pi_i = 0$ $G = G_{x,x}$ — абсолютный расход энергии на холостом ходу, при $\Pi_i = \Pi_{\text{опт}}$, $g = g_{\min}$, $G_{\text{опт}} = g_{\min}\Pi_{\text{опт}}$.

Откуда

$$G = G_{x,x}; \quad C_1 = g_{\min}; \quad C_2 = -\frac{G_{x,x}}{\Pi_{\text{опт}}}.$$

Таким образом, в аппроксимирующее выражение (1) g входит барьерная функция C_0/Π и оно отвечает начальным условиям [2] $g \rightarrow \infty$ при $\Pi = 0$.

После преобразования показатели увеличения удельного и абсолютного перерасхода энергии примут вид

$$\Delta g = g - g_{\min} = \frac{G_{x,x}}{\Pi} - \frac{G_{x,x}/\Pi_{\text{опт}}^2}{\Pi};$$

$$\Delta G = \Delta g \Pi = G_{x,x} \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\Pi_{\text{опт}}} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Анализ зависимости (2) показывает, что функция абсолютного перерасхода энергии ΔG будет расти при удалении влево (см. рис. 1, а) от оптимального по экономичности режима.

В качестве примера рассмотрим идеализованную гиперболическую характеристику удельного расхода энергии насоса или компрессора с приводом ДВС при регулировании производительности Π перепуском рабочего тела, у которой затрачиваемая мощность постоянна:

$$g = \frac{C}{\Pi} = \frac{g_{\min} \Pi_{\text{опт}}}{\Pi},$$

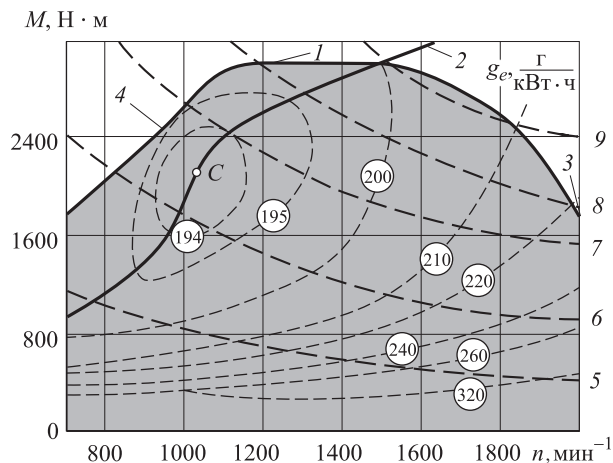


Рис. 2. Экспериментальная параметрическая зависимость момента от частоты вращения вала тепловозного дизеля с турбонаддувом с кривыми постоянной мощности и постоянного удельного расхода топлива:

1 — внешняя характеристика; 2 — экономическая характеристика; 3 — предельная регуляторная характеристика; 4 — корректорная характеристика; 5 — $W = 100$ кВт; 6 — $W = 200$ кВт; 7 — $W = 300$ кВт; 8 — $W = 400$ кВт; 9 — $W = 500$ кВт; \circ — значения g_e , г/(кВт·ч)

где C — параметр экономичности машины, характеризующий абсолютный расход энергии на оптимальном по экономичности режиме работы машины, $C = G_{\text{опт}} = g_{\min} \Pi_{\text{опт}}$. При такой характеристике g (см. рис. 1, б) возрастание удельного расхода энергии по сравнению с минимальным g_{\min} при отклонении влево от оптимальной производительности $\Pi_{\text{опт}}$ машины составит

$$\Delta g = g - g_{\min} = g_{\min} \left(\frac{\Pi_{\text{опт}}}{\Pi} - 1 \right) = g_{\min} \left(\frac{1}{k_{\Pi}} - 1 \right).$$

Здесь k_{Π} — коэффициент загрузки машины, равный отношению текущей производительности к ее значению на оптимальном режиме, $k_{\Pi} = \Pi/\Pi_{\text{опт}}$.

