

А.О. Прохоренко, С.С. Кравченко, Д.Є. Самойленко, І.М. Карягін, Д.С. Таланин

УНІВЕРСАЛЬНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ РЕГУЛЯТОР ДИЗЕЛЯ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРИЧНОГО СЕРВОАКТУАТОРА

Розроблено електронний регулятор паливної системи високого тиску для транспортного дизеля, впровадження якого дозволить формувати оптимальні характеристики транспортного засобу з урахуванням умов його експлуатації та узгодженості з будь-якими видами трансмісії та двигуна. Авторами запропоновано функціональну схему та алгоритм електронного регулятора дизеля, що базується на аналогії з роботою механічного пружинно-важільного все режимного регулятора прямої дії. Розроблено алгоритм роботи підсистеми керування позиціонуванням виконавчого механізму (сервоактуатором) HEINZMANN, який побудований на паралельній роботі позиційного і пропорційно-диференціально-ізодромного регуляторів. Проведені безмоторні дослідження паливного насоса високого тиску марки BOSCH PES 4P 100A, обладнаного електричним сервоактуатором, показали, що розроблена авторами система електронного регулювання може забезпечити ідентичні зі штатним механічним регулятором, а при простому переналаштуванні – будь-які необхідні, регуляторні характеристики двигуна.

Вступ

Значного прогресу в світовому двигунобудуванні вдалося досягти за рахунок використання в конструкціях сучасних двигунів електронних компонентів для керування їх агрегатами і системами. Зокрема, електронне керування подачею палива дизеля дозволяє точно і диференційовано регулювати параметри процесу впорскування. Тільки таким чином можна забезпечити відповідність численним технічним вимогам, які висуваються до сучасних двигунів внутрішнього згорання [1]. Але досі масове виробництво й обладнання дизелів паливною апаратурою з електронним керуванням є прерогативою декількох провідних світових фірм. Монопольне володіння зазначеними технологіями дозволяє таким фірмам отримувати понадприбуток, необґрунтовано завищуючи вартість як самих систем, так і робіт з їх адаптації на об'єкті регулювання. Тому природно, що зазначені фірми-виробники не видають ніякої інформації про склад, структуру алгоритмів і кодів програм, за якими працює їх обладнання. Такого ж підходу до ведення бізнесу дотримуються і невеликі приватні фірми, які займаються переобладнанням традиційної паливної апаратури на електронне керування та науковці, що займаються дослідженнями у даній області.

У відкритих літературних джерелах і публікаціях повідомляються лише загальні положення про електронне керування паливоподачею дизелів. Так, загальновідомо, що до складу електронної системи керування дизеля входять: набір датчиків в тій чи іншій комплектації – як правило, це: датчик частоти обертання, датчик положення органу керування двигуном (обидва – обов'язково), датчик положення рейки ПНВТ, датчик температури палива, тиску та температури наддуву, температур відпрацьованих газів і охолоджуючої рідини; виконавчий механізм у вигляді електромагніту, лінійного п'єзоактуатору або крокового двигуна; електрон-

ний блок керування (ЕБК), що пов'язує датчики і виконавчі механізми за допомогою роботи свого алгоритму. Проте описи цих алгоритмів роботи ЕБК повністю відсутні. Уривчасто відомо лише, що в ньому проводиться обробка сигналів датчиків і, на основі інтерполяції закладених в пам'ять таблиць видаються керуючі сигнали на виконавчий механізм [1]. Як правило, самі набори таблиць, їх призначення, методика формування керуючого сигналу є комерційними секретами (know-how) фірм.

Аналіз літератури

Наразі відомі деякі публікації з приводу синтезу алгоритмів систем керування ДВЗ. Зокрема, у статті [2] є відомості про практичне створення алгоритмів електронного управління тепловозних дизелів. Проте, опис самих алгоритмів також не наводиться. Крім того, особливості роботи тепловозних дизелів не дозволяють перенести алгоритм їх управління на використання в двигуні наземного транспорту або спецтехніки. Те ж стосується і суднових двигунів, алгоритм управління якими розглядається в статті [3]. Роботи вчених В.В. Фурмана та А.Б. Богаєвського також присвячені розробці систем електронного управління саме тепловозних дизелів [4, 5 та ін.].

Останнім часом з'явилося безліч наукових робіт, пов'язаних з електронним управлінням випробувальним стендом [6, 7], метою яких є стендове відтворення транзйентних (перехідних) випробувальних циклів двигуна для визначення їх екологічних показників. Проте, в даному випадку вирішується завдання управління абсолютно іншим об'єктом – навантажувальним пристроєм стенду, що має до двигуна опосередковане відношення.

Частина відомих відкритих публікацій, що присвячена електронному регулюванню дизелів, описує алгоритми управління окремими системами – акумулятором тиску палива [8], системою подачі повітря [9], гірським гальмом [10], системою реци-

ркуляції ВГ [11], діагностики приводного електромагніту ПНВТ [12] та ін., що також не відноситься безпосередньо до системи регулювання швидкісного режиму роботи двигуна.

Праці [13, 14] не можна в повній мірі назвати такими, що пов'язані з електронним регулюванням, оскільки в них йдеться про дистанційну передачу «ручного» управління на вхідний важіль механічного регулятора, щоправда, за допомогою електромагнітної-пневматичного виконавчого механізму, керованого мікроконтролером.

Роботи вчених Г.М. Кухаренка і А.Н. Марчука [15, 16] присвячені розробці алгоритму управління паливopoдачою тільки для окремого режиму роботи двигуна, а саме – для режиму пуску.

Найбільш близьким матеріалом з постановки задачі і методів її розв'язання є робота [17]. Проте, автори цього дослідження в якості виконавчого механізму використовували кроковий двигун, який, як відомо, має невисоку швидкість, що не може не позначитися на динамічних властивостях системи управління. Крім того, алгоритм управління заснований на інтерполяції закладених в пам'ять контролера необхідних статичних характеристик регулятора в табличному вигляді. Це вносить додаткове навантаження на центральний процесор контролера і призводить до збільшення власного часу (інерційності) електронного регулятора.

Виходячи з цього, актуальним є вирішення науково-технічної задачі створення ефективної, з точки зору швидкодії, системи електронного керування подачею палива дизеля на основі відкритого програмного алгоритму його роботи. Саме це є метою даної статті.

