



ЛІТЕРАТУРА

1. Угода про прийняття єдиних технічних приписів для колісних транспортних засобів, предметів обладнання та частин, які можуть бути встановлені та/або використані на колісних транспортних засобах, і про умови взаємного визнання офіційних затверджень, виданих на основі цих приписів у 1958 році з поправками 1995 року. – Режим доступу: <https://www.unecse.org/trans/main/wp29/wp29regs.html/>.
2. Сводная резолюция о конструкции транспортных средств (СР.3), пересмотр 6. – Режим доступу: <https://www.unecse.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29resolutions/ECE-TRANS-WP.29-78r6r.pdf/>.
3. Про єдині вимоги до конструкції та технічного стану колісних транспортних засобів, що експлуатуються: Постанова Кабінету Міністрів України від 22 грудня 2010 року № 1166.
4. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. – Режим доступу: http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/984_011/.
5. Регламент європейського Парламенту та Ради (ЄС) № 168/2013 від 15 січня 2013 року про затвердження та нагляд за ринком дво- та триколісних транспортних засобів та квадроциклів. – Режим доступу: http://eurlex.europa.eu/search.html?DTN=0168&DTA=2013&qid=1517900423431&DB_TYPE_OF_ACT=regulation&CASE_LAW_SUMMARY=false&DTS_DOM=ALL&excConsLeg=true&typeOfActStatus=REGULATION&type=advanced&SUBDOM_INIT=ALL_ALL&DTS_SUBDOM=ALL_ALL/.
6. Делегований Регламент Комісії (ЄС) № 134/2014 від 16 грудня 2013 року про доповнення Регламенту Європейського Парламенту і Ради (ЄС) № 168/2013 стосовно вимог з екологічної ефективності та ефективності засобів урухомлення і внесення поправок до його Додатка V. – Режим доступу: <http://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX:32014R0134/>.
7. Угода про введення Глобальних технічних правил для колісних транспортних засобів, предметів обладнання та частин, які можуть бути встановлені та (або) використані на колісних транспортних засобах. – Режим доступу: <https://www.unecse.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29glob.html/>.
8. Директива 95/1/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 02 лютого 1995 року стосовно максимальної конструктивної швидкості, максимального крутного моменту і максимальної ефективної потужності двигуна дво- або триколісних транспортних засобів.



УДК 621.436.12

- © С. В. Ковбасенко, канд. техн. наук, доцент;
 © А. В. Голик, аспірант (НТУ);
 © В. Г. Петренко, канд. техн. наук, старший наук. співробітник (КПІ ім. Ігоря Сікорського);
 © С. Ю. Гутаревич, канд. техн. наук, доцент, старший наук. співробітник (ДП “ДержавтотрансНДІпроект”)

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПІД-ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА ГАЗОДИЗЕЛЬНОЇ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ

Анотація. Проаналізовано вплив складових ПІД-регулятора газодизельної мікропроцесорної системи живлення на час впорскування газу електромагнітними форсунками в умовах експлуатації.

Ключові слова: дизель, газодизель, стиснений природний газ, ПІД-регулятор.

Аннотация. Проанализировано влияние составляющих ПИД-регулятора газодизельной микропроцессорной системы питания на время впрыска газа электромагнитными форсунками в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: дизель, газодизель, сжатый природный газ, ПИД-регулятор.

Annotation. The article analyzes the influence of the components of the PID regulator of the diesel gas microprocessor system on the gas injection time by injectors under exploitation conditions.

Key words: diesel engine, gas diesel engine, CNG, PID regulator.

ВСТУП

Відомо, що запасів нафти з кожним роком стає все менше і однією з альтернатив традиційному моторному паливу, що виробляється з сирової нафти, є природний газ [1]. Існує два шляхи переобладнання дизеля для роботи на стисненому природному газі. Перший – перехід від дизеля до газового двигуна за

циклом Отто, тобто двигуна з іскровим запалюванням. Другий – газодизель. Це по суті двопаливний двигун, де основна потужність регулюється подачею газового палива, а дизельне паливо (далі – ДП) використовується в якості запальної дози. Частка запальної дози ДП при роботі дизеля за газодизельним циклом залежить від характеристик паливного насосу високого тиску (далі – ПНВТ) та дизельних форсунок. При

використанні штатних ПНВТ та форсунок запальну дозу ДП можна зменшити до 15 % [2]. Однак, для отримання такого результату необхідне використання якісної і точної паливної апаратури із застосуванням мікропроцесорної техніки [3]. Тому виникла необхідність в проведенні досліджень щодо налаштування мікропроцесорної техніки, зокрема, пропорційно-інтегрально-диференційного (далі – ПІД) регулятора при роботі дизеля за газодизельним циклом [4,5].

