

**ПРОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ УСТАНОВКОЮ ПОРШНІВ  
З КОРУНДОВИМ ШАРОМ**

*В.В. Шпаковський*

У статті приводиться аналіз результатів випробувань літака Z-37 Chemelak з авіаційним двигуном AI-14M з корундовим шаром на робочих поверхнях поршнів. Установка поршнів з корундовим шаром дозволила поліпшити експлуатаційні характеристики літака: на 20% збільшилася швидкість обертання гвинта на номінальному режимі, на 15°C – 22 °C знизилася температура масла у всіх циліндрах, на 18 м зменшилася довжина пробігу при зльоті.

**PROLONGATION OF THE RESOURCE OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE BY INSTALLATION  
OF PISTONS WITH CORUNDUM LAYER**

*Shpakovskyy V. V.*

In a paper the analysis of results of trials Z-37 Chemelak with corundum a layer on working surfaces pistons aviation engine AI-14M is presented. Installation of pistons with corundum layer has allowed to improve operating performances of the plane: speed of rotation of the screw increased more than by 20 % on a nominal regime, on 15°C - 22 °C the oil temperature in all cylinders has decreased, the run-length was decreased more than by 18 m at flight.

УДК 006:536.7

*В.Д. Зонов*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРИТЕРИЯ ПРИРАБОТКИ  
ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПРИ  
ЗАВОДСКИХ ОБКАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ**

*Приведена математическая модель критерия стабилизации расхода топлива, оценивающего качество приработки цилиндропоршневой группы (ЦПГ) в реальном времени обкаточных испытаний тепловозных дизелей на раме тепловоза. Дана оценка влияния на критерий стабилизации расхода топлива внезапности включения-отключения вспомогательного оборудования, соединённого с коленчатым валом двигателя через клиноременную передачу и редуктор с компрессором и вентиляторами водяного и воздушного охлаждения. Отмечено, что математическое моделирование внезапности включения-отключения, проведенное на основе закона нормального распределения, не выявило существенного влияния на критерий стабилизации расхода топлива, с помощью которого производилась оценка качества приработки ЦПГ.*

**Введение**

При проведении заводских обкаточных испытаний дизель-генераторов на раме тепловозов возникает проблема выбора критерия качества приработки пары трения поршневое кольцо-гильза цилиндра на каждом обкаточном режиме испытаний в реальном масштабе времени. Проблема выбора осложняется тем, что режимы, на которых происходит основная приработка цилиндропоршневой группы (ЦПГ), – ненормальные ( $n=300\text{min}^{-1}$  -  $n=450\text{min}^{-1}$ ), отличаются низкими индикаторными показателями рабочего процесса. Причиной низких индикаторных показателей принято считать неустойчивый процесс топливоподачи, характеризующийся пропусками впрыска топлива и неравномерностью впрыскиваемого топлива по циклам и цилиндрам. В результате, в работающих цилиндрах на ненормальных режимах постоянно происходят перераспределения мощности при установленной нагрузке обкаточного режима. Учитывая данный фактор, становится понятным стремление к выбору критерия качества приработки пары трения поршневое кольцо-гильза цилиндра ЦПГ в реальном времени обкаточных испытаний.

Выбор критерия должен обеспечить методологию неразрушающего контроля качества приработки ЦПГ в реальном времени на всех обкаточных режимах испытаний тепловозных дизелей на раме тепловоза. Применение критерия, обеспечивающего методологию неразрушающего контроля качества приработки ЦПГ, является основой создания сокращённой энергосберегающей технологии заводских обкаточных испытаний.

**Анализ ранее проведенных исследований и постановка задачи.**

Анализ качества приработки пары трения поршневое кольцо-гильза цилиндра ЦПГ тепловозных дизелей на основных, ненормальных обкаточных режимах показал, что основное влияние на приработку оказывает процесс топливоподачи, характеризующийся пропусками впрыска и неравномерностью впрыскиваемого топлива по циклам и цилиндрам. Дополнительно, оказывает влияние и фактор внезапного включения – отключения вспомогательного оборудования: компрессора, вентиляторов основного и дополнительного контуров водяного охлаждения дизель-генератора, вентиляторов охлаждения тяговых двигателей.

Из литературных источников известно, что приведенные факторы весьма негативны и их влияние (на протяжении всего жизненного цикла), до настоящего времени недостаточно полно изучено.

Существующая практика оценки качества приработки ЦПГ тепловозных дизелей в заводских и деповских условиях основана на методах разрушающего контроля, который сам по себе не только малоэффективен, но требует больших материальных затрат.

Использовался рядом исследователей и метод контроля качества на базе выборочных измерений расхода топлива. Однако, в этом случае учёт влияния включения-выключения вспомогательного оборудования, на величину расхода топлива не производился.

Как показала практика, применяемые методы не позволяют дать точную оценку качества приработки зеркала ЦПГ по характеру изменения величин расхода топлива в реальном масштабе времени.

#### Результаты проведенных исследований.

Математическая модель критерия качества приработки ЦПГ создавалась на основе работ [1, 2, 3, 4, 5], позволивших обосновать теорию устойчивого процесса топливоподачи во всём диапазоне частот вращения и нагрузки тепловозных дизелей. Дальнейшее развитие теории подтверждено патентом на форсунку специальной конструкции [6], которая на практике обеспечила устойчивый закон топливоподачи на всех режимах работы тепловозных дизелей.

Устойчивый закон топливоподачи, реализованный форсунками специальной конструкции, позволил обосновано подойти к математическому моделированию критерия, оценивающего качественную сторону приработки ЦПГ дизеля, как на станции испытания дизелей, так и раме тепловоза, в реальном времени.

Программное обеспечение математической модели реализовано в сертифицированном приборе измерения расхода топлива АК-ДТ 0,5, который позволяет фиксировать момент стабилизации расхода топлива, выбранного нами в качестве критерия стабилизации расхода топлива ( $K_{ge}^{ct}$ ), в реальном времени на каждом обкаточном режиме.

Выбранный критерий позволил обеспечить и метод неразрушающего контроля качества приработки ЦПГ в реальном масштабе времени на каждом обкаточном режиме испытаний.

Выбранный критерий, подтвердив свою эффективность на станции испытания дизелей, потребовал дополнительного математического моделирования и доработки программного обеспечения, учитывающего внезапность и периодичность

включения-отключения вспомогательного оборудования дизелей на раме тепловоза, которое ранее никогда не рассматривалось.

Математическое моделирование включения-отключения вспомогательного оборудования и их влияния на критерий ( $K_{ge}^{ct}$ ) стабилизации расхода топлива производилось на основе закона нормального распределения.

При этом математическая модель оптимизировалась с учётом выбора режимов сокращённых обкаточных испытаний. Программное обеспечение разработанной математической модели реализовано в рамках неразрушающего контроля качества приработки ЦПГ в реальном времени испытаний.

