

Л.П. Клименко, О.Ф. Прищепов, В.І. Андрєєв, О.В. Щесюк, М.І. Сідєлєв

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННОЇ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МАЛОПОТУЖНИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Переважає більшість систем двигунів внутрішнього згоряння керуються електронними блоками управління. В подальшому, максимальна автоматизація двигунів повинна обов'язково включати повну самодіючу контрольованість газообміном в циліндрах. Інноваційною ідеєю конструкції газообмінного механізму вважається електромагнітний привід розподільчих клапанів. Такі новачки активно досліджуються в автомобільних двигунах, але мало інформації про застосовуються для малопотужних двигунів внутрішнього згоряння, які є базовими для малої механізації, а в воєнний час, подекуди, мають подвійне призначення. Фізична модель, що розглядається авторами, передбачає, що на заміну розподільного валу відкриттям і закриттям клапанів керують дуже швидкі електромагнітні актуатори за командою електронного блока управління. Вхідна інформація до блоку надходить від сенсорів та датчиків, що відслідковують положення колінчастого валу, тиск у впускному колекторі, температуру двигуна та швидкість обертання колінчастого валу. На виході отримують інформацію для керування положенням впускного та випускного клапанів. Технологія дозволяє змінювати моменти відкриття та закриття клапанів відносно мертвих точок та робочих тактів двигуна, впливати на тривалості відкритого та закритого станів клапанів, варіювати час перекриття (одночасного відкритого стану) клапанів, здійснювати потактове зсування фаз тощо. Для процесу моделювання системи газообміну в малопотужних двигунах внутрішнього згоряння з електронним керуванням клапанами використано мову програмування C#, за допомогою об'єктно-орієнтованого підходу. Результати роботи моделі, що представлена в статті, погоджуються з даними відкритих публікацій останнього часу. Дослідження виконано на макетних зразках, які створено дослідним підбором робочих параметрів. Системні вимоги до живлення електронного блока управління достатньо низькі – можливість працювати від електричної мережі 12 В. Дослідження продемонстрували, що привід досягає бажаної потужності та вимог до продуктивності.

Ключові слова: двигуни внутрішнього згоряння; газорозподільна система; фази газообміну; електронна система керування клапанами; актуатор; моделювання; маса двигуна; економія палива; екологічність

Вступ

В останні роки технічна оснащеність двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) внутрішньою електронною автоматикою значно зростає. Зовсім недавно мікропроцесорні системи запалювання, електронні системи управління вихлопними газами, системи упорскування бензину, бортова самодіагностика вважалися останніми досягненнями в області приладобудування двигунів. Тепер їх відносять до класичних систем і встановлюють майже на кожен серійний двигун [1].

Електронне управління необхідно для задоволення високих вимог щодо екологічності, паливної економічності, експлуатаційних характеристик, зручності обслуговування і діагностики, що висуваються до сучасних двигунів внутрішнього згоряння, як законодавцями, так і споживачами [2].

Проте, є система, яка традиційно віддається механічному регулюванню. Це газорозподільний механізм (ГРМ) із жорстким кінематичним зв'язком між колінчастим і розподільним валами, завданням якого, є введення в дію клапанів у потрібний час і в необхідній послідовності. В сучасних ДВЗ автоматичне управління клапанами, незалежне від розподільного валу, поки що зустрічаються тільки в експериментальних розробках. Автори запропонували власне технічне рішення та оцінили його працездатність для варіанту автоматизації роботи газорозпо-

дільної системи двигуна без застосування кулачкового механізму.

Актуальність виконаного дослідження обґрунтована його спрямованістю на досягнення максимальних показників паливної економічності та екологічності ДВЗ, що є одним з основних науковим напрямків сучасного двигунобудування.

Мета і завдання дослідження

Мета дослідження визначена авторами як моделювання роботи газорозподільної системи в розповсюджених на цей час малопотужних двигунів внутрішнього згоряння без застосування газорозподільного валу та кулачків, а за рахунок електронного управління газообміном. Означена мета досягається шляхом послідовного виконання наступних завдань:

- розроблення схеми автоматизації газообміну в двигуні для оптимізації фаз газорозподілу;
- відпрацювання системи силового приводу впускних та випускних клапанів;
- розроблення на мові C# програми електронного управління системою газорозподілу в малопотужних двигунах внутрішнього згоряння;
- перевірки працездатності автоматизованої системи газообміну в циліндрах двигуна.