Регулятори бувають пропорційними (далі – П-регулятор), пропорційно-інтегральними (далі – ПІ), пропорційно-диференційними (далі – ПД) та ПІД-регулятори. ПІД-регулятор – пристрій в керуючому контурі зі зворотним зв'язком, який використовується в системах автоматичного управління для формування керуючого сигналу з метою отримання необхідної точності та якості перехідного процесу. ПІД-регулятор формує керуючий сигнал, який є сумою трьох складових, перша з яких пропорційна різниці вхідного сигналу і сигналу зворотного зв'язку (сигнал неузгодженості), друга – інтегралу сигналу неузгодженості, третя – похідній сигналу неузгодженості.

На **рис. 1** показана схема роботи ПІД-регулятора за його складовими. Пропорційна складова виробляє вихідний сигнал, який протидіє відхиленню регульованої величини від заданого значення, що спостерігається у визначений момент часу. Зі збільшенням відхилення пропорційна складова зростає. Загалом пропорційна складова підсилює вихідний сигнал на задану константу (значення пропорційної складової).

Інтегральна складова пропорційна інтегралу за часом від сигналу неузгодженості. Її використовують для усунення статичної помилки. Однак лише введення інтегрального регулятора зазвичай призводить до нестабільності системи. Тому в системах, найчастіше, використовуються П, ПІ, ПД або ПІД-регулятори.

Диференційна складова залежить від швидкості 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.

Тому значення регульовальних параметрів є дуже важливими, оскільки від налаштувань ПІД-регулятора залежить точність роботи мікропроцесорної системи живлення та стабільність роботи дизеля, що працює за газодизельним циклом.

Для реалізації всережимного регулятора для газового палива залежно від режиму роботи дизеля необхідні дослідження впливу зміни регульовальних параметрів ПІД-регулятора на час впорскування газу електромагнітними форсунками дизеля, що працює за газодизельним циклом.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Важливим питанням є забезпечення належної роботи двигуна за газодизельним циклом залежно від режимів його роботи, а також налаштування ПІД-регулятора [6, 7, 8]. Для вирішення поставленого завдання було розроблено мікропроцесорну систему живлення (далі – МПСЖ), принципова схема якої показана на **рис. 2**. Ця система перевіряє працездатність усіх датчиків та форсунок, а також узгоджує роботу системи залежно від режиму роботи дизеля та налаштувань ПІД-регулятора.

Система складається з блоку газових форсунок 2, які здійснюють індивідуальне впорскування газового палива до кожного циліндра, комплекту датчиків 24-28 (датчик положення важеля подачі палива, датчик колінчастого валу, датчик фази газорозподільного валу, датчик тиску наддуву та датчик температури відпрацьованих газів), механізму зміни запальної дози 20 (далі – МЗЗД), який встановлюється на штатному

