

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТЬЮ СИЛОВОГО АГРЕГАТА С ДИЗЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**И.В. Леонов**

olgadleonova@bk.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Одной из важнейших характеристик силового агрегата является его экономичность. Проведенные исследования показали, что минимизировать расход топлива силового агрегата можно воздействием на систему управления скорости дизельного двигателя и путем оптимального выбора передаточного числа коробки передач. Подобная задача ставится и при управлении автоматической коробкой передач силового агрегата. Для решения такой проблемы необходима разработка алгоритма управления дизельного двигателя

Ключевые слова

Силовой агрегат, дизельный двигатель, система управления скорости, расход топлива, динамические показатели, установившийся режим работы, разгон

Поступила в редакцию 15.11.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Расход энергии, характеризующий экономичность силового агрегата (СА), является одной из важнейших его характеристик. Особую сложность представляет проектирование СА с дизельным двигателем, скорость вращения которого на режиме минимального удельного расхода топлива, как правило, не совпадает со скоростью номинального режима работы. Дополнительные трудности проектирования связаны с тем, что дизельный двигатель является элементом системы управления, в функции которой не входит управление экономичностью расхода топлива. Трудности выбора параметров СА заключаются также в том, что производительность СА, как правило, не является постоянной в процессе эксплуатации [1]. Особую трудность при проектировании СА с дизельным двигателем вызывает неоднозначная зависимость удельного расхода топлива от мощности, определяемой скоростью и крутящим моментом [2]. Для снижения расхода энергии при эксплуатации дизельного двигателя необходимо выбирать оптимальную номинальную мощность и разработать алгоритм управления мощностью, который обеспечит работу по экономической характеристике.

Силовой агрегат представляет собой соединение дизельного двигателя и рабочей машины. Его основная характеристика — передаточное число i_{12} — отношение скоростей ω_1 и ω_2 валов двигателя и рабочей машины. В настоящее время используются два типа СА: механическое соединение с помощью редуктора и коробки передач или соединение с помощью электрического генератора и электрического двигателя. В обоих случаях возникают аналогичные задачи разработки алгоритма управления дизельного двигателя по динамическим и экономическим критериям для корректировки характеристик системы управления [2, 3].

На рис. 1 изображена структурная схема СА, состоящего из двигателя 1, рабочей машины 2, механического или электрического передаточных механизмов 3, звена 4 приведения сил и моментов инерции, в качестве которого выбран вал двигателя. Структурная схема СА (а) дополнена идеализированными характеристиками его элементов (б–г). Целью идеализации характеристик является отказ от учета несущественных свойств и выявление более четкого влияния существенных свойств на решение поставленной задачи.