При разработке математической модели особую трудность создавал аппарат контроля и учёта внезапных по продолжительности ( $t_{пр}$ ) включения-отключения вентилятора охлаждения воды основного контура ( $t_{в.о.к}$ ) и тормозного компрессора ( $t_{тк}$ ).

Для этого случая влияние на критерий стабилизации расхода топлива имеет вид:

$$K_{ge}^{ct} = t_{и} + \frac{\kappa \cdot r}{r - f_{реж}} (t_{в.о.к} + t_{т.к} + t_{пр}), \quad (1)$$

где  $t_{и}$  – время проведения обкаточных испытаний;  $\kappa$  – плотность режимов обкаточных испытаний;  $r$  – время обкаточного режима;  $f_{реж}$  – часть времени работы дизеля при внезапном включении-выключении вспомогательного оборудования.

Увеличение длительности включения-выключения во время полезного использования  $t_{и}$  нежелательно, так как длительность  $t_{в.о.к}$  и  $t_{т.к}$  влияет на  $K_{ge}^{ct}$ .

В процессе исследований было принято, что закон распределения определяющего параметра (ОП) внезапного включения-выключения различного вспомогательного оборудования является функцией внезапной периодичности ОП. При увеличении длительности испытаний увеличивается объём информации о ходе влияния ОП, а, следовательно, уменьшается степень случайности процесса. Для выявления зависимости ( $K_{ge}^{ct}$ ) стойкости ОП от длительности внезапного включения-выключения аппроксимирована гиперболическая зависимость

$$\sigma_V = \varphi(t_{пр}) = \frac{1}{p + q_{tm.к}}, \quad (2)$$

где  $q$  – коэффициент, характеризующий скорость убывания дисперсии

$$p = \frac{1}{\sigma(0)}. \quad (3)$$

В этом случае зависимость  $K_{ge}^{ct}$  от длительности включения-выключения вспомогательного оборудования принимает вид:

$$K_{ge}[\varphi(t_{np})] = \frac{S_0 - S_{кр}}{V_2[\varphi(t_{т.к})]}, \quad (4)$$

где  $S_0$  и  $S_{кр}$  – соответственно, начальное и критическое значения ОП;  $V_2$  – верхняя граница скорости изменения ОП.

Таким образом, задача сводится к отысканию зависимости внезапного включения-выключения вспомогательного оборудования применительно к различным законам плотности разделения скорости изменения ОП.

В случае равномерного закона плотности распределения скорости изменения ОП математическое ожидание и дисперсия имеют вид:

$$m_V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2), \quad (5)$$

$$\sigma_V = \frac{V_2 - V_1}{2\sqrt{3}}, \quad (6)$$

где  $V_1$  – нижняя граница скорости изменения ОП.

Учитывая, что равномерный закон является симметричным и длительность внезапного включения-выключения не изменяет положение математического ожидания  $m_V$ , можно записать

$$\tau = \frac{S_0 - S_{кр}}{m_V + \sqrt{3} \frac{1}{p + qt_{np}}}. \quad (7)$$

Равенство (7) приводится к виду

$$\tau = \Theta \frac{c_1 + b_1 t_{np}}{c'_1 + b_1 t_{np}} \quad (8)$$

$$c_1 = m_V p; \quad \frac{1}{p} = \sigma_V; \quad \Theta = \frac{S_0 - S_{кр}}{m_V}, \quad b = m_V q,$$

$$c'_1 = c_1 \sqrt{3}.$$

Аналогично в случае закона Симпсона при

$$m_V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2); \quad (9)$$

$$\sigma_V = \frac{V_1 + V_2}{2\sqrt{6}}; \quad (10)$$

$$\tau = \Theta \frac{c_1 + b_1 t_{np}}{c'_1 + b_1 t_{np}}, \quad (11)$$

$$c'_1 = c_1 + \sqrt{6}$$

$t_{np} = 0$  для (11) справедливо

$$\tau = \Theta \frac{c_1}{c'_1}. \quad (12)$$

Кривая (11) представляет собой равнобочную гиперболу, отнесенную к асимптотам, центр симметрии которой смещен в точку с координатами

$$\left(-\frac{c_1}{c'_1}, \Theta\right).$$

По закону Симпсона получается аналогичное выражение с координатами центра симметрии

$$\left(-\frac{c_1}{c'_1}, \Theta\right).$$

$$\tau = \frac{S_0 - S_{кр}}{m_V} \cdot \frac{c_1}{c'_1}. \quad (13)$$

На рис. 1, 2 представлены зависимости  $\tau = f(t_{np})$ , построенные по выражениям (8) и (11) при значениях стойкости ( $K_{ge}^{cm}$ ) и продолжительности внезапного включения-выключения ОП.

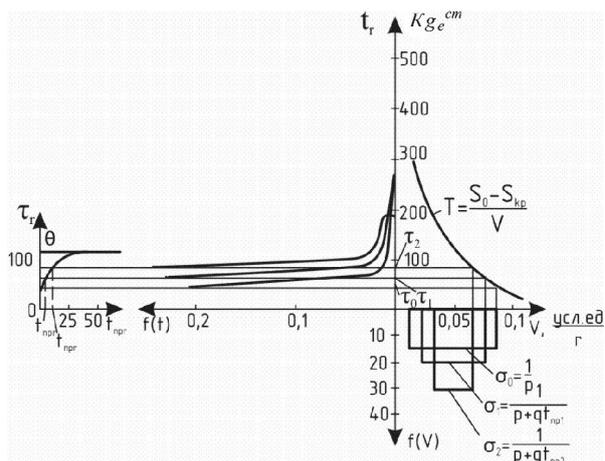


Рис.1. Зависимость между стойкостью ( $K_{ge}^{cm}$ ) и продолжительностью внезапного включения-выключения различного оборудования при равномерной плотности распределения скорости изменения ОП

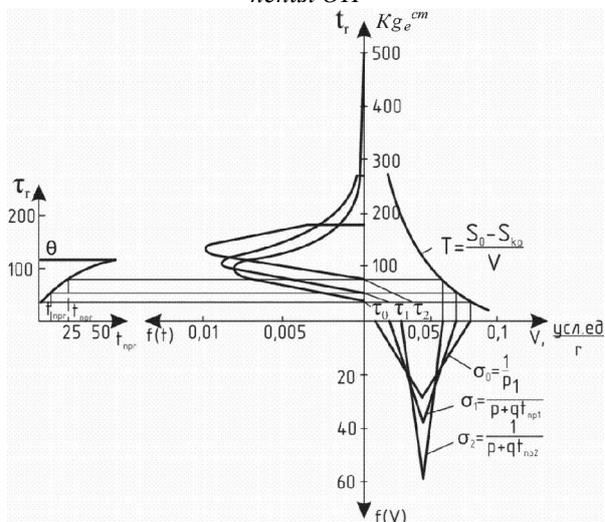


Рис.2. Зависимость между стойкостью ( $K_{ge}^{cm}$ ) и продолжительностью внезапного включения различного оборудования при плотности распределения скорости изменения ОП по закону Симпсона