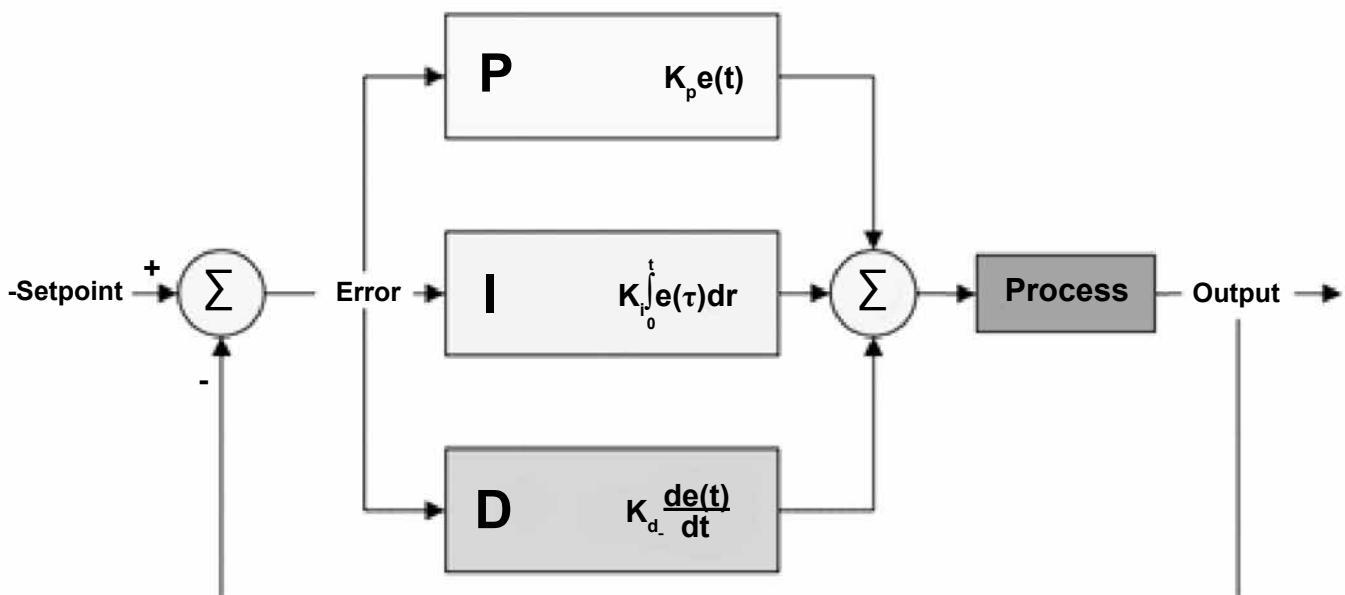


Рис. 1. Схема роботи ПІД-регулятора

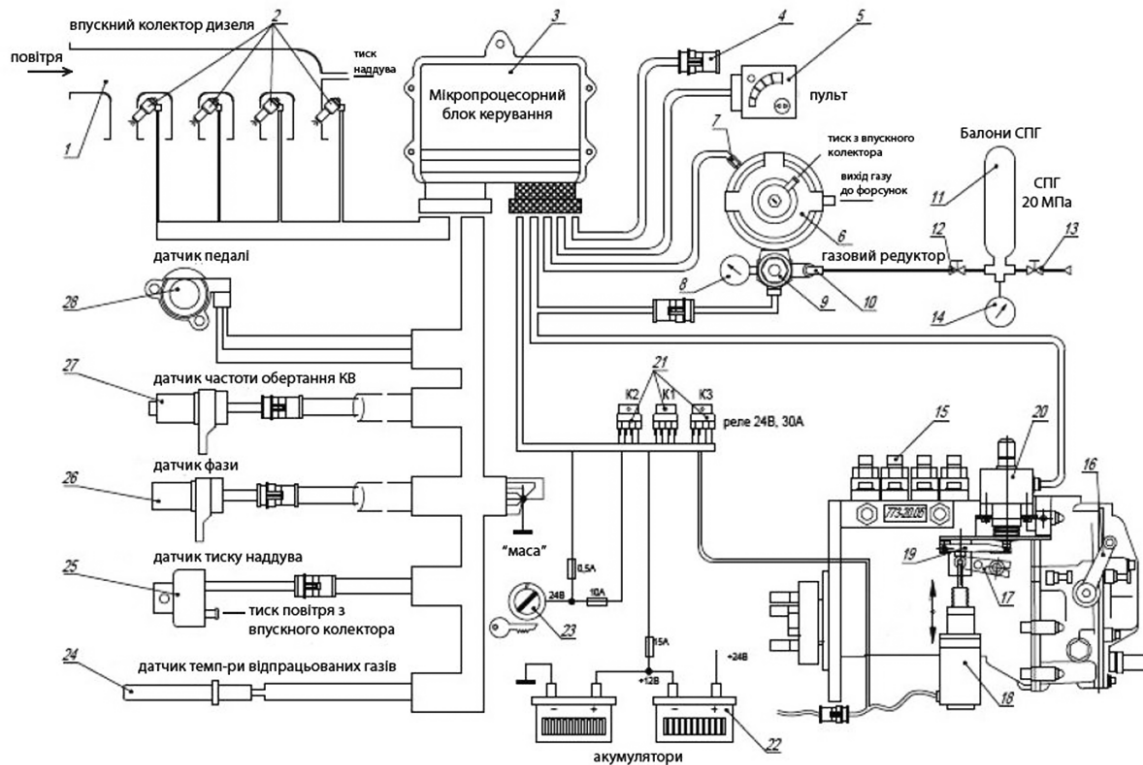


Рис. 2. Принципова схема газодизельної МПСЖ: 1 – впускний колектор двигуна; 2 – форсунки газові електромагнітні; 3 – блок керування мікропроцесорний; 4 – роз’єм діагностичний; 5 – пульт; 6 – редуктор газовий; 7 – датчик температури корпусу редуктора; 8 – манометр редуктора; 9 – електромагнітний клапан; 10 – штуцер підведення газу до редуктора; 11 – балони для СПГ; 12 – вентиль витратний; 13 – вентиль наповнювальний; 14 – манометр високого тиску; 15 – ПНВТ; 16 – важіль управління швидкісним режимом двигуна; 17 – важіль зупинки двигуна; 18 – електромагніт зупинки двигуна; 19 – МЗЗД; 20 – роковий двигун МЗЗД; 21 – реле; 22 – кумуляторні батареї; 23 – вимикач приладів і стартера; 4 – датчик температури відпрацьованих газів; 25 – датчик тиску наддува; 26 – датчик фази; 27 – датчик частоти обертання колінчастого валу двигуна; 28 – датчик педалі керування подачею палива

ПНВТ та газобалонного обладнання. Керування системою живлення здійснює мікропроцесорний блок 3 із відповідним програмним забезпеченням.