Автори статті висувають гіпотезу, що автоматизація процесів газообміну для ДВЗ має значний

потенціал для зменшення їх масогабаритних показників та підвищення екологічності.

Аналіз публікацій

Оптимізація системи газообміну є постійним процесом досліджень та розробок в інженерії переважно автомобільних двигунів внутрішнього згорання, і є напрямом, який дозволяє виробникам досягти підвищення потужності, економії палива, зниження викидів шкідливих речовин та загальної ефективності транспортного засобу.

Системи газообміну в двигунах внутрішнього згорання без розподільчих валів систематизуються за декількома варіантами, які використовуються в залежності від типу приводу клапанів:

- пневмоклапанні системи: газорозподіл з пневматичним приводом;
- електронні системи керування клапанами: безкулачковий газорозподіл з електромагнітним приводом;
- поршневий газорозподіл: системи з кулачками, розташованими на поршнях;
- системи бездросельного газорозподілу;
- системи змінного газорозподілу.

Переваги безклапанного газорозподілу демонструються наступними технічними рішеннями [3,4]:

- застосування систем змінного газорозподілу (Variable Valve Timing) засновано на зміні режимів підйому клапанів при різних навантаженнях;
- електронні системи управління газообміном в двигунах мають більший контроль над системою газорозподілу завдяки більш точній оптимізації фаз та підйому клапанів;
- безклапанний газорозподіл надає зниження втрат на тертя та можливість більш гнучкого управління газообміном;
- автоматизація системи газообміну ДВЗ в комбінованих гібридно-електричних силових установках оптимізована для роботи в режимах рекуперації енергії та спільної роботи з електродвигунами;
- впровадження систем рециркуляції відпрацьованих газів з низьким тиском (LP EGR) на різних режимах роботи двигуна сприяє зниженню викидів NOx без значного впливу на ефективність;
- створення електронних комплексів з управління тепловим режимом двигуна позитивно впливає на роботу системи газообміну та експлуатаційні і екологічні показники двигуна в цілому.

У теперішній час системи газообміну без розподільчих валів знаходяться на стадії розробки та дослідження, а їх впровадження в серійне виробництво ще не набуло широкого поширення.

Аналіз попередніх розробок узагальнює процес розвитку автоматизації газорозподілу ДВЗ до наступних конструктивних рішень. Щоб змусити клапан

газорозподільного механізму двигуна відкриватися і закриватися в максимально оптимальному режимі потрібно примусово керувати фазами розподілу газових потоків залежно від частоти обертання, положення і навантаження колінчастого валу. В автоматизованому управлінні газообміном в двигуні кулачковий розподільчий вал вичерпує свої можливості, і не дає змоги вирішити це завдання. Найбільш перспективним вважається електромагнітний привід (ЕМП), керований електронікою. З його допомогою двигун більш рівномірно працює за змінних навантажень, споживає менше пального на максимальних обертах за заданої потужності, легко змінює напрям обертання колінчастого валу, вимикає та додає в роботу циліндри.

Типовою конструкцією електромагнітного приладу є прямоходова схема з двома катушками і двома пружинами, що створюють попередній натяг. Розробкою такого виду приводів займаються: компанія DaimlerChrysler (м. Штутгарт, Німеччина); Рурський університет (м. Бохум, Німеччина); компанія Siemens VDO (Німеччина); компанія FEV-Motorentechnik (м. Аахен, Німеччина); компанія Eaton Aerospace у співпраці з Університетом штату Огайо та дослідницьким центром General Motors (США); Мічиганський університет у співпраці з Ford Motor Company (м. Дірборн, США) [4, 5]. Компанією Engineering Matters (м. Медфілд, США) розроблено найбільш відомий варіант керованого індивідуального електромагнітного приводу (Single Valve Actuator) клапана ГРМ (рис. 1 а), а також подвійний ЕМП (рис. 1 б) (Double Valve Actuator), призначений для керування парою клапанів ГРМ [6].

