

УДК 681.587.72

АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ АСТАТИЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ЕЛЕКТРОННО-КЕРОВАНОГО ПНВТ ДИЗЕЛЯ

*Ю. Габрієль, інж., Т. Щур, к.т.н, В. Паславський, магістр,
Ю.Ямнюк, магістр.*

Львівський національний аграрний університет

Ключові слова: дизель, електронний регулятор, астатичний регулятор, ПД регулятор.

Розглянуто астатичний режим регулювання дизеля, обладнаного електронно-керованим ПНВТ. Запропоновано використання ПД-регулятора для астатичного режиму, який повинен покращити стабільність системи порівняно із релейним законом регулювання. Проведено симуляцію навантаження двигуна (зміну його частоти обертання) та відтворено реакцію системи (положення крокового двигуна) при різних коефіцієнтах ПД-регулятора.

Постановка проблеми. У процесі експлуатації двигунів важливим елементом є система регулювання потужності та обертів двигуна. Така система має свої переваги та недоліки. До переваг можна віднести низьку собівартість, простоту конструкції та експлуатації, високу надійність. Найвагомішими недоліками є – невідповідність екологічним нормам, робота лише на все режимному регулюванні, паливна економічність, відсутність корекції паливоподачі відносно температури двигуна... Для задоволення усіх цих вимог необхідно використовувати електронні системи паливоподачі. Однак сучасні системи паливоподачі є доволі складними та чутливими до якості палива і значно дорожчими за класичні механічні системи. Тому розробка електронного регулювання дизельних двигунів на базі стандартного паливного насоса є надзвичайно актуальною.

Постановка завдання. Мета досліджень – введення у електронну систему регулювання ПНВТ дизеля закону ПД регулювання та підбір відповідних коефіцієнтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Отримані раніше результати досліджень описують роботу дизельних двигунів виробництва країн СНД, що керуються звичайною системою паливоподачі, основою якої є всережимний регулятор [2].

Виклад основного матеріалу Електронний регулятор базується на основі крокового двигуна, давачів та блоку управління, що обробляє вхідні сигнали та керує положенням виконавчого механізму, а, отже, цикловою подачею паливного насосу високого тиску(ПНВТ). Використання крокового двигуна у конструкції дозволяє відмовитись від присутності давача положення рейки. Проте таке рішення потребує наявності системи зворотнього зв'язку та аварійного захисту в разі пропуску кроків виконавчого механізму. Для зворотнього зв'язку використовується широкосмуговий лямбда-зонд Bosch LSU 4.9, який спеціально розроблений для дизелів. Для аварійного захисту використовується електромагнітний клапан відсічки палива[1].

Цей електронний регулятор не потребує серйозної зміни конструкції паливного насосу, є "гнучким" у налаштуванні та пристосованості до різних типів ПНВТ. Для початкових налаштувань електронного регулятора під конкретний тип двигуна необхідно спершу провести безмоторні дослідження серійного регулятора та на основі отриманих результатів відповідно запрограмувати експериментальний регулятор.

Для проведення безмоторних досліджень серійного ПНВТ УТН-5 та експериментального регуляторів використовувався стенд Motorpal NC-104. Графік зовнішньої та часткових швидкісних характеристик серійного регулятора відображено на рис.1.

Оскільки відомо, що циклова подача палива залежить не лише від положення рейки, а й від частоти обертання[2], слід також отримати таку залежність. Вона досліджувалась на експериментальному регуляторі, оскільки програмно це легко реалізовується, а відлік положення рейки пропорційний положенню крокового двигуна. Така залежність відтворена на рис.2. Положення рейки ПНВТ вказано у кроках виконавчого механізму, оскільки хід штока КД становить $10,4 \cdot 10^{-3}$ м при 255 кроках (при повнокроковому режимі керування КД), точність позиціонування складає $54,9 \cdot 10^{-6}$ м, швидкість переміщення штока складає 333 кроки/с, при чому розвивається зусилля 6 Н[3], що втричі перевищує зусилля для переміщення рейки дозаторів.