Для перевірки роботи МПСЖ та регулювання часу впорскування газу електромагнітними фор-

сунками було розроблено безмоторний стенд СБВ-ГД. Це по суті напівнатурна робота газодизельної системи живлення, оскільки містить імітатор роботи двигуна та імітатор відмов роботи складових системи. Решта складових, зокрема комплект

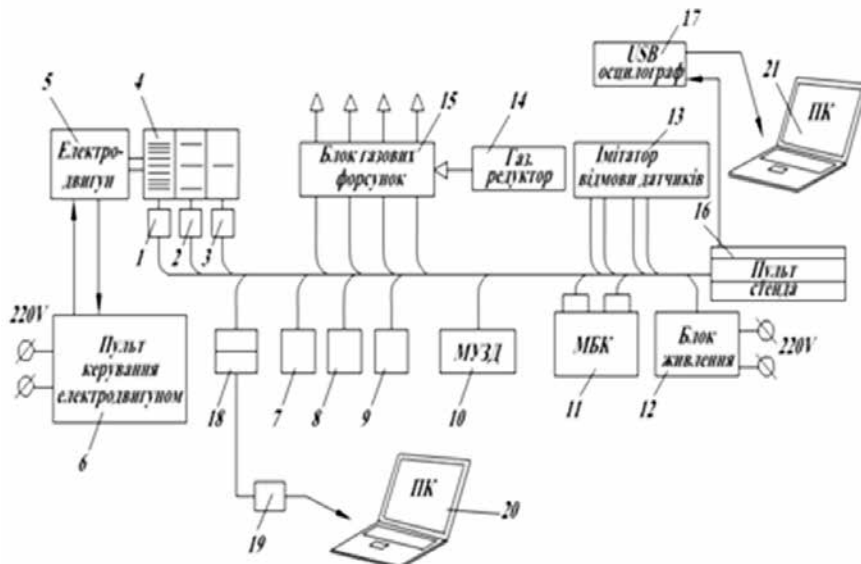


Рис. 3. Принципова схема безмоторного стенда СБВ-ГД для дослідження МПСЖ: 1...3, 7...9 – датчики системи живлення МПСЖ; 4 – імітатор обертання колінчастого і розподільного валів; 5 – електродвигун приводу імітатора 4; 6 – пульт керування приводом 5; 10 – МЗЗД; 11 – мікропроцесорний блок керування МПСЖ; 12 – блок живлення стенда 12-24В; 13 – імітатор відмови датчиків МПСЖ; 14 – редуктор газовий; 15 – блок газових форсунок; 16 – пульт керування стендом; 17 – реєструючий USB осцилограф; 18 – діагностичний роз’єм системи; 19 – кабель інтерфейсу налаштування МПСЖ; 20 – комп’ютер налаштування МПСЖ; 21 – комп’ютер реєстрації робочих параметрів МПСЖ

датчиків, МЗЗД тощо, ті ж самі, що встановлюються на дослідний автомобіль. Схему стенда показано на **рис. 3**.

Оскільки стенд напівнатурний і має ті ж можливості, що і встановлена на дослідний автомобіль МПСЖ, то завдяки йому здійснено перевірку роботи газових електромагнітних форсунок за допомогою регулювання ПІД-регулятора. На першому етапі було досліджено ПІД-регулятор частоти обертання колінчастого валу (далі – КВ), який мав один універсальний коефіцієнт K_{Gain} , за допомогою якого здійснювався розрахунок часу відкриття $T\phi$ (впорскування газу) газових електромагнітних форсунок (**рис. 4**). Але такий регулятор має суттєвий недолік: нахил характеристики $T\phi=f(n)$ різко змінюється від інтенсивності зміни частоти обертання КВ (**рис. 5**). Значення показника регулювання з універсальним коефіцієнтом K_{Gain} визначається за формулою:

$$PID_k = PID_{k-1} - \left(\frac{6 * \Delta n_k}{5 - \Delta n_{k-1}} \right) / K_{Gain} \quad (1)$$

де – значення показника регулювання;
 k та $k-1$ – відповідно поточне та попереднє значення;

Δn – різниця між поточним значенням частоти обертання та очікуваним;

K_{Gain} – універсальний коефіцієнт впливу.

Як видно з **рис. 4**, при збільшенні значення коефіцієнта K_{Gain} залежність часу відкриття газових форсунок дещо зміщується праворуч по осі абсцис. Також зі збільшенням коефіцієнта дещо зменшується кут нахилу кривої. Як видно з **рис. 5** при більш інтенсивній зміні частоти обертання КВ залежність часу відкриття газових форсунок змінює свій характер, порівняно з менш інтенсивною зміною частоти обертання КВ, а саме зменшується кут та збільшується діапазон часу відкриття форсунок.