Используя эту оценку, рассчитаем по идеализированной гиперболической зависимости рост удельного расхода энергии g в процентах от g_{\min} в зависимости от степени загрузки k_{Π} по мощности W :

$$k_W = k_{\Pi} = W/W_{\text{опт}}.$$

Зависимость расхода энергии от коэффициента загрузки двигателя приведена ниже:

$k_W, \%$	0	10	25	50	75	100
$\Delta g/g_{\min}, \%$	∞	900	300	100	30	0

Анализируя расход энергии, следует отметить, что при снижении степени загрузки k_W МА до 50 % происходит увеличение удельного расхода энергии на 100 %, т. е. вдвое. Даже использование машины с 75%-ной загрузкой от оптимальной производительности вызывает увеличение удельного расхода энергии на 30 % по сравнению с минимально возможным расходом. При снижении степени загрузки машины до 10 % происходит рост удельного расхода энергии примерно в 10 раз. Таким образом, увеличение абсолютного расхода энергии G зависит от степени загрузки двигателя и расхода энергии на оптимальном режиме работы машины:

$$C = C_{\text{опт}} = g_{\min} \Pi_{\text{опт}}; \quad C = G_{\text{опт}} = g_{\min} \Pi_{\text{опт}},$$

а также от величины отклонения производительности машины Π от оптимальной $\Pi_{\text{опт}}$, которую можно характеризовать коэффициентом загрузки $k_{\Pi} = k_W < 1$.

Проектирование ДВС проводится таким образом, что режим работы с максимальной мощностью, указываемый как номинальный (точка N), не совпадает с наиболее экономичным режимом его в точке C (рис. 2). Номинальная мощность установленного ДВС, как

правило, выбирается исходя из необходимости сокращения времени разгона или для кратковременного приема пиковой нагрузки, поэтому она оказывается заведомо большей, чем это необходимо для работы в установившемся режиме [3].

Таким образом, при выборе номинальной мощности двигателя $W_{\text{ном}}$ конструктор закладывает возможность работы ДВС с различной экономичностью. Выбор двигателя с номинальной мощностью, намного превышающей потребности установившегося режима, позволяет улучшить динамические характеристики МА. Момент двигателя при разгоне затрачивается на преодоление сопротивления движению и обеспечение заданного желаемого ускорения ε вала и времени разгона ДВС. Его можно представить в виде суммы момента сопротивления на установившемся режиме $M_{\text{сопр}}$ и динамического момента $M_{\text{дин}}$, вызывающего ускорение вала ДВС [2]:

$$M_{\text{дв}} = |M_{\text{сопр}}| + M_{\text{дин}},$$

где $M_{\text{дин}} = \varepsilon J_{\text{пр}} = \omega_{\text{ном}} J_{\text{пр}} / \tau_{\text{разг}}$; $\tau_{\text{разг}}$ — время разгона в идеализированном цикле МА до номинальной скорости двигателя $\omega_{\text{ном}}$, $\tau_{\text{разг}} = \omega_{\text{ном}} / \varepsilon$; $J_{\text{пр}}$ — суммарный приведенный к валу ДВС момент инерции МА.

Выразив мощность двигателя через момент и скорость, получим удобное приближенное выражение для выбора мощности двигателя в идеализированном цикле «разгон — торможение» [2] с заданными динамическими свойствами через $\tau_{\text{разг}}$:

$$W_{\text{дв}} = \left(W_{\text{сопр}} + \frac{T_{\text{max}}}{\tau_{\text{разг}}} \right) \frac{1}{\eta_{\text{мех}}},$$

где T_{max} — прирост кинетической энергии при разгоне, $T_{\text{max}} = J_{\text{пр}} \omega_{\text{ном}}^2 / 2$; $\eta_{\text{мех}}$ — механический КПД, учитывающий потери на трение; $W_{\text{сопр}}$ — мощность сил сопротивления движению на установившемся режиме.

