

УДК 629.1.032

РАЗРАБОТКА ИНВАРИАНТНОГО ЭЛЕКТРОГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ВСЕРЕЖИМНОГО РЕГУЛЯТОРА ТОПЛИВОПОДАЧИ ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ С ЭЛЕКТРОННЫМ БЛОКОМ УПРАВЛЕНИЯ

Т.Е. Александрова, проф., д.т.н., А.А. Лазаренко, ассист., к.т.н.,
Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков

Аннотация. Предложена методика структурно-параметрического синтеза всережимного регулятора топливоподачи транспортного дизеля, инвариантного к действию внешних возмущений повышенной точности и топливной экономичности.

Ключевые слова: дизель, система топливоподачи, электрогидромеханический всережимный регулятор, электронный блок управления

РОЗРОБКА ІНВАРІАНТНОГО ЕЛЕКТРОГІДРОМЕХАНІЧНОГО ВСЕРЕЖИМНОГО РЕГУЛЯТОРА ПАЛИВОПОДАЧІ ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ З ЕЛЕКТРОННИМ БЛОКОМ КЕРУВАННЯ

Т.Є. Александрова, проф., д.т.н., А.О. Лазаренко, ассист., к.т.н.,
Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків

Анотація. Запропоновано методику структурно-параметричного синтезу всережимного регулятора паливоподачи транспортного дизеля, інваріантного до дії зовнішніх збурень підвищеної точності й паливної економічності.

Ключові слова: дизель, система паливоподачи, електрогидромеханічний всережимний регулятор, електронний блок керування.

DEVELOPMENT OF INVARIANT ELECTROHYDROMECHANICAL DIESEL ENGINE FUEL SUPPLY VARIABLE SPEED GOVERNOR WITH AN ELECTRONIC CONTROL UNIT

T. Alexandrova, Prof., D. Sc. (Eng.), A. Lazarenko, T. Asst., Cand. Sc. (Eng.),
National Technical University «KhPI», Kharkiv

Abstract. The method of structural and parametric synthesis of the all-range vehicle diesel engine fuel supply regulator, which is invariant to the action of external disturbances with an increase of accuracy and fuel efficiency of the fuel supply system, is offered.

Key words: diesel engine, fuel supply system, fuel pump rack position sensor, variable speed regulators.

Введение

Разрыв отношений в области военнотехнического сотрудничества с Российской Федерацией заставил отечественных специалистов в области конструирования и производства армейских автомобилей серии «КрАЗ» искать пути замены на таких автомобилях дизельных силовых установок серии

«ЯМЗ» производства Ярославского моторного завода дизельными установками отечественного производства. Из всей номенклатуры транспортных дизелей, производимых в Украине, наиболее предпочтительными для использования в армейских автомобилях серии «КрАЗ» являются дизели серии ЗТД мощностью 300, 400, 500 и 600 л.с., разработанные специалистами Харьковского кон-

структорского бюро по двигателестроению (ХКБД) и производимые для легкобронированных гусеничных машин Государственным предприятием «Завод имени Малышева». Дизели серии 3ТД разработаны на основе танкового дизеля 6ТД-2 и содержат гидромеханический всережимный регулятор топливоподачи, такой же, как и у танкового дизеля 6ТД-2. Точность и топливная экономичность гидромеханического регулятора дизеля 6ТД-2, вполне достаточные при использовании в танках, оказываются недостаточно высокими для использования в автомобилях.

Анализ публикаций

В этой связи еще в 90-х годах предыдущего столетия специалистам ХКБД совместно со специалистами Харьковского конструкторского бюро по машиностроению имени А.А. Морозова (ХКБМ) и Харьковского политехнического института (ХПИ) была поставлена задача создания электрогидромеханического всережимного регулятора с электронным блоком управления повышенной точности и экономичности для дизеля 6ТД-2 и созданных в то время на его основе дизелей серии 3ТД [1]. Если штатный регулятор топливоподачи дизеля 6ТД-2 содержал только лишь центробежный чувствительный элемент для измерения угловой скорости вращения коленчатого вала, то электронный регулятор с электронным блоком управления, описанный в работах [2, 3], помимо индукционного датчика угловой скорости коленчатого вала, содержит также индукционный датчик положения рейки топливного насоса. Выходы обоих датчиков поданы на входы электронного блока управления, а выход электронного блока связан со входом исполнительного органа, представляющего собой последовательное соединение электромагнита управления и гидравлического сервомотора, выходной шток которого связан с рейкой топливного насоса. Испытания разработанного электронного регулятора показали, что отклонение угловой скорости коленчатого вала от заданной при использовании электронного всережимного регулятора не превышает 1 %, в отличие от штатного регулятора, где отклонение составляет 3÷12 %. Кроме того, экономия расхода топлива составляет 8÷12 % по сравнению со штатным регулятором. Такие показатели обусловлены тем, что электронный всережимный регулятор топливоподачи [2, 3] объединяет два