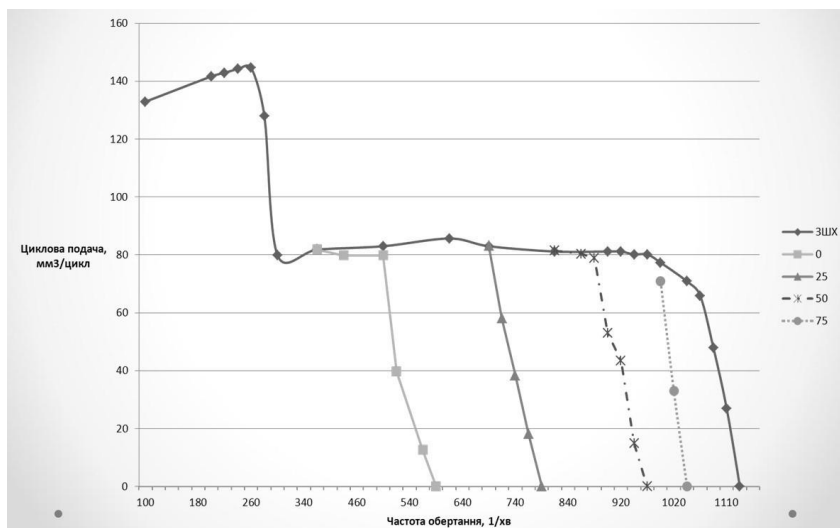


Рис.1. Графік зовнішньої та часткових швидкісних характеристик серійного регулятора.

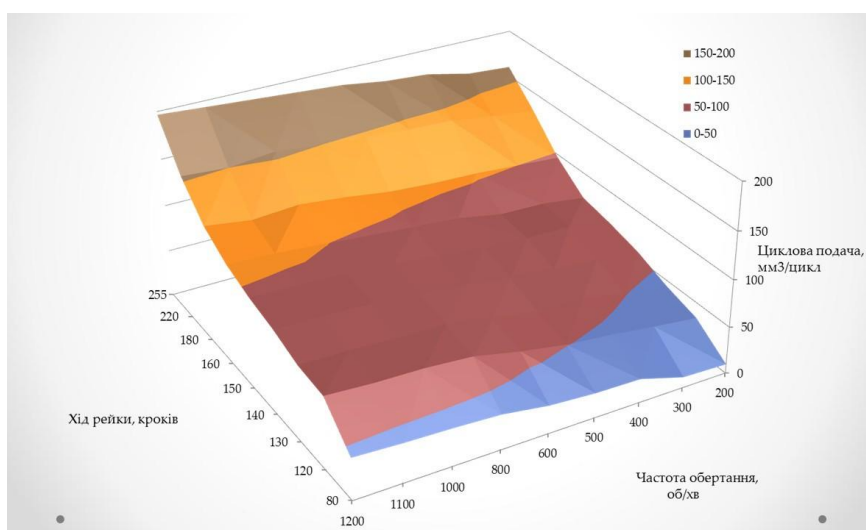


Рис.2. Характеристика подачі ПНВТ за ходом рейки.

Маючи дані серійного всережимного регулятора та залежність подачі палива від ходу рейки, можна відтворити цей режим на експериментальному регуляторі. У електронний блок управління (ЕБУ) вноситься залежність положення рейки від частоти у реперних точках (кількість точок можна змінювати). Проміжні значення положення рейки експериментального регулятора вираховуються методом лінійної інтерполяції.

Слід також розглянути астатичний режим регулювання. Завдяки такому типу регулювання достатньо точно підтримується частота обертання. Астатичне регулювання використовується переважно на електростанціях. Для нашого регулятора також доцільно було дослідити такий тип регулювання.

Зважаючи на особливості роботи астатичного регулювання, для стабілізації процесу регулювання паливоподачі, необхідно ввести у систему пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор.

ПІД регулятор – пристрій в керуючому контурі зі зворотним зв'язком. Використовується в системах автоматичного управління для формування керуючого сигналу з метою отримання необхідних точності і якості перехідного процесу. ПІД регулятор формує керуючий сигнал, який є сумою трьох доданків, перший з яких пропорційний різниці вхідного сигналу і сигналу зворотного зв'язку (сигнал неузгодженості), другий – інтеграл сигналу неузгодженості, третій – похідна сигналу неузгодженості. Завдяки такій реалізації ми відмовляємось від релейного закону регулювання астатичного режиму(щоб не провокувати часту та різку зміну положення рейки), а використовуємо ПІД регулятор, у якому максимальні значення обмежуються ЗШХ, а мінімальне значення становить 0.

Пропорційна складова виробляє вихідний сигнал, що протидіє відхиленню регульованої величини від заданого значення, спостережуваному в даний момент часу. Чим більший сигнал, тим більше відхилення. Якщо вхідний сигнал дорівнює заданому значенню, то вихідний дорівнює нулю. Однак при використанні тільки пропорційного регулятора значення регульованої величини ніколи не стабілізується на заданому значенні. Існує так звана статична помилка, яка дорівнює такому відхиленню регульованої величини, яке забезпечує вихідний сигнал, що стабілізує вихідну величину саме на цьому значенні.

