

УДК 621.43.03

**О. О. Коваленко<sup>1</sup>**, к.т.н., старший викладач,[a.kovalenko@2upost.com](mailto:a.kovalenko@2upost.com)**В. Г. Петренко<sup>2</sup>**, к.т.н., с.н.с.,[petrko@ukr.net](mailto:petrko@ukr.net)**А. С. Соломаха<sup>2</sup>**, к.т.н., асистент[as\\_solomaha@ukr.net](mailto:as_solomaha@ukr.net)**В. М. Селенков<sup>1</sup>**, старший викладач,[volodyamaks@ukr.net](mailto:volodyamaks@ukr.net)<sup>1</sup>Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЦИФРОВОГО ГАЗОВОГО ДОЗАТОРА СИСТЕМИ ГАЗОПОДАЧІ ДВЗ

*У статті розглядається один із етапів проектування цифрового газового дозатора системи газоподачі двигуна внутрішнього згорання – розробка його чисельної математичної моделі для забезпечення можливості виконання математичного моделювання з використанням чисельних методів та системи автоматизованого проектування, що дозволить всебічно дослідити об'єкт і знайти його оптимальні параметри.*

*Наведено результати моделювання роботи регулятора, які підтверджують, що розроблена модель якісно правильно відображає об'єкт проектування та може бути використана для подальшого чисельного дослідження роботи регулятора у складі САПР при різноманітних умовах та режимах роботи та для оптимізації параметрів для цих умов та режимів.*

**Ключові слова:** ДВЗ, цифровий газовий дозатор, система газоподачі, САПР, чисельні методи, чисельна математична модель, еквівалентна схема.

Застосування газових палив для живлення транспортних двигунів внутрішнього згорання дозволяє суттєво підвищити економічну мотивацію використання альтернативних моторних палив і отримати бажаний екологічний ефект (особливо за умови сучасного зростання цін на бензин і дизельне паливо [1–3]).

В НТУУ «КПІ» спільно з фірмою Авто Газ Глобал розробляються газодизельні системи живлення для переобладнання дизельних двигунів вантажних автомобілів у газодизелі (ГД). Одна з останніх розробок – універсальна газодизельна система з мікропроцесорним керуванням (ГДМП), що не потребує додаткового втручання в конструкцію штатного паливного насоса двигуна [4].

Успішна апробація системи з розподільним і фазовим впорскуванням газового палива показала і певні складності з розташуванням і установкою датчиків на двигунах різних моделей.

Крім цього, для забезпечення необхідної циклової подачі газу на багатоциліндрових потужних двигунах необхідно встанов-

лювати велику кількість електромагнітних форсунок. Це породжує певну громіздкість системи, ускладнює і піднімає вартість як ГД комплекту, так і переобладнання транспортних засобів.

З метою спрощення і здешевлення ГДМП фахівцями НТУУ «КПІ» та ЧДТУ запропоновано модифікацію цієї системи за схемою центрального впорскування газового палива до двигуна на основі цифрового газового дозатора. Такий регулятор газового потоку являє собою набір паралельно з'єднаних дроселів та електромагнітних клапанів-комутаторів, які можуть включатися в схему незалежно, забезпечуючи необхідний режим подачі палива.

При цьому, зменшується як кількість елементів системи, які необхідно додатково встановлювати на двигун, так і, відповідно, об'єм монтажних робіт; спрощується процес налаштування та експлуатація системи живлення; поліпшується загальна надійність роботи газодизеля.

Проблема підвищення якості газових систем живлення автомобільних ДВЗ безо-

середньо пов'язана з розробкою методів дослідження усталених та динамічних характеристик газодозувальних агрегатів і вибору їх оптимальної структури та параметрів. Очевидно, що оптимальний шлях проектування і дослідження повинен поєднувати різні методи, а саме: на початковому етапі – аналітичні спрощені методи, які дозволяють визначити початкові варіанти схеми та параметрів; на другому етапі – математичне моделювання з використанням чисельних методів та САПР, що дозволить всебічно дослідити об'єкт та знайти його оптимальні параметри; на кінцевому етапі – експериментальна перевірка отриманих при чисельному моделюванні результатів.