Синтез статичних характеристик електронного регулятора методом аналогії

Розглянемо роботу механічного всережимного регулятора зі змінним зтягуванням пружини, схема якого наведена на рис. 1. Їй відповідає аналогічна алгоритмічна структурна схема, що наведена на рис. 2, яка побудована на підставі заміни фізичних інформаційних процесів (лінійних переміщень ланок) електронними. Так, переміщення муфти чутливого елемента під дією сил інерції обертових мас може бути представлено як алгоритм вимірювання швидкості обертання колінчастого валу, а сила зтягування пружини – як алгоритм обробки зовнішнього керуючого впливу. З цієї точки зору, важіль регулятора можна уявити як деякий обчислювач, рівноважний стан якого однозначно визначає значення вихідного сигналу Hr_0 .

Тоді умову статичної рівноваги всережимного регулятора зі змінним зтягуванням пружини, можна описати математичною рівністю:

$$E \cdot (b + c) = D \cdot c. \quad (1)$$

Тут E – це умовна відновлююча сила, яка предста-

вляє собою силу зтяжки пружини регулятора. Ця сила складається з сили попередньої зтяжки пружини (E_0) і її приведених до важеля поточних деформацій, пов'язаних з рухом важеля управління (X) і рейки ПНВТ (Hr_0):

$$E = E_0 + C \cdot \bar{X} \cdot (X_{\max} - X_{\min}) \frac{e}{d + e} - C \cdot Hr_0 \cdot (Hr_{\max} - Hr_{\min}) \frac{b + c}{a + b + c}, \quad (2)$$

де C – віртуальний коефіцієнт жорсткості пружини в Н/м. Рискою в формулі (2) й далі позначені відносні величини. Коефіцієнти a, b, c, d, e – розміри відповідних плечей важелів регулятора (див. рис. 1).

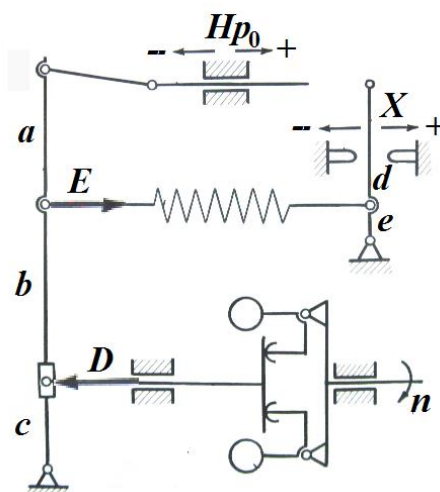


Рис. 1. Всережимний регулятор зі змінним зтягуванням пружини. Принципова схема

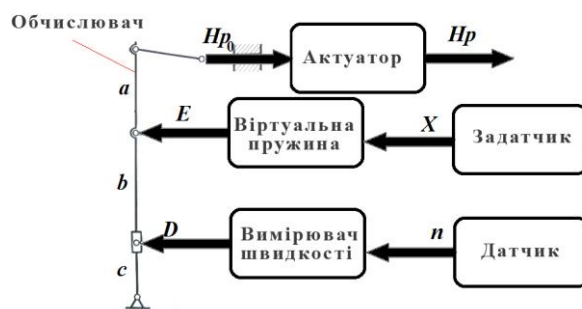


Рис. 2. Схема аналогії роботи електронного всережимного регулятора

Умовна підтримуюча сила D – це, по суті, вимірювач швидкості обертання. Припустимо, що він підпорядковується лінійній залежності. Тоді

$$D = K \cdot \bar{\omega} \cdot (\omega_{\max} - \omega_{\min}) = K \frac{\pi}{30} \bar{n} \cdot (n_{\max} - n_{\min}), \quad (3)$$

де K – постійний коефіцієнт пропорційності, Н·с⁻¹. (аналог інерційного коефіцієнта механічного регу-

лятора [18]).

Підставимо вирази (2) і (3) в рівняння (1) і розкриємо дужки в його лівій частині:

$$\begin{aligned} E_0 \cdot (b+c) + C \cdot (X_{\max} - X_{\min}) \frac{e(b+c)}{d+e} \cdot \bar{X} - \\ - C \cdot (Hr_{\max} - Hr_{\min}) \frac{(b+c)^2}{a+b+c} \cdot \bar{Hr}_0 = \\ = K \frac{\pi}{30} \bar{n} \cdot (n_{\max} - n_{\min}) \cdot c. \end{aligned}$$

Розділимо отриманий вираз на множник

$$\begin{aligned} C \cdot (Hr_{\max} - Hr_{\min}) \frac{(b+c)^2}{a+b+c} : \\ \frac{E_0}{C(Hr_{\max} - Hr_{\min})} \cdot \frac{a+b+c}{b+c} + \\ + \frac{X_{\max} - X_{\min}}{Hr_{\max} - Hr_{\min}} \cdot \frac{e(a+b+c)}{(d+e)(b+c)} \cdot \bar{X} - \bar{Hr}_0 = \\ = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{K(n_{\max} - n_{\min})}{C(Hr_{\max} - Hr_{\min})} \cdot \frac{c(a+b+c)}{(b+c)^2} \bar{n}. \end{aligned}$$

Позначимо константи, що входять в отриманий вираз:

$$\begin{aligned} \frac{E_0}{C(Hr_{\max} - Hr_{\min})} \cdot \frac{a+b+c}{b+c} = A, \\ \frac{X_{\max} - X_{\min}}{Hr_{\max} - Hr_{\min}} \cdot \frac{e(a+b+c)}{(d+e)(b+c)} = A, \\ \frac{\pi}{30} \cdot \frac{K(n_{\max} - n_{\min})}{C(Hr_{\max} - Hr_{\min})} \cdot \frac{c(a+b+c)}{(b+c)^2} = B. \end{aligned}$$

Тоді маємо запис рівняння електронного регулятора вигляду

$$A_1 + A \cdot \bar{X} - \bar{Hr}_0 = B \cdot \bar{n},$$

або

$$\bar{Hr}_0 = A_1 + A \cdot \bar{X} - B \cdot \bar{n}. \quad (4)$$

Отримане рівняння (4) і є алгоритмом роботи пропонованого електронного регулятора. Зв'язок між значеннями величини Hr_0 і фізичним положенням рейки ПНВТ Hr був докладно описаний у роботі [19].

