

– 324 с. 9. Papok K.K. Naga-ry, lakovye otlozhenija i osadki v avtomobil'nyh dvigateljah / K.K. Papok, A.V. Vipser. – M.: Mashgiz, 1956. – 156 s. 10. Niko-laenko A.V. Kolichestvennye karakteristiki uhudshenija rabo-ty traktornogo dizelja pri nagarootlozhenijah v cilindrah / A.V. Nikolaenko, A.P. Kartoshkin, A.I. Proskurin // Dvigatel-lestroenie. – 1984. – №8. – S. 45-49. 11. Zelencov A.A. Issledo-vanie lokal'nogo teploobmena v kamere sgoranija dizelja, kon-vertirovannogo na prirodnyj gaz: avtoref. dis. kand. tehn. nauk. – M., 2012. – 16 s. 12. Barchenko F.B. Raschet rabocheho cik-la dizelja s uchetom lokal'nyh temperatur poverhnosti kamery

sgoranija: avtoref. dis. kand. tehn. nauk. – M., 2011. – 16 s. 13. Mollenhauer K. Handbook of diesel engines / Klaus Mollenhauer, Helmut Tschoeke. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 636 r. 14. Sovremennye dizeli: povyshenie toplivnoj jekonomichnosti i dlitel'noj prochnosti / F.I. Abramchuk, A.P. Marchenko, N.F. Razlejcev i dr. ; pod red. A.F. Shehovcova. – K. : Tjehnika, 1992. – 272 s. 15. Woschni G. Experimental investigation of the heat transfer in internal combustion engines with insulated combustion chamber walls // Heat and mass transfer in gasoline and diesel engines, 1987. – 13 pp.

УДК 621.436:681.51

А.А. Прохоренко, канд. техн. наук

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ДИЗЕЛЯ С АККУМУЛЯТОРНОЙ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМОЙ

Для разработки системы автоматического регулирования (САР) частоты вращения коленчатого вала дизеля необходимо знать статические свойства ее элементов. В такую САР обычно входят два элемента – собственно двигатель, как объект регулирования, и регулятор. В случае дизеля, оснащенного современной аккумуляторной системой топливоподдачи с электромагнитным управлением, такой регулятор может быть только электронным [1].

В работах [2-4] рассмотрены динамические свойства перечисленных элементов САР, получены дифференциальные уравнения, описывающие их поведение.

Настоящая статья посвящена описанию способа получения и анализу статических характеристик электронных регуляторов: ПД-регулятора, ПИ-регулятора и ПД-регулятора с последовательным интегральным звеном. При проведении исследования применен подход, основанный на анализе дифференциальных уравнений звеньев системы, записанных в операторной форме после применения преобразования Лапласа, и учитывающий конечное время переходных процессов [5].

Исходя из известного положения, что по окончании процесса регулирования САР приходит в установившееся равновесное состояние, можно сказать, что при $t \rightarrow \infty$ все колебательные и апериодические процессы заканчиваются, то есть в анализируемых операторных уравнениях переменная Лапласа:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (p) = 0.$$

Все статические характеристики рассмотрены в относительных безразмерных координатах: регулирующего воздействия x ; частоты вращения ко-

ленчатого вала φ ; величины нагрузки на двигатель α ; внешнего управляющего воздействия, вызванного принудительным перемещением органа управления двигателем (электронной педали) α_p .

Регуляторная характеристика САР с ПД-регулятором

В работе [2] получено дифференциальное уравнение дизеля с аккумуляторной топливной системой как объекта регулирования:

$$\left[T_{AK} T_d p^2 + (k_p T_d + k_d T_{AK}) p + (k_p k_d + \theta_p k_\varphi) \right] \varphi = \left[T_{AK} p + (k_p - \theta_p) \right] x - (T_{AK} p + k_p) \theta_n \alpha + \theta_p \theta_f f, \quad (1)$$

где T_{AK} – постоянная времени аккумулятора; k_φ – коэффициент усиления по угловой скорости коленчатого вала; k_p – коэффициент самовыравнивания аккумулятора; θ_f – коэффициент усиления по сигналу ШИМ; T_d – постоянная времени собственно двигателя; k_d – коэффициент самовыравнивания; θ_p – коэффициент усиления по давлению топлива в аккумуляторе; θ_n – коэффициент усиления по нагрузке.