Об'єкт дослідження цієї роботи – цифровий газовий дозатор газодизельної системи живлення ГДМП для автомобільного дизеля. Цифровий дозатор, схема якого показана на рис. 1, є подальшою модифікацією розробленого раніше аналогового газового редуктора-регулятора [6].

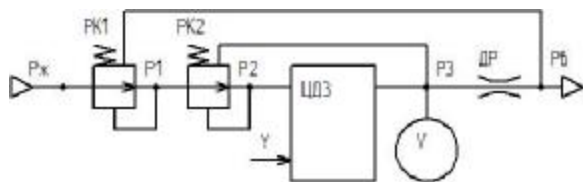


Рис. 1. Схема цифрового газового дозатора газодизельної системи живлення ГДМП

На схемі показані: джерело живлення (балон зі стиснутим газом)  $P_{жс}$ , два одноступінчаті редуктори  $PK1$  та  $PK2$  вхідного тиску газу, цифровий дозатор третього ступеня  $ЦДЗ$ , зосереджений об'єм  $V$ , дросель  $ДР$  та параметри на виході дозатора  $Pв$ .  $P1$ ,  $P2$  та  $P3$  – тиски відповідно після першого, другого та третього ступенів. Схема передбачає корекцію на другому ступені – редукування відбувається відносно тиску на виході третього ступеня  $P3$  (без корекції – відносно тиску на виході  $Pв$ ).  $Y$  – керуючий сигнал.

Мета роботи – розробка чисельної математичної моделі цифрового газового дозатора системи газоподачі ДВЗ

Аналіз структури системи газоподачі ГДМП показує, що для її якісного проектування в складі САПР, остання повинна містити у вигляді еквівалентних схем математичні моделі таких елементів і робочих процесів: джерел пневматичної енергії; постійних і змінних пневматичних опорів та ємностей;

трубопроводів; термодинамічних процесів (перенесення тепла з газом, зміна температури газу при зміні тиску і об'єму, теплообмін тощо); механічних процесів (тертя, упорів, пружин тощо); виконавчих пристроїв (мембрани, циліндри, мотори тощо); клапанів (запобіжного, зворотного, редукційного).

Перелічений список математичних моделей, враховуючи, що їх можна модифікувати, дозволить легко і якісно проектувати широкий спектр пневмомеханічних систем.

З урахуванням того, що досліджуваний у цій роботі цифровий газовий регулятор є модифікацією розробленого раніше аналогового регулятора, частина раніше створених моделей (пневматичних опорів, ємностей, редукційних клапанів та ін.) використана і в цьому випадку. Чисельні моделі цих елементів були створені на основі чисельних моделей пневматичних опорів та ємностей, побудованих, у свою чергу, на основі класичних рівнянь Сен-Венана Ванцеля та стану ідеального газу [5]. Для забезпечення можливості використання чисельних методів, сталості процесів інтегрування в ці залежності введені певні обмеження, після чого вони були занесені до бібліотеки нелінійних функцій ПК ALLTED. Подальше їх використання виконується системою автоматично.

Для можливості моделювання та дослідження нової системи була розроблена математична модель третього ступеня – цифрового дозатора, схема якого показана на рис. 2.

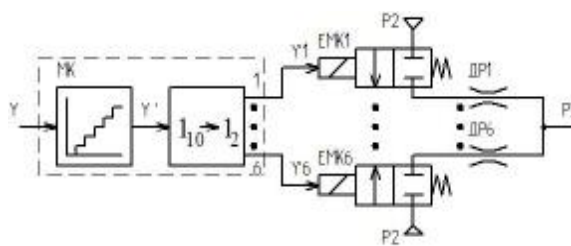


Рис. 2. Схема третього ступеня ГДМП – цифрового дозатора

На схемі показані: шестиканальний мікроконтролер електронного блоку керування ГДМП  $МК$ , який складається з двох блоків: квантування по рівню, що перетворює аналоговий вхідний сигнал  $Y$  в дискретний  $Y'$  та блок перетворення дискретного значення  $Y'$  в двійковий код; відповідної кількості електромагнітних клапанів ( $EMK1$ , ...,  $EMK6$ ), керу-