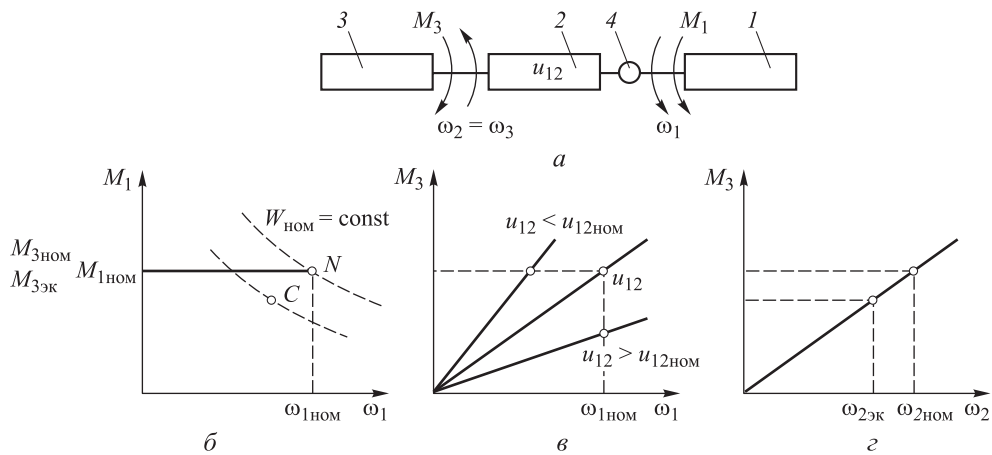


Рис. 1. Структурная схема силового агрегата и характеристики его элементов

При выборе номинальной мощности двигателя СА используется простейшая идеализированная характеристика дизельного двигателя, номинальная мощность которого отображается в виде площади прямоугольника, приведенного на рис. 1, б. Такая грубая идеализация отображает мощность дизельного двигателя с постоянным значением движущего момента M_1 вплоть до увеличения скорости вращения его вала ω_1 до значения номинальной скорости $\omega_{1ном}$, после достижения которой движущий момент резко снижается автоматическим регулятором скорости путем уменьшения подачи топлива в цилиндр. На рис. 1, в и г показаны приведенные и реальные характеристики момента сопротивления, наложенные на идеализированную характеристику дизельного двигателя.

Точкой N отмечен режим максимальной мощности, который принимается за номинальный. Номинальная мощность двигателя $W_{ном}$ (произведение номинальных значений крутящего момента и скорости) получает отражение в виде площади под зависимостью крутящего момента от скорости вращения его вала ω_1 (см. рис. 1, б). Номинальный режим расположен на пересечении двух характеристик дизельного двигателя: внешней и предельной регуляторной. Через точку N номинального режима (см. рис. 1, б) проведена гипербола — кривая постоянной мощности идеального двигателя, равной номинальной:

$$M = \frac{W_{дв}}{\omega_{дв}}.$$

На рис. 1, б показана также точка С минимального удельного расхода топлива дизельного двигателя, через которую проведена гипербола — кривая постоянной частичной мощности двигателя.

Идеализированная характеристика рабочей машины приведена на рис. 1, г в виде пропорциональной зависимости модуля крутящего момента сопротивления M_3 от скорости вала РМ ω_2 : $M_{\text{сопр}} = k_S \omega_2$.

Равновесный режим работы с постоянной скоростью движения может поддерживаться при равенстве нулю суммарного приведенного момента в каждый момент времени: $M_\Sigma = M_{\text{дв}} + M_{\text{сопр}} = 0$.

Даже при такой достаточно грубой идеализации характеристик дизельного двигателя и рабочей машины анализ их совместной работы на установившихся равновесных режимах позволяет сделать вывод о значительном влиянии выбора не только номинальной мощности, но и передаточного числа редуктора или коробки передач [3, 4]. В зависимости от выбора передаточного числа их совместная равновесная характеристика может проходить вблизи или на значительном расстоянии от наиболее экономичного режима работы. В первом случае равновесная характеристика проходит и через точку номинального режима работы дизельного двигателя. В последнем случае при неоптимальном выборе передаточного числа равновесная характеристика СА оканчивается или на внешней характеристике или на регуляторной характеристике дизельного двигателя.

Поскольку выбор оптимального передаточного числа СА является самостоятельной задачей, попробуем разработать алгоритм выбора оптимальной номинальной мощности дизельного двигателя, записав условие равновесия вала двигателя на номинальном режиме в виде равенства модуля приведенного момента сопротивления и момента двигателя как функций угловой скорости вала ω_1 .

Силовой агрегат может эксплуатироваться с постоянным выбранным передаточным числом. Однако в целях выявления математической связи экономичности работы СА с выбранным передаточным числом в процессе проектирования проводится вариация передаточного числа u_{12} в целях выбора его оптимального значения [2]. Рассмотрим при этой вариации изменение характеристики приведенного момента сопротивления к валу двигателя, которое может быть получено из условия равенства мощностей наложением приведенных характеристик момента сопротивления [5, 6] на характеристику двигателя при разных значениях передаточного числа u_{12} :

$$M_{1\text{ном}} = \frac{k_S \omega_2}{u_{12\text{ном}}}.$$

Расчетное передаточное число редуктора на номинальном режиме работы получаем, приравнявая номинальную мощность двигателя и модуль мощности сил сопротивления:

$$u_{12\text{ном}} = \omega_{1\text{ном}} \sqrt{\frac{k}{W_{\text{ном}}}}; \quad u_{12\text{ном}} = \omega_{1\text{ном}} \sqrt{\frac{k_c}{W_{\text{ном}}}}.$$