В работе [3] выведено дифференциальное уравнение ПД-регулятора:

$$T_p^2 p^2 x + T_K p x + \delta_z x = T_r p \varphi + \varphi + 0,5 T_K p \alpha_p + \delta_z \alpha_p, \quad (2)$$

где T_p – характерное собственное время ЭБУ, включающего электронный регулятор; T_K – время вязкого трения регулятора; δ_z – местная степень неравномерности; T_r – время воздействия по ускорению коленчатого вала.

Статическая характеристика регулятора является зависимостью вида $\varphi = f(x)$, которую можно

получить из дифференциального уравнения (2) с учетом приведенных выше условий. Выразим φ через обратную переходную функцию:

$$\varphi = \frac{T_p^2 p^2 + T_K p + \delta_z}{T_r p + 1} x. \quad (3)$$

По окончании переходного процесса, вызванного ступенчатым регулирующим воздействием x , установится величина φ , которая может быть определена из следующего выражения [6]:

$$\varphi = \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{T_p^2 p^2 + T_K p + \delta_z}{T_r p + 1} x \right) = \delta_z x. \quad (4)$$

Соответствующий равенству (4) график зависимости относительного изменения равновесной угловой скорости вращения коленчатого вала φ от относительного изменения управляющего импульса приведен на рис. 1, прямая I. Из этого рисунка и равенства (4) видно, что регулятор обладает статизмом с относительной ошибкой регулирования δ_z . Кроме того, поскольку статическая характеристика регулятора является прямой линией, его общая степень неравномерности δ равна местной степени неравномерности и не зависит от угловой скорости вращения. Статическая характеристика регулятора представляет собой наклонную равновесную прямую.

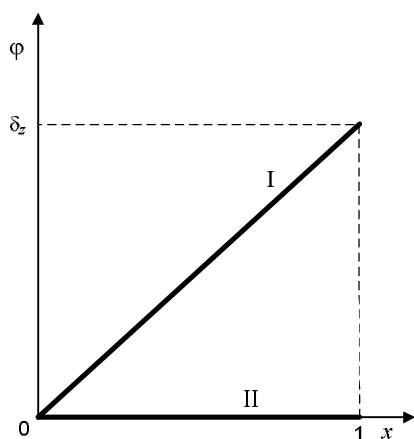


Рис. 1. Статические характеристики регуляторов:

I – ПД-регулятор; II – ПИ-регулятор и ПД-регулятор с последовательным интегральным звеном

Для получения регуляторной характеристики двигателя, которую обеспечивает САР со статическим ПД-регулятором, из уравнения (2) выразим x , используя обратную передаточную функцию:

$$x = \frac{T_r p + 1}{T_p^2 p^2 + T_K p + \delta_z} \varphi, \quad (5)$$

и подставим полученное выражение в уравнение (1), также выраженное через передаточные функции, с учетом отрицательной обратной связи:

$$\begin{aligned} \varphi = & - \frac{T_{AK} p + (k_p - \theta_p)}{T_{AK} T_D p^2 + (k_p T_D + k_D T_{AK}) p + (k_p k_D + \theta_p k_\varphi)} \times \\ & \times \frac{T_r p + 1}{T_p^2 p^2 + T_K p + \delta_z} \varphi - \\ & - \frac{(T_{AK} p + k_p) \theta_n}{T_{AK} T_D p^2 + (k_p T_D + k_D T_{AK}) p + (k_p k_D + \theta_p k_\varphi)} \alpha + \\ & + \frac{\theta_p \theta_f}{T_{AK} T_D p^2 + (k_p T_D + k_D T_{AK}) p + (k_p k_D + \theta_p k_\varphi)} f. \end{aligned} \quad (6)$$