известных принципа управления – по отклонению и по возмущению и, таким образом, обладает свойством инвариантности к действию внешних возмущений [4].

Цель и постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка методики структурно-параметрического синтеза всережимного регулятора топливоподачи транспортного дизеля, инвариантного к действию внешних возмущений, действующих на коленчатый вал дизеля со стороны поверхности движения автомобиля.

Разработка инвариантной системы

В работах [5, 6] разработана математическая модель возмущенного движения замкнутой системы топливоподачи дизеля 6ТД-2 с электрогидромеханическим всережимным регулятором топливоподачи, содержащим электронный блок управления, записываемая в виде

$$I_{\Sigma} \frac{d\omega(t)}{dt} = M_o[\omega(t), h(t)] - M_n[\omega(t), t];$$

$$L_y \frac{di_y(t)}{dt} + r_y i_y(t) = u_y(t);$$

$$m \frac{d^2 Z(t)}{dt^2} + f \frac{dZ(t)}{dt} + cZ(t) = k_m i_y(t); \quad (1)$$

$$T_z \frac{dh(t)}{dt} + h(t) = Z(t);$$

$$u_y(t) = k_{\omega} \omega(t) + k_h h(t) + k_a a(t).$$

Структурная схема замкнутой системы топливоподачи приведена на рис. 1.

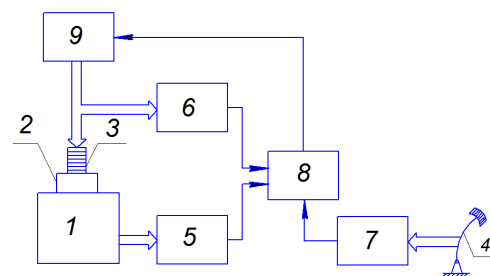


Рис. 1. Структурная схема системы топливоподачи: 1 – дизель; 2 – система топливоподачи; 3 – рейка топливного насоса; 4 – педаль управления подачей топлива; 5 – датчик угловой скорости вращения коленчатого вала; 6 – датчик положения рейки топливного насоса; 7 – датчик положения педали; 8 – электронный блок; 9 – исполнительный орган

В системе (1) приняты следующие обозначения: $\omega(t)$ – угловая скорость коленчатого вала; $h(t)$ – положение рейки топливного насоса; $Z(t)$ – положение якоря электромагнита; $i_y(t)$ – электрический ток в обмотке управления электромагнита; $u_y(t)$ – управляющий сигнал на выходе электронного блока; $a(t)$ – положение педали управления подачей топлива; $M_d[\omega(t), h(t)]$ – активный момент, развиваемый дизелем; $M_n[\omega(t), t]$ – момент нагрузки на коленчатом валу дизеля; $L_y(t)$ – индуктивность обмотки управления электромагнита; r_y – омическое сопротивление обмотки управления электромагнита; m – масса якоря электромагнита; f – коэффициент демпфирования электромагнита; c – коэффициент жесткости фиксирующей пружины якоря электромагнита; k_m – коэффициент усиления электромагнита; k_ω , k_h , k_a – коэффициенты усиления электронного блока.