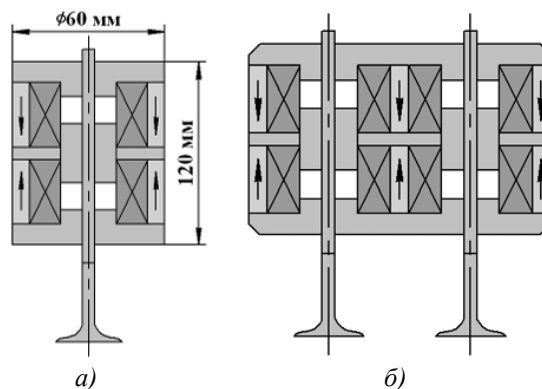


Рис. 1. Керований електромагнітний привід клапанів: а) індивідуальний; б) подвійний

У технологічному інституті Флориди (м. Гейнсвілл) у співпраці з каліфорнійським університетом (м. Берклі) розроблено поляризований електромагнітний привід клапанів ГРМ ДВЗ [7]. Використання поляризованої магнітної системи в ЕМП дає змогу не тільки зменшити витрати енергії на утримання

якоря, а й забезпечити обмежені масогабаритні показники приводу.

В університеті Цинхуа (м. Пекін, Китай) [8] займаються розробкою власної конструкції автоматизованого керованого електропривода обертальної дії для керування клапанами ГРМ ДВЗ.

Над розробкою систем зміни фаз газорозподілу і висоти підйому клапана із застосуванням ЕМП працюють такі компанії, як BMW [9], GM [10], «Renault» [11], «Siemens» [12] та ін. Найбільші досягнення в цьому напрямку належать ученим із Кореї, Японії та США

Фірма «Renault» [11] пропонує іншу систему для мало оборотних ДВЗ, за допомогою якої можна не тільки чітко керувати часом відкриття кожного клапана, а й забезпечувати отримання максимальної потужності або максимального крутного моменту за дуже малої ходи та економічної частоти обертання колінчастого валу на холостому ході двигуна.

Фірма Valeo (м. Париж, Франція) [13] розробила систему SVA (Smart Valve Actuation), яка також відкриває і закриває клапани, але за допомогою соленоїдного електромагнітного приводу (рис. 2).

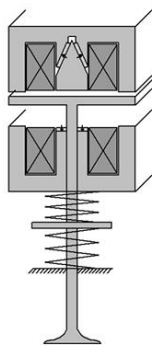


Рис. 2. Соленоїдний привід клапана фірми Valeo

В основу конструкції покладено принцип «пружинного маятника». Привід має такий вигляд: на стрижні клапана змонтовано дві пружини, одна з яких працює на закривання, а друга - на відкривання. Перевага такої електропружинної схеми - зниження потужності електромагнітів, а недолік - привід SVA виходить доволі громіздким, і висота головки блоку істотно збільшується.

Дослідження показали, що застосування ЕМП клапана дає змогу знизити викиди шкідливих речовин на 12...15 %, збільшити крутильний момент двигуна на 20 %, паливна економічність становить 18...23 %. Таким чином, завдання розроблення та застосування електромагнітного клапана на реальному двигуні є актуальним.

В електромагнітному приводному пристрої основним компонентом є електромагніт, що змика-

ється, тому від частих зіткнень якоря з сіллом неминуче підвищення шумності. Удари призводять не тільки до шуму, а інколи й до поломки клапанів.

У поршневому двигуні з класичним ГРМ послідовність і логіка спрацювання впускних і випускних клапанів забезпечується розподільним і колінчастим валами, з якими всі клапани перебувають у постійному кінематичному зв'язку. У двигуні з електронним керуванням, такий кінематичний зв'язок клапанів із колінчастим валом відсутній. Тому, під час вимкнення двигуна, його колінчастий вал зупиняється у випадковому положенні відносно розташування газорозподільних клапанів, які під час вимкнення запалювання всі встановлюються в положення «закрито». Тепер, щоб знову запустити двигун, необхідно встановити всі клапани у вихідний передпусковий стан, який відповідає випадковому положенню колінчастого валу.

Дослідження розробок у сфері створення ЕМП газорозподільних клапанів засвідчили, що дотепер не розроблено теорію оптимального проєктування таких приводів, немає узагальнених інженерних методик розрахунку для електромагнітів клапанів, і, як наслідок, дотепер немає конструкцій ГРМ з електромагнітними клапанами, прийнятних для широкого використання в ДВЗ.

