

параметры сложного плоско-параллельного движения поршня в процессе работы двигателя – зазоры. Кроме этого, по результатам измерений, представляется возможным выявить вероятные пятна контакта сопряжения и оценить как общую, так и локальную динамическую нагруженность пары.

Приемлемая точность измерений, в сочетании с малой инерционностью системы, позволяют использовать результаты измерений не только для качественного анализа динамики поршня, но и для верификации математических моделей.

Одновременно с этим, возможность гибкой модернизации конструкции корпусов датчиков, постоянство характеристик ИСМП при работе с объектами исследования, обладающими различными магнитными свойствами, значительно расширяют области возможного применения предложенной аппаратуры.

Действующий образец устройства успешно прошел апробацию на моторном стенде ПАО «АВТРАМАТ», при исследованиях динамики поршня 4-го цилиндра серийного двигателя ВАЗ 21083.

Дальнейшее совершенствование измерительной аппаратуры направлено на повышение точности, быстродействия и ресурсных показателей ЧЭ.

Список литературы:

1. Доценко В.Н. Математическая модель движения поршня ДВС с учетом гидродинамических сил и моментов, возникающих в смазочном слое между поршнем и цилиндром / В.Н. Доценко, И.Н. Москаленко // Двигатели

внутреннего сгорания. – 2009. – № 2. – С. 57-59. 2. Рождественский Ю.В. Современные конструкции поршней для тепловых двигателей: учеб. пособие / Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов; Мин-во образования и науки Российской Федерации, Южно-Уральский гос. Университет. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. 3. Габов А.П. Индуктивный конечный датчик в электроприводе / А.П. Габов, С.Н. Рыжов // Следящие электроприводы пром. установок, роботов и манипуляторов: тез. докл. Всесоюзная науч.-техн. конф. – Челябинск, 1989. – С. 1 – 9. 4. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник: пер. с англ. / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с. 5. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства. Справочник радиолюбителя / Издательство «Наукова думка»; Р.М. Терещук, К.М. Терещук, С.А. Седов. – К., 1981. – 670 с. 6. Фишер, Дж.Э. Электроника от теории к практике: пер. с англ. / Дж.Э. Фишер, Х.Б. Гетланд. – М.: Энергия, 1980. – 400 с.

Bibliography (transliterated):

1. Docenko V.N. Matematicheskaja model' dvizhenija porshnja DVS s uchetom gidrodinamicheskikh sil i momen-tov, vznikajuwih v smazochnom sloe mezhdu porshnem i cilindrom / V.N. Docenko, I.N. Moskalenko // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2009. – № 2. – S. 57-59. 2. Rozhdestvenskij Ju.V. Sovremennye konstrukcii porshnej dlja teplovyh dvigatelej: ucheb. posobie / Ju.V. Rozhdestvenskij, K.V. Gavrilov; Min-vo obrazovanija i nauki Rossijskoj Federacii, Juzhno-Ural'skij gos. Univer-sitet. – Cheljabinsk: Izd-vo JuUrGU, 2009. 3. Gabov A.P. Induktivnyj konechnyj datchik v jelektroprivode / A.P. Gabov, S.N. Ryzhov // Sledjawie jelektroprivody prom. ustanovok, robotov i manipulatorov: tez. dokl. Vseso-juznaja nauch.-tehn. konf. – Cheljabinsk, 1989. – S. 1 – 9. 4. Frajden, Dzh. Sovremennye datchiki. Spravochnik: per. s angl. / Dzh. Frajden. – M.: Tehnosfera, 2005. – 592 s. 5. Poluprovodnikovyje priemno-usilitel'nye ustrojstva. Spravochnik radioljubitelja / Izdatel'stvo «Naukova dumka»; R.M. Terewuk, K.M. Terewuk, S.A. Sedov. – K., 1981. – 670 s. 6. Fisher, Dzh.Je. Jelektronika ot teorii k praktike: per. s angl. / Dzh.Je. Fisher, H.B. Getland. – M.: Jenergija, 1980. – 400 s.

УДК 621.436:681.51

А.А. Прохоренко, канд. техн. наук

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ ДИЗЕЛЯ С АККУМУЛЯТОРНОЙ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМОЙ

Практически все транспортные дизели имеют в своем составе всережимный автоматический регулятор [1, 2]. В результате работа двигателя осуществляется по, так называемым, регуляторным характеристикам – совокупности режимов, для которых зависимость крутящего момента от частоты вращения устанавливается автоматически, без постороннего воздействия на орган управления топливоподачей [1]. Причем, эти регуляторные характеристики для транспортного дизеля должны быть статическими, то есть при изменении нагрузки на двигатель угловая скорость вращения коленчатого

вала должна изменяться. Однако, в некоторых случаях применения дизелей (например, для дизель-генераторных установок) требуется, чтобы поддержание заданного скоростного режима было очень точным и не зависело от нагрузки. Регуляторная характеристика, составляющая совокупность режимов с различной нагрузкой и постоянной угловой скоростью вращения коленчатого вала, называется астатической, а регулятор, обеспечивающий такую работу – прецизионным.