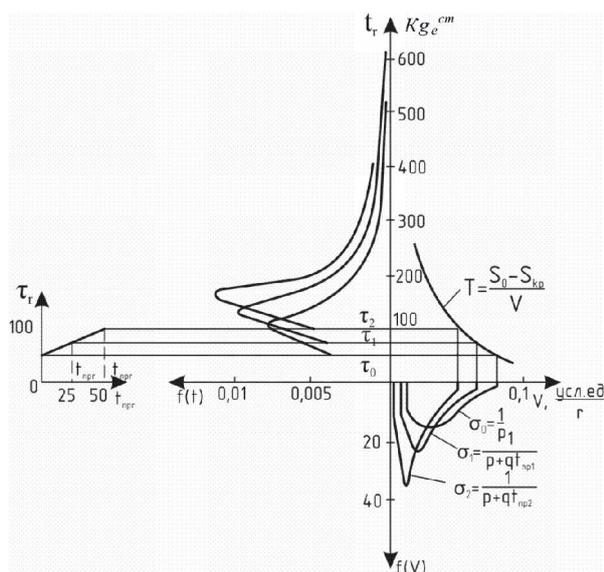


Рис.3. Зависимость между стойкостью ( $K_{ge}^{cm}$ ) и продолжительностью внезапного включения различного оборудования при плотности изменения скорости изменения ОП по закону Вейбулла

Анализ характера зависимости (между стойкостью выбранного критерия и продолжительностью включения-выключения различного оборудования), проведенного в рамках нижеприведенных формул

$$S_0 - S_{кр} = 5 \text{ усл. ед.}; V_1 = 0,01 \frac{\text{усл. ед.}}{\text{ч}};$$

$$V_2 = 0,08 \frac{\text{усл. ед.}}{\text{ч}}$$

показал, что с увеличением длительности внезапного включения-выключения различного оборудования при принятой зависимости  $\tau = f(t_{пр})$  стойкость асимптотически приближается к параметру  $\Theta \cdot (\Theta = 110\text{ч})$ .

В случае усеченного распределения Вейбулла, являющегося асимметричным распределением, уменьшение дисперсии в результате внезапного включения-выключения оборудования влечет за собой уменьшение математического ожидания, вследствие чего точное аналитическое выражение зависимости стойкости от внезапного включения-выключения различного оборудования получить трудно. Численный анализ при различных вариациях параметров закона Вейбулла показывает, что зависимость стойкости ( $K_{ge}^{ct}$ ) от внезапного включения-выключения различного оборудования приближенно может быть представлена эмпирическим соотношением

$$\tau[\varphi(t_{пр})] \cong \frac{S_0 - S_{кр}}{V_2} + \kappa' t_{пр}, \quad (14)$$

где  $\kappa' \cong \frac{a \cdot q}{2}$ .

При распределении Релея,  $a=2$ , а при экспоненциальном,  $a=1$ . Зависимость (14) представлена на рис. 3 при  $S_0 - S_{кр} = 5 \text{ усл. ед.}; V = 0,01 \frac{\text{усл. ед.}}{\text{ч}};$

$$V = 0,08 \frac{\text{усл. ед.}}{\text{ч}}; \Theta = 2; q = 2.$$

Зависимость  $t(t_{пр})$  является убывающей функцией от  $t_{пр}[2]$  и может быть аппроксимирована функцией вида

$$t_B = \frac{1}{c_2 + b_2 t_{пр}}. \quad (15)$$

Использование формул (1), (8), (11), (14) и (15) позволяет получить

$$t_{и} = \Theta \frac{c_1 + b_1 t_{пр}}{c_1' + b_1' t_{пр}} - \frac{\kappa \cdot r}{r - f_{реж}} \left( \frac{1}{c_2 + b_2 t_{пр}} + t_{пр} \right); \quad (16)$$

$$t_{и} = \Theta \frac{c_1 + b_1 t_{пр}}{c_1' + b_1' t_{пр}} - \frac{\kappa \cdot r}{r - f_{реж}} \left( \frac{1}{c_2 + b_2 t_{пр}} + t_{пр} \right); \quad (17)$$

$$t_{и} = \frac{S_0 - S_{кр}}{V_2} - \frac{aq}{2} - \frac{\kappa \cdot r}{r - f_{реж}} \left( \frac{1}{c_2 + b_2 t_{пр}} + t_{пр} \right); \quad (18)$$

Время полезного использования ( $t_{и}$ ) имеет максимум при  $t_{пр} = t_{пр. опт}$ . Значение  $t_{пр. опт}$  может быть найдено графически или в результате решения уравнений (16) ÷ (18) на экстремум:

$$\frac{dt_{и}}{dt_{пр}} = 0. \quad (19)$$

Уравнения (16), (17) сводятся к алгебраическому уравнению 4-й степени, а уравнение (18) – 2-й степени относительно  $t_{пр. опт}$ .

Так, при значениях  $c_2 = b_2 = 0,04 \frac{1}{\text{ч}}$ ,  $\kappa = 1$

$$q = 1, S_0 - S_{кр} = 5_{\text{усл. ед.}}; V_1 = 0,01 \frac{\text{усл. ед.}}{\text{ч}}, V_2 =$$

$\frac{\text{усл. ед.}}{\text{ч}}$  можно определить, что для случаев (17) и (18)  $\tau_{опт}$  соответственно равны 7,0 ч и 8,2 ч сокращённых обкаточных испытаний.

Следует отметить, что в предлагаемой математической модели критерий стабилизации расхода топлива ( $K_{ge}^{ct}$ ) учитывал оптимальный объем технологических операций, включая, как существующую методологию, так и методологию проведения сокращённых обкаточных испытаний [7].

### Заключение

Математическое моделирование критерия ста-

билизации расхода топлива и влияния на него внезапности включения-отключения различного вспомогательного оборудования, подтверждает на практике высокую степень точности контроля неразрушающим методом качества приработки цилиндропоршневой группы в реальном времени на каждом обкаточном режиме испытаний тепловозного дизеля.