Дослідження

Головна проблема традиційного ГРМ криється в еліптичній формі кулачка, завдяки якій клапан практично ніколи не буває надовго відкритий або закритий повністю. Замість цього він завжди або плавно відкривається, або плавно закривається, що знижує його пропускну здатність. Мало того, унаслідок запізнювання закриття випускних клапанів і випередження відкриття впускних відбувається ефект перекриття клапанів, тобто одночасне відкриття впускного та випускного клапанів у разі положення поршня біля верхньої мертвої точки (рис.3 на основі [14]). Це дає потужність, але негативно позначається на екологічних характеристиках двигуна.

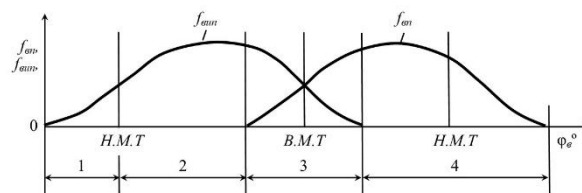


Рис.3. Перекриття впускних і випускних клапанів при звичайному ГРМ: 1 – вільний випуск; 2 – примусовий випуск; 3 – продування; 4 – наповнення

Відмова від кулачкової схеми та застосування електромагнітного приводу клапанів, керованого електронікою, демонструє крива відкриття клапанів

що нагадує прямокутник: клапан різко відкривається, утримується у відкритому стані, а потім різко закривається (рис. 4 на основі [2, 6, 7]).

Червоний графік демонструє криву відкриття впускного клапана, синій – впускного. Клапани максимально довго перебувають у повністю відкритому положенні, а необхідні обсяги газів проходять скрізь отвори за менший проміжок часу.

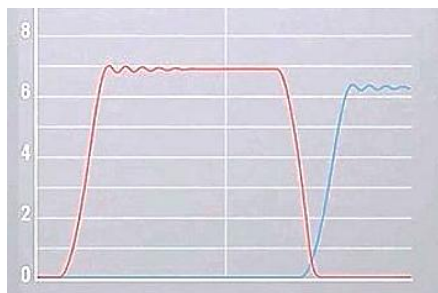


Рис. 4. Ілюстрація механізму зміни фаз газорозподілу ДВЗ з керованим електроприводом клапанів

Автори статті розглядаючи переваги означеної конструкції газообміну, провели моделювання роботи електронної газорозподільної системи для малопотужних ДВЗ, які зараз виготовляються в великій кількості. Окремі двигуни мають подвійне використання в період воєнного стану. Вимоги до таких – мала вага і габаритність, мала шумність та пом'якшені показники довговічності [15].

В якості привідного механізму клапанів газорозподілу ДВЗ авторами оцінювалися актуатори прямолинійної дії – електромагнітні пристрої, що пе-

ретворюють електричну енергію на енергію штовхуючого або втягувального руху штока. Електричні актуатори в складі ГРМ можуть забезпечити кожен клапан індивідуальним приводом і незалежною системою керування.

Дослідження виконано на макетних зразках (рис. 5). Макети створено дослідним підбором робочих параметрів електромагнітних актуаторів. Системні вимоги до живлення – можливість працювати від електричної мережі 12 В, мінімальне енергоспоживання в режимі очікування, підвищені вимоги до компактності.

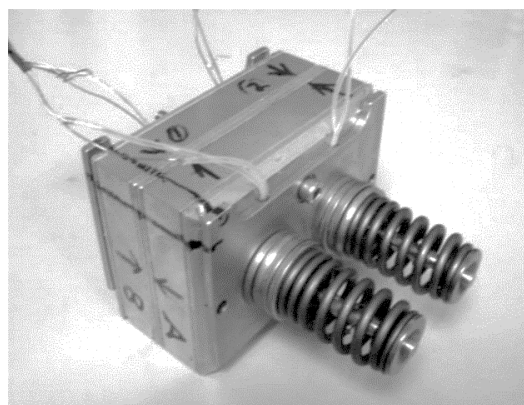


Рис. 5. Конструкція автоматизованого приводу клапанів з актуаторами

Принципова система зміни фаз газорозподілу при застосуванні електронної системи керування драйверами клапанів розроблена під мову програмування з високою ступенню швидкодії. (рис. 6).



Рис. 6. Принципова схема керування клапанами газообміну з використанням актуаторів

Функціональне значення елементів з принципової схеми прокоментуємо окремо:

1. Сенсори постійно збирають дані про стан двигуна, такі як положення колінчастого валу, тиск у впускному колекторі, температуру двигуна та швидкість обертання колінчастого валу. Ці дані передаються в електронний блок керування (ECU)

(рис. 7).