На рис. 1, в представлены приведенные к валу двигателя характеристики рабочей машины при различных фиксированных передаточных числах от скорости вала двигателя ω_1 . В зависимости от значения передаточного числа можно заставить работать дизельный двигатель на разных режимах как по внешней, так и по регуляторной характеристике. При выборе оптимального передаточного числа приведенная характеристика рабочей машины проходит через точки N и C номинального режима и режима максимальной экономичности. Таким образом, выбор оптимального передаточного числа позволяет согласовать характеристики двигателя и рабочей машины для работы двигателя по экономической характеристике и достижения максимальной мощности или снижения удельного расхода топлива [7, 8].

Однако идеализация характеристик двигателя и рабочей машины может быть различной в зависимости от цели исследования. Идеализация характеристик машины представляет собой систему принимаемых допущений в области ее описаний или изображений, при которых упрощается и ускоряется решение поставленной задачи. Если при выборе оптимального передаточного числа редуктора использовалась идеализированная характеристика двигателя в виде прямоугольника, отражающая только его мощность, то при дальнейшем более глубоком исследовании от нее можно отказаться. На рис. 2 показана другая, бо-

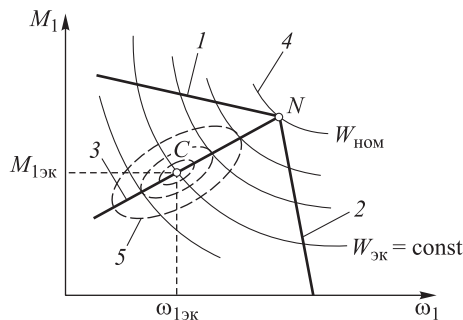


Рис. 2. Параметрическая характеристика дизельного двигателя:

1 — внешняя характеристика при постоянном положении органа топливоподачи; 2 — предельная регуляторная характеристика при управлении органа топливоподачи регулятором скорости; 3 — экономическая характеристика, проходящая через точку C минимального удельного расхода топлива; 4 — кривая постоянной мощности; 5 — кривая постоянной удельного расхода топлива

лее детальная идеализированная так называемая параметрическая характеристика дизельного двигателя, отражающая экономичность расхода энергии, где точкой C отмечен еще один важный режим работы с минимальным удельным расходом топлива g_{\min} . Вокруг точки C проведены параметрические замкнутые кривые постоянного значения удельного расхода топлива $g > g_{\min}$. Она часто называется параметрической, так как отражает влияние нескольких параметров таких, как мощность и удельный расход энергии в системе координат $M_1 - \omega_1$ — крутящий момент двигателя — скорость вращения вала двигателя. Границами этой характеристики являются: 1 — внешняя характеристика дизельного двигателя, по которой изменение крутящего момента происходит при постоянном положении органа топливоподачи; 2 — регуляторная характеристика, по которой изменение крутящего момента происходит при изменении положения ор-

гана топливоподачи автоматическим регулятором скорости; 3 — экономическая характеристика, на которой удельный расход топлива минимален при соответствующих значениях момента и скорости вала двигателя.

Замкнутые штриховые кривые постоянных значений удельного расхода топлива в некоторых точках касаются гиперболических кривых постоянной мощности двигателя, которые образуют на параметрической характеристике в системе координат $M_1—\omega_1$ экономическую характеристику 3 дизельного двигателя. На параметрической характеристике дизельного двигателя замкнутые кривые постоянного удельного расхода топлива пересекаются кривыми постоянной мощности. Это указывает на то, что одна и та же мощность W дизельного двигателя может быть реализована с разными значениями удельного расхода топлива в условиях эксплуатации, более высокими, чем по экономической характеристике.