**Список литературы:**

1. Зонов В.Д. Математическое моделирование и исследование энергетических характеристик топливopодачи в форсунках специальной конструкции / В.Д. Зонов // Межвуз. сб. научн. трудов. – Харьков: УкрГАЗТ, 2005. – Вып. 70. – С. 112-122. 2. Зонов В.Д. Критерий контроля показателя качества энергетических характеристик топливopодачи форсунками специальной конструкции тепловозов / В.Д. Зонов, Н.И. Данько // Научно-практический журнал «Новини науки Придніпров'я». – 2006. - № 1. – С.25-28. 3. Зонов В.Д. Математичне моделювання процесу паливopодачі у форсунках спеціальної конструкції / В.Д. Зонов, С.А. Єроценков, А.Л. Григорьев // Зб.наук.праць/ ХарДАЗТ, – 2001.-Вип.45 -с. 82-88. 4. Зонов В.Д. Анализ причин и определение условий, обеспечивающих герметичность плоского дифференциального клапана форсунки / В.Д. Зонов, Г.Б. Розенблит, А.Л. Григорьев // Двигатели внутреннего сгорания: Вестник ХГПУ. – 1999.-Вып.58 - с.82-91. 5. Зонов В.Д. Прогнозно-математические методы оценки качества энергосберегающих технологий приработки цилиндропоршневой группы тепловозного дизеля / В.Д. Зонов // Вісник інженерної академії України. – № 3-4.– 2007. – с. 124-

129. 6. Пат. на корисну модель № 30267. Форсунка спеціальної конструкції для дизельного та газодизельного процесу / Зонов В.Д. (Україна). – 7F02M45/00; заявл. 27.07.2007; опубл. 25.02.2008, Бюл. №4. 7. Пат.на корисну модель № 47003. Спосіб гарячої обкатки двигуна внутрішнього згорання / Зонов В.Д. (Україна). – F02B79/00 G01M15/04; заявл.04.08.2009, опубл.11.01.2010, Бюл.№1.

**Bibliography (transliterated):**

1. Zonov V.D. Matematicheskoe modelirovanie i issledovanie jenergeticheskikh harakteristik toplivopodachi v forsunkah special'noj konstrukcii / V.D. Zonov // Mezhvuz. sb. nauchn. trudov. – Har'kov:UkrGAZHT, 2005. – Вып. 70. – С. 112-122. 2. Zonov V.D. Kriterij kontrolja pokazatelja kachestva jenergeticheskikh harakteristik toplivopodachi forsunkami special'noj konstrukcii teplovozov / V.D. Zonov, N.I. Dan'ko // Naukovo-praktichnij zhurnal «Novini nauki Pridniprov'ja». – 2006. - № 1. – С.25-28. 3. Zonov V.D. Matematichne modeljuvannja procesu palivopodachi u forsunkah special'noi konstrukcii / V.D. Zonov, S.A. Eroshhenkov, A.L. Grigor'ev // Zb.nauk.prac'/ HarDAZT, – 2001.-Vip.45 -с. 82-88. 4. Zonov V.D. Analiz prichin i opredelenie uslovij, obespechivajushhih germetichnost' ploskogo differencial'nogo klapano forsunki / V.D. Zonov, G.B. Rozenblit, A.L. Grigor'ev // Dvigateli vnutrennego sgoranija: Vestnik HGPU. – 1999.-Vyp.58 - с.82-91. 5. Zonov V.D. Prognozno-matematicheskie metody ocenki kachestva jenergosberegajushhih tehnologij prirabotki cilindroporshnevoj grupy teplovoznogo dizelja / V.D. Zonov // Visnik inzhenernoi akademii Ukraini. – № 3-4.– 2007. – с. 124-129. 6. Pat. na korisnu model' № 30267. Forsunka special'noi konstrukcii dlja dizel'nogo ta gazodizel'nogo procesu / Zonov V.D. (Ukraina). – 7F02M45/00; zjavl. 27.07.2007; opubl. 25.02.2008, Bjul. №4. 7. Pat.na korisnu model' № 47003. Sposib garjachoї obkatki dviguna vnutrishn'ogo zgorannja / Zonov V.D. (Ukraina). – F02B79/00 G01M15/04; zjavl.04.08.2009, opubl.11.01.2010, Bjul.№1.

Поступила в редакцию 20.06.2014

**Зонов Виктор Дмитриевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры управления эксплуатационной работы Украинской государственной академии железнодорожного транспорта «УкрГАЗТ», e-mail: D\_Zonov@mail.ru

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КРИТЕРІЮ ПРИРОБЛЕННЯ ЦИЛІНДРОПОРШНЕВОЇ ГРУПИ ДИЗЕЛІВ ТЕПЛОВОЗІВ ПРИ ЗАВОДСЬКИХ ОБКАТУВАЛЬНИХ ВИПРОБУВАННЯХ**

**В.Д. Зонов**

Приведена математична модель критерію стабілізації витрати палива, що оцінює якість прироблення пари тертя поршневе кільце-гільза циліндра на станції випробування дизелів і на рамі тепловоза, з урахуванням раптовості включення-відключення допоміжного устаткування тепловоза, при заводських обкатувальних випробуваннях. Приведений вплив раптовості включення – виключення допоміжного устаткування на критерій стабілізації витрати палива.

**MATHEMATICAL MODEL OF RUNNING-IN CRITERION IN THE PISTON-CYLINDER UNIT OF LOCOMOTIVE DIESELS ENGINE DURING FACTORY TESTING**

**V.D.Zonov**

The mathematical model of criterion of stabilizing of fuel consumption, which allow to estimate quality of run in of pair of friction piston ring-shell of cylinder at the station of test of diesels and on the frame of diesel engine is resulted, taking into account the suddenness of including-disconnecting of ancillaries of diesel engine, at factory tests. Influence of suddenness of on-off ancillaries on the criterion of stabilizing of consumption of fuel is resulted.

*Н. М. Луков, О. Н. Ромашкова, А. С. Космодамианский, Г. Ф. Кашников*

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ЛОКОМОТИВА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА

*Для определения качества работы систем регулирования частоты вращения вала энергетической установки локомотива необходимо знать не только статические, но и динамические характеристики и параметры установки как объекта регулирования частоты вращения вала. Впервые приводятся методика графоаналитического расчета динамических характеристик и параметров установки и зависимости их от условий и режимов работы, а также динамические характеристики и параметры дизель-генератора типа 10Д100 тепловоза 2ТЭ10М. Методика дает возможность не только рассчитать динамические параметры (факторы устойчивости и постоянную времени) установки, но и определить зависимости их от частоты вращения вала установки и цикловой подачи топлива. Она может быть использована при расчете оптимальных настроек не только обычных систем, но и самонастраивающихся адаптивных автоматических систем.*

Как известно, любая автоматическая система содержит две основные, соединенные встречно параллельно, функциональные части: объект регулирования (ОР) и автоматический регулятор (АР). Любой АР содержит две основные, соединенные последовательно, функциональные части: управляющий орган (УО) и исполнительно-регулирующее устройство (ИРУ). УО содержит устройства: измерительное (ИУ) (датчик регулируемой величины), задающее (ЗУ), сравнивающее (СУ), усилительно-преобразующее (УУ). В свою очередь ИРУ содержит две основные соединенные последовательно функциональные части: исполнительный механизм (ИМ) и регулирующий орган (РО) [1, 2]. В автоматических регуляторах частоты вращения вала (АРЧВВ) непрямого действия, содержащих в качестве РО аппаратуру подачи топлива (топливную аппаратуру (ТА)) (регулирующего воздействия  $\mu$ ) в ДВС, функции ИМ выполняет пневматический, гидравлический или электромагнитный привод реек топливных насосов высокого давления (ТНВД) или иглы форсунки [2].

