

УДК 621.436

DOI 10.18698/0536-1044-2017-5-23-28

Оптимизация передаточного числа коробки передач машинного агрегата с дизельным двигателем

И.В. Леонов

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

Optimization of the Transmission Ratio of a Diesel-Powered Machine Unit

I.V. LeonovBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: ivleonov@bmstu.ru

i Экономичность — одна из важнейших характеристик машинного агрегата (МА). Основные свойства МА закладываются в процессе проектирования при выборе таких параметров, как номинальная мощность двигателя внутреннего сгорания и передаточное число редуктора или коробки передач (КП). Последующие расчеты деталей по критериям прочности и долговечности, как правило, не влияют на динамические свойства МА и расход энергии при эксплуатации, если при этих вычислениях не происходит значительного увеличения подвижных масс. Особую сложность представляет проектирование МА с дизельным двигателем, скорость вращения которого в режиме минимального удельного расхода топлива обычно не совпадает с таковой в номинальном режиме работы. Кроме того, дизельный двигатель оснащен регулятором скорости, в функции которого не входит экономичное управление расходом топлива. На удельный расход топлива МА оказывают влияние КПД рабочей машины и двигателя, а также передаточное число редуктора или КП. Первое условие повышения экономичности МА в процессе проектирования — выбор экономичного двигателя. Однако это условие является необходимым, но недостаточным, и его выполнение обеспечивает только потенциальную возможность решения данной задачи. Для ее практической реализации необходимо совместить экономичные режимы двигателя и рабочей машины путем выбора оптимального передаточного числа редуктора или КП. Проведенные исследования показали, что расход топлива можно минимизировать по экономической характеристике МА путем оптимального выбора передаточного числа КП с одновременным воздействием на систему управления скоростью дизельного двигателя. Решение подобной проблемы требуется и при управлении автоматической КП.

Ключевые слова: передаточное число, силовой агрегат, дизельный двигатель, расход топлива, динамические свойства, установившийся режим.

i Efficiency is one of the main characteristics of a machine unit (MU). The main MU properties are defined at the design stage when selecting such parameters as nominal capacity of the internal combustion engine and transmission ratio of the gear box. As a rule, subsequent calculations of parts with regards to strength and life do not influence MU dynamic properties and operating power consumption as long as there is no appreciable increase in the moving mass. Diesel-powered MUs are particularly difficult to design because the rotational velocity of a diesel engine working at the minimal specific fuel rate does not correspond to the rotational velocity under nominal operating conditions. Moreover, a diesel engine is equipped with a speed adjuster, the functions of which do not include efficient fuel control. The specific

fuel consumption is influenced by the coefficient of efficiency of the working machine and engine as well as the transmission ratio of the reducing gear or the gear box. The first condition of increasing the MU efficiency at the design stage is the selection of an efficient engine. However, this is necessary but not sufficient, and meeting this condition has only the potential of solving this problem. To put it into practice, it is necessary to combine economy modes of the engine and working machine by selecting the optimal transmission ratio of the reducing gear or the gear box. The research has shown that fuel consumption can be minimized through the optimal selection of the transmission ratio with a simultaneous impact on the control system of the diesel engine velocity. A similar problem has to be solved when controlling an automatic gear box.

Keywords: transmission ratio, power unit, diesel engine, fuel consumption, dynamic properties, cruise mode.

Основные свойства машинного агрегата (МА) закладываются в процессе его проектирования при выборе таких параметров, как номинальная мощность двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и передаточное число редуктора или коробки передач (КП). Последующие расчеты деталей по критериям прочности и долговечности, как правило, не влияют на динамические свойства МА и расход энергии при эксплуатации, если при проведении вычислений не происходит значительного увеличения подвижных масс.

Улучшить динамические свойства и повысить производительность МА можно либо увеличением номинальной мощности ДВС, либо выбором оптимального передаточного числа КП, позволяющего реализовать максимальную мощность ДВС [1, 2]. В МА с автоматическими КП осуществляется связанное управление текущими значениями как передаточного числа, так и развиваемой мощности ДВС.