Крім того, з рівняння (4) можна отримати статичні характеристики регулятора у вигляді

$$\bar{Hr}_0 = f(\bar{X}, \bar{n}),$$

а підбором коефіцієнтів A_1 , A і B - задати їх необхідний вигляд.

Алгоритм роботи підсистеми керування позиціонуванням виконавчим механізмом

Найбільшого поширення у ДВЗ набули виконуючі механізми (актуатори) у вигляді електричних машин (крокові або прецизійні електродвигуни) або електричних апаратів (електромагніти та соленоїди).

Так, в роботі [20] описаний позитивний досвід

авторів з експериментального використання лінійного крокового електродвигуна в якості виконуючого механізму (ВМ) для електронної системи керування паливopoдачею дослідницького дизеля. Цей виконавчий механізм проявив себе досить надійним і простим в алгоритмізації роботи агрегатом. Однак застосування лінійного ВМ на основі крокового двигуна має і ряд недоліків. Серед них: досить великі габарити; недостатня швидкодія; складна система аварійного захисту (при зниканні сигналу керування ВМ «зависає» в останньому положенні).

В той же час, фірма BOSCH® для позиціонування рейки рядних і розподільних паливних насосів високого тиску використовує електромагніти, керовані за сигналом широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) [1]. Конструкція таких ВМ добре відпрацьована і має масове або серійне виробництво. А широко відома на ринку компанія HEINZMANN® виробляє великий асортимент надійних і довговічних актуаторів практично для будь-якого сегменту промисловості, включаючи актуатори обертання з безщітковими електромоторами, зубчастим редуктором та вбудованим датчиком зворотного зв'язку за позиціонуванням [21]. Всі ВМ цієї фірми оснащені електроприводом з можливістю підключення пристроїв керування, що дозволяє легко встановлювати їх на будь-якому двигуні. При цьому, вибір відповідного актуатора залежить від зусилля, необхідного для приведення в дію або утримання в певному положенні органу керування паливopoдачею (рейки ПНВТ).

Наприклад, актуатор HEINZMANN моделі StG 6-02V, зовнішній вигляд і устрій якого представлені на рис. 3, заснований на дисковому двигуні постійного струму, що керується за сигналом ШИМ. Він має зубчастий редуктор і безконтактний зворотний позиційний зв'язок. Цей актуатор забезпечує вихідний крутний момент у 6 Н·м і діапазон кута повороту вихідного валу 36° [21].

Слід зазначити, що такий актуатор позбавлений ряду недоліків ВМ на основі крокового двигуна, викладених вище. Це визначається: 1) наявністю зворотної пружини, яка переводить вихідний вал в «нульове» положення при зниканні сигналу керування; 2) досить високою швидкодією (час відгуку, за паспортом пристрою, складає 75 мс), що дозволяє використовувати його для регулювання високообертових двигунів.

Виходячи з вищевказаного, в якості фізичного об'єкта дослідження в даній роботі обрано саме агрегат StG 6-02V.

Функціональна схема розробленої авторами електронної системи автоматичного керування (САК) дизеля представлена на рис. 4. Як видно з рисунку, зовнішніми і внутрішніми впливами такої САК є: X – поточне положення органу керування

двигуном, n – поточна частота обертання колінчастого валу двигуна, H_p – положення органу керування паливоподачею (рейки ПНВТ), f – відносна величина заповнення сигналу ШІМ. Регулятор ВМ являє собою частину програми ЕБК двигуна. Алгоритм роботи підсистеми керування позиціонування ВМ наводиться нижче.

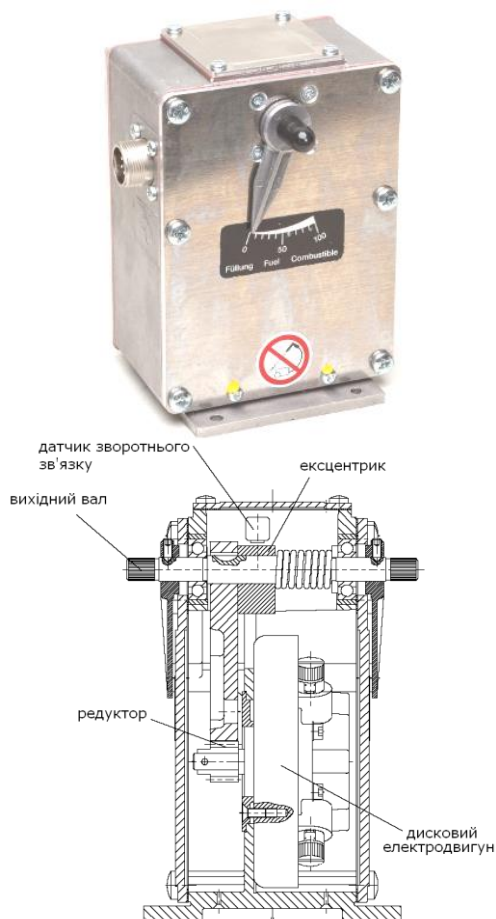


Рис. 3. Актуатор StG 6-02V

З огляду на наявність зворотного позиційного зв'язку за поточним дійсним положенням рейки ПНВТ, можна обчислити величину «нев'язки» за цим положенням:

$$\Delta H_p = H_p - H_{p_0} \quad (5)$$

Розроблений алгоритм керування ВМ побудований на паралельній роботі позиційного (П) і пропорційно-диференціально-ізодромного (ПДІ) регуляторів (див. рис. 4). При цьому, П-регулятор є, по суті, безінерційним підсилювачем і визначає необхідний рівень заповнення сигналу ШІМ для досягнення заданого рівноважного положення рейки H_{p_0} . Його рівняння має досить простий вигляд:

$$f_0 = K \cdot H_{p_0} \quad (6)$$

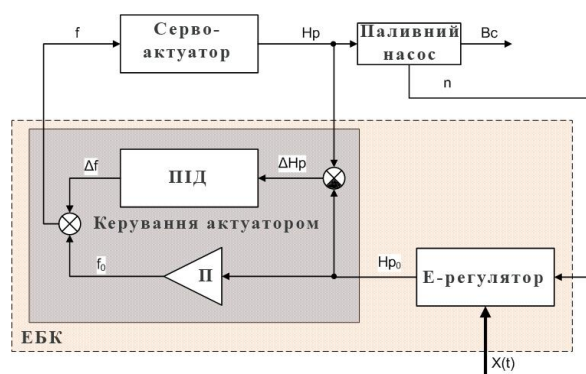


Рис. 4. Функціональна схема електронної системи керування дизеля

Паралельно працюючий з ним ПДІ-регулятор, на підставі величини, визначеної за формулою (5) невід'язки, забезпечує швидке досягнення заданого положення H_{p_0} за допомогою програмної реалізації виразу:

$$\Delta f = K_D \cdot \Delta^2 H_p + K_P \cdot \Delta H_p + K_I \cdot S \quad (7)$$

Таким чином, поточне заповнення сигналу ШІМ, поданого на виконавчий механізм, має значення:

$$f = f_0 + \Delta f \quad (8)$$

Аналізуючи формули (6) і (7) не важко помітити, що перша з них забезпечує статичні характеристики, а друга визначає динамічні властивості системи.