В автоматической системе регулирования частоты вращения вала энергетической установки локомотива (АСРЧВВЭУЛ) функции ОР частоты вращения вала (ОРЧВВ) выполняют дизель-генератор, турбогенератор или дизель-гидравлическая установка. Во всех случаях (рис. 1) регулируемой выходной

величиной  $\varphi$  является частота вращения вала  $\omega_s$  (или  $n_{дг}$ ), регулирующим входным воздействием  $\mu$  - изменение подачи топлива  $g_u$  (или перемещение реек ТНВД  $h_p$  для дизелей [2]) в тепловой двигатель. По статическим и динамическим характеристикам и параметрам объекта регулирования подбирается к нему автоматический регулятор. В АСРЧВВЭУЛ обычно применяются пропорционально интегральные (ПИ) или пропорционально интегрально дифференциальные (ПИД) АРЧВВ. Для определения устойчивости и показателей качества работы (перерегулирования, времени регу-

лирования и др.) АСРЧВВЭУЛ необходимо знать не только статические, но и динамические характеристики и параметры ЭУЛ как ОРЧВВ. В научнотехнической литературе по регулированию ДВС не имеется методик расчета динамических характеристик и параметров ЭУЛ как объекта регулирования частоты вращения вала и зависимости их от условий и режимов работы ЭУЛ. В данной статье впервые приводятся методика графоаналитического расчета динамических характеристик и параметров ЭУЛ как объекта регулирования частоты вращения вала и динамические характеристики и параметры дизель-генератора типа 10Д100 тепловоза 2ТЭ10М.

Экспериментально установлено, что приращение вращающего момента дизеля  $\Delta M_D$  прямо пропорционально приращению цикловой подачи  $\Delta g_u$  топлива:  $M_D = C_g g_u$  [2, 3]. А так как подача топлива прямо пропорциональна перемещению реек ТНВД, то  $M_D = C_h h_p$ . Так для тепловозного дизель-генератора 10Д100  $C_h = 1900$  Нм/мм, а для дизель-генератора Д70  $C_h = 1400$  Нм/мм.

Внешним входным возмущающим воздействием  $\lambda$  является изменение мощности  $N_e$  теплового двигателя, которая в статике равна мощности потребителя энергии  $N_{п}$  (мощности нагрузки). Таким образом, ОРЧВВ имеет два входных воздействия: изменение подачи топлива  $g_u$  (или  $h_p$ ) и изменение мощности нагрузки  $N_{п}$  и один выходной сигнал (регулируемую величину) - частоту вращения вала  $\omega_s$  (или  $n_{дг}$ ) (рис. 1) [1-6].

Отклонение регулируемой величины (частоты вращения вала  $\omega_s$  (или  $n_{дг}$ ) относят обычно к её номинальному значению, тогда относительное значение этой величины  $\varphi = (\omega_s - \omega_{s0}) / \omega_{s0}$ .

Относительные отклонения воздействий (перемещение РО, изменение нагрузки) принято относить к максимальному воздействию. Тогда относительные изменения регулирующего  $\mu$  и возмущающего (вращающего момента)  $\lambda$  воздействий (в безразмерных единицах) выражаются соот-

ответственно  $\mu = (g_u - g_{uo}) / g_{u\max}$  (или  $(h_p - h_{po}) / h_{p\max}$ ) и  $\lambda = (M - M_o) / M_{\max}$ .

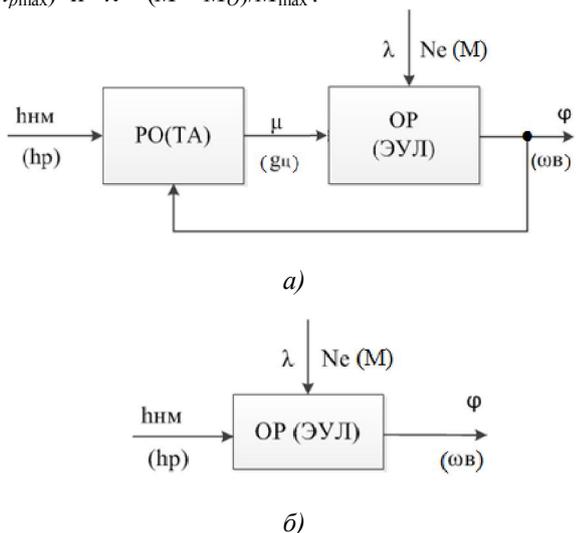


Рис. 1. Функциональная схема ОРЧВВ  
а – с выделением РО; б – ОРЧВВ

При максимальных воздействиях, т. е. при  $g_u - g_{uo} = g_{u\max}$  (или  $h_p (h_p - h_{po}) / h_{p\max}$ ) или  $M - M_o = M_{\max}$  относительные изменения воздействий будут равны единице, т. е.

$$\mu_{\max} = \frac{(g_u - g_{uo})}{g_{u\max}} = 1 \quad (1)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{(M - M_o)}{M_{\max}} = 1 \quad (2)$$

Выраженные уравнениями (1,2) максимальные воздействия соответствуют единичным однократным воздействиям.

В ЭУЛ вследствие изменения вращающих моментов двигателя  $M_d$  и потребителя его энергии (агрегата нагрузки)  $M_{\Pi}$  на величину  $\Delta M$  за время  $dt$  изменится частота вращения вала на величину  $d\omega_e$ , т. е.

$$[(M_d - M_{до}) - (M_{\Pi} - M_{\Piо})] dt = J_B d\omega_e, \quad (3)$$

откуда

$$(M_d - M_{до}) - (M_{\Pi} - M_{\Piо}) = \frac{J_B d\omega_e}{dt}, \quad (4)$$

где  $(M_d - M_{до})$  – изменение момента двигателя;  $(M_{\Pi} - M_{\Piо})$  – изменение момента потребителя;  $J_B$  – динамический момент инерции ЭУЛ для дизель-генератора 10Д100 тепловоза 2ТЭ10М он равен  $863,3 \text{ Нм}^2$  [2];  $d\omega_e/dt$  – скорость изменения частоты вращения вала ЭУЛ.

Зависимость момента двигателя от положения РО ( $h_p$  или подачи топлива  $g_u$ ) и от частоты вращения вала  $\omega_e$  может быть также описана уравнением

$$M_d = f_1(h_p) + f_2(\omega_e) \text{ (рис. 2) [7].}$$

Степень влияния частоты вращения вала  $\omega_e$  на момент двигателя  $M_d$  в статическом ОР определяется линейным соотношением  $(M_d - M_{до}) / (\omega_e - \omega_{e0}) = \Delta M_{до} / \Delta \omega_e$ .