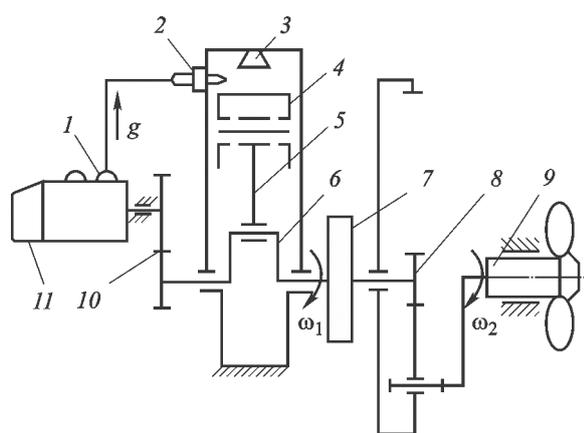


Рис. 1. Принципиальная схема судового силового агрегата с дизельным двигателем:

- 1 — топливный насос высокого давления (ТНВД);
- 2 — форсунка; 3 — клапан; 4 — поршень; 5 — шатун;
- 6 — коленчатый вал; 7 — маховик; 8 — редуктор;
- 9 — винт; 10 — зубчатая передача привода ТНВД и автоматического регулятора скорости;
- 11 — автоматический регулятор скорости

Первое условие повышения экономичности МА — выбор экономичного ДВС в процессе проектирования. Однако это условие является необходимым, но недостаточным, так как обеспечивает только потенциальную возможность снижения расхода топлива. Для практической реализации данной задачи необходимо совместить оптимальные режимы работы ДВС и рабочей машины (РМ) путем выбора оптимального передаточного числа [2, 3]. Трудность выбора этого конструктивного параметра заключается в том, что производительность МА, как правило, не является постоянной в процессе эксплуатации.

Цель работы — определение оптимального передаточного числа МА и анализ влияния его выбора на удельный расход топлива.

Наиболее экономичный ДВС транспортных МА — дизельный. Однако его реальная характеристика не является благоприятной, так как одна и та же мощность может развиваться при различных сочетаниях крутящего момента и угловой скорости вращения коленчатого вала [3, 4], что не позволяет сделать однозначный выбор передаточного числа редуктора МА. Поэтому необходимым условием улучшения динамических свойств и повышения производительности МА в процессе проектирования является выбор оптимального передаточного числа, соответствующего характеристикам двигателя и РМ.

Таким образом, оптимальный выбор передаточного числа МА позволяет согласовать характеристики этих двух агрегатов с целью достижения максимальной мощности или снижения удельного расхода топлива. Опыт показывает, что оптимальный выбор передаточного числа будет зависеть от вида характеристик двигателя и РМ, но при этом следует отказаться от учета несущественных факторов,

т. е. провести идеализацию этих характеристик для выявления оптимальных связей передаточного числа с другими параметрами МА.

В качестве примера на рис. 1 приведена принципиальная схема судового силового агрегата (СА) с дизельным двигателем, соединенным редуктором с винтом, основной характеристикой которого является передаточное число — отношение входной ω_1 и выходной ω_2 угловых скоростей вращения их валов [1, 3]

$$u_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{1}{u_{21}}.$$

Из практики проектирования СА с дизельным двигателем известно, что скоростной режим минимального удельного расхода топлива обычно не совпадает с номинальным режимом работы. Однако между этими режимами можно провести так называемую экономическую характеристику, по которой при эксплуатации двигателя обеспечивается увеличение удельного расхода топлива от минимального значения до номинального [4, 5]. Вывод уравнения экономической характеристики дизельного двигателя иллюстрирует рис. 2.

В зависимости от цели исследования идеализированные характеристики двигателя и РМ могут быть различными. Если задачей является оптимальный выбор мощности и передаточного числа СА, то для дизельного двигателя удобно принять простейшую идеализированную параметрическую характеристику, показанную на рис. 2 [4, 5]. Точкой *N* обозначен режим работы с максимальной мощностью (номинальный режим), который расположен на пересечении внешней и предельной регуляторной характеристик, а точкой *C* — режим максимальной экономичности.

Через точку *N* (рис. 2) проведена гипербола — кривая постоянной номинальной мощности двигателя $W_{ном}$, соответствующая характеристике идеального двигателя [6, 7], и аналогично через точку *C* — кривая постоянной мощности двигателя в режиме минимального удельного расхода топлива $W_{эк}$.

Характеристика идеального двигателя определяется выражением

$$M = \frac{W_{дв}}{\omega_{дв}},$$

где *M*, $W_{дв}$ и $\omega_{дв}$ — соответственно крутящий момент, мощность и частота вращения коленчатого вала идеального двигателя.