Для дизелей с традиционной гидромеханической топливной аппаратурой, регулирование которых достаточно просто осуществить с помощью

механического чувствительного элемента, конструкции таких прецизионных регуляторов достаточно известны, изучены и доведены до совершенства. Как известно, это регуляторы с упруго присоединенным катарактом или непрямого действия с изодромной обратной связью [1].

Однако, на современные дизельные двигатели, оснащенные топливной аппаратурой с электромагнитным управлением, перенести этот опыт сложно, поскольку использование механического чувствительного элемента требует преобразования типа сигнала в цепи управления (механический сигнал в электрический).

В работе [4] показано, что электронный ПД-регулятор обладает статизмом, то есть имеет ошибку регулирования. Возможные способы исключения этого статизма путем доработки алгоритма электронного регулятора предложены в данной статье.

Как известно, система автоматического регулирования (САР) в составе «дизель – электронный регулятор» является непрерывно-цифровой. В данной работе для анализа этой системы она сведена к непрерывной, и регулятор также считается непрерывным звеном.

Электронный ПИД-регулятор дизеля с электромагнитным управлением топливоподачей описывается следующим дифференциальным уравнением [4]:

$$0,5T_d T_{II} p^3 x' + (T_d + 0,5T_{II}) p^2 x' + p x' = 0,5(k_{II} T_d + k_d) T_{II} p^3 \varphi + (k_{II} (0,5T_{II} + T_d) + k_{II} T_d + k_d) p^2 \varphi + k_{II} p \varphi + k_{II} \varphi. \quad (1)$$

Здесь T_d – время дифференцирования; T_{II} – время интегрирования; k_{II} – пропорциональный коэффициент регулятора; k_d – дифференциальный коэффициент регулятора; k_{II} – интегральный коэффициент регулятора; p – обозначение переменной Лапласа; $x = \Delta\tau/\tau_0$ – безразмерная относительная координата регулирующего воздействия (продолжительность управляющего импульса на электромагнит форсунки); $\varphi = \Delta\omega/\omega_0$ – безразмерная относительная частота вращения коленчатого вала. Также предварительно обозначим величину регулирующего воздействия до прохождения алгоритма электронного блока управления (ЭБУ) (до поступления на исполнительный механизм) символом x' .

Кроме того, как было показано в работе [4], при построении САР по схеме, приведенной на рис.

1, на работу регулятора оказывает воздействие процесс прохождения сигнала через алгоритм ЭБУ. Этот процесс описывается дифференциальным уравнением:

$$T_3 p x + x = x' + \alpha_p, \quad (2)$$

где α_p – внешнее управляющее воздействие, вызванное принудительным перемещением органа управления двигателем (электронной педали).

Уравнение ПИ-регулятора

Реализуем регулятор в виде ПИ-регулятора, то есть в уравнении (1) положим: $T_d = 0$ и $k_d = 0$.

При этом уравнение (1) упрощается до вида:

$$0,5T_{II} p^2 x' + p x' = 0,5k_{II} T_{II} p^2 \varphi + k_{II} p \varphi + k_{II} \varphi. \quad (3)$$

Учтем, что $T_{II} = NT_d$, где N – число рабочих циклов двигателя, в течение которых происходит интегрирование его выходной характеристики φ , и разделим уравнение (3) почленно на k_{II} :

$$\frac{NT_d}{2k_{II}} p^2 x' + \frac{1}{k_{II}} p x' = \frac{NT_d}{2} p^2 \varphi + p \varphi + \frac{k_{II}}{k_{II}} \varphi. \quad (4)$$

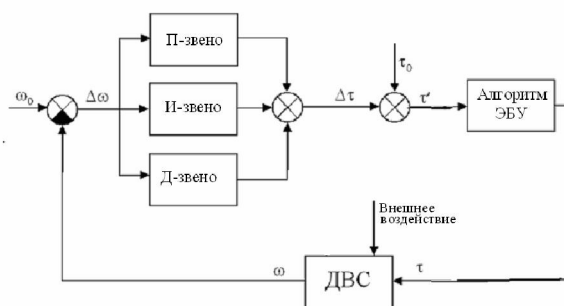


Рис.1. Общая схема регулирования частоты вращения дизеля

Сведем систему двух уравнений (2) и (4) в одно путем исключения переменной x' :

$$\frac{NT_d^2}{2k_{II}} p^3 x + \left(1 + \frac{N}{2}\right) \frac{T_d}{k_{II}} p^2 x + \frac{1}{k_{II}} p x = \frac{NT_d}{2} p^2 \varphi + p \varphi + \frac{k_{II}}{k_{II}} \varphi + \frac{NT_d}{2k_{II}} p \alpha_p + \frac{1}{k_{II}} \alpha_p. \quad (5)$$