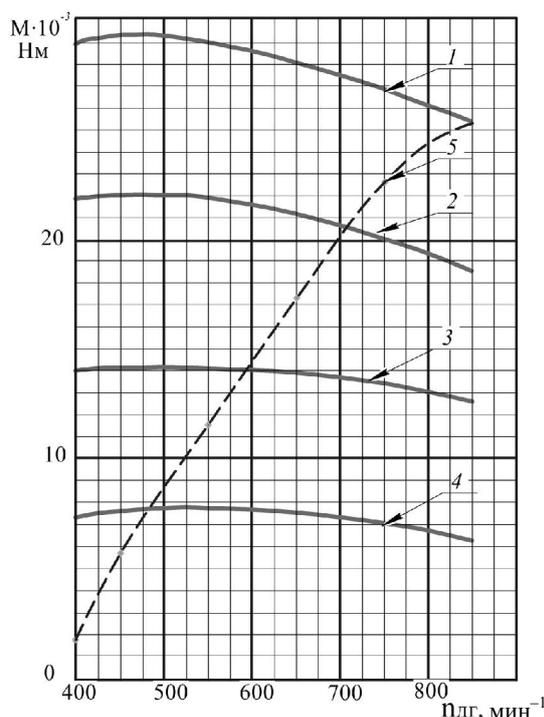


Рис. 2. Внешняя скоростная характеристика (линия 1) и частичные скоростные характеристики (линии 2-4) дизель-генератора типа 10Д100 при относительных цикловых подачах топлива:

1 – 1,0; 2 – 0,75; 3 – 0,50; 4 – 0,25 и характеристика нагрузки дизеля потребителем энергии – тяговым генератором (линия 5)

В пределе, при  $\Delta \omega_e \rightarrow 0$ , это отношение обращается в производную, т. е. в  $\partial M_d / \partial \omega_e$ , которая является динамическим параметром – фактором устойчивости  $F_d$  двигателя ЭУЛ (рис. 3). Производная  $\partial M_{\Pi} / \partial \omega_e$  является вторым динамическим параметром – фактором устойчивости  $F_{\Pi}$  потребителя. Факторы устойчивости определяются графоаналитическим методом дифференцирования характеристик, представленных на рис. 2. Фактор устойчивости  $F_d$  имеет отрицательные значения. Однако, при частоте вращения вала менее 500 об/мин он меняет знак. Из рис. 3 видно, что зависимости факторов устойчивости двигателя и потребителя энергии, а также постоянной времени установки от частоты вращения вала существенно нелинейны. Это необходимо учитывать при расчете оптимальных настроек АРЧВВ [1, 2].

Зависимость момента  $M_d$  от положения РО  $h_p$  определяется производной  $\partial M_d / \partial h_p$ . Изме-

ние момента двигателя, т. е.  $M_D - M_{ДО}$ , при изменении положения РО от  $h_{po}$  до  $h_p$  и частоты вращения вала  $\omega_\epsilon$  от  $\omega_{\epsilon 0}$  до  $\omega_\epsilon$  будет определяться выражением

$$M_D - M_{ДО} = \left( \frac{\partial M_D}{\partial h_p} \right) \cdot (h_p - h_{po}) + \left( \frac{\partial M_D}{\partial \omega_\epsilon} \right) \cdot (\omega_\epsilon - \omega_{\epsilon 0}) \quad (5)$$

Для установления зависимости, существующей между изменениями частоты вращения вала, момента двигателя и момента потребителя, подставим уравнение (3) в уравнение (2), в результате чего получим

$$\frac{\partial M_D}{\partial h_p} \cdot (h_p - h_{po}) + \frac{\partial M_D}{\partial \omega_\epsilon} \cdot (\omega_\epsilon - \omega_{\epsilon 0}) - (M_{II} - M_{ПО}) = \frac{J_B d\omega_\epsilon}{dt} \quad (6)$$

Это дифференциальное уравнение является математическим описанием переходного процесса в ЭУЛ с учетом её свойств самовыравнивания.

Для получения дифференциального уравнения в безразмерных единицах отнесем отклонения частоты вращения вала к её номинальному значению  $\omega_{\epsilon 0}$ , отклонение положения РО  $h$  – к  $h_{pmax}$ , а отклонения момента двигателя  $M_D$  и момента потребителя  $M_{II}$  – к максимальному моменту потребителя, который в установившемся режиме определяет как максимальный момент двигателя, так и максимальный момент потребителя, т. е.  $M_{max} = M_{Dmax} = M_{IImax}$ .

Тогда, разделив уравнение (6) на  $M_{max}$  и приняв  $\left( \frac{d\omega_\epsilon}{dt} \right) = \frac{d(\omega_\epsilon - \omega_{\epsilon 0})}{dt}$ , будем иметь

$$\frac{\partial M_D}{\partial h_p} \cdot \left( \frac{h_p - h_{po}}{h_{pmax}} \right) + \frac{\partial M_D}{\partial \omega_\epsilon} \cdot \frac{\omega_{\epsilon 0}}{M_{max}} \cdot \left( \frac{\omega_\epsilon - \omega_{\epsilon 0}}{\omega_{\epsilon 0}} \right) - \left( \frac{M_{II} - M_{ПО}}{M_{ПО}} \right) = \frac{J_B d\omega_\epsilon}{M_{max}} \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{\omega_\epsilon - \omega_{\epsilon 0}}{\omega_{\epsilon 0}} \right) \quad (7)$$

Коэффициент первого члена уравнения (7) может быть упрощен, если принять, что РО имеет линейную характеристику, т. е. момент двигателя  $M_D$  изменяется прямо пропорционально положению РО. В этом случае

$$\frac{\partial M_D}{\partial h_p} \cdot \left( \frac{h_{pmax}}{M_{max}} \right) = 1. \quad (8)$$

Для коэффициента второго члена уравнения (5) введем обозначение

$$\frac{\partial M_D}{\partial \omega_\epsilon} \cdot \frac{\omega_{\epsilon 0}}{M_{max}} = -\rho_1. \quad (9)$$

Далее, в уравнении (7) введем следующие обозначения:  $(h_p - h_{po})/h_{pmax} = \mu$  относительное

отклонение регулирующего воздействия (положение РО);  $-(M_{II} - M_{ПО})/M_{max} = \lambda$  – относительное отклонение момента потребителя;  $(\omega_\epsilon - \omega_{\epsilon 0})/\omega_{\epsilon 0} = \varphi$  – относительное отклонение регулируемой величины – частоты вращения вала установки.

Для коэффициента в правой части уравнения (7) введем обозначение

$$\frac{J_B \omega_{\epsilon 0}}{M_{max}} = T_p. \quad (10)$$

Коэффициент  $T_p$  имеет размерность времени и является временем разгона одноемкостного статического ОР – ЭУЛ.