Предположим, что внешнее возмущение по аккумулятору топлива отсутствует, то есть $f = 0$. Тогда из уравнения (6) получим:

$$\begin{aligned} \varphi = & - \frac{(T_{AK} p + k_p) \theta_n}{T_{AK} T_D p^2 + (k_p T_D + k_D T_{AK}) p +} \\ & + \frac{(T_{AK} p + k_p) \theta_n}{(k_p k_D + \theta_p k_\varphi) + [T_{AK} p + (k_p - \theta_p)] \frac{T_r p + 1}{T_p^2 p^2 + T_K p + \delta_z}} \alpha. \end{aligned} \quad (7)$$

А в конце переходного процесса при $t \rightarrow \infty$:

$$\begin{aligned} \varphi = \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \left(- \frac{(T_p^2 p^2 + T_K p + \delta_z) (T_{AK} p + k_p) \theta_n}{T_{AK} T_D p^2 + (k_p T_D + k_D T_{AK}) p +} \right. \\ \left. + \frac{(T_{AK} p + k_p) \theta_n}{(k_p k_D + \theta_p k_\varphi) + [T_{AK} p + (k_p - \theta_p)] (T_r p + 1)} \alpha \right) \quad (8) \\ = - \frac{k_p \theta_n}{(k_p k_D + \theta_p k_\varphi) + (k_p - \theta_p) \frac{1}{\delta_z}} \alpha. \end{aligned}$$

Регуляторной характеристикой принято называть зависимость крутящего момента (нагрузки) двигателя от частоты вращения его коленчатого вала при определенном положении органа управления топливоподачей, устанавливаемого автоматическим регулятором. В данном случае, при применении относительных безразмерных координат, эта зависимость $\alpha = f(\varphi)$ может быть получена из уравнения (8):

$$\alpha = - \frac{(k_p k_D + \theta_p k_\varphi) + (k_p - \theta_p) \frac{1}{\delta_z}}{k_p \theta_n} \varphi. \quad (9)$$

Графический вид зависимости, полученной по уравнению (9), которая и представляет собой регуляторную характеристику дизеля с исследуемой САР, представлен на рис. 2, кривая I. Из уравнения (9) следует, что наклон регуляторной характеристики зависит от динамических параметров дизеля

$(k_\phi, k_p, k_d, \theta_p, \theta_n)$ и местной степени неравномерности регулятора δ_z .

Регуляторная характеристика САР с ПИ-регулятором

Операторное уравнение электронного ПИ-регулятора [4]:

$$T_p^2 p^3 x + T_K p^2 x + \delta_z p x = T_r p^2 \phi + p \phi + k_p \phi + T_p^2 / T_d p \alpha_p + \delta_z \alpha_p. \quad (10)$$

Выразим ϕ через обратную переходную функцию, положив, что внешнее управляющее воздействие отсутствует, то есть $\alpha_p = 0$:

$$\phi = \frac{T_p^2 p^3 + T_K p^2 + \delta_z p}{T_r p^2 + p + k_p} x. \quad (11)$$

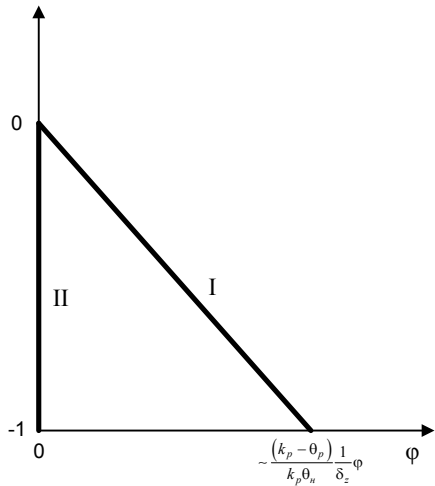


Рис. 2. Регуляторные характеристики дизеля: I – с ПД-регулятором; II – с ПИ-регулятором и ПД-регулятором с последовательным интегральным звеном

По окончании переходного процесса, вызванного ступенчатым регулирующим воздействием x , установится величина ϕ , которая может быть определена из следующего выражения:

$$\phi = \lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{T_p^2 p^3 + T_K p^2 + \delta_z p}{T_r p^2 + p + k_p} x \right) = 0. \quad (12)$$

Из полученного выражения (12) следует вывод, что регулятор обладает астатизмом. Статическая характеристика такого регулятора на рис. 1. изображена горизонтальной прямой II.