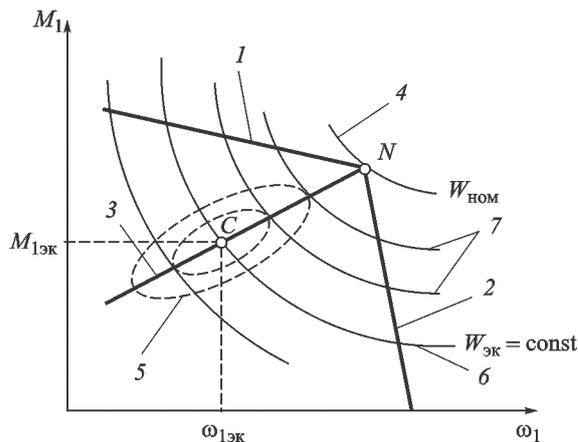


Рис. 2. Аппроксимированная параметрическая характеристика дизельного двигателя: 1 — внешняя характеристика при постоянном положении органа топливоподачи; 2 — предельная регуляторная характеристика при управлении топливоподачей регулятором скорости; 3 — экономическая характеристика; 4 — характеристика постоянной номинальной мощности; 5 — характеристика постоянного удельного расхода топлива; 6 — характеристика постоянной мощности, проходящая через точку *C* минимального удельного расхода топлива; 7 — характеристика постоянной частичной мощности

Даже при такой достаточно грубой идеализации характеристик дизельного двигателя и РМ анализ их совместной работы в установившихся равновесных режимах позволяет сделать вывод о значительном влиянии на удельный расход топлива выбора не только номинальной мощности двигателя, но и передаточного числа редуктора или КП. В зависимости от выбранного передаточного числа их совместная равновесная характеристика может быть расположена вблизи или на значительном расстоянии от наиболее экономичного режима работы. В первом случае равновесная характеристика может проходить и через точку номинального режима работы дизельного двигателя, а во втором (при неоптимальном выборе передаточного числа) она оканчивается на его внешней или регуляторной характеристике.

СА с дизельным двигателем может эксплуатироваться с редуктором, имеющим постоянное выбранное передаточное число u_{12} . Однако для выявления математической связи между мощностью *W* и u_{12} в процессе проектирования передаточное число варьируется с целью выбора его оптимального значения, обеспечивающего работу или по экономической характеристике, или с минимальным удельным расходом топлива, или с максимальной мощностью дизельного двигателя, т. е. наилучшие

динамические качества и высокую производительность СА [7, 8].

Уравнение экономической характеристики опишем через определитель второго порядка [9], в котором текущие значения крутящего момента двигателя M_1 и угловой скорости вращения его коленчатого вала ω_1 связаны между собой прямой, проходящей через точки N и C , соответствующие номинальному режиму и режиму максимальной экономичности:

$$\begin{vmatrix} M_{\text{ном}} - M_{\text{эк}} & \omega_{\text{ном}} - \omega_{\text{эк}} \\ M_1 - M_{\text{эк}} & \omega_1 - \omega_{\text{эк}} \end{vmatrix} = 0,$$

где $M_{\text{ном}}$, $M_{\text{эк}}$ и $\omega_{\text{ном}}$, $\omega_{\text{эк}}$ — крутящие моменты и угловые скорости вращения коленчатого вала двигателя, развиваемые им соответственно в номинальном режиме и режиме максимальной экономичности.

Его решением является выражение, связывающее на экономической характеристике параметры двигателя — крутящий момент M_1 и угловую скорость вращения коленчатого вала ω_1 :

$$M_1 = k_{\text{эк}} \omega_1.$$

Здесь $k_{\text{эк}}$ — коэффициент пропорциональности,

$$k_{\text{эк}} = M_{\text{ном}} \frac{1 - k_{\omega}}{\omega_{\text{ном}} (1 - k_M)},$$

где k_{ω} , k_M — коэффициенты, отражающие взаимное расположение координат точек $C(\omega_{\text{эк}}, M_{\text{эк}})$ и $N(\omega_{\text{ном}}, M_{\text{ном}})$, $k_{\omega} = \omega_{1\text{эк}}/\omega_{1\text{ном}}$, $k_M = M_{1\text{эк}}/M_{1\text{ном}}$.

При выборе оптимального передаточного числа редуктора используем идеализированную характеристику момента сил сопротивления [1, 6]

$$M_c = k_c \omega_2,$$

где k_c — коэффициент пропорциональности; ω_2 — угловая скорость вращения вала РМ.