При выборе двигателя с недостаточной мощностью происходит его перегрузка и снижение моторесурса. В идеализированном цикле «разгон—торможение» последнее выражение позволяет определить коэффициент загрузки двигателя по мощности на установившемся режиме K_W при выборе его мощности в целях обеспечения заданных динамических качеств [3]:

$$K_W = \frac{\tau_{\text{разг}} W_{\text{сопр}}}{1 + J_{\text{пр}} \frac{\omega_{\text{ном}}^2}{2} \left(\frac{1}{\tau_{\text{разг}} W_{\text{сопр}}} \right)}.$$

Как правило, снижение экономичности обусловлено относительным ростом потерь (тепловых, механических и др.) при уменьшении коэффициента использования номинальной мощности k_W . Поэтому при проектировании накладывают ограничения на его допустимые минимальные значения. Изменить значение k_W можно как выбором оптимального передаточного отношения, так и выбором номинальной мощности двигателя. Рассчитанное по статической характеристике оптимальное передаточное отношение

$$(U_{\text{эк}})_{\text{опт}} = (\omega_{\text{дв}})_{\text{эк}} / (\omega_{\text{рм}})_{\text{эк}},$$

обеспечивающее работу двигателя в экономичной расчетной точке, будет определять и соотношение скоростей валов двигателя $(\omega_{\text{дв}})_{\text{эк}}$ и рабочей машины (РМ) $(\omega_{\text{рм}})_{\text{эк}}$ на экономичном режиме [3].

Передаточное отношение редуктора определяет не только соотношение скоростей, но и отношение моментов на входном и выходном валах:

$$(M_{\text{рм}})_{\text{эк}} = (U_{\text{эк}})_{\text{опт}} (M_{\text{дв}})_{\text{эк}},$$

где $(U_{\text{эк}})_{\text{опт}}$ — передаточное отношение, оптимальное по экономичности расхода энергии двигателя; $(M_{\text{дв}})_{\text{эк}}$ — нагрузка двигателя в экономичной точке статической характеристики. Поэтому при выборе передаточного отношения МА можно определить и необходимую номинальную мощность двигателя для работы в установившемся режиме:

$$W_{\text{ном}} = (M_{\text{дв}})_{\text{ном}} (\omega_{\text{дв}})_{\text{ном}}.$$

При изменении нагрузки РМ происходит отклонение от выбранного расчетного экономичного режима работы, приводящее, как правило, к увеличению расхода энергии МА. Экономичность снижается меньше, если отклонение от расчетного режима работы происходит по направлению градиента изменения критерия экономичности, определяющего экономическую характеристику МА. Поэтому, оценивая наиболее вероятные режимы работы МА, можно совместить их с областью экономичной работы, например, путем изменения передаточного отношения передаточного механизма. Для этой цели в МА применяют автоматические устройства, например, объединенный регулятор скорости и нагрузки дизель-электрического агрегата тепловоза и т. п. [4].

Таким образом, повышение экономичности расхода энергии на установившихся режимах возможно за счет выбора оптимальной номи-

нальной установленной мощности ДВС, т. е. путем приближения установившегося режима работы к режиму минимального удельного расхода энергии (см. рис. 2) [5].

Параметрическая модель экономичности МА с ДВС (см. рис. 2) осуществляет связь между параметрами режима работы с показателями экономичности расхода энергии, например, зависимости крутящего момента ДВС от скоростного режима $M(\omega)$ при постоянном значении удельного расхода топлива. Построение экономической характеристики ДВС осуществляется в координатах M и n по данным экспериментальных исследований (см. рис. 2, кривая 1) [6]. Управление ДВС при эксплуатации по экономической характеристике может служить значительным резервом повышения экономичности машины на переходных режимах. Однако конструкция и алгоритм действия системы управления ДВС по экономичности до сих пор не разработаны [7].

При разработке алгоритма системы управления ДВС в качестве математического критерия экономичности может быть принято отклонение параметров переходного режима от точки минимального расхода топлива (см. рис. 2, точка C), которое должно минимизироваться системой управления ДВС. Разработку этого алгоритма иллюстрирует рис. 3. Для вывода алгоритма управления режимом работы ДВС по критерию экономичности расхода энергии может быть использован принцип минимизации отклонения r_{\min} переходного режима от наиболее экономичного режима работы ДВС (рис. 2) с координатами точки C ($M_{\text{ЭК}}$, $\omega_{\text{ЭК}}$), характеризующими расстояние от точки касания D кривой постоянной мощности W (см. рис. 3).