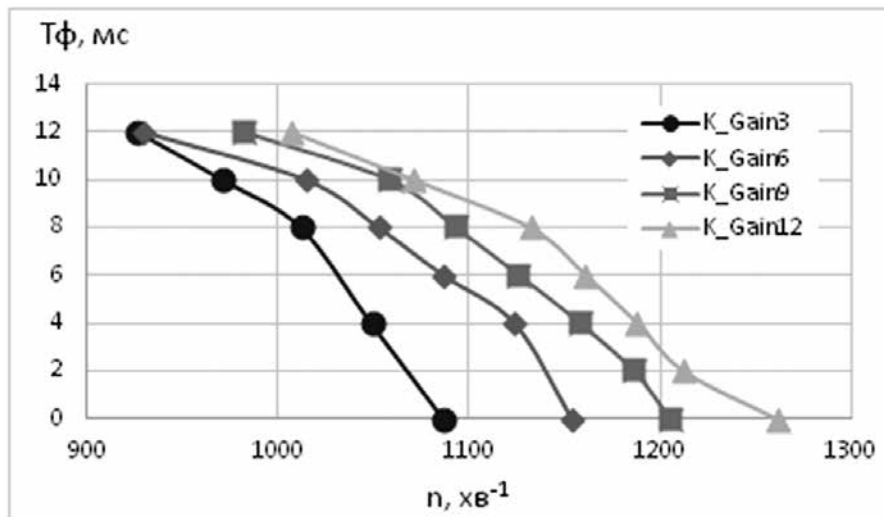


Рис. 4. Залежність часу відкриття газових електромагнітних форсунок від частоти обертання КВ за різних значень універсального коефіцієнта K_{Gain}

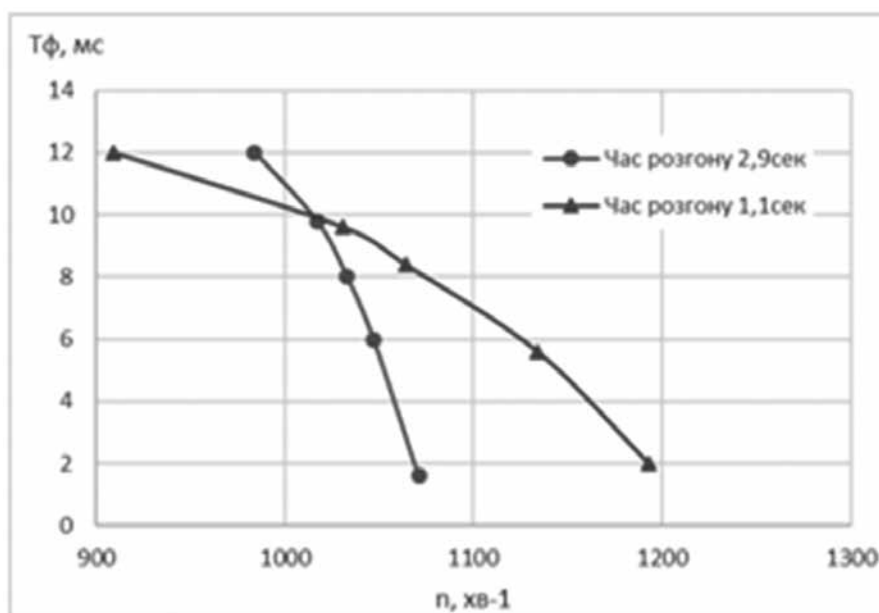


Рис. 5. Залежність часу відкриття газових електромагнітних форсунок за роботи регулятора з універсальним коефіцієнтом K_{Gain} при різній інтенсивності розгону

Зважаючи на недоліки регулятора з універсальним коефіцієнтом K_{Gain} , було розроблено скинути ПІД-регулятор, який має три складові: пропорційну, інтегральну та диференціальну. Такий регулятор має забезпечити необхідні характеристики $T\phi=f(n)$. Для цього потрібно, щоб виконувались дві умови, а саме: вимкнення подачі газового палива повинно бути якомога ближче до частоти обертання КВ, якому відповідає положення важеля подачі палива, та діапазон спрацювання характеристики $T\phi=f(n)$ має знаходитись в межах 200 хв^{-1} . У розробленому регуляторі інтенсивність зміни частоти обертання КВ від 800 хв^{-1} до 1100 хв^{-1} задавалась $1,1 \text{ с}$ та $2,9 \text{ с}$, як і в отриманій характеристиці на **рис. 5**. Вплив на складові регулятора в розробленій системі живлення, здійснюється за допомогою коефіцієнтів: K_p – коефіцієнта пропорційної складової, K_i – інтегральної складової, а також K_d – диференційної складової. Значення показника регулювання описується такими формулами:

$$PID = (R_p + R_i + R_d), \quad (2)$$

де R_p, R_i, R_d – відповідно пропорційна, інтегральна та диференціальна складові ПІД-регулятора. Ці складові визначають за формулами:

$$R_p = K * \Delta n_k, \quad (3)$$

$$R_i = R_i + K_i * \Delta n_k, \quad (4)$$

$$R_d = K_d * (\Delta n_{k-1} - \Delta n_k). \quad (5)$$

Вплив коефіцієнта пропорційної складової регулятора K_p на криву часу відкриття газових форсунок при положенні важеля подачі палива, що відповідає частоті обертання КВ 1000 хв^{-1} показано на **рис. 6**.