ючими сигналами для яких є значення розрядів двійкового коду ( $Y1, \dots, Y6$ ), та послідовно з'єднаних з **ЕМК** постійних дроселів (**ДР1**, ..., **ДР6**) з ефективними площами, що відрізняються в два рази так, що

$$F_{\text{эф}6} = 2 \cdot F_{\text{эф}5} = 4 \cdot F_{\text{эф}4} =$$

$$8 \cdot F_{\text{эф}3} = 16 \cdot F_{\text{эф}2} = 32 \cdot F_{\text{эф}1}$$

Таким чином, діапазон зміни сумарної ефективної площі може бути дискретизований у межах від 0 до 63.

Для реалізації такої моделі до вже розроблених чисельних математичних моделей (ММ) постійного та змінного пневматичного опору [6, 7] були розроблені моделі блоків **МК** (блоку квантування сигналу по рівню та блоку перетворення дискретного значення  $Y'$  в двійковий код) і **ЕМК**.

Модель **ЕМК** являє собою комбінацію моделей змінного пневматичного опору та електромагніту. На вхід електромагніту подається сигнал відповідного розряду двійкового коду (1 або 0). Вихід електромагніту – величина відкриття клапану. На цьому етапі електромагніт був змодельований аперіодичною ланкою. Схема прийнятої моделі **ЕМК** показана на рис. 3. Постійна часу аперіодичної ланки, що моделює електромагніт,  $T = 0,02$  с, ефективна площа прохідного отвору клапану  $F_{\text{эф}1} = 9,96 \text{ мм}^2$  (еквівалентний діаметр – 4,0 мм, коефіцієнт витрати – 0,793).

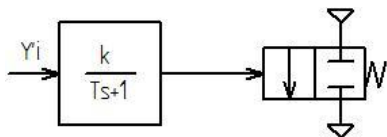


Рис. 3. Схема прийнятої апроксимації моделі **ЕМК**

Еквівалентна схема ММ каналу подачі газового палива газодизельної системи живлення побудована на основі еквівалентних схем ММ складових елементів і показана на рис. 4. На схемі позначені такі моделі та елементи:

БАЛ – модель балона (задає тиск та температуру повітря/газу на вході);

РК1, РК2 – моделі газових редукторів першого та другого ступеня [6, 7];

ЦДЗ – модель цифрового дозатора;

VOL – модель постійної пневматичної ємності [6, 7];

ДР – модель постійного дроселя [6, 7];

ВИХ – модель параметрів (тиск та температура) повітря/газу на виході;

ЕУ – незалежне джерело вхідного сигналу. На цьому етапі відпрацювання моделей вхідний сигнал лінійно зростає від нуля до максимального значення.

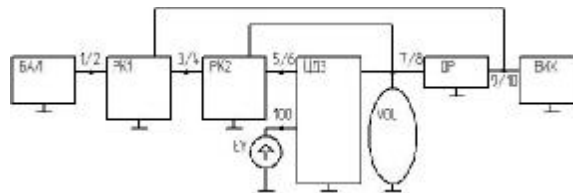


Рис. 4. Еквівалентна схема чисельної моделі газоподачі ГДМП

Потенціалам вузлів еквівалентної схеми відповідають тиски та температури повітря/газу:

1, 2 – в балонах;

3, 4 – на виході першого ступеня;

5, 6 – на виході другого ступеня;

7, 8 – на виході регулятора основної дозуючої системи;

9, 10 – на виході;

100 – керуючий сигнал  $Y$ .

Представлена еквівалентна схема газоподачі ГДМП є, по суті, графічним зображенням розробленої чисельної математичної моделі системи живлення, що розглядається. Вона дозволяє використовувати цю модель у складі САПР ПК ALLTED [8–11] для всебічного дослідження та розрахунку показників системи газоподачі для ГДМП.