2. ECU обробляє ці дані та коригує роботу двигуна в режимі реального часу для забезпечення максимальної ефективності та мінімальних викидів. ECU визначає оптимальні моменти для відкриття та закриття клапанів.

3. Електронні драйвери передають команди

від ECU до електричних актуаторів, які відкривають і закривають клапани.

4. Електромагнітні актуатори отримують електричні сигнали від драйверів і фізично переміщують клапани.

5. Блок живлення забезпечує стабільне електроживлення для всіх компонентів системи, підтримуючи їхню безперебійну роботу.

6. Механізм клапанів реалізує фізичне відкриття та закриття впускних і випускних отворів.



Рис. 7. Датчики та сенсори в системі електронного керування клапанами

Програма, яка моделює систему газообміну в двигуні внутрішнього згорання з електронним керуванням клапанами розроблена на мові програмування C#, за допомогою об'єктно-орієнтованого підходу через класи і методи:

1. **Sensor**: клас для представлення датчика. Має властивості **Name** для назви датчика і **Value** для його значення. Метод **UpdateValue** оновлює значення датчика.

2. **ElectromagneticActuator**: клас для представлення електромагнітного актуатора. Має властивість **ValveType** для типу клапана (впускний або випускний). Методи **OpenValve** та **CloseValve** відповідно відкривають та закривають клапан.

3. **EngineControlUnit**: клас, що представляє електронний блок керування (ECU). Ініціалізує всі необхідні датчики та актуатори. Метод **UpdateSensors** оновлює значення датчиків та викликає метод **ControlValves** для керування клапанами.

4. **ControlValves**: метод, що реалізує просту логіку керування клапанами на основі значень датчиків.

5. **Program**: головний клас програми, де створюється екземпляр **EngineControlUnit**, імітується оновлення даних з датчиків і викликаються методи керування клапанами.

Код програми складається з наступних основних компонентів:

1. Константи різних режимів подачі пального.

2. Головний метод **Main** починає виконання програми: містить нескінченний цикл за вибиранням режимом подачі пального або вихід з програми.

3. Метод **SetFuelInjection**, відповідає за встановлення кількості пального для обраного режиму і виведення відповідного повідомлення на екран.

4. Метод **DisplaySensorData** симулює зчитування даних з чотирьох датчиків і виводить їх на екран. Для генерації випадкових значень використовується клас **Random**.

Цей код є спрощеним прикладом, який показує основні концепції і взаємодії між компонентами системи. Вихідна версія програми включає чотири режими роботи двигуна, що відповідає обсягам подачі пального: 1, 2, 5, 10 мл/с. У реальній системі можуть бути більш складні алгоритми для керування клапанами на основі багатьох параметрів та умов.

Обговорення результатів досліджень

Високооборотним двигуном, якими є малопотужні ДВЗ, при максимальному навантаженні потрібні більші перекриття, випередження відкриття і запізнювання закриття клапанів, щоб впустити більшу кількість суміші за менший період часу. Одночасно, за великого перекриття клапанів виходять невисокі характеристики на низьких частотах обертання і мінімальних навантаженнях, оскільки частина об'єму горючої суміші залишає циліндр через випускний канал. В конструкції газорозподільного валу кулачки проектується за принципом – «золота середина», коли можна отримати гарний розподіл потужності в усьому діапазоні частот обертання, хоча в цьому разі ні «тяга на низах», ні висока максимальна потужність не буде характерною для двигуна.

В результаті моделювання роботи електронної газорозподільної системи для малопотужного високооборотного двигуна авторами досягнута керована

автоматизована робота імітаційним макетом клапанів ГРМ. Це дозволяє відійти від фіксованої розподільним валом системи зміни фаз газообміну, і автоматично змінювати налаштування двигуна в залежності від роботи на високих або низьких обертах.

Моделювання виконувалось для актуатора (Moving coil actuator) з рухомою котушкою, яка вміщена в постійне магнітне поле. Котушка від дії струму зазнає впливу сил Лапласа-Лоренца. Ця сила пропорційна прикладеному струму, тому ці актуатори є керованими. В електронний блок керування закладено логіку процесу газообміну для ДВЗ мовою програмування C#. Вхідна інформація подається з баз даних датчиків ДВЗ, а на виході отримуємо команди управління актуаторами.