Приведение момента сопротивления к валу двигателя осуществляется из условия равенства мощностей [6, 7]. Если пренебречь потерями энергии внутри редуктора, то значение приведенного к валу двигателя момента сопротивления будет обратно пропорционально передаточному числу [7, 8]:

$$(M_c)_{\text{ред}} = M_c / u_{12}.$$

Равновесный режим работы СА на экономической характеристике определяется из условия равенства мощностей двигателя и РМ:

$$W_1 = M_1 \omega_1 = k_{\text{эк}} \omega_1^2;$$

$$W_c = M_c \omega_2 = k_c \omega_2^2.$$

Совместное решение двух последних уравнений позволяет найти передаточное число, обеспечивающее работу дизельного двигателя по экономической характеристике и принимаемое за его оптимальное значение,

$$U_{\text{опт}} = \sqrt{k_c / k_{\text{эк}}}.$$

Расчеты при равенстве мощностей для номинального режима и режима минимального удельного расхода топлива дизельного двигателя дают те же самые результаты, т. е. работа по экономической характеристике в установившихся режимах не требует изменения передаточного числа, которое можно принять оптимальным, так как обеспечивает использование и номинальной, и экономичной мощности в зависимости от настройки системы управления скоростью двигателя.

При назначении конструктором СА иного передаточного числа, не равного $U_{\text{опт}}$, которое способно обеспечить использование меньшей так называемой частичной мощности $W_{\text{част}}$, характеризуемой коэффициентом загрузки

$$k_W = W_{\text{част}} / W_{\text{ном}},$$

получим уравнение частичной характеристики

$$M_{\text{част}} = k_{\text{част}} \omega_1,$$

где $k_{\text{част}}$ — коэффициент, определяющий наклон характеристики частичной мощности двигателя, $k_{\text{част}} = M_{\text{част}} / M_{\text{ном}}$.

Коэффициент $k_{\text{част}}$ учитывает отличие выбираемого передаточного числа от его оптимального значения для обеспечения частичного режима работы:

$$u_{12\text{част}} = u_{12\text{опт}} k_{\text{част}} = u_{12\text{опт}} \pm \Delta u_{12},$$

где Δu_{12} — абсолютное изменение передаточного числа относительно оптимального по экономической характеристике $\Delta u_{12} = |u_{12\text{опт}} - u_{12\text{част}}|$.

Изменение передаточного числа вызывает уход с экономической характеристики и увеличение удельного расхода топлива дизельного двигателя, которое можно оценить по соотношению моментов и угловых скоростей вращения на параметрической характеристике

(см. рис. 2) в зависимости от передаточного числа и коэффициента загрузки. При выборе передаточного числа меньше оптимального двигатель переходит с экономической характеристики на работу по внешней характеристике, а при выборе передаточного числа больше оптимального — по регуляторной характеристике. Подобное явление в судовых СА называют «тяжелым» и «легким» винтом [2], и в обоих случаях происходит увеличение удельного расхода топлива.

Расчет изменения удельного расхода топлива g дизельного двигателя в режиме частичной мощности можно провести в соответствии с угловой скоростью вращения коленчатого вала и развиваемым крутящим моментом или приближенно в зависимости от выбираемого передаточного числа $u_{12\text{част}}$:

$$g - g_{\min} = (g_{\text{ном}} - g_{\min}) \Delta u_{12} / u_{12\text{опт}},$$

где $g_{\text{ном}}$ и g_{\min} — удельный расход топлива в номинальном режиме и режиме максимальной экономичности.

Разгон двигателя обеспечивается либо повышением мощности сверх необходимой для его работы в установившихся режимах, либо изменением передаточного числа КП, приводящего к увеличению приведенного момента двигателя к валу РМ [6, 8]. На практике разгон СА требует одновременного изменения передаточного числа и управляющего воздействия на дизельный двигатель, что часто осуществляется при применении автоматической КП. Таким образом, возможность работы одного и того же дизельного двигателя в различных режимах определяется передаточным числом редуктора или КП СА. Если в качестве передаточного ме-

ханизма использовать вариатор или автоматическую КП, включенную в состав системы управления скоростью двигателя, то характеристику приведенного к валу РМ момента можно сделать гиперболической, как и у идеального двигателя постоянной мощности [6, 7].

Выводы

1. Установлено, что основным фактором, вызывающим снижение производительности СА с дизельным двигателем, является неоптимальный выбор передаточного числа редуктора или КП. Проведенные исследования показали, что расход топлива СА можно минимизировать по его экономической характеристике путем выбора оптимального передаточного числа с одновременным воздействием на систему управления скоростью двигателя.

2. Работа дизельного двигателя по экономической характеристике обеспечивается при постоянном оптимальном значении передаточного числа, которое определяется характеристиками этого двигателя и РМ.