Таким образом, экономическая характеристика проходит через две точки: точку N (номинального режима) с координатами $M_{ном}$, $\omega_{ном}$ и точку C (режима максимальной экономичности) с координатами $M_{1эк}$, $\omega_{1эк}$. Изменение мощности CA в эксплуатационных условиях предпочтительно по экономической характеристике, так как по ней возрастание удельного расхода топлива g минимально по сравнению с g_{min} .

Коэффициент пропорциональности $k_{эк}$ наклона экономической характеристики, проходящей через точки N и C , может быть связан с расположением двух характерных режимов работы дизельного двигателя (рис. 3). Значение коэффициента k_g зависит от взаимного расположения точек N и C на экономической характеристике дизельного двигателя.

Уравнение экономической характеристики может быть описано посредством определителя второго порядка [9, 10], где текущие значения параметров работы двигателя M_1 и ω_1 связаны между собой прямой экономической характеристикой, проходящей через точки N и C :

$$\begin{vmatrix} M_{ном} - M_{эк} & \omega_{ном} - \omega_{эв} \\ M - M_{эк} & \omega - \omega_э \end{vmatrix}.$$

Решение такого уравнения представляет собой зависимость момента двигателя от текущей скорости вала $M_1 = k_{эк}\omega_1$, его можно использовать для управления системой регулирования скорости двигателя на установившихся режимах работы по критерию экономичности расхода энергии. Алгоритм управления дизельного двигателя получен путем совместного

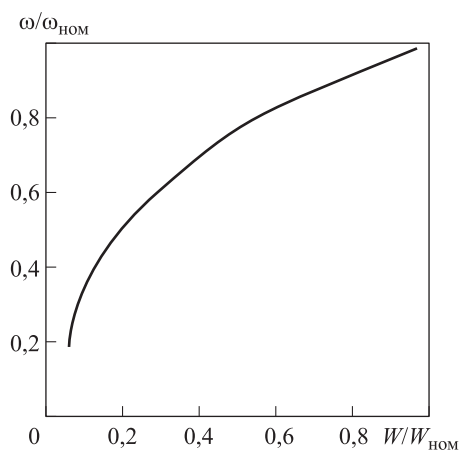


Рис. 3. График зависимости отношения текущей скорости вала двигателя к номинальному значению от отношения желаемой мощности двигателя к ее номинальному значению

решения уравнения постоянной мощности двигателя $M = W_{\text{дв}} / \omega_{\text{дв}}$ и определителя второго порядка, описывающего уравнение экономической характеристики. Он имеет вид алгебраического уравнения второго порядка, связывающего скорость вращения и мощность дизельного двигателя:

$$(M_{\text{ном}} - M_{\text{эк}})\omega^2 - Q\omega - W(\omega_{\text{ном}} - \omega_{\text{эк}}) = 0,$$

где $Q = M_{\text{эк}}(\omega_{\text{ном}} - \omega_{\text{эк}}) + \omega_{\text{эк}}(M_{\text{ном}} - M_{\text{эк}})$; $k_m = M_{1\text{эк}} / M_{1\text{ном}}$, $k_\omega = \omega_{1\text{эк}} / \omega_{1\text{ном}}$ — коэффициенты, характеризующие координаты точек наиболее экономичного и номинального режимов.

Решением полученного квадратного уравнения являются его корни, связывающие параметры дизельного двигателя на режиме постоянной мощности и на экономической характеристике: $M_1 = M_{\text{кр}}$ — крутящий момент двигателя, $\omega_1 = \omega_{\text{дв}}$ — скорость вращения вала двигателя:

$$\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} = -\frac{k_m - k_\omega}{2(1 - k_m)} \pm \sqrt{\left(\frac{k_m - k_\omega}{2(1 - k_m)}\right)^2 + \frac{1 - k_\omega}{1 - k_m} \frac{W}{W_{\text{ном}}}}.$$

В решении можно отметить два корня, соответствующие выходу экономической характеристики на внешнюю или предельную регуляторную характеристики в зависимости от коэффициента загрузки двигателя, т. е. степени использования его номинальной мощности $k_W = W / W_{\text{ном}}$.