Отклонение r_{\min} можно представить как переменный радиус окружности с центром в точке минимального удельного расхода топлива C , проведенной через точку ее пересечения с линией постоянного значения мощности $W = M_{\text{ДВ}} \omega_{\text{ДВ}}$:

$$\left(\frac{W}{\omega_{\text{ДВ}}} - M_{\text{ЭК}} \right)^2 + (\omega_{\text{ДВ}} - \omega_{\text{ЭК}})^2 = r^2,$$

где радиус r пропорционален приросту удельного расхода Δg топлива по сравнению с минимальным значением [7] с коэффициентом пропорциональности

$$k_g = \frac{(M_{\text{НОМ}} - M_{\text{ЭК}})^2 + (\omega_{\text{НОМ}} - \omega_{\text{ЭК}})^2}{g_{\text{НОМ}} - g_{\text{МИН}}}$$

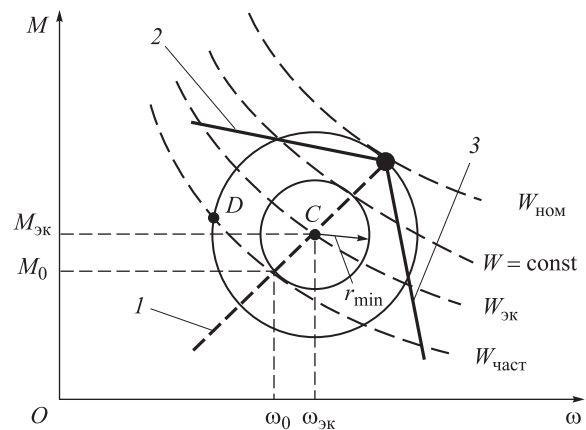


Рис. 3. Схематизированная параметрическая зависимость для вывода алгоритма управления ДВС: 1 — экономическая характеристика; 2 — внешняя характеристика; 3 — предельная регуляторная характеристика

Таким образом, минимизация расхода топлива ДВС на переходном режиме возможна за счет воздействия на момент ДВС $M_{\text{ДВ}}$ в соответствии со скоростью вала по экономической характеристике $\omega_{\text{ЭК}}$:

$$\Delta g = \frac{(g_{\text{НОМ}} - g_{\text{МИН}}) \left[(M_{\text{ДВ}} - M_{\text{ЭК}})^2 + (\omega_{\text{ДВ}} - \omega_{\text{ЭК}})^2 \right]}{(M_{\text{НОМ}} - M_{\text{ЭК}})^2 + (\omega_{\text{НОМ}} - \omega_{\text{ЭК}})^2}.$$

Проведенные исследования показали, что минимизация расхода топлива МА может быть обеспечена по его экономической характеристике путем выбора оптимального передаточного числа с одновременным воздействием на систему управления скорости дизельного двигателя.

Результаты исследования были использованы при создании принципиально новой двухимпульсной системы управления дизеля с турбонаддувом Челябинского тракторного завода.

Выводы

1. Основными факторами, вызывающими снижение экономичности МА с ДВС в эксплуатационных условиях, является неоптимальный выбор номинальной мощности и использование САРС, не предназначенной для управления ДВС по экономической характеристике

2. Управление ДВС на переходных режимах по экономической характеристике обеспечивает снижение расхода топлива и возможно при настройке системы управления на минимизацию удаленности текущего переходного режима работы от точки минимального удельного расхода топлива

3. В дизелях с турбонаддувом система управления по минимизации удаленности текущего режима работы от точки минимального удельного расхода топлива может быть построена на

базе системы автоматического регулирования скорости с введением корректирующего импульса по давлению наддува взамен использования импульса по нагрузке.

Литература

- [1] Александров А.А., Иващенко Н.А., ред. *Машиностроение. Энциклопедия. Двигатели внутреннего сгорания*. Т. IV – 14. Москва, Машиностроение, 2013. 784 с.
- [2] Леонов И.В. *Теория механизмов и машин*. Москва, Высшее образование, 2009. 239 с.
- [3] Епишин А.Ю. К вопросу экономичности автономного подвижного состава путем совершенствования управления силовыми установками. *Естественные и технические науки*, 2012, № 6, с. 285–288.
- [4] Чеботарев М.А. Математическое моделирование работы дизель-генератора тепловоза в переходных режимах. *Тр. 9 Научн.-практ. конф. Безопасность движения поездов*. Москва, 2008, МИИТ, с. V/6-V/7.
- [5] Cerri T., Onorati A., Mattarelli E. 1D engine simulation of a small HSDI diesel engine applying a predictive combustion model. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2008, vol. 130, iss. 1, pp. 012802/1–012802/10, article no. 012802.
- [6] Vermonet Claire, Souchon Vincent, Metssonier Guillaume *Moteur Diesel muni d'un dispositif de controle du debit d'injection de carburant*. Patent Fr. no. 0213502, МПК {7} F 02 D 41/38, F 02 D 41/40, 2004.
- [7] Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Основы проектирования машин по динамическим и экономическим показателям. *Улучшение эксплуатационных показателей ДВС: Материалы 4-й Междунар. научн.-практ. конф. Наука–технология–энергосбережение. Сб. науч. тр.* Киров, Вятская ГСХА, 2011. С. 158–163.