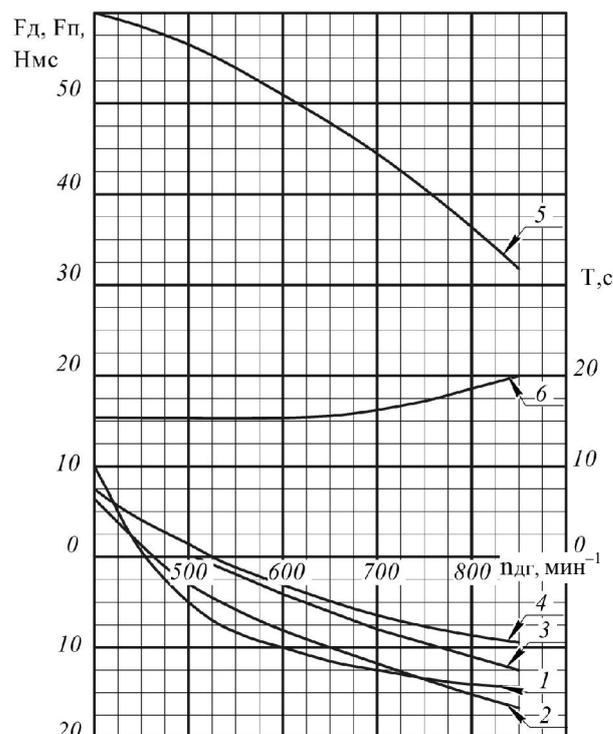


Рис. 3. Зависимости фактора устойчивости двигателя дизель-генератора типа 10Д100 при относительных цикловых подачах топлива:

1 – 1,0; 2 – 0,75; 3 – 0,50; 4 – 0,25; фактора устойчивости потребителя энергии – тягового генератора (линия 5) и постоянной времени установившегося режима (линия 6) от частоты вращения вала

После подстановки в уравнение (7) принятых обозначений получим

$$T_p \frac{d\varphi}{dt} + \rho_1 \varphi = \mu - \lambda. \quad (11)$$

В уравнении (11) коэффициент  $\rho_1$  – величина безразмерная и является коэффициентом самовыравнивания (саморегулирования) ОР. Чем круче статическая характеристика ОР  $M_D(\omega_\epsilon)$ , тем больше самовыравнивание и тем раньше (с меньшим отклонением частоты вращения) наступит стабилизация режима (новое равновесное состояние). Знак

минус, введенный перед коэффициентом  $\rho_1$  в формуле (9), указывает на то, что самовыравнивание имеет место лишь тогда, когда отклонение частоты вращения вала вызывает уменьшение величины, которая это отклонение вызвала, т. е. когда фактор устойчивости двигателя  $F_D = (\partial M_D / \partial \omega_e) < 0$  (см. рис. 3, линии 1-4).

Такое самовыравнивание является самовыравниванием на притоке энергии в установку.

Самовыравнивание на стоке энергии из установки принципиально ничем не отличается от самовыравнивания на притоке. Здесь полностью остается справедливым уравнение ОР (11). Коэффициент самовыравнивания в этом случае будет выражаться соотношением

$$\frac{\partial M_{II}}{\partial \omega_e} \cdot \frac{\omega_{eo}}{M_{\max}} = \rho_2. \quad (12)$$

Самовыравнивание на стоке энергии из установки будет иметь место лишь в том случае, когда с ростом частоты вращения вала растет сток энергии из установки, а при снижении частоты вращения он уменьшается, т. е. когда фактор устойчивости потребителя (агрегата нагрузки двигателя)  $F_{II} = (\partial M_{II} / \partial \omega_e) > 0$  (см. рис. 3, линия 5).

ЭУЛ как ОР частоты вращения вала обладает самовыравниванием, как на притоке, так и на стоке энергии из установки. В этом случае общее самовыравнивание определяется влиянием частоты вращения вала на изменение, как притока, так и стока энергии из установки. Коэффициент самовыравнивания в этом случае будет выражаться соотношением

$$\left( \frac{\partial M_{II}}{\partial \omega_e} - \frac{\partial M_D}{\partial \omega_e} \right) \cdot \frac{\omega_{eo}}{M_{\max}} = \rho_3 \quad (13)$$

Для статического ОР – ЭУЛ имеется ряд важных особенностей. Для статического ОР, у которого регулируемая величина изменяется с непрерывно убывающей скоростью, время разгона  $T_p$  является условным показателем, выражающим время, в течение которого эта величина достигла бы отклонения, соответствующего воздействию, если бы она изменялась с постоянной скоростью, равной начальной, т. е. соответствующей моменту возмущения. На практике динамические свойства статического ОР представляются дифференциальным уравнением, выраженным не через  $T_p$ , а через постоянную времени  $T$ . Для её определения правую и левую части уравнения (11) разделим на  $\rho_1$ , в результате чего получим

$$\frac{T_p}{\rho_1} \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = \frac{1}{\rho_1} (\mu - \lambda) \quad (14)$$

В уравнении (14) отношение времени разгона  $T_p$  к коэффициенту самовыравнивания  $\rho_1$  и есть постоянная времени  $T$  статического ОР, т. е.  $T_p / \rho_1 = T$ .

Постоянная времени ЭУЛ является динамическим параметром переменным и сильно зависящим от частоты вращения вала (рис. 3, линия 6).

В результате ЭУЛ является существенно нелинейным звеном в АСРЧВВЭУЛ.

Величина, обратная коэффициенту самовыравнивания, есть коэффициент усиления (коэффициент передачи) статического ОР  $k_{op}$ , т. е.

$$\frac{1}{\rho_3} = k_{op}. \quad (15)$$

Тогда после соответствующей замены коэффициентов в уравнении (14) будет получено дифференциальное уравнение (математическая модель) одноемкостного ОР с самовыравниванием в общем виде, выраженное через постоянную времени  $T$  и коэффициент передачи  $k_{op}$ :

$$T \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k_{op} (\mu - \lambda). \quad (16)$$

Либо в операторной форме:

$$Tp\varphi + \varphi = k_{op} (\mu - \lambda), \quad (17)$$

где  $d/dt = p$  – оператор дифференцирования.

Таким образом, ЭУЛ представляет собой одноемкостной статический ОР в контуре АСРЧВВЭУЛ и обладает динамическими свойствами аperiodического звена первого порядка с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k_{op}}{Tp + 1} \quad (18)$$

и амплитудно-фазово-частотной функцией

$$W(j\omega) = \frac{k_{op}}{Tj\omega + 1}. \quad (19)$$

Известно, что амплитудно-фазово-частотная характеристика ОР используется при расчете оптимальных параметров настройки автоматических систем [1].

Дифференциальные уравнения (16,17) выражают зависимость частоты вращения вала  $\omega_e$  и скорости её изменения  $d\omega_e/dt$  от изменения воздействий  $\mu$  и  $\lambda$ . При этом коэффициент передачи  $k_{op}$  показывает, во сколько раз отклонение частоты вращения вала  $\omega_e$  в установившемся режиме превышает обусловившее его отклонение воздействие.

Разработанная методика дает возможность не только рассчитать динамические параметры (факторы устойчивости и постоянную времени) установки, но и определить зависимости их от частоты вращения вала установки и цикловой подачи топлива. Она может быть использована при расчете оптимальных настроек АРЧВВ не только обычных систем, но и самонастраивающихся адаптивных автоматических систем [1, 11].