Оптимальную номинальную мощность двигателя также можно выбирать по идеализированной характеристике дизельного двигателя в целях оценки изменения удельного расхода топлива по экономической характеристике с помощью определителя второго порядка

$$g - g_{\text{min}} = \frac{(g_{\text{ном}} - g_{\text{min}})(k_W - k_{W\text{эк}})}{(1 - k_{W\text{эк}})}.$$

Таким образом, найденное решение является алгоритмом установившейся работы дизельного двигателя по его экономической характеристике с минимальным абсолютным расходом топлива.

Разгон двигателя обеспечивается при повышении мощности сверх необходимой для его работы на равновесных режимах. В идеализированном цикле далее приведенное выражение дает возможность выразить коэффициент загрузки двигателя по мощности на установившемся режиме k_W при выборе его мощности в целях обеспечения заданных динамических качеств:

$$k_W = \frac{\eta_{\text{мех}}}{\left(1 + J_{\text{пр}} (\omega_{\text{ном}})^2\right) 2\tau_{\text{разг}} W_{\text{сопр}}},$$

где $\eta_{\text{мех}}$ — механический КПД; $\tau_{\text{разг}}$ — время разгона СА; $J_{\text{пр}}$ — приведенный момент инерции СА.

Зависимости динамических и экономических качеств СА от коэффициента загрузки двигателя k_W приведены на рис. 4.

Выбор двигателя с высоким значением коэффициента загрузки k_W влечет за собой снижение динамических качеств с одновременным увеличением расхода топлива [7, 8]. Выбирая двигатель номинальной мощности, обеспечивающей коэффициент загрузки k_W (вблизи точки минимального удельного расхода топлива), получают приемлемые динамические качества СА [9, 10]. Положение точки минимального удельного расхода топлива относительно параметров номинального режима связано со степенью форсирования дизельного двигателя. У высокофорсированного двигателя, как правило, низкое значение соотношения мощностей на наиболее экономичном и номинальном режимах, т. е. $k_{W_{\text{эк}}} = W_{\text{эк}}/W_{\text{ном}}$.

Выводы. 1. Основным фактором, вызывающим снижение экономичности силового агрегата с дизельным двигателем в эксплуатационных условиях является неблагоприятная характеристика системы управления, предопределяющая резкое изменение подачи топлива и крутящего момента при изменении скорости.

2. В силовых агрегатах с дизельным двигателем, реальная характеристика которого не является благоприятной, предпочтительно использовать вариатор или автоматическую коробку передач, чтобы на валу рабочей машины характеристика приведенного момента двигателя имела гиперболический характер, как у идеального двигателя постоянной мощности.

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

4. Управление дизельным двигателем на установившихся и переходных режимах по экономической характеристике приводит к снижению расхода топлива и не влечет значительного ухудшения динамических качеств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.А., Иващенко Н.А., ред. Машиностроение. Т. IV-14. Двигатели внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 2013. 784 с.
2. Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Латошкин А.А. Математическая модель дизеля как источника энергии транспортной установки с электрической трансмиссией // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «Наука–технология–энергосбережение». Киров: Вятская ГСХ, 2011. 210 с.

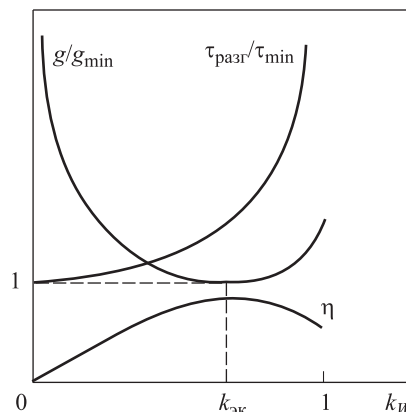


Рис. 4. Зависимости динамических и экономических качеств СА от коэффициента загрузки:

$\tau_{\text{разг}}$ — время разгона; g — удельный расход топлива; η — эффективный КПД дизельного двигателя