Як видно з показаних графіків, при збільшенні значення коефіцієнта K_p зростає кут нахилу характеристики $T\phi=f(n)$. Це призводить до більш різкого характеру спрацювання газових форсунок. Згідно з отриманими результатами раціонально вико-

ристовувати значення коефіцієнта $K_p=0,25$, адже вимкнення подачі газового палива повинно бути якомога ближчим до частоти обертання КВ, якому відповідає положення важеля подачі палива. Менші значення коефіцієнта K_p призводять до жорсткішої роботи двигуна в перехідних режимах, а більші – до погіршення динаміки дизеля.

Оскільки інтегральна та диференціальна складові зазвичай не вводяться як самостійні, розглянемо залежність часу відкриття газових електромагнітних форсунок за роботи з ПІ та ПД-регуляторами, показані на **рис. 7** та **8**. Значення пропорційної складової обираємо $K_p=0,25$.

Як видно з **рис. 7** за роботи ПІ-регулятора залежності часу відкриття газових форсунок мають однаковий кут нахилу характеристики $T\phi=f(n)$ залежно від коефіцієнта інтегральної складової K_i . Однак збільшення значення коефіцієнта K_i призводить до зросту нечутливості регулятора, що спостерігається на графіку при значенні коефіцієнта $K_i=0,001$ в порівнянні з коефіцієнтами $K_i=0,0001$ та $K_i=0,00001$. При збільшенні значення коефіцієнта $K_i=0,001$ ще в 10 разів до значення $K_i=0,01$, ПІ-регулятор не буде працювати. При значенні $K_i=0,00001$ характер залежності часу відкриття газових форсунок є найбільш раціональним для положення важеля подачі палива, що відповідає частоті обертання КВ 1000 хв^{-1} , оскільки подача газу вже припиняється при частоті обертання КВ двигуна 1050 хв^{-1} .

При роботі ПД-регулятора (**рис. 8**) залежності часу відкриття газових форсунок мають подібний характер і відрізняються лише кутом нахилу. Збільшення значення коефіцієнта K_d збільшує кут нахилу кривих. У цьому випадку обираємо найбільш раціональним значення коефіцієнта $K_d=0,1$, оскільки подача газу припиняється вже при частоті обертання КВ 1036 хв^{-1} .

Після вибору раціональних значень коефіцієнтів ПІД-регулятора для отримання необхідного характеру кривих часу відкриття газових форсунок, розгля-

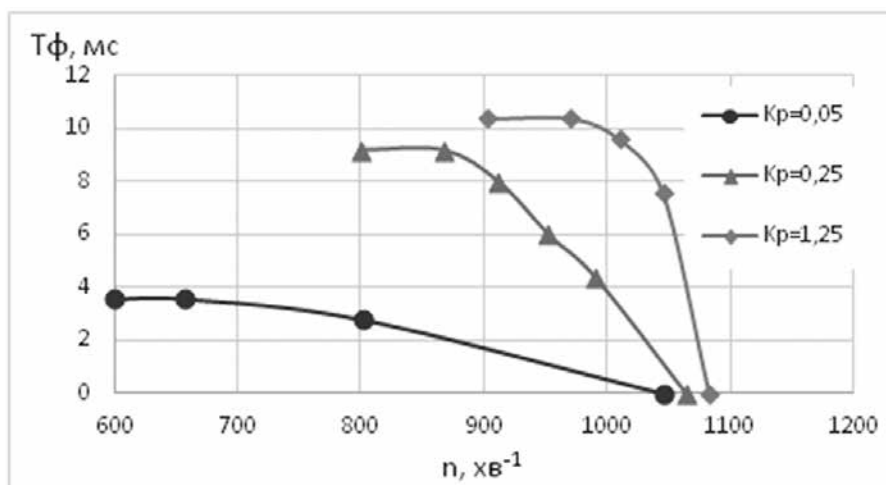


Рис. 6. Залежність часу відкриття газових електромагнітних форсунок за роботи з П-регулятором та положення важеля подачі палива, що відповідає частоті обертання КВ 1000 хв^{-1}