При постоянном положении педали управления подачей топлива $a(t) = a_0$ всережимный регулятор топливоподачи настроен на соответствующую угловую скорость вращения коленчатого вала $\omega(t) = \omega_0$. Изменение угловой скорости $\Delta\omega(t)$ при этом происходит вследствие изменения момента нагрузки $\Delta M_n(t)$ относительно его среднего значения M_{n0} и приводит к изменению положения рейки топливного насоса $\Delta h(t)$ относительно его среднего значения h_0 . Линеаризуем нелинейные функции $M_d[\omega(t), h(t)]$ и $M_n[\omega(t), t]$ относительно их средних значений

$$M_d[\omega(t), h(t)] = M_d[\omega_0, h_0] + \left(\frac{\partial M_d}{\partial \omega}\right)_0 \Delta\omega(t) + \left(\frac{\partial M_d}{\partial h}\right)_0 \Delta h(t); \quad (2)$$

$$M_n[\omega(t), h] = M_n[\omega_0] + \left(\frac{\partial M_n}{\partial \omega}\right)_0 \Delta\omega(t) + \Delta M_n(t).$$

С учетом соотношений (2) система (1) записывается в виде

$$I_\Sigma \frac{d\Delta\omega(t)}{dt} + \left[\left(\frac{\partial M_n}{\partial \omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_d}{\partial \omega}\right)_0 \right] \Delta\omega(t) = \left(\frac{\partial M_d}{\partial h}\right)_0 \Delta h(t) - \Delta M_n(t);$$

$$L_y \frac{d\Delta i_y(t)}{dt} + r_y \Delta i_y(t) = \Delta u_y(t);$$

$$m \frac{d^2 \Delta Z(t)}{dt^2} + f \frac{d\Delta Z(t)}{dt} + c \Delta Z(t) = k_m \Delta i_y(t); \quad (3)$$

$$T_r \frac{d\Delta h(t)}{dt} + \Delta h(t) = \Delta Z(t);$$

$$\Delta u_y(t) = k_\omega \Delta\omega(t) + k_h \Delta h(t).$$

Введем обозначения

$$T_d = \frac{I_\Sigma}{\left[\left(\frac{\partial M_n}{\partial \omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_d}{\partial \omega}\right)_0 \right]};$$

$$k_d = \frac{\left(\frac{\partial M_d}{\partial h}\right)_0}{\left[\left(\frac{\partial M_n}{\partial \omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_d}{\partial \omega}\right)_0 \right]};$$

$$k_f = -\frac{1}{\left[\left(\frac{\partial M_n}{\partial \omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_d}{\partial \omega}\right)_0 \right]};$$

$$T_y = \frac{L_y}{r_y}; k_y = \frac{1}{r_y}; T_{1m}^2 = \frac{m}{c}; T_{2m} = \frac{f}{c},$$

где T_d – постоянная времени дизеля; T_y – постоянная времени обмотки управления; T_{1m} , T_{2m} – постоянные времени электромагнита; k_d , k_f – коэффициент усиления дизеля; k_y – коэффициент усиления обмотки управления.

С учетом принятых обозначений систему (3) представим в следующем виде

$$T_d \frac{d\Delta\omega(t)}{dt} + \Delta\omega(t) = k_d \Delta h(t) + k_f \Delta M_n(t);$$

$$T_y \frac{d\Delta i_y(t)}{dt} + \Delta i_y(t) = k_y [k_\omega \Delta\omega(t) + k_h \Delta h(t)];$$

$$T_{1m}^2 \frac{d^2 \Delta Z(t)}{dt^2} + T_{2m} \frac{d\Delta Z(t)}{dt} + \Delta Z(t) = \frac{k_m}{c} \Delta i_y(t); \quad (4)$$

$$T_r \frac{d\Delta h(t)}{dt} + \Delta h(t) = \Delta Z(t).$$

Первое уравнение (4) описывает возмущенное движение объекта управления, передаточная функция которого равна

$$W_0(s) = \frac{L\{\Delta\omega(t)\}}{L\{\Delta h(t)\}} = \frac{k_d}{T_d s + 1}. \quad (5)$$

Остальные уравнения системы (4) описывают возмущенное движение автоматического регулятора с передаточной функцией

$$W_a(s) = \frac{L\{\Delta h(t)\}}{L\{\Delta\omega(t)\}} = \frac{k_y k_M k_\omega}{c} \times \frac{1}{(T_{1M}^2 s^2 + T_{2M} + 1) \times [T_\Gamma T_y s^2 + (T_\Gamma + T_y)s + 1] - \frac{k_y k_M}{c} k_h}. \quad (6)$$

Тогда передаточная функция разомкнутой системы топливоподачи равна

$$W_p(s) = W_0(s)W_a(s) = \frac{k_d \frac{k_y k_M}{c} k_\omega}{(T_d s + 1) \{ (T_{1M}^2 s^2 + T_{2M} + 1) \times [T_\Gamma T_y s^2 + (T_\Gamma + T_y)s + 1] - \frac{k_y k_M}{c} k_h \}}. \quad (7)$$