Відзначимо також, що диференціальна складова в виразі (7) визначається таким чином:

$$\Delta^2 H_p = \Delta H_p(t) - \Delta H_p(t-T), \quad (9)$$

де $T = 120/n$ – тактовий розрахунковий період, який залежить від поточного швидкісного режиму двигуна n і детермінує часові константи інтегрування і диференціювання.

Доданок ізодромної складової S з того ж виразу (7) обчислюється за допомогою рекурентної формули:

$$S(t+T) = k_I \cdot S(t) + \Delta H_p(t) \quad (10)$$

У формулах (9) і (10) t – поточний момент часу, k_I – коефіцієнт ізодрому, що за фізичним сенсом є величиною, зворотною константі часу цієї ланки.

Іншими компонентами, що входять в схему крім актуатора, є: мікроконтролер Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 з тактовою частотою 84 МГц, об'ємом оперативної пам'яті 96 Кбайт і програмованої пам'яті 512 Кбайт, частотою вихідного 12-ти розрядного сигналу ШІМ – 488,28 Гц; електричний блок живлення потужністю 330 Вт; інтегральний мостовий драйвер електродвигуна з вихідним струмом до 43 А.

Загальновідомо, що для забезпечення якісної роботи системи ПДІ-регулювання необхідно вирішити складне завдання вибору і оптимізації зна-

чень коефіцієнтів, що входять в рівняння такого регулятора. В даному випадку, це величини K_D , K_P , K_I у формулі (7) та K в формулі (6). Існує два способи вирішення цього завдання. Перший – це складання математичних моделей регулятора і об'єкта регулювання у вигляді системи диференціальних рівнянь з подальшими розрахунковими дослідженнями на основі спеціальних методів теорії автоматичного керування [22]. Другий спосіб полягає в експериментальному підборі значень коефіцієнтів, тобто так званому «ручному налаштуванні», яке базується на деяких емпіричних правилах і методиках (наприклад метод Зіглера-Нікольса, CHR та ін. [23]).

На попередньому етапі завдання вибору коефіцієнтів було вирішене авторами за допомогою саме другого способу, з урахуванням забезпечення робастності системи при такому змінному значенні тактового періоду T , що відповідає можливому діапазону частот обертання колінчастого валу двигуна.

Коефіцієнт передавання (підсилення) K у фо-

рмулі (6) має простий фізичний сенс і визначення: це необхідне заповнення сигналу ШІМ на одиницю відносного позиціонування вихідного валу для даного актуатора. Його значення було встановлене за допомогою експериментального визначення нахилу статичної характеристики актуатора StG 6-02V у вигляді практично лінійної функції $H_p(f)$.

В результаті серії спеціальних лабораторних експериментів на досліджуваній установці були знайдені оптимальні значення коефіцієнтів ПДІ-регулятора. Їх відносне вагове значення склало величини: $K_D \approx 20\%$, $K_P \approx 50\%$, $K_I \approx 30\%$. Така настройка забезпечила збіжність перехідних процесів з малою коливальністю у восьму діапазоні зміни величини тактового періоду і може бути визнана задовільною на даному етапі досліджень. Для прикладу на рис. 5 і рис. 6 представлено запис треку роботи системи. Як видно з рисунків, розроблена система керування забезпечує астатичне позиціонування вихідного валу актуатора $H_p(t)$ за заданим положенням $H_{p0}(t)$.

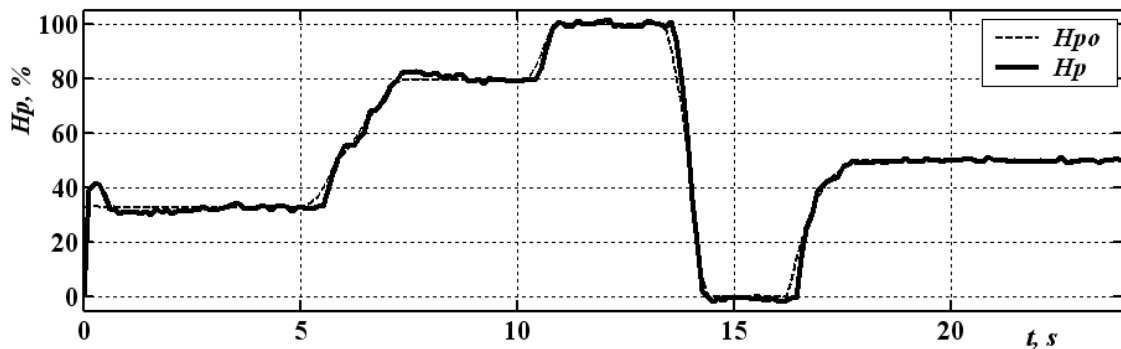


Рис. 5. Переміщення органу керування (вихідний сигнал)

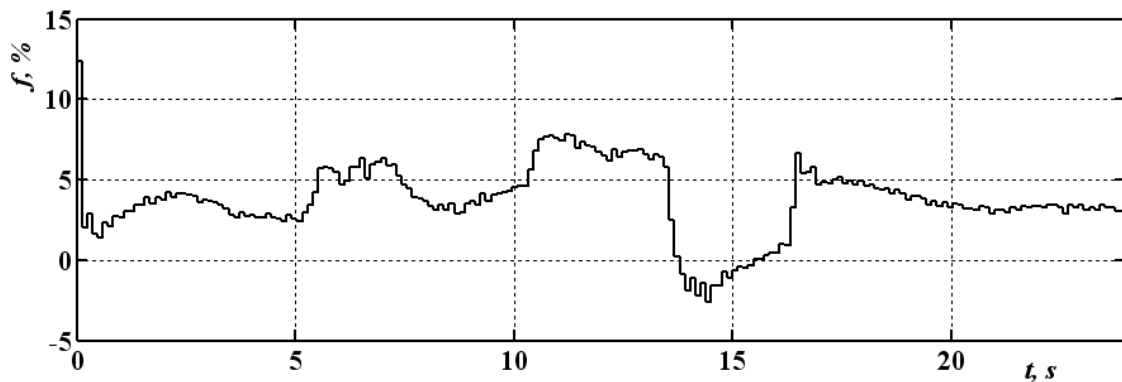


Рис. 6. Зміна величини заповнення сигналу ШІМ (вхідний сигнал)