3. В СА с дизельным двигателем, реальная характеристика которого не является благоприятной, предпочтительнее использовать вариатор или автоматическую КП, чтобы на валу РМ характеристика приведенного момента дизельного двигателя имела гиперболический характер, как и у идеального двигателя постоянной мощности. Диапазон изменения передаточного числа КП может быть выбран конструктором при проектировании или оператором в условиях эксплуатации по разработанному алгоритму.

Литература

- [1] Александров А.А., Иващенко Н.А., ред. *Машиностроение. Энциклопедия. Двигатели внутреннего сгорания*. Т. IV–14. Москва, Машиностроение, 2013. 784 с.
- [2] Толшин В.И., Сизых В.А. *Автоматизация судовых энергетических установок*. Москва, Консультант, 2003. 304 с.
- [3] Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Выбор оптимальной мощности двигателя внутреннего сгорания гибридной силовой установки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 4, с. 47–54.
- [4] Леонов И.В., Барбашов Н.Н. *Основы проектирования машин по динамическим и экономическим показателям*. Deutschland, LAMBERT Academic Publishing, 2015. 124 с.
- [5] Леонов И.В., Леонов Д.И. *Теория механизмов и машин*. Москва, Юрайт, 2016. 240 с.
- [6] Епишин А.Ю. К вопросу экономичности автономного подвижного состава путем совершенствования управления силовыми установками. *Естественные и технические науки*, 2012, № 6, с. 285–288.

- [7] Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Латошкин А.А. Математическая модель дизеля как источника энергии транспортной установки с электрической трансмиссией. Улучшение эксплуатационных показателей ДВС. *Наука–технология–энергосбережение. Матер. 4-й Междунар. науч.-практ. конф.* Киров, Вятская ГСХ, 2011. 210 с.
- [8] Ивашенко А.А., Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Кузнецов С.А. Моделирование процессов управления транспортными установками с дизельной и электрической трансмиссией. *Вестник Волгоградского университета. Сер. 10: Инновационная деятельность*, 2014, № 5, с. 68–77.
- [9] Выгодский М.Я. *Справочник по высшей математике*. Москва, ГИТТЛ, 1956. 783 с.

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] Tolshin V.I., Sizykh V.A. *Avtomatizatsiia sudovykh energeticheskikh ustanovok* [Automation of marine power plants]. Moscow, Konsul'tant publ., 2003. 304 p.
- [3] Barbashov N.N., Leonov I.V. *Vybor optimal'noi moshchnosti dvigatel'ia vnutrennego sgoraniia gibridnoi silovoi ustanovki* [Selection of Optimal Power of Internal Combustion Engine of Hybrid Power Plant]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 2010, no. 4, pp. 47–54.
- [4] Leonov I.V., Barbashov N.N. *Osnovy proektirovaniia mashin po dinamicheskim i ekonomicheskim pokazateliam* [Fundamentals of machine design at the dynamic and economic indicators]. Deutschland, LAMBERT Academic Publishing, 2015. 124 p.
- [5] Leonov I.V., Leonov D.I. *Teoriia mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Iurait publ., 2016. 240 p.
- [6] 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.
- [7] Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Latochkin A.A. *Matematicheskaiia model' dizelia kak istochnika energii transportnoi ustanovki s elektricheskoi transmissiei. Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazatelei DVS* [Mathematical model of diesel as an energy source of the transport unit with electric transmission. The performance improvement of internal combustion engines]. *Materialy 4-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka–tekhnologiia–energoberezhenie». Sbornik nauchnykh trudov* [Materials of 4th international scientific-practical conference «Science–technology–energy saving». Collection of scientific papers]. Киров, Viatskaia GSKh publ., 2011. 210 p.
- [8] Ivashchenko A.A., Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Kuznetsov S.A. *Modelirovanie protsessov upravleniia transportnykh ustanovok s dizel'nym i elektricheskoi transmissiei* [Simulation of the processes of driving transport vehicle with diesel and electric drivetrain]. *Vestnik Volgogradskogo Universiteta. Serii 10: Innovatsionnaia deiatel'nost'* [Science Journal of Volgograd State University. Technology and innovations]. 2014, no. 5, pp. 68–77.
- [9] Vygodskii M.Ia. *Spravochnik po vysshei matematike* [Reference book on higher mathematics]. Moscow, GITTL publ., 1956. 783 p.

Статья поступила в редакцию 09.01.2017

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: ivleonov@bmstu.ru).

Information about the author

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