Інтегральна складова пропорційна інтегралу від відхилення регульованої величини. Її використовують для усунення статичної помилки. Вона дозволяє регулятору з часом врахувати статичну помилку. Якщо система не відчуває зовнішніх збурень, то через деякий час регульована величина стабілізується на заданому значенні, сигнал пропорційною складовою дорівнюватиме нулю, а вихідний сигнал буде повністю забезпечувати інтегральна складова. Тим не менш, інтегральна складова також може призводити до автоколивання.

Диференціальна складова пропорційна темпу зміни відхилення регульованої величини і призначена для протидії відхилень від цільового значення, які прогноуються в майбутньому. Відхилення можуть бути

викликані зовнішніми збуреннями або запізненням впливу регулятора на систему.

Отже, формула ПД-регулятора:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}; \quad (1)$$

де $u(t)$ – наша функція;

P – пропорційна складова;

I – інтегральна складова;

D – диференціальна складова;

$e(t)$ – поточна помилка;

K_p – пропорційний коефіцієнт;

K_i – інтегральний коефіцієнт;

K_d – диференціальний коефіцієнт.

У програмній реалізації, переходять до дискретної реалізації. Формула ПД регулятора набирає вигляду:

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t) \quad (2)$$

Пропорційна складова $P(t) = K_p \cdot e(t)$ складається із добутку поточної помилки та пропорційного коефіцієнта.

Інтегральна складова $I(t) = I(t-1) + K_i \cdot e(t)$ складається з суми інтеграла від попередньої помилки та пропорційної складової.

Диференціальна складова $D(t) = K_d \{e(t) - e(t-1)\}$ складається з різниці поточної та попередньої помилки, помноженої на диференціальний коефіцієнт.

Відповідно сума цих складових дасть нам корегуючий результат. У нашому випадку доцільніше використовувати рекурентну реалізацію, що виглядатиме наступним чином:

$$\begin{aligned} u(t) &= u(t-1) + P(t) + I(t) + D(t); \\ P(t) &= K_p \{e(t) - e(t-1)\}; \\ I(t) &= I \cdot e(t); \\ D(t) &= K_d \{e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)\}; \end{aligned} \quad (3)$$

Обчислюємо суму трьох складових. Кожна з них визначається своїми коефіцієнтами. Якщо цей коефіцієнт нульовий, то складова при обчисленні не враховується. З цією формулою працюватимемо далі, її і реалізуватимемо.

Коефіцієнти тут – дробові числа. У мові програмування C ці коефіцієнти описані як *double*. Особливість системи ПІД-регулювання полягає саме у підборі цих коефіцієнтів.

Для цього було написано програму у середовищі Excel та просимульовано роботу ПІД регулятора з підбором найоптимальніших коефіцієнтів. Необхідно підібрати такі значення коефіцієнтів, які б дозволили водночас швидко стабілізувати положення рейки задля підтримки необхідних обертів і не провокувати ”розгойдування” системи через надмірну чутливість. Результат зображено на рисунку 3.

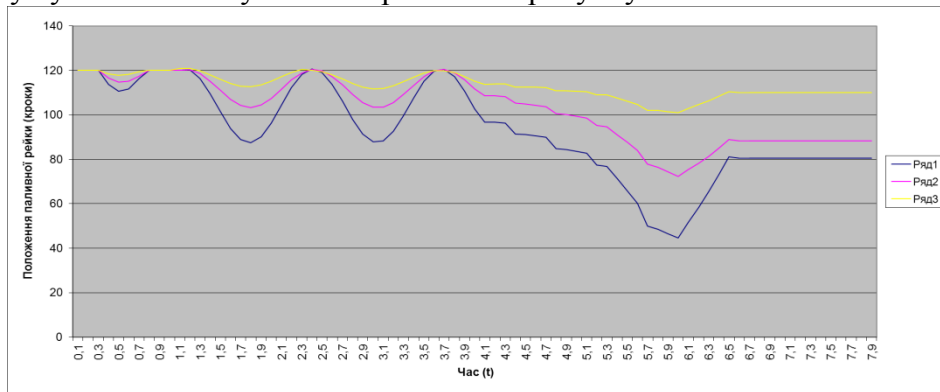


Рис.3. Графік залежності зміни оборотів колінчатого вала та чутливості ПІД регулятора з різними коефіцієнтами при очікуваних обертах 1000 об/хв.

Ряд1 – $K_p=4$; $K_i=0,3$; $K_d=0,2$. *Ряд2* – $K_p=2$; $K_i=0,3$; $K_d=0,2$.

Ряд3 – $K_p=1$; $K_i=0,2$; $K_d=0,1$.