Введем обозначения в соответствии с физическим смыслом [1, 4]: $T_d \sqrt{N/2k_{II}} = T_p$ – постоянная времени ЭБУ, включающего электронный регулятор, $\left(1 + \frac{N}{2}\right) \frac{T_d}{k_{II}} = T_k$ – постоянная времени для вязкого трения регулятора, $\frac{1}{k_{II}} = \delta_z$ – местная

степень неравномерности, $N/2 T_d = T_r$ – время воздействия по ускорению коленчатого вала, $k_{II}/k_{II} = k_p$ – коэффициент усиления интегрального звена.

Тогда уравнение (5), описывающее электронный блок управления с ПИ-регулятором примет вид:

$$\begin{aligned} T_p^2 p^3 x + T_K p^2 x + \delta_z p x = \\ = T_r p^2 \varphi + p \varphi + k_p \varphi + T_p^2 / T_d p \alpha_p + \delta_z \alpha_p \end{aligned} \quad (6)$$

Статическая характеристика полученного регулятора может быть найдена из его динамической характеристики путем вычисления ошибки регулирования через обратную передаточную функцию. Известно, что статическая характеристика – это зависимость $\varphi = f(x)$ на установившемся, равновесном режиме при постоянной настройке регулятора, которая, в данном случае, выражается координатой α_p . Положим, что внешнее управляющее воздействие отсутствует, то есть $\alpha_p = 0$. Тогда, выражая через обратную передаточную функцию из уравнения (6):

$$\varphi = \frac{T_p^2 p^3 + T_K p^2 + \delta_z p}{T_r p^2 + p + k_p} x \quad (7)$$

После затухания всех колебательных и апериодических процессов по окончании регулирования имеем [5]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (p) = 0 \quad (8)$$

Учитывая это, в уравнении (7) получим:

$$\varphi = \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{T_p^2 p^3 + T_K p^2 + \delta_z p}{T_r p^2 + p + k_p} x \right) = 0 \quad (9)$$

то есть, в конце процесса регулирования угловая скорость вращения коленчатого вала не изменится по сравнению с начальной $\varphi(0) = 0$, а значит регулятор является астатическим.

Уравнение ПД-регулятора с последовательным интегральным звеном

Рассмотрим другой возможный способ создания астатизма для процесса регулирования – введем в схему последовательное интегральное звено. Таким звеном является положительная местная обратная связь, как показано в схеме на рис. 2.

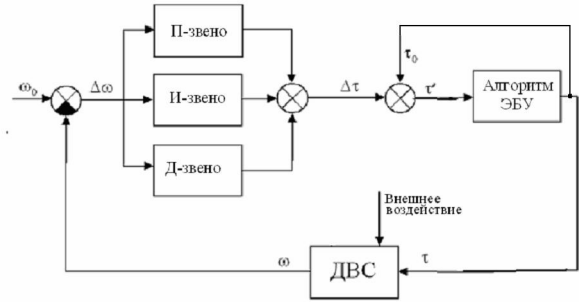


Рис.2. Общая схема регулирования частоты вращения дизеля с местной положительной обратной связью

Как известно из классической теории автоматического управления [5], передаточная функция узла с положительной обратной связью определяется следующим образом:

$$W_{OC}(p) = \frac{W_{ЭБУ}(p)}{1 - W_{ЭБУ}(p)} \quad (10)$$

В данном случае, алгоритм ЭБУ является звеном запаздывания с передаточной функцией [4]:

$$W_{ЭБУ}(p) = \frac{1}{T_d p + 1} \quad (11)$$

Тогда:

$$W_{OC}(p) = \frac{1}{T_d p + 1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{T_d p + 1}} = \frac{1}{T_d p} \quad (12)$$

Полученная передаточная функция является не чем иным, как отображением идеального интегрирующего звена, и ей соответствует дифференциальное уравнение:

$$T_d \frac{dx}{dt} = x' + \alpha_p, \text{ или } T_d p x = x' + \alpha_p \quad (13)$$

Уравнение (13) дополняет уравнение ПД-регулятора, полученное в работе [4] из (1) при условии $T_{II} = 0$ и $k_{II} = 0$:

$$T_d p x' + x' = (k_{II} T_d + k_d) p \varphi + k_{II} \varphi \quad (14)$$

Система уравнений (13), (14) после исключения переменной x' сводится к одному уравнению:

$$\begin{aligned} \frac{T_d^2}{k_{II}} p^2 x + \frac{T_d}{k_{II}} p x = \\ = \left(T_d + \frac{k_d}{k_{II}} \right) p \varphi + \varphi + \frac{T_d}{k_{II}} p \alpha_p + \frac{1}{k_{II}} \alpha_p \end{aligned} \quad (15)$$

Введем обозначения для новых постоянных времени, используемых в уравнении (15):

$T_d/\sqrt{k_{II}} = T_p$ – постоянная времени собственно

ЭБУ, включающего электронный регулятор;

$T_d/k_{II} = T_K$ – постоянная времени катаракта (вязкого трения);

$(T_d + k_d/k_{II}) = T_r$ – время воздействия по ускорению коленчатого вала.