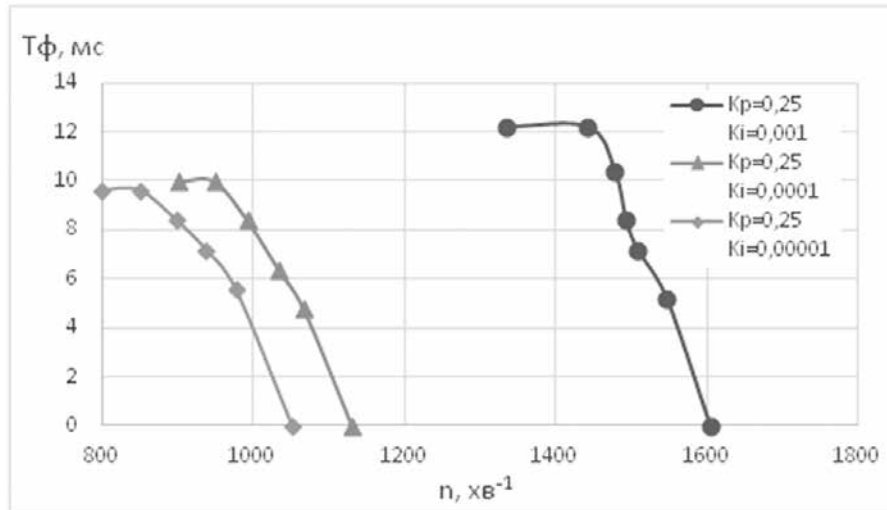


Рис. 7. Залежність часу відкриття газових електромагнітних форсунок за роботи з ПІ-регулятором та положення важеля подачі палива, що відповідає частоті обертання КВ 1000 хв⁻¹

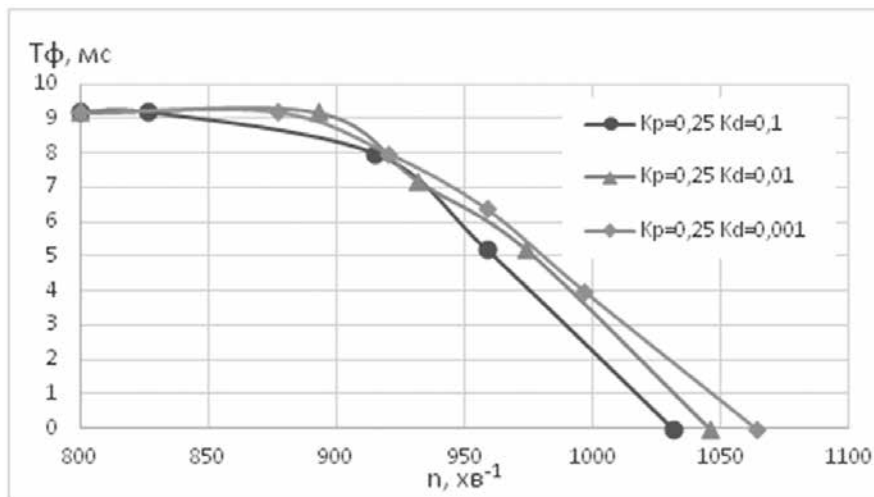


Рис. 8. Залежність часу відкриття газових електромагнітних форсунок за роботи з ПД-регулятором та положення важеля подачі палива, що відповідає частоті обертання КВ 1000 хв⁻¹

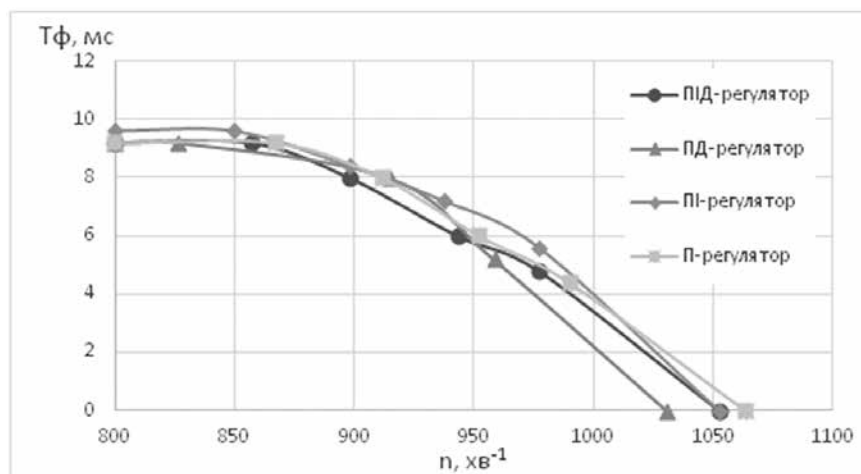


Рис. 9. Порівняльна характеристика залежностей часу відкриття газових форсунок при роботі з П, ПІ, ПД та ПІД-регуляторами з раціональними значеннями ПІД-параметрів регулятора газодизельної МПСЖ

немо ПІД-регулятор і порівнюємо його з П, ПІ та ПД регуляторами.