References

- [1] *Mashinostroenie. Entsiklopediia. Dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Engineering. Encyclopedia. Internal combustion engines]. Vol. 4-14. Ed. Aleksandrov A.A., Ivashchenko N.A. Moscow, Mashinostroenie publ., 2013. 784 p.
- [2] Leonov I.V., Leonov D.I. *Teoriia mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines]. Moscow, Vysshee obrazovanie publ., 2009. 239 p.
- [3] Epishin A.Iu. K voprosu ekonomichnosti avtonomnogo podvizhnogo sostava putem sovershenstvovaniia upravleniia silovymi ustanovkami [On the question of cost-autonomous rolling stock by improving the management of power plants]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and engineering sciences]. 2012, no. 6, pp. 285–288.
- [4] Chebotarev M.A. Matematicheskoe modelirovanie raboty dizel'-generatora teplovoza v perekhodnykh rezhimakh [Mathematical modeling of diesel generator diesel locomotive under transient conditions]. *Trudy 9 Nauchno-prakticheskoi konferentsii Bezopasnost' dvizheniia poezdov* [9 Proceedings of the Scientific-Practical Conference train safety]. 2008, Moscow, MIIT publ., pp. V/6–V/7.
- [5] Cerri T., Onorati A., Mattarelli E. 1D engine simulation of a small HSDI diesel engine applying a predictive combustion model. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2008, vol. 130, iss. 1, pp. 012802/1–012802/10, article no. 012802.
- [6] Vermonet Claire, Souchon Vincent, Metssonier Guillaume *Moteur Diesel muni d'un dispositif de controle du debit d'injection de carburant*. Patent Fr. no. 0213502, МПК {7} F 02 D 41/38, F 02 D 41/40, 2004.
- [7] Barbashov N.N., Leonov I.V. Osnovy proektirovaniia mashin po dinamicheskim i ekonomicheskim pokazateliam [Fundamentals of Machine Design for dynamic and economic indicators]. *Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazatelei DVS: Materialy 4-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Nauka-tekhnologiya-energoberezhenie. Sb. nauch. tr.* [Improving operational performance engine: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference Science-Technology-saving. Collection of scientific papers]. Kirov, Viatskaia GSKhA publ., 2011. pp. 158–163.

Статья поступила в редакцию 07.11.2014

Информация об авторе

ЛЕОНОВ Игорь Владимирович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теория механизмов и машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: dmit_leonov@gmail.com).

Information about the author

LEONOV Igor Vladimirovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Theory of Mechanisms and Machines Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: dmit_leonov@gmail.com).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 2-е издание учебника
под общей редакцией
А.М. Архарова и И.К. Буткевича

«Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты»

Во втором издании (первое — 2010 г.) приведены методы расчета и конструирования криогенных машин, безмашинных криогенераторов и криоинструментов, наиболее широко применяемых в низкотемпературной технике. Рассмотрены поршневые и лопастные машины, предназначенные для криогенерации (детандеры, криогенные газовые машины) и для циркуляции криоагента (насосы), а также криогенные аппараты, реализующие струйный, вихревой, пульсационный, волновой и магнитокалорический эффекты при получении холода. Даны расчеты и конструкции специфических криогенераторов и криоинструментов, используемых в криохирургии. Описаны процессы, которые происходят в машинах и аппаратах, работающих в двухфазной области параметров состояния криоагентов.

Содержание учебника соответствует курсу лекций, который авторы читают в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Для студентов, инженеров, магистров, аспирантов и специалистов.

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