Експериментальна частина – визначення статичних характеристик електронного регулятора на безмоторному стенді

В якості керованого ПНВТ використаний насос марки BOSCH PES 4P 100A 320RV, який забезпечує тиск впорскування палива до 80 МПа при максимальній цикловій подачі 170 мм³. Спочатку,

досліджуваний ПНВТ був забезпечений всережимним механічним регулятором типу RQV. Його статичні регуляторні характеристики, що отримані авторами експериментально, показані на рис. 7. Важливо відзначити, що отримані результати повністю збігаються з якісними довідковими даними, наведеними в [1, стор. 128].

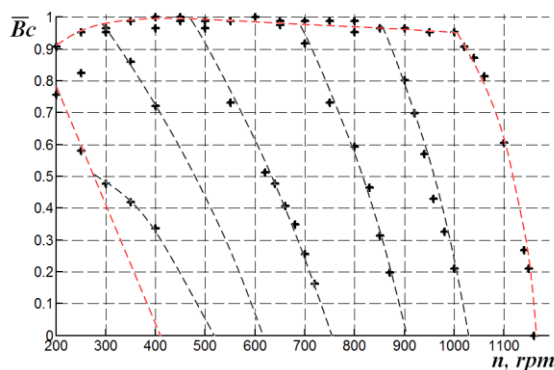


Рис. 7. Статичні регуляторні характеристики ПНВТ BOSCH PES 4P зі штатним механічним регулятором марки RQV

Виходячи з представлених на рис. 7 статичних характеристик штатного механічного всережимного регулятора RQV і з метою їх можливо близького повторення на електронному регуляторі, було припущено, що вимірювач швидкості має параболічну залежність, тобто $D = f(\omega^2)$. Тоді рівняння алгоритму регулятора набуває вигляду:

$$\overline{Hr}_0 = A_1 + A \cdot \overline{X} - B \cdot \overline{n}^2.$$

Використовуючи спеціальну аналітичну методику було обрано значення констант, що входять в це рівняння: $A_1 = 0,217$, $A = 3,17$, $B = 2,41$.

Зовнішній вигляд експериментальної установки електронного регулятора з актуатором і приєднанням до нього ПНВТ наведено на рис. 8. Система змонтована на безмоторному випробувальному стенді паливної апаратури K1921M, що дозволяє робити налаштування і зняття статичних характеристик ПНВТ дизеля.

Крім того, в алгоритм контролера введені рівняння, за якими здійснюється робота граничного регулятора, регулятора холостого ходу, а також позитивного і негативного коректорів. Їх параметри погоджені з параметрами тракторного дизеля потужністю 100 кВт, на який передбачається інсталяція даної системи керування. Це стосується забезпечення необхідного коефіцієнта пристосованості (забезпечується позитивним коректором), обмеження димлення (негативний коректор), мінімальних і максимальних обертів холостого ходу. Тому в області граничних циклових подач характеристики, що отримані з використанням електронного регулятора, дещо відрізняються від відповідних налаштувань механічного регулятора.

Експериментально отримані статичні регуляторні характеристики системи з використанням електронного регулятора наведені на рис. 9. Порівняння даних на рис. 7 і 9 показує, що розроблена авторами система електронного регулювання може забезпечити ідентичні зі штатним механічним регулятором статичні характеристики двигуна.

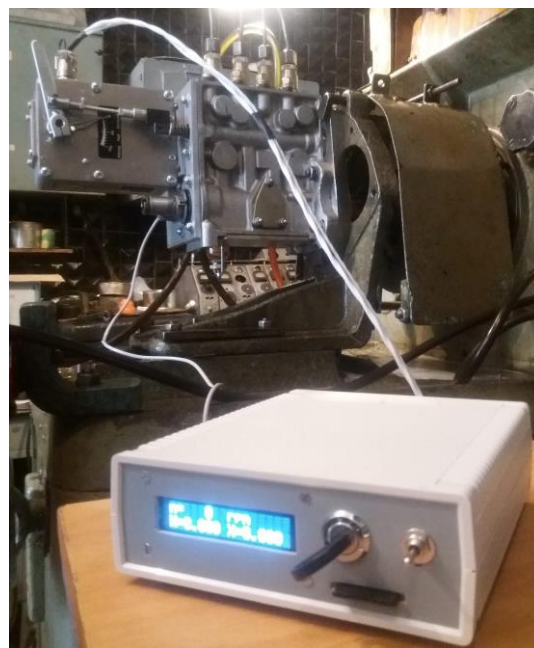


Рис. 8. Експериментальна установка на безмоторному випробувальному стенді

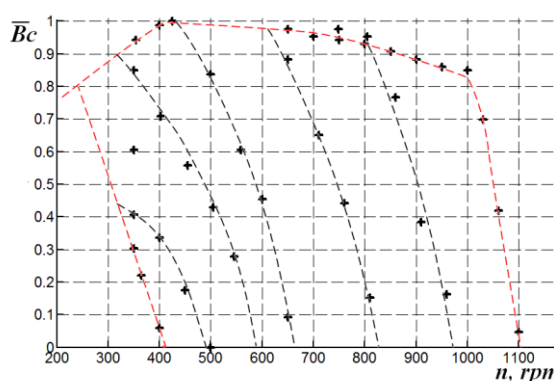


Рис. 9. Статичні регуляторні характеристики ПНВТ BOSCH PES 4P з всережимним електронним регулятором (аналогічним марки RQV)

Використовуючи гнучкість настройки алгоритму електронного регулятора, можна досить просто цей же пристрій переналаштувати як дворегіжний регулятор. Наприклад, при використанні рівняння:

$$\overline{Hr}_0 = A_1 + A \cdot \overline{X} - B \cdot \overline{n}$$

з коефіцієнтами $A_1 = 0,365$, $A = 0,668$, $B = 0,0776$ статичні регуляторні характеристики отримують вид, що наведений на рис. 10 (експериментальні дані, отримані авторами аналогічно попереднім). Таке налаштування практично збігається з роботою механічного регулятора марки RQ фірми BOSCH [1, стор. 135].