Для ідентифікації розробленої моделі виконано чисельні експерименти у складі САПР ПК ALLTED – моделювалась реакція системи (зміна тиску на виході третього ступеня **P3** та витрати **G**) на зміну вхідного сигналу. Результати моделювання показані на рис. 5: а) зміна тиску на виході третього ступеня та масової витрати газу через дросель ДР при лінійному зростанні вхідного сигналу від 0 до 64; б) залежність витрати газу через дросель ДР від тиску на виході третього ступеня. На графіках позначено **P3** – тиск на виході третього ступеня, **G** – масова витрата газу через дросель ДР.

При чисельному дослідженні значення абсолютного тиску в балоні – 20 МПа, тиску на виході – 0,2 МПа, діаметр дроселя першого розряду цифрового дозатора – 0,4 мм, прийнятий коефіцієнт витрати – 0,793.

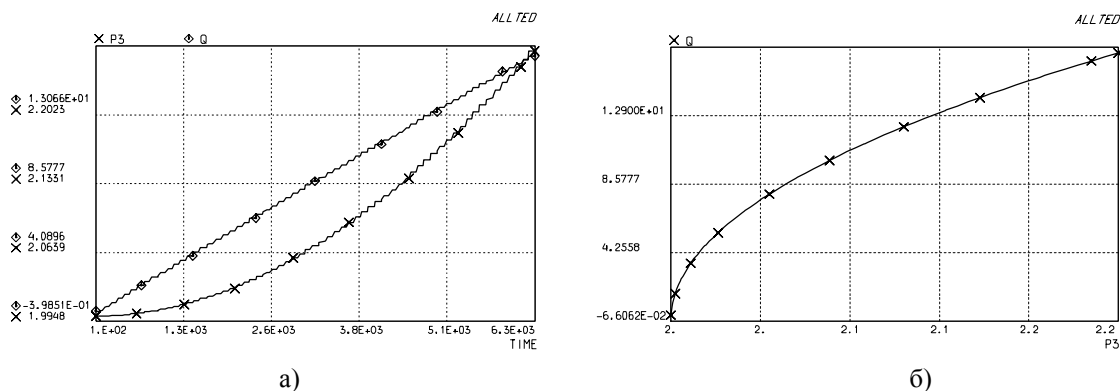


Рис. 5. Результати моделювання роботи ГДМП (робоче тіло – повітря, без компенсації)

### Висновки:

1. Розроблено чисельну математичну модель газодозуючого каналу для газодизельної системи живлення наддувального дизеля відповідно до методики подання ММ для САПР у вигляді еквівалентної схеми.

2. Складено програму для розрахункових досліджень показників цифрового газового дозатора як окремого агрегату, так і системи газоподачі ГДМП в цілому.

3. Математичне моделювання з використанням ПК ALLTED [6, 7] показало, що розроблена ММ якісно правильно відображає роботу цифрового дозатора.

4. Отримана ММ газодозувальної системи ГДМП дозволяє виконувати в складі САПР ПК ALLTED весь спектр дослідницьких процедур – усталений, динамічний, частотний і спектральний аналізи, параметричну оптимізацію, визначення оптимальних допусків на параметри агрегатів системи живлення та інше, за різних режимів роботи як системи живлення, так і самого ДВЗ.

5. Практична цінність розробленої ММ і методики дослідження полягає в тому, що вона ще на ранніх стадіях проектування дозволяє всебічно дослідити роботу системи газоподачі та зробити оптимальний вибір його конструктивних параметрів для формування бажаного складу робочої суміші залежно від вимог до системи живлення ДВЗ.

6. Запропонований спосіб проектування дозволяє у стислий термін і при мінімальних витратах як розробляти нові агрегати газодозувальних систем, так і адаптувати зразки вже існуючих конструкцій під газодизельну систему живлення конкретного двигуна.

7. Дослідження газових систем живлення ДВЗ у складі САПР ПК ALLTED за ра-

хунок значного зменшення обсягу експериментальних робіт і створення меншої кількості прототипів дозволить суттєво скоротити час і вартість створення реально працюючих зразків систем.