Представим знаменатель передаточной функции (7) в виде

$$A_p(s) = T_d T_{1M}^2 T_\Gamma T_y s^5 + [T_{1M}^2 T_\Gamma T_y + T_d T_{1M}^2 (T_\Gamma + T_y) + T_d T_\Gamma T_y T_{2M}] s^4 + [T_d T_{1M}^2 + T_d T_\Gamma T_y + T_d T_{2M} (T_\Gamma + T_y) + T_{1M}^2 (T_\Gamma + T_y) + T_\Gamma T_y T_{2M}] s^3 + [T_d (T_\Gamma + T_y + T_{2M}) + T_{1M}^2 + T_\Gamma T_y + T_{2M} (T_\Gamma + T_y)] s^2 + [(1 - \frac{k_y k_M}{c} k_h) T_d + T_\Gamma + T_y + T_{2M}] s + 1 - \frac{k_y k_M}{c} k_h. \quad (8)$$

Постоянная времени T_d значительно превышает постоянные времени элементов регулятора топливоподачи. С учетом этого обстоятельства соотношение (8) может быть представлено в упрощенном виде:

$$A_p(s) = T_d T_{1M}^2 T_\Gamma T_y s^5 + T_d [T_{1M}^2 (T_\Gamma + T_y) + T_\Gamma T_y T_{2M}] s^4 + T_d [T_{1M}^2 + T_\Gamma T_y + T_{2M} (T_\Gamma + T_y)] s^3 + T_d (T_\Gamma + T_y + T_{2M}) s^2 + (1 - \frac{k_y k_M}{c} k_h) T_d s + 1 - \frac{k_y k_M}{c} k_h. \quad (9)$$

Если значение коэффициента усиления k_h выбрать равным

$$k_h = \frac{c}{k_y k_M}, \quad (10)$$

то соотношение (9) принимает вид

$$A_p(s) = s^2 \{ T_d T_{1M}^2 T_\Gamma T_y s^3 + T_d [T_{1M}^2 (T_\Gamma + T_y) + T_\Gamma T_y T_{2M}] s^2 + T_d [T_{1M}^2 + T_\Gamma T_y + T_{2M} (T_\Gamma + T_y)] s + T_d (T_\Gamma + T_y + T_{2M}) \}. \quad (11)$$

Поскольку знаменатель (11) передаточной функции разомкнутой системы (7) при выполнении соотношения (10) содержит множитель s^2 , то замкнутая система является астатической с астатизмом второго порядка, первые два коэффициента ошибок которой равны нулю, т.е. система является инвариантной к действию внешних возмущений $\Delta M_H(t)$.

Рассмотрим характеристическое уравнение замкнутой системы

$$1 + W_p(s) = T_d T_{1M}^2 T_\Gamma T_y s^5 + T_d [T_{1M}^2 (T_\Gamma + T_y) + T_\Gamma T_y T_{2M}] s^4 + T_d [T_{1M}^2 + T_\Gamma T_y + T_{2M} (T_\Gamma + T_y)] s^3 + T_d (T_\Gamma + T_y + T_{2M}) s^2 + (1 - \frac{k_y k_M}{c} k_h) T_d s + 1 - \frac{k_y k_M}{c} k_h + \frac{k_d k_y k_M}{c} k_\omega = 0. \quad (12)$$

Из рассмотрения уравнения (12) можно сделать вывод о том, что выполнение условия (10) приводит к тому, что коэффициент характеристического уравнения (12) при s обращается в нуль и, следовательно, замкнутая система топливоподачи становится неустойчивой, т.е. теряет работоспособность.