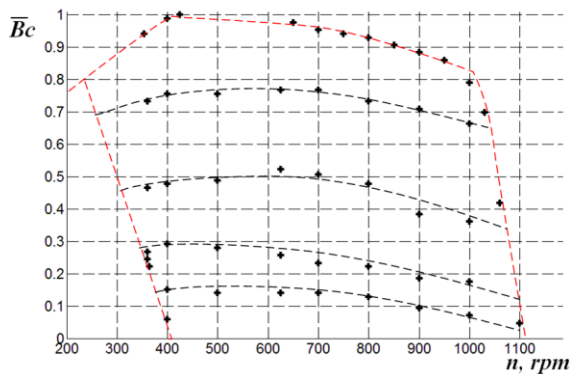


Рис. 10. Статичні регуляторні характеристики ПНБТ BOSCH PES 4P з дворежимним електронним регулятором (аналогічним марки RQ)

Висновки

1. Запропоновано алгоритмічна структурна схема та алгоритм електронного регулятора дизеля, які базуються на аналогії з роботою механічного пружинно-важільного регулятора прямої дії.
2. Розроблено алгоритм роботи підсистеми керування позиціонуванням сервоактуатором фірми HEINZMANN, який побудований на паралельній роботі позиційного і пропорційно-диференціально-ізодромного регуляторів.
3. Проведені безмоторні дослідження паливного насоса високого тиску марки BOSCH PES 4P 100A, обладнаного електричним сервоактуатором HEINZMANN, показали, що розроблена авторами система електронного регулювання працездатна та може забезпечити ідентичні зі штатним механічним регулятором регуляторні характеристики двигуна.
4. Показано, що розроблений алгоритм електронного регулятора частоти обертання дизеля дозволяє не тільки повторити характеристики механічного регулятора, але і створити будь-які необхідні регуляторні характеристики двигуна, включаючи можливість універсалізації – об'єднання в одному пристрої двох, трьох і більше регуляторів різного призначення.

Подяка

Автори висловлюють подяку Інституту газу НАН України, а особисто – старшому науковому співробітнику пану В.С. Вербовському, за допомогу у придбанні дослідного обладнання – актуатора HEINZMANN StG 6-02V, завдяки чому стало можливим виконання цієї роботи.

Список літератури:

1. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. — М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. — 480 с.: ил. 2. Марков В.А., Шатров В.И. Системы автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок и тен-

- денции их совершенствования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. №5. С. 96-116. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-96-116. 3. Yushkov E.A. Modeling of operation modes of ship power plant of combined propulsion complex with control system based on electronic controllers. Electrical engineering & electromechanics, 2016, №6, P. 39-44. 4. Фурман В.В. Система электронного управления топливоподачей дизеля // Бюллетень результатов научных исследований // Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург) eISSN: 2223-9987 № 4 (13) , 2014, С. 39-45. 5. Богаевский А.Б. Микропроцессорная система управления частотой вращения и мощностью дизель-генераторной установки. / А.Б. Богаевский, А.В. Басов, О.П. Смирнов // Вестник ХГАДТУ, Харьков. - 2001. - вып. 15-16. - С. 153-156. 6. Lopez, Jose & Espinosa Oviedo, Jairo & Agudelo, John. (2011). LQR Control for Speed and Torque of Internal Combustion Engines. 2230-2235. 10.3182/20110828-6-IT-1002.02176. 7. Payo I., Sánchez L., Caño E., Armas O. Control Applied to a Reciprocating Internal Combustion Engine Test Bench under Transient Operation: Impact on Engine Performance and Pollutant Emissions. Energies 2017, 10, 1690. 8. Lu Y., Zhao C., Zuo Z., Zhang F., Zhang S. Research on the Common Rail Pressure Overshoot of Opposed-Piston Two-Stroke Diesel Engines. Energies 2017, 10, 571. 9. Simani S., Bonfè M. Fuzzy Modelling and Control of the Air System of a Diesel Engine, Advances in Fuzzy Systems, vol. 2009, Article ID 450259, 14 pages, 2009. 10. Кусяк В. А. Исследование динамики дизельного двигателя при электронном управлении моторным тормозом / В. А. Кусяк // Изобретатель. 2014. №9. С. 45-48. 11. Dong T., Zhang F., Liu B., An X. Model-Based State Feedback Controller Design for a Turbocharged Diesel Engine with an EGR System. Energies 2015, 8, 5018-5039. 12. Hsun-Heng T., Tseng C.-Y. Detecting Solenoid Valve Deterioration in In-Use Electronic Diesel Fuel Injection Control Systems. Sensors 2010, 10, 7157-7169. 13. Кусяк В.А. Алгоритм электронного управления дизельным двигателем стандарта euro-2 / В.А. Кусяк // Изобретатель: ISSN 2218-743X - 2014. - № 07-08(2014). С. 33-41. 14. Баханович А. Г. Электронное управление топливоподачей дизельного двигателя на основе программного ПИД-регулирования / А. Г. Баханович, В. А. Кусяк, А. Н. Гурин, Ле Ван Нгуа // Наука и техника. 2017. Т. 16, №1. С. 28-37. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-28-37. 15. Кухаренко Г. М. Организация топливоподдачи на режиме пуска в аккумуляторных системах дизелей с электронным управлением / Г. М. Кухаренко, А. Н. Марчук // Вестник Белорусского национального технического университета : научно-технический журнал. — 2009. — №5. — С. 59-66. 16. Кухаренко Г. М. Метод определения параметров топливоподдачи в дизелях на режиме пуска / Г. М. Кухаренко, А. Н. Марчук // Вестник Белорусского национального технического университета : научно-технический журнал. — 2011. — №1. — С. 40-47. 17. Головчук А.Ф. Универсальный электронный регулятор для тракторного дизеля / А.Ф. Головчук, Ю.Ш. Гарбіель // Двигатели внутреннего сгорания. — 2014. — №1. — С. 31-34. 18. Прохоренко А.А. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания (навальный посібник) // Харків: «Підручник НТУ «ХПІ», 2014. — 102 с. 19. Prokhorenko A., Samoilenko D., Orlinski P., Bednarski M., Kravchenko S., Karyagin I. Subsystem of positioning the actuator for an electronic diesel control system, Journal of Machine Construction and Maintenance, vol. 1(108), 103-109, 2018. ISSN 1232-9312.