#### Список литературы:

1. Ротач В. Я. Расчет настройки промышленных систем

регулирования / В. Я. Ротач. – М.–Л.: ГЭИ, 1961. – 344 с. 2. Луков Н. М. Автоматизация тепловозов, газотурбовозов и дизель-поездов / Н. М. Луков. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с. 3. Леевин М. И. Автоматизация судовых дизельных установок / М. И. Леевин.- Л.: Судостроение, 1969. – 468 с. 4. Крутов В. И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект / Крутов В. И. – М.: Машиностроение, 1978. – 472 с. 5. Ланчуковский В. И. Автоматизированные системы управления судовых дизельных и газотурбинных установок// Ланчуковский В. И., Козьминых А. В. – М.: Транспорт, 1983. – 320 с., 1990. – 335 с. 6. Луков Н.М. Автоматические системы управления локомотивов /Н. М. Луков, А. С., Космодамианский : Учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 429 с. 7. Васильев В.Г. Составление электронной модели дизеля и регулятора тепловоза ТЭ10 / В. Г. Васильев, Л. Е. Тимановская . Изв. вузов. Электромеханика. – 1963. - № 2. - С. 205-206. 8. Лаврик А. Н. Расчет системы автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала дизеля / А. Н. Лаврик. - Челябинск, ЧГТУ, 1991. - 37 с. 9. Горбунова Н.А. Автоматическое регулирование и управление ДВС / Н.А. Горбунова. – Коломна, КИ(ф)МГОУ – 2010. - 268 с. 10. Горбунова Н.А. Автоматическое регулирование ДВС / Н.А. Горбунова. - КИ(ф)МГОУ, Коломна, 2012. – 50 с. 11. Козлов Ю.М. Беспoisковые самонастраивающиеся системы // Ю. М.

Козлов, Р. М. Юсупов. – М.: Наука, 1969. – 226 с.

**Bibliography (transliterated):**

1. Rotach V. Ja. Raschet nastrojki promyshlennyh sistem regulirovaniya / V. Ja. Rotach. – М.–Л.: GJel, 1961. – 344 s. 2. Lukov N. M. Avtomatizacija teplovozov, gazoturbobozov i dizel'-poezdov / N. M. Lukov. – М.: Mashinostroenie, 1988. – 272 s. 3. Leevin M. I. Avtomatizacija sudovyh dizel'nyh ustanovok / M. I. Leevin.- L.: Sudostroenie, 1969. – 468 s. 4. Krutov V. I. Dvigatel' vnutrennego sgoranija kak reguliruemyj ob#ekt / Krutov V. I. – М.: Mashinostroenie, 1978. – 472 s. 5. Lanchukovskij V. I. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija sudovyh dizel'nyh i gazoturbinnnyh ustanovok// Lanchukovskij V. I., Koz'minyh A. V. – М.: Transport, 1983. – 320 s., 1990. – 335 s. 6. Lukov N.M. Avtomaticheskie sistemy upravlenija lokomotivov /N. M. Lukov, A. S., Kosmodamianskij : Uchebnik dlja vuzov zh.-d. transporta. – М.: GOU «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte», 2007. – 429 s. 7. Vasil'ev V.G. Sostavlenie jelektronnoj modeli dizelja i reguljatora teplovoza TJe10./ V. G. Vasil'ev, L. E. Timanovskaja . Izv. vuzov. Jelektromehaniка, 1963, № 2, S. 205-206. 8. Lavrik A. N. Raschet sistemy avtomaticheskogo regulirovanija chastoty vrashhenija kolenчатого vala dizelja / A. N. Lavrik. - Cheljabinsk, ChGTU, 1991. - 37 с. 9. Gorbunova N.A. Avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie DVS / N.A. Gorbunova. – Kolonna, KI(f)MGOU – 2010. - 268 s. 10. Gorbunova N.A. Avtomaticheskoe regulirovanie DVS / N.A. Gorbunova. - KI(f)MGOU, Kolonna, 2012. – 50 s. 11. Kozlov Ju.M. Bespoiskovyе samonastrajvajushiesja sistemy // Ju. M. Kozlov, R. M. Jusupov. – М.: Nauka, 1969. – 226 s.

Поступила в редакцию 29.05.2014

**Луков Николай Михайлович** – доктор техн. наук, профессор, академик Академии транспорта России и Транспортной Академии Украины, профессор МГУПС (МИИТ), г. Москва, Россия, e-mail: nm-57@yandex.ru.

**Ромашкова Оксана Николаевна** – доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Прикладная информатика» Московского педагогического государственного университета, г. Москва, Россия, e-mail: ox-gom@yandex.ru.

**Космодамианский Андрей Сергеевич** – доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Тяговый подвижной состав» РОАТ МГУПС (МИИТ), председатель экспертного совета ВАК РФ по транспорту, академик Академии электротехнических наук Российской Федерации, г. Москва, e-mail: askosm@mail.ru.

**Кашников Геннадий Филиппович** – доктор техн. наук, зав. отделом «Электрические машины и аппараты» ВНИКТИ, г. Коломна, Россия, e-mail: vnikti\_ema@mail.ru.

**THE METHOD OF CALCULATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS AND PARAMETERS IN LOCOMOTIVE POWER PLANT AS OBJECT OF SHAFT’S SPEED ADJUSTMENT**

*N. M. Lukov, O. N. Romashkova; A. S. Kosmodamiansky; G. F. Kashnikov*

To determine quality of work automatic system of regulation of frequency of rotation of the shaft power plant of locomotive must know not only the static but also the dynamic characteristics and parameters as the object of regulation of frequency of rotation of the shaft. For the first time graphic-analytical methods of calculation of dynamic characteristics and parameters of installation as an object of regulation of frequency of rotation of the shaft and their dependence on the conditions and modes of operation, and dynamic characteristics and parameters of the diesel-generator type 10D100 of locomotive ТЭ10М. The method gives the possibility not only to calculate dynamic parameters (factors of sustainability and the time constant) installation, but also to determine the dependence of the frequency of rotation of the shaft installation and cycle fuel supply. It can be used when calculating the optimal settings not only conventional systems, but also adaptive self-tuning of automatic systems

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЛОКОМОТИВА ЯК ОБ’ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВАЛА**

*М. М. Луків, О. М. Ромашкова, А. С. Космодамианський, Г. Ф. Кашніков*

Для визначення якості роботи систем регулювання частоти обертання вала енергетичної установки локомотива необхідно знати не тільки статичні, але й динамічні характеристики та параметри установки як об’єкта регулювання частоти обертання вала. Уперше приводяться методика графоаналітичного розрахунків динамічних характеристик і параметрів установки та залежності їх від умов і режимів роботи, а також динамічні характеристики і параметри дизель-генератора типу 10Д100 тепловоза 2ТЭ10М. Методика дає можливість не тільки розрахувати динамічні параметри (фактори стійкості і постійну часу) установки, але й визначити залежності їх від частоти обертання вала установки та циклової подачі палива. Вона може бути використана при розрахунках оптимальних налаштувань не тільки звичайних систем, але й самонастроювальних адаптивних автоматичних систем.