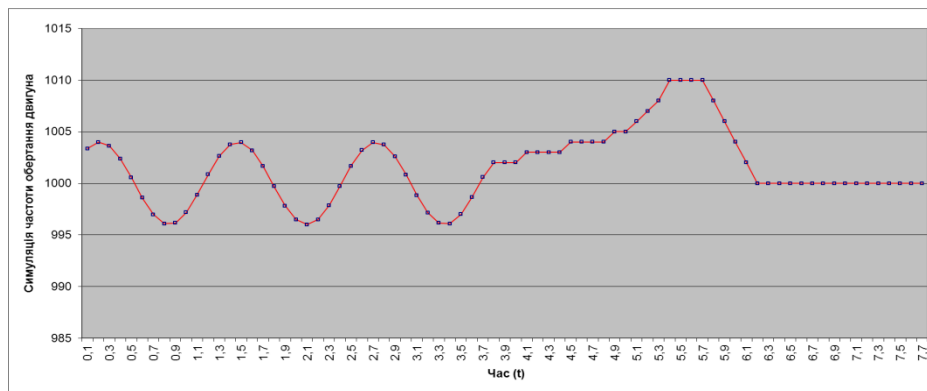


Рис.4. Графік симуляції роботи двигуна.

Провівши низку досліджень можу сказати що чутливість регулятора найбільш залежна від пропорційного коефіцієнта. Вплив інтегрального та диференціального коефіцієнтів незначний, проте достатньо сильно

впливають на стійкість системи не даючи їй входити в автоколивальний режим.

Беручи до уваги інертність роботи дизельного двигуна, висока чутливість системи є недоцільною. Крок обчислень по часу становить 50 мс. Тому використання значення коефіцієнтів ряду², рис.3 є найбільш доцільним, оскільки коефіцієнти ряду¹ та ряду³ є занадто чутливими та повільними у реагуванні системи відповідно.

Аналізуючи отримані результати можна ствердити:

- збільшення пропорційного коефіцієнта підвищує швидкодію і знижує запас стійкості;
- із зменшенням інтегральної складової помилка регулювання з часом зменшується швидше;
- зменшення постійної інтегрування зменшує запас стійкості;
- збільшення диференціальної складової збільшує запас стійкості та швидкодію.

При порівнянні релейного та ПІД закону регулювання на безмоторних дослідженнях візуально спостерігається зменшення частоти посмикування рейки приводу ПНВТ, що повинно покращити параметри системи в цілому.

Висновки. Описаний закон ПІД регулювання із заданими параметрами підвищить плавність ходу регулятора та покращить його стабільність. Для детальнішого підбору коефіцієнтів та працездатності електронного регулятора при астатичному регулюванні необхідно провести моторні дослідження цього типу регулювання та провести порівняння стосовно релейного закону регулювання.

Бібліографічний список

1. Головчук А. Ф., Габріель Ю. І. Електронна система паливоподачі тракторного дизеля/ А. Ф. Головчук, Ю.І. Габріель. - Вісник НТУ, 2012.
2. Головчук А. Ф. Улучшение топливной экономичности и снижение дымности тракторных дизелей путем совершенствования системы автоматического регулирования: монография/ А. Ф. Головчук. - Х.: ХНАДУ, 2001. - 472с.
3. Артемов Д. РХХ, принцип работы, диагностика и тестирование/ Денис Артемов [Електронний ресурс].
4. Режим доступу: <http://www.agson.net/forum/index.php?act=-Attach&type=post&id=35>
5. Поляков К. Ю. Теория автоматического управления для чайников/ К. Ю. Поляков. - Санкт-Петербург, 2008. - 80с.

Gabriel Y., Shchur T., Paslavskyy V., Yamnjuk Y. Astatic control algorithm electronically-controlled fuel injection pump assembly of diesel engine.

The astatic mode of adjusting of diesel, equipped electronic-guided HPFP is considered. The use of pid-controller for the astatic mode, which must improve stability of the system by comparison to the relay law of adjusting, is offered. The simulation of loading of engine (changing its speed) is conducted and the reaction of the system (position of stepper motor) is recreated at the different coefficients of pid-controller.

Key words: diesel, electronic controller, astatic controller, controller.

Габриель Ю., Щур Т., Паславский В., Ямнюк Ю. Алгоритм управления астатического регулятора электронно-управляемого ТНВД

Рассмотрен астатический режим регулирования дизеля, оборудованного электронно-управляемым ТНВД. Предложено использование ПИД-регулятора для астатического режима, который должен улучшить стабильность системы в сравнении с релейным законом регулирования. Проведена симуляция нагрузки двигателя (изменение его частоты вращения) и воссоздана реакция системы (положение шагового двигателя) при разных коэффициентах ПИД-регулятора.

Ключевые слова: дизель, электронный регулятор, астатический регулятор, ПИД регулятор.