20. Прохоренко А.О. Розробка універсального електронного регулятора частоти обертання колінчастого валу дизеля / А.О. Прохоренко С.С. Кравченко, І.М. Карягін, Є.Г. Вовк, П.І. Думенко // Двигуни внутрішнього згоряння – 2017. – № 2. – С. 35-39. 21. Heinzmann. Actuators – [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.heinzmann.com/en/engine-and-turbine-management/actuator/electric>. 22. Прохоренко А.О. Наукові принципи розробки систем керування дизелів з електрогідравлічною паливною апаратурою: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.05.03 / Прохоренко Андрій Олексійович; НТУ „ХПІ”. – Харків, 2013. – 26 с. 23. Энциклопедия АСУ ТП. ПИД-регуляторы. Расчет параметров – [електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.bookasutp.ru/Chapter5_5.aspx#ParametersChoose.

Bibliography (transliterated):

1. Averkiev V. (2004), Control systems for diesel engines. Translation from German. The first Russian edition [Sistemy upravleniya dizel'nymi dvigatel'nyami. Perevod s nemeckogo. Pervoe russkoe izdanie], CJSC "KZHI" Driving ", Moscow, 480 p. 2. Markov V., Shatrov V. (2016), Systems of automatic control and regulation of heat-power installations and tendencies of their perfection [Sistemy avtomaticheskogo upravleniya i regulirovaniya teplojenergeticheskikh ustanovok i tendencii ih sovershenstvovaniya], Bulletin of MSTU named after. N.E. Bauman. Ser. Mechanical engineering, No 5, pp. 96-116. 3. Yushkov E.A. (2016), Modeling of operation modes of ship power plant of combined propulsion complex with control system based on electronic controllers. Electrical engineering & electromechanics, No.6, pp. 39-44. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.6.07. 4. Furman V. (2014), Electronic fuel management system for diesel fuel [Sistema jelektronnogo upravleniya toplivopodachej dizel'ja] Bulletin of research results St. Petersburg State University of Communications of Emperor Alexander I (St.Petersburg), No. 4 (13), pp. 39-45. 5. Bogaevsky A., Basov A., Smirnov O. (2001), Microprocessor control system for the speed and power of the diesel generator set [Mikroprocessornaja sistema upravleniya chastotoj vrashhenija i moshhnost'ju dizel'-generatornoj ustanovki], Bulletin HGADTU, Kharkiv, Vol. 15-16, pp. 153-156. 6. Lopez, Jose, Espinosa Oviedo, Jairo, Agudelo, John. (2011), LQR Control for Speed and Torque of Internal Combustion Engines, 10.3182/20110828-6-IT-1002.02176. 7. Payo I., Sánchez L., Caño E., Armas O. (2017) Control Applied to a Reciprocating Internal Combustion Engine Test Bench under Transient Operation: Impact on Engine Performance and Pollutant Emissions. Energies, No.10, 1690. 8. Lu Y., Zhao C., Zuo Z., Zhang F., Zhang S. (2017), Research on the Common Rail Pressure Overshoot of Opposed-Piston Two-Stroke Diesel Engines. Energies, No.10, 571. 9. Simani S., Bonfè M. (2009), Fuzzy Modelling and Control of the Air System of a Diesel Engine, Advances in Fuzzy Systems, vol. 2009, Article ID 450259, 14

pages. DOI:10.1155/2009/450259. 10. Kusiak V. (2014), Investigation of the dynamics of a diesel engine in the electronic control of a motor brake [Issledovanie dinamiki dizel'nogo dvigatelja pri jelektronnom upravlenii motornym tormozom], Inventor, № 9, pp. 45-48. 11. Dong T., Zhang F., Liu B., An X. (2015), Model-Based State Feedback Controller Design for a Turbocharged Diesel Engine with an EGR System. Energies, No.8, pp. 5018-5039. 12. Hsun-Heng T., Tseng C.-Y. (2010), Detecting Solenoid Valve Deterioration in In-Use Electronic Diesel Fuel Injection Control Systems. Sensors, No.10, pp. 7157-7169; DOI:10.3390/s100807157. 13. Kusiak V. (2014), Algorithm of electronic control of the diesel engine of the euro-2 standard [Algoritim jelektronnogo upravleniya dizel'nyim dvigatelem standarta euro-2], Inventor: ISSN 2218-743X., No. 07-08, pp. 33-41. 14. Bakhanovich A., Kusiak V., Gurin A., Le Van Ngia (2017), Electronic control of fuel supply of a diesel engine based on software PID regulation [Jelektronnoe upravlenie toplivopodachej dizel'nogo dvigatelja na osnove programmnoho PID-regulirovaniya], Science and Technology, Vol. 16, No. 1. pp. 28-37. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-28-37. 15. Kukharenek G., Marchuk A. (2009), The organization of fuel supply on start-up in battery systems of diesel engines with electronic control [Organizacija toplivopodachi na rezhime puska v akkumulyatornyh sistemah dizelej s jelektronnym upravleniem], Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal, №5, pp. 59-66. 16. Kukharenek G., Marchuk A. (2011), Method for determining fuel delivery parameters in diesel engines at the start-up mode [Metod opredeleniya parametrov toplivopodachi v dizeljah na rezhime puska], Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal, No. 1. pp. 40-47. 17. Golovchuk A.F., Garbriel' Ju.Sh. (2014), Universal electronic regulator for tractor diesel [Universal'nij jelektronnij reguljator dlja traktornogo dizelja], Internal Combustion Engines, No. 1, pp. 31-34. 18. Prokhorenko A.A. (2014), Automatic regulation vnutrenneho combustion engines (manual) [Avtomaticheskoe regulirovanie dvigatelej vnutrenneho sgoraniya (navchal'nij posibnik)], Kharkiv "Manual NTU" KhPI ", 102 p. 19. Prokhorenko A., Samoilenko D., Orlinski P., Bednarski M., Kravchenko S., Karyagin I. (2018), Subsystem of positioning the actuator for an electronic diesel control system, Journal of Machine Construction and Maintenance, vol. 1(108), pp. 103-109, ISSN 1232-9312. 20. Prokhorenko A.O., Kravchenko S.S., Karyagin I.M., Vovk Ye.G., Dumenko P.I. (2017), Development of universal electronic regulator of the frequency of rotation of a crankshaft of a diesel engine, Internal Combustion Engines, No. 2, pp. 35-39. 21. "Heinzmann. Actuators", available at: <https://www.heinzmann.com/en/engine-and-turbine-management/actuator/electric>. 22. Prokhorenko A.O. (2013), Scientific principles of development of systems of control of diesels with electrohydraulic fuel equipment: Autor's thesis [Naukovi principi rozrobki sistem keruvannja dizeliv z elektrogidravlichnoju palivnoju aparaturuju: avtoref. dis ... doc. tech nauk], Kharkiv, 26 p. 23. "Encyclopaedia of Automated Control Systems. PID regulators. Calculation of parameters is", available at: http://www.bookasutp.ru/Chapter5_5.aspx#ParametersChoose.