Як видно з рис. 9 залежності часу відкриття газових форсунок за роботи з різними регулято-

рами досить схожі, але ПІ-регулятор має кращу характеристику, в порівнянні з П-регулятором. Це пояснюється тим, що при використанні П-регулятора, на високих обертах КВ не забезпечується

одна з необхідних умов, а саме – вимкнення подачі газового палива повинно бути якомога ближчим до частоти обертання КВ, якому відповідає положення важеля подачі палива. Тому ПІ-регулятор є найбільш оптимальним, оскільки містить інтегральну складову, яка забезпечує необхідні умови регулювання у всьому діапазоні частоти обертання КВ дизеля.

ПД та ПІД-регулятори мають диференційну складову, яку зазвичай не використовують у системах “двигун-редуктор”, оскільки вона має “побічну дію”, яка полягає в тому, що навіть за малих коливань положення важеля подачі палива призводить до короткочасного повного відкриття газових форсунок, а це своєю чергою – до самовільного прискорення дизеля.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень встановлено, що ПІ-регулятор, маючи лише пропорційну складову, не забезпечує необхідних умов на високих обертах КВ двигуна, а ПД та ПІД-регулятори через наявність диференційної складової не доцільно використовувати в системах “двигун-редуктор”.

Найбільш вдалим типом регулятора вважаємо ПІ-регулятор, оскільки він виконуватиме задані умови регулювання у всьому діапазоні частоти обертання КВ дизеля. В наступних дослідженнях необхідно перевірити ПІ-регулятор з раціональними ПІД-параметрами газодизельної МПСЖ (коефіцієнтом пропорційної складової $K_p=0,25$; коефіцієнтом інтегральної складової $K_i=0,00001$) під час проведення дорожніх випробувань тестового автомобіля з відповідною МПСЖ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ковбасенко С. Перспективи використання природного газу двигунами транспортних засобів в Україні / С. Ковбасенко, М. Назаренко, В. Петренко, А. Голик // Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia / pod redakcją naukową Kazimierza Lejdy Monographia nr 7; Seria: Transport; Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza. –Rzeszów : 2016. – С. 159–164.
2. Mikulski Maciej, Wierzbiński Sławomir, Ambrosewicz-Walacik Marta, Duda Kamil and Pięta Andrzej. Combustion of Gaseous Alternative Fuels in Compression Ignition Engines [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.5772/61663/>.
3. Ковбасенко С. Переобладнання дизеля в газодизель, як можливість розширення паливної бази автомобільного транспорту / С. Ковбасенко, В. Петренко, С. Гутаревич, А. Голик // Вісник. Науково-технічний збірник. – №1 (37). – Київ : НТУ, 2017. – С. 154–160. – (Серія “Технічні науки”).
4. Araki M. PID control [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.eolss.net/ebooks/Sample%20Chapters/C18/E6-43-03-03.pdf/>.
5. Li, Y. and Ang, K.H. and Chong. PID control system analysis and design [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://eprints.gla.ac.uk/3815/1/IEEE_CS_PID_01580152.pdf/.
6. До Ань Туан. Методи підвищення технічних характеристик паралельно працюючих газодизель-генераторних агрегатів: дис. канд. техн. наук. – Херсон : ХНТУ, 2008.
7. Лісовал А.А. Теоретичні основи управління подачею палива і повітря в дизелях з газотурбінним наддувом: дис. докт. техн. наук. – Київ : НТУ, 2011.
8. Samuel E. de Lucena. Internal Combustion Engine's Throttle Control as a Motivational Theme for Teaching Microprocessors Systems Lab Classes. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [tps://www.computer.org/csdl/proceedings/fie/2013/9999/00/06684865.pdf/](https://www.computer.org/csdl/proceedings/fie/2013/9999/00/06684865.pdf/).

ГАЛУЗЕВИЙ СЛОВНИК

В останні роки спостерігаємо тенденцію до утворення та вживання питомих українських термінів у науково-технічному стилі української мови загалом та в автотранспортній сфері зокрема. Цей процес подеколи призводить до паралельного існування кількох термінів на позначення одного явища. З огляду на розширення міжнародних зв'язків України, зростаючу потребу в якісних перекладах документів у транспортній сфері, актуальним є також укладання перекладного словника для цієї галузі.

З метою вдосконалення національної терміносистеми в галузі та водночас для узгодження її з міжнародними термінами пропонуємо автотранспортній спільноті розпочати роботу над укладанням галузевого тлумачно-перекладного словника. Журнал «Автошляховик України» започатковує рубрику «Галузевий словник», в якій у наступних випусках публікуватиме розроблені нами визначення найбільш проблемних термінів українською мовою із зазначенням їх відповідників в інших мовах та з коментарями щодо їх утворення й сфери застосування.

Зауваги та пропозиції до проекту просимо надавати в редакцію на е-мейл: ikopyantsya@insat.org.ua з темою «Галузевий словник».