### Список літератури

1. Екологія та автомобільний транспорт : навч. посіб. / [Ю. Ф. Гутаревич, Д. В. Зеркалов, А. Г. Говорун та ін.]. – [2-ге вид., переробл. та доповн.] / Нац. транспорт. ун-т. – К. : Арістей, 2008. – 296 с.
2. Канило П. М. Будущее автотранспорта – альтернативные топлива и канцерогенная безопасность [Электронный ресурс] / П. М. Канило, М. В. Сарапина // Автомобильный транспорт. – 2012. – Вып. 31. – С. 40–49. – Режим доступа : [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/at\\_2012\\_31\\_9.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/at_2012_31_9.pdf)
3. Куксанов В. Ф. Совершенствование эколого-экономических инструментов стимулирования внедрения газового моторного топлива на маршрутном транспорте (на примере г. Оренбурга) / В. Ф. Куксанов, А. А. Филиппов, О. В. Дудченко // Вестник Оренбургского государственного университета – 2014. – № 10 (171). – С. 99–106.
4. Газодизельная система живления автомобильного двигателя с микропроцессорным управлением / [М. О. Дикий, В. Г. Петренко, А. С. Соломаха та ін.] // Наукові нотатки : міжвузівський зб. – 2011. – Вип. 31. – С. 120–123.
5. Герц Е. В. Динамика пневматических систем машин / Е. В. Герц. – М. : Машиностроение, 1985. – 256 с.
6. Дослідження динамічних характеристик газового редуктора-регулятора в системі живлення двигуна з іскровим запалюван-

- ням / [М. О. Дикий, В. Г. Петренко, О. І. Пятничко, О. О. Коваленко] // Вісник Національного транспортного університету. – К. : НТУ, 2011. – № 22. – С. 197–203.
7. Покращення динамічних характеристик системи газоподачі ДВЗ / [М. О. Дикий, В. Г. Петренко, О. О. Коваленко та ін.] // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2012) : матеріали П'ятої Міжнар. наук.-практ. конф., (Київ, 15–16 трав. 2012 р.). – К. : НАУ.
  8. ALLTED – a computer-aided engineering system for electronic circuit design / A. Petrenko, V. Ladogubets, V. Tchkalov, Z. Pudlovski. – Melbourne : UICEE, 1997, 205 p.
  9. Використання пакетів схемотехнічного проектування для побудови моделей механічних компонентів / А. І. Петренко, В. В. Ладогубець, О. Ю. Безносик та ін.] // Вісник НУ «Львівська політехніка»: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2009. – № 638. – С. 18–22.
  10. NetALLTED optimization procedure [Internet]. Available from: <http://allted.kpi.ua>
  11. Making a mechanical components library for circuit design software / O. Beznosyk, O. Finogenov, V. Ladogubets, O. Tchkalov // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: proc. of the V-th Internat. conf. MEMSTECH'2009, (Lviv-Polyana, Ukraine, 22-24 April 2009). – Lviv : Publishing House Vezha & Co., 2009. – pp. 120–122.
- ### References
1. Gutarevich, Yu. F., Zerkalov, D. V., Govorun, A. G. et al. (2008) Ecology and auto transport. 2<sup>nd</sup> ed.. Kyiv: Ariistey, 296 p. [in Ukrainian].
  2. Kanilo, P. M. and Sarapina, M. V. (2012) Future of vehicles – alternative fuel and carcinogenic security [Internet]. *Avtomobilniy transport*, (31), pp. 40–49. Available from: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/at\\_2012\\_31\\_9.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/at_2012_31_9.pdf) [in Russian].
  3. Kuksanov, V. F., Philipov, A. A. and Dudchenko, O. V. (2014) Improvement of ecologic and economic instruments for promoting of gas motor fuel in fixed-run taxi (on the example of Orenburg). *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, (10), pp. 99–106 [in Russian].
  4. Dykiy, M. O., Petrenko, V. G., Solomaha, A. S. et al. (2011) Gas/petrol system for automobile engine supply with microprocessor control. *Naukovi notatky (Mizhvuzivskiy zbirnik)*, (31), pp. 120–123 [in Ukrainian].
  5. Gerc, E. V. (1985) The dynamics of pneumatic systems of machines. Moscow: Mashinostroenie, 256 p [in Russian].
  6. Dykyu, M. O., Petrenko, V. G., Pyatnichko, O. I. and Kovalenko, O. O. (2011) The study of dynamic characteristics of gas reducer-regulator in power system engine with spark ignition. *Visnyk Nacionalnogo Transportnogo Universytetu*, (22). Kyiv: NTU, pp. 197–203 [in Ukrainian].
  7. Dykyu, M. O., Petrenko, V. G., Kovalenko, O. O. et al. (2012) The improvement of dynamic characteristics of gas/petrol supply system of ICE. *Integrated intelligent robotic complexes (IIRTC-2012): proc. of the 5<sup>th</sup> Intern. scient.-pract. conf., 15-16 May, Kyiv: NAU* [in Ukrainian].
  8. Petrenko, A., Ladogubets, V., Tchkalov V. and Pudlovski, Z. (1997) ALLTED – a computer-aided engineering system for electronic circuit design. Melbourne: UICEE, 205 p.
  9. Petrenko, A., Ladogubets, V., Beznosyk, O. et al. (2009) The use of schematic design packages for building models of mechanical components. *Visnyk NU «Lvivska politehnika»: Kompjuterni nauky ta informaciyini tehnologii*, (638), pp. 18–22. [in Ukrainian].
  10. NetALLTED optimization procedure [Internet]. Available from: <http://allted.kpi.ua>
  11. Beznosyk ,O., Finogenov, O., Ladogubets, V. and Tchkalov, O. (2009) Making a mechanical components library for circuit design software. *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: V<sup>th</sup> Intern. conf. MEMSTECH'2009, 22-24 April, Lviv-Polyana, Ukraine: proc. Lviv: Publishing House Vezha & Co. pp. 120–122.*