Выберем алгоритм управления, реализуемый электронным блоком, в виде

$$u_y(t) = k_\omega \omega(t) + k_h h(t) + k_i \dot{h}(t). \quad (13)$$

Тогда характеристическое уравнение замкнутой системы принимает следующий вид

$$T_d T_{1M}^2 T_\Gamma T_y s^5 + T_d [T_{1M}^2 (T_\Gamma + T_y) + T_\Gamma T_y T_{2M}] s^4 + T_d [T_{1M}^2 + T_\Gamma T_y + T_{2M} (T_\Gamma + T_y)] s^3 + T_d (T_\Gamma +$$

$$+T_y + T_{2M})s^2 + \left[\left(1 - \frac{k_y k_M}{c} k_h\right) T_d - \frac{k_y k_M}{c} k_h \right] s + 1 - \frac{k_y k_M}{c} k_h + \frac{k_d k_y k_M}{c} k_\omega = 0. \quad (14)$$

Положим в уравнении (14), что коэффициент усиления k_h удовлетворяет условию (10). Тогда уравнение (14) записывается

$$T_d T_{1M}^2 T_y s^5 + T_d [T_{1M}^2 (T_\Gamma + T_y) + T_\Gamma T_y T_{2M}] s^4 + T_d [T_{1M}^2 + T_\Gamma T_y + T_{2M} (T_\Gamma + T_y)] s^3 + T_d (T_\Gamma + T_y + T_{2M}) s^2 - \frac{k_y k_M}{c} k_h s + \frac{k_d k_y k_M}{c} k_\omega = 0. \quad (15)$$

Пусть численные значения параметров системы топливоподачи транспортного дизеля составляют

$$T_d = 0,3 \text{ с}; \quad T_{1M}^2 = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ с}^2; \quad T_{2M} = 1,51 \cdot 10^{-4} \text{ с}; \\ T_\Gamma = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \quad T_y = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad c = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}; \\ k_M = 0,2 \text{ Н} \cdot \text{В}^{-1}; \quad k_d = -10^3 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

В области варьируемых параметров электронного блока (k_ω , k_h) построим область устойчивости замкнутой системы топливоподачи, представленной на рис. 2.

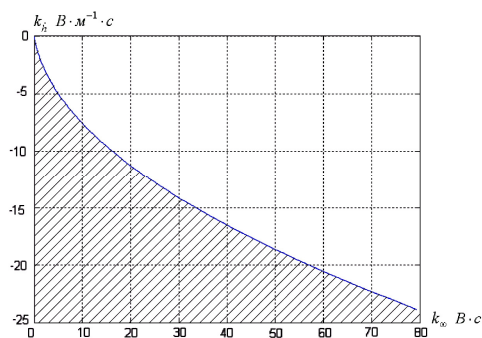


Рис. 2 Область устойчивости замкнутой системы топливоподачи

В соответствии с [7] области устойчивости заштрихована. Анализ рис. 2 приводит к выводу, что при выполнении условия (10) соответствующим выбором электронного блока управления k_ω и k_h замкнутая система топливоподачи транспортного дизеля, реализующая закон управления (13), может сохранить устойчивость в широком диапазоне изменения коэффициентов k_ω и k_h .

Вывод

Повышенная точность и топливная экономичность системы топливоподачи транспортного дизеля может быть обеспечена соответствующим выбором алгоритма управления, реализуемого электронным блоком всережимного регулятора, и выбором численных значений варьируемых коэффициентов усиления электронного блока.

Литература

1. Рязанцев Н.К. Моторы и судьбы / Н.К. Рязанцев. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 272 с.
2. Рязанцев Н.К. Улучшение топливной экономичности и эксплуатационных характеристик транспортных двигателей путем разработки электронных систем управления / Н.К. Рязанцев, Ю.С. Бородин, Л.Б. Синельникова // Вестник НТУ «ХПИ». – 2001. – Вып. 7. – С. 183–192.
3. Александров Е.С. Основы автомобильной автоматики / Е.С. Александров. – Х.: ХНАДУ, 2010. – 172 с.
4. Александрова Т.Е. К вопросу синтеза линейных инвариантных систем стабилизации / Т.Е. Александрова // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – Вып. 62 (1035). – С. 152–158.
5. Александрова Т.Е. Электронный регулятор паливоподавания транспортного дизеля з нерегульованим турбонаддувом / Т.Е. Александрова // Труды Одесского государственного политехнического университета. – 2001. – Вып. 5. – С. 192–195.
6. Александрова Т.Е. Нелинейная математическая модель замкнутой системы топливоподачи дизеля 6ТД / Т.Е. Александрова // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2001. – Вып. 7–8. – С. 202–204.
7. Бесскерский В.А. Теория системы автоматического управления / В.А. Бесскерский, Е.П. Попов. – Л.: Профессия, 2003. – 752 с.

Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 29 августа 2016 г.