Для получения регуляторной характеристики САР из уравнения (11) выразим x через прямую передаточную функцию:

$$x = \frac{T_r p^2 + p + k_p}{T_p^2 p^3 + T_K p^2 + \delta_z p} \phi, \quad (13)$$

и подставим полученное выражение в уравнение

(1) с учетом отрицательной обратной связи, считая также, что $f = 0$:

$$\phi = - \frac{T_{AK} p + (k_p - \theta_p)}{T_{AK} T_d p^2 + (k_p T_d + k_d T_{AK}) p + (k_p k_d + \theta_p k_\phi)} \times \frac{T_r p^2 + p + k_p}{T_p^2 p^3 + T_K p^2 + \delta_z p} \phi - \quad (14)$$

$$- \frac{(T_{AK} p + k_p) \theta_n}{T_{AK} T_d p^2 + (k_p T_d + k_d T_{AK}) p + (k_p k_d + \theta_p k_\phi)} \alpha.$$

Отсюда после преобразований получим:

$$\phi = - \frac{(T_{AK} p + k_p) \theta_n}{T_{AK} T_d p^2 + (k_p T_d + k_d T_{AK}) p + (k_p k_d + \theta_p k_\phi)} + \frac{[T_{AK} p + (k_p - \theta_p)] \frac{T_r p^2 + p + k_p}{T_p^2 p^3 + T_K p^2 + \delta_z p}}{[T_{AK} p + (k_p - \theta_p)] (T_r p^2 + p + k_p)} \alpha. \quad (15)$$

В конце переходного процесса при $t \rightarrow \infty$:

$$\phi = \lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \left(- \frac{(T_p^2 p^3 + T_K p^2 + \delta_z p) (T_{AK} p + k_p) \theta_n}{T_{AK} T_d p^2 + (k_p T_d + k_d T_{AK}) p + (k_p k_d + \theta_p k_\phi)} \right) \alpha = 0. \quad (16)$$

Из полученного результата видно, что по окончании процесса регулирования угловая скорость коленчатого вала станет равной исходному значению, то есть процесс в САР является астатическим, не имеет ошибки, а регуляторная характеристика имеет вид вертикальной прямой II, как показано на рис. 2.

Регуляторная характеристика САР с ПД-регулятором с последовательным интегрирующим звеном

Схема такого регулятора описана в работе [4], там же получено его операторное уравнение:

$$T_p^2 p^2 x + T_K p x = T_r p \phi + \phi + T_K p \alpha_p + \delta_z \alpha_p. \quad (17)$$

Уравнение (17) имеет структуру левой части, схожую с уравнением (10) (здесь отсутствует свободный член). Из этого нетрудно заключить, что такой регулятор также является астатическим, а его статическая характеристика и регуляторная характеристика САР аналогичны ПИ-регулятору (прямые II на рис.1 и рис.2).

ПД-регулятор с последовательным интегрирующим звеном также не вносит в САР статической ошибки регулирования, но имеет большее быстродействие по сравнению с ПИ-регулятором [4].

Выводы

1. Статические характеристики ПИ- и ПД-

регуляторов представляют собой равновесные прямые.

2. Общая степень неравномерности ПД-регулятора совпадает с местной степенью неравномерности.

3. Регуляторные характеристики САР с ПИ- и ПД-регуляторами также представляют собой прямые.

4. Регуляторные характеристики ПИ-регулятора и ПД-регулятора с последовательным интегральным звеном не имеют наклона, то есть являются астатическими.

5. Наклон регуляторной характеристики САР с ПД-регулятором зависит от степени неравномерности регулятора и динамических параметров регулируемого объекта – дизеля с аккумуляторной топливной системой с электронным управлением.