Надійшла до редакції 01.06.2018 р.

Прохоренко Андрій Олексійович – докт. техн. наук, проф., професор кафедри двигуни внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна. e-mail: ap.kharkiv@ukr.net

Кравченко Сергій Сергійович – канд. техн. наук, науковий співробітник кафедри двигуни внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: kravc4enkoser@gmail.com.

Самойленко Дмитро Євгенович – доктор інженер, ад'юнкт кафедри двигуни внутрішнього згоряння Варшавського університету технологій, Варшава, Польща, e-mail: samoilenko@simr.pw.edu.pl

Карягін Ігор Миколайович – старший науковий співробітник кафедри двигуни внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: karyagin@gmail.com

Таланін Дмитро Сергійович – аспірант кафедри двигуни внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: dima.kharkiv75@ukr.net

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕГУЛЯТОР ДИЗЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЕРВОАКТУАТОРА

А.А. Прохоренко, С.С. Кравченко, Д.Е. Самойленко, И.Н. Карягин, Д.С. Таланин

Разработан электронный регулятор топливной системы высокого давления для транспортного дизеля, внедрение которого позволит формировать оптимальные характеристики транспортного средства с учетом условий его эксплуатации и согласованности с любыми видами трансмиссии и двигателя. Авторами предложена функциональная схема и алгоритм электронного регулятора дизеля, основанный на аналогии с работой механического пружинно-рычажного регулятора прямого действия. Разработан алгоритм работы подсистемы управления позиционированием исполнительного механизма (серво-актуатором) HEINZMANN, который построен на параллельной работе позиционного и пропорционально-дифференциально-изодромного регуляторов. Проведенные безмоторные исследования топливного насоса высокого давления марки BOSCH PES 4P 100A, оборудованного электрическим серво-актуатором, показали, что разработанная авторами система электронной регулировки может обеспечить идентичные со штатным механическим регулятором, а при простой переналадке – любые необходимые регуляторные характеристики двигателя.

UNIVERSAL CONTROLLER OF DIESEL ON THE BASIS OF ELECTRIC SERVO-ACTUATOR

A.A. Prokhorenko, S.S. Kravchenko, D.E. Samoilenko, I.N. Karyagin, D.S. Talanin

An electronic actuator of a high-pressure fuel system for a transport diesel has been developed, the introduction of the actuator will allow to formulate optimum characteristics of a vehicle taking into account the conditions of its operation and coordination with any types of transmission and engine. The authors proposed a functional scheme and an algorithm for an electronic diesel actuator, based on the analogy with the operation of a mechanical spring-lever governor of direct action. The algorithm of the HEINZMANN actuator positioning control subsystem (servo-actuator) is developed. The algorithm is built on the parallel operation of the positional and proportional-differential-isodromic actuators. The motorless research of the high-pressure fuel pump BOSCH PES 4P 100A, equipped with an electric servo-actuator, showed that the electronic governor system developed by the authors can provide identical with a regular mechanical governor characteristics and could be easily adapted to the any necessary regulatory characteristics of the engine.

УДК 621.43

DOI: 10.20998/0419-8719.2018.1.07

А.А. Лисовал, А.В. Вербовский

СРАВНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ РАЗЛИЧНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ СКОРОСТИ НА АВТОМОБИЛЬНОМ ДИЗЕЛЕ

Цель исследования – сравнение показателей качества регулирования скорости автомобильного дизеля с все-режимным механическим регулятором прямого действия и все-режимным микропроцессорным регулятором непрямого действия на установившихся режимах и в переходных процессах.

Моторные сравнительные исследования проведены на автомобильном дизеле 4ЧН12/14. Объект экспериментальных исследований - автоматическая серийная механическая и разработанные авторами микропроцессорные системы регулирования автомобильного дизеля. Результаты цифровых записей позволяют визуально оценить качество регулировки и настройки регуляторов скорости.

Результаты сравнительного анализа показывают удовлетворительную работу разработанного все-режимного микропроцессорного регулятора на различных установившихся и динамических режимах и подтверждают необходимость настройки ПИД-параметров в зависимости от эксплуатационных режимов работы дизеля. Установлено, что стабильность поддержания частоты вращения разработанным все-режимным микропроцессорным регулятором при различных установившихся скоростных режимах не превышает 5 %. Величины заброса частоты вращения и длительности переходных процессов не хуже, чем при использовании серийного механического регулятора.

Введение

Вопросы разработки, внедрения, настройки и эксплуатации микропроцессорных систем управления и регулирования дизелей остаются актуальными для двигателестроения, так как элементная база, информационные технологии и, соответственно, программное обеспечение для таких систем постоянно совершенствуются. Функции системы автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала дизеля необходимы и для микропроцессорных систем управления.

На кафедре двигателей и теплотехники Наци-

онального транспортного университета (г. Киев) разработаны микропроцессорные двухрежимный и все-режимный регуляторы частоты вращения коленчатого вала (скорости) дизеля. Двухрежимный микропроцессорный регулятор (МР) создан на основе микроконтроллера фирмы Микрочип и пропорционального электромагнита, воздействующего на рейку ТНВД. Этот двухрежимный МР скорости был испытан на автотракторном дизеле 4ЧН12/14, где ранее на ТНВД стоял механический регулятор [1].

Все-режимный МР разработан на основе элек-