3. Иващенко А.А., Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Кузнецов С.А. Моделирование процессов управления транспортными установками с дизелем и электрической трансмиссией // Вестник Волгоградского университета. Сер. 10. Инновационная деятельность. 2014. № 5. С. 68–77.
4. Леонов И.В., Леонов Д.И. Теория механизмов и машин. М.: Юрайт. Высшее образование, 2016. 240 с.
5. Епишин А.Ю. К вопросу экономичности автономного подвижного состава путем совершенствования управления силовыми установками // Естественные и технические науки. 2012. № 6. С. 285–288.
6. 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.
7. Леонов И.В., Барбашов Н.Н. Основы проектирования машин по динамическим и экономическим показателям. Deutschland, Academic Publishing, 2015. 124 с.
8. Толицин В.И., Сизых В.А. Автоматизация судовых энергетических установок. М.: Консультант, 2003. 304 с.
9. Леонов И.В. Энергетический анализ цикла грузоподъемной машины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 3. С. 22–26.
DOI: 10.18698/0536-1044-2012-3-22-26
10. Vidal P. Aide memoire d'automatique. Paris: Dunod, 1985. 196 p.

Леонов Игорь Владимирович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Леонов И.В. Алгоритм управления экономичностью силового агрегата с дизельным двигателем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 1. С. 83–91.
DOI: 10.18698/0236-3941-2018-1-83-91

EFFICIENCY CONTROL ALGORITHM OF DIESEL POWER UNIT

I.V. Leonov

olgadleonova@bk.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

One of the most important characteristics of power unit is its efficiency. Recent studies show that to minimize fuel economy of power unit one should affect the speed control system of diesel engine through optimal selection of transmission ratio. The same problem is set during control of power unit's automatic gearbox. In this paper to solve this problem, the control algorithm development is considered

Keywords

Power unit, diesel engine, speed control system, fuel economy, dynamic indicators, stable speed operation, acceleration

Received 15.11.2016
© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Aleksandrov A.A., Ivashchenko N.A., red. Mashinostroenie. T. IV-14. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Mechanical engineering. Vol. IV-14. Combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013. 784 p.
- [2] Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Latochkin A.A. Matematicheskaya model' dizelya kak istochnika energii transportnoy ustanovki s elektricheskoy transmissiyey [Diesel mathematical model as power source for transport plant with electric transmission]. *Materialy 4-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauka–tehnologiya–energoberezhenie»* [Proc. 4th Int. sci.-practice conf. "Science- technology-energy saving"]. Kirov, Vyatskaya GSKh Publ., 2011. 210 p. (in Russ.).
- [3] Ivashchenko A.A., Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Kuznetsov S.A. Simulation of the processes of driving transport vehicle with diesel and electric drivetrain. *Vestnik Volgogradskogo universiteta. Ser. 10. Innovatsionnaya deyatel'nost'*, 2014, no. 5, pp. 68–77 (in Russ.).
- [4] Leonov I.V., Leonov D.I. Teoriya mekhanizmov i mashin [Machines and mechanisms theory]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 240 p.
- [5] Epishin A.Yu. To the question of autonomous rolling equipment cost effectiveness by means of power unit control improvement. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 6, pp. 285–288 (in Russ.).
- [6] Barbashov N.N., Leonov I.V. Selection of optimal power of internal combustion engine of hybrid power plant. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie*, 2010, no. 4, pp. 47–54 (in Russ.).
- [7] Leonov I.V., Barbashov N.N. Osnovy proektirovaniya mashin po dinamicheskim i ekonomicheskim pokazatelyam [Machines design baseline based on dynamic and economic performance]. Deutschland, Academic Publishing, 2015. 124 p.
- [8] Tolshchin V.I., Sizykh V.A. Avtomatizatsiya sudovykh energeticheskikh ustanovok [Automation of ship high-power units]. Moscow, Konsul'tant Publ., 2003. 304 p.
- [9] Leonov I.V. Power consumption analysis of the delivery vehicles cycle. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 3, pp. 22–26 (in Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2012-3-22-26
- [10] Vidal P. Aide memoire d'automatique. Paris, Dunod, 1985. 196 p.

Leonov I.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Leonov I.V. Efficiency Control Algorithm of Diesel Power Unit. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 1, pp. 83–91 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2018-1-83-91