**O. O. Kovalenko**<sup>1</sup>, *PhD, senior lecturer,*  
[a.kovalenko@2upost.com](mailto:a.kovalenko@2upost.com)

**V. G. Petrenko**<sup>2</sup>, *PhD, senior researcher,*  
[petrko@ukr.net](mailto:petrko@ukr.net)

**A. S. Solomaha**<sup>2</sup>, *PhD, lecturer,*  
[as\\_solomaha@ukr.net](mailto:as_solomaha@ukr.net)

**V. M. Selenkov**<sup>1</sup>, *senior lecturer,*  
[volodyamaks@ukr.net](mailto:volodyamaks@ukr.net)

<sup>1</sup>Cherkasy State Technological University  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»  
Peremogy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

### THE DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF DIGITAL GAS METERING DEVICE OF GAS SUPPLY SYSTEM FOR INTERNAL-COMBUSTION ENGINE

*The use of gas fuels for power supply of internal-combustion engines (ICE) of vehicles allows to greatly improve economic motivation of the use of alternative motor fuels and to get the desired environmental effect (especially in terms of the modern growth of prices for gasoline and diesel fuel).*

*The problem of improving the quality of gas engines for power supply of ICE is directly related to the development of research methods for static and dynamic characteristics of gas supply units and choosing their optimal structure and parameters. Obviously, the optimal path for design and research should combine various methods, namely: initially – analytical simplified methods that allow to specify initial options and parameters; at the second stage – mathematical modeling with the use of numerical methods and CAE systems, which will give possibility to comprehensively examine the object and to find its best options; the final stage is experimental verification of results, obtained with numerical simulation.*

*The article discusses one of the stages of designing of digital gas metering device of gas supply system for internal combustion engine – the development of its mathematical model to perform mathematical simulation using numerical methods and CAE systems.*

**Keywords:** *ICE, digital gas metering device, gas supply system, CAE, numerical methods, numerical mathematical model, equivalent circuit.*

*Рецензенти: Г. В. Канашиевич, д.т.н., професор,  
О. Ф. Луговський, д.т.н., професор.*