Список литературы:

1. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. – М.: ЗАО “КЖИ “За рулем”, 2004. — 480 с. 2. Прохоренко А.А. Дифференциальное уравнение динамики дизеля с аккумуляторной системой топливоподачи как объекта регулирования / А.А. Прохоренко – Двигатели внутреннего сгорания. – №2. – 2011. С. 81-86. 3. Прохоренко А.О. Дифференциальные уравнения электронного регулятора для дизеля с аккумуляторной топливной системой / А.О. Прохоренко //

Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2012. – № 3. – С. 194 – 205. 4. Прохоренко А.А. Прецизионный электронный регулятор для дизеля с аккумуляторной топливной системой регулирования / А.А. Прохоренко // Двигатели внутреннего сгорания. – №1. – 2012. С.45-48. 5. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. — изд. 4-е, перераб. и доп. — СПб, изд-во «Профессия», 2004. — 752 с. 6. Dorf R. Современные системы управления / Р. Dorf, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

Bibliography (transliterated):

1. Sistemy upravlenija dizel'nymi dvigateljami. Perevod s nemetskogo. Pervoe russkoe izdanie. – M.: ZAO “KZhI “Za rulem”, 2004. — 480 s. 2. Prohorenko A.A. Differencial'noe uravnenie dinamiki dizelja s akkumuljatornoj sistemoj toplivopodachi kak ob'ekta regulirovanija / A.A. Prohorenko – Dvigateli vnutrennego sgoranija. – №2. – 2011. S. 81-86. 3. Prohorenko A.O. Diferencijne ravnannja elektronnoho reguljatora dlja dizelja z akumuljatornoju palivnoju sistemoju / A.O. Prohorenko // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu „Harkivs'kij politehničnij institut”. Zbirnik nauko-vih prac'. Tematičnij vipusk: Matematične modelju-vannja v tehničnii ta tehnologijah. – 2012. – № 3. – S. 194 – 205. 4. Prohorenko A.A. Precizionnij jelektronnij reguljator dlja dizelja s akumuljatornoj toplivnoj sistemoj regulirovanija / A.A. Prohorenko // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – №1. – 2012. S.45-48. 5. Besekerskij V.A. Teorija sistem avtomatičeskogo upravlenija / V. A. Be-sekerskij, E. P. Popov. — izd. 4-e, pererab. i dop. — SPb, izd-vo «Professija», 2004. — 752 s. 6. Dorf R. So-vremennye sistemy upravlenija / R. Dorf, R. Bishop. Per. s angl. B.I. Kopylova. – M.: Laboratorija bazovyh znani, 2002. – 832 s.

УДК 629.

А. А. Грабовский, канд. техн. наук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВС С КШМ СО СДВОЕННЫМИ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ СВЯЗЯМИ И С ЦЕНТРАЛЬНЫМ КШМ

Введение

Динамический расчет является основным, наиболее значимым этапом процесса проектирования и расчета двигателя. Основными исходными данными для динамического расчета являются результаты теплового и кинематического расчетов. Учитывая особенности кинематической схемы КШМ со сдвоенными кинематическими связями [1,2] необходимо составить расчетную схему КШМ (рис. 1).

Анализ расчетной схемы

Из анализа расчетной схемы следует, что при $\varphi = 0, \beta = \alpha_1$. Из расчетной схемы кинематического расчета (рис. 1) следует, что углы β и φ связаны между собой зависимостями

$$\sin \beta = \frac{e}{L} - \frac{R}{L} \sin(\alpha_1 + \varphi);$$

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{e}{L} - \frac{R}{L} \sin(\alpha_1 + \varphi)\right)^2}.$$

Сила давления газов (суммарные силы), действующая на поршень, на осях поршневых пальцев (верхних головках шатунов) делится пополам и раскладывается на две составляющие: на нормальные N_l и N_r , равные по величине и противоположные по знаку и уравнивающие друг друга, и силы P_s , равные между собой, действующие по осям шатунов и прикладываемые к осям шатунных шеек кривошипов B_l и B_r .