Тогда уравнение (15), описывающее электронный блок управления с ПД-регулятором, примет вид:

$$T_p^2 p^2 x + T_K p x = T_r p \varphi + \varphi + T_K p \alpha_p + \delta_z \alpha_p. \quad (16)$$

Для получения статической характеристики такого регулятора применим тот же подход, что и для ПИ-регулятора, описанный выше:

$$\varphi = \frac{T_p^2 p^2 + T_K p}{T_r p + 1} x. \quad (17)$$

Откуда при условии $\lim_{t \rightarrow \infty} (p) = 0$:

$$\varphi = \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{T_p^2 p^2 + T_K p}{T_r p + 1} x \right) = 0, \quad (18)$$

то есть регулятор также является астатическим.

Сравнительный анализ регуляторов

Проведем качественное сравнение предложенных выше ПИ-регулятора (имеющего в своем составе параллельное интегральное звено) и ПД-регулятора с последовательным интегральным звеном. Известно, что время переходного процесса для аperiodического звена (а оба предложенных регулятора являются аperiodическими звеньями 2-го порядка, так как в описывающих их дифференциальных уравнениях коэффициент перед первой производной больше коэффициента перед второй производной, что и является определяющим условием) составляет [3]:

$$t_n \approx 3T_K. \quad (19)$$

Как было показано выше, время катаракта ПИ-регулятора $T_K = (1 + N/2)T_d/k_{II}$, аналогичный параметр ПД-регулятора $T_K = T_d/k_{II}$, что на порядок меньше из-за отсутствия целого множителя $(1 + N/2)$. Следовательно, с точки зрения быстроты действия САР применение ПД-регулятора с последовательным интегрирующим звеном более эффективно, чем применение ПИ-регулятора.

Выводы

1. Существует два способа исключения статической ошибки электронного ПД-регулятора путем доработки его алгоритма: применение ПИ-регулятора и введение в схему ПД-регулятора последовательного интегрального звена.

2. Получены дифференциальные уравнения предложенных электронных регуляторов, которые могут быть использованы для синтеза САР дизеля с электронным управлением.

3. Качественное сравнение ПИ-регулятора и ПД-регулятора с последовательным интегральным звеном показало, что последний обеспечивает на порядок большее быстродействие при сохранении обеспечения астатизма.

Список литературы:

1. Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания. / В.И. Крутов – М.: Машиностроение, 1989. – 416 с. 2. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. – М.: ЗАО “КЖИ “За рулем”, 2004. – 480 с. 3. Поляков К.Ю. Теория автоматического управления для “чайников”. Учебник. / К.Ю. Поляков. – Санкт-Петербург, 2008. – 139 с. 4. Прохоренко А.О. Дифференційне рівняння електронного регулятора для дизеля з акумуляторною паливною системою / 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. 5. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб, изд-во «Профессия», 2004. – 752 с.

Bibliography (transliterated):

1. Krutov V.I. Avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie dvigatelej vnutrennego sgoraniya. / V.I. Krutov – M.: Mashinostroenie, 1989. – 416 s. 2. Sistemy upravlenija dizel'nymi dvigateljami. Perevod s nemeckogo. Pervoe russkoe izdanie. – M.: ZAO “KZhI “Za rulem”, 2004. – 480 s. 3. Poljakov K.Ju. Teorija avtomaticheskogo upravlenija dlja “chajnikov”. Uchebnik. / K.Ju. Poljakov. – Sankt-Peterburg, 2008. – 139 s. 4. Prohorenko A.O. Di-ferencijne rivnjannja elektronnoho reguljatora dlja dizelja z akumuljatornoju palivnoju sistemoju / A.O. Prohorenko – Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu „Harkivs'kij politehničnij institut”. Zbirnik nauko-vih prac'. Tematichnij vipusk: Matematichne modeljuvannja v tehničij ta tehnologijah. – 2012. – № 3. – S. 194 – 205. 5. Besekerskij V.A. Teorija sistem avtomaticheskogo upravlenija / V. A. Besekerskij, E. P. Popov. – SPb, izd-vo «Professija», 2004. – 752 s.