Графічне моделювання процесів закриття та відкриття клапанів за розробленою програмою на мові C# доводить відповідність режимі до реальної зміни фаз газорозподілу в залежності від даних датчиків, що фіксують положення колінчастого валу, тиск у впускному колекторі, температуру двигуна та швидкість обертання колінчастого валу. Програма дозволяє управляти конфігурацію кривої відкриття та закриття клапанів і дає можливість змінювати її до форми прямокутника (див. рис. 4), коли клапан різко відкривається, утримується у відкритому стані, а потім різко закривається. При цьому, можна змінювати кути перекриття клапанів.

В разі впровадження система ГРМ під управлінням розробленої програми покращить ефективність згоряння палива, знизить його витрати та зменшить рівень викидів шкідливих речовин.

Малопотужні високооборотні двигуни, що є основою мобільних побутових генераторів розраховані на роботу в перехідних режимах. Але, режим холостого ходу або робота на низьких обертах – негативно впливають на їх екологічні показники. Застосування електронного управління ГРМ ДВЗ генератора зменшує забруднення міського довкілля.

Висновки

1. В дослідженні змодельована робота електронної системи керування пристроєм газорозподілу ДВЗ шляхом створення фізичної моделі, її апроксимації на віртуальну модель та розробки супровідного програмного забезпечення. Для процесу моделювання використано мову програмування C#, за допомогою об'єктно-орієнтованого підходу.

2. За комп'ютеризованою графічною оцінкою роботи електронного ГРМ отримано підтвердження, що програмне забезпечення на мові C# достовірно (зі ступеню швидкодії 0,97) відтворює процес роботи впускного та випускного клапанів для малопотужного ДВЗ.

3. Результати тестування розробленої моделі електронної газорозподільної системи для малопотужних двигунів внутрішнього згорання демонструють ідентичність з відомими теоріями оптимального проектування таких приводів.

Список літератури:

1. Клименко Л. П. Элементы электронных систем керування автомобільними двигунами / Л. П. Клименко, О. Ф. Прищепов, В. І. Андреев. — Миколаїв : Вид-во ЧДУ імені Петра Могили, 2013. — С. 62-63. — ISBN 978-966-336-289-2.
2. Low fuel consumption and low emissions / M. Pischger, W. Salber, F.V.D. Staay, H. Baumgarten, H. Kemper // *Electromechanical valvetrain in vehicle operation*. — Int. J. Autom. Technol. — 2000. — № 1. — P. 17–25.
3. Rebhan M. Two-stroke/four-stroke multicylinder gasoline engine for downsizing applications / Rebhan, M., Stokes, J. — MTZ Worldw, 2009, 70. — P. 40–45.
4. European Centers of Power : *Automotive Engineering International*. — 2004. — June. — P. 67.
5. Hoffman B. Fully Variable Valve actuation with electromagnetic Linear Motor / Hoffman, Bernhard // *SIA Conference on Variable Valve Actuation*. IFP Rueil. — 2006. — 30 November.
6. Cope D. Fully flexible electromagnetic valve actuator: design, modeling, and measurements / D. Cope, A. Wright // Paper Number 2008-01-1350.
7. Kim J. A new electromagnetic engine valve actuator with less energy consumption for variable valve timing / Kim J., Lieu Dennis K. // *Journal of Mechanical Science and Technology*. — 2007. — № 21. — P. 602–606.
8. Zhao J. A fully flexible valve actuation system for internal combustion engines // B.A.Sc., Tsinghua University. — 2007.
9. The Third Generation of Valvetrains – New Fully Variable Valve trains for Throttle-Free Load Control / R. Flierl, M. Kluting // *SAE Technical Paper Series*. — Paper 2000-01-1227. — 2000.
10. Hoffmann W. Iterative Learning Control for Soft Landing of Electromechanical Valve Actuator in Camless Engines / W. Hoffmann, K. Peterson, A. Stefanopoulou // *IEEE Transport Control System Technology*. — 2003. — Vol. 11. — № 2. — P. 174–184.
11. Renault Research : *Automotive Engineering International*. — 2000. — P. 114.
12. Stubbs A. Modeling and controller design of an electromagnetic engine valve / A. Stubbs, C. Tai, T. Tsao // *Proceedings of 2001 ACC*. — 2001. — P. 2890–2895.
13. Офіційний сайт SAE International [Електронний ресурс]: New powertrain enhancements from Valeo. — Режим доступу: <http://www.sae.org/mags/aei/AFTRM/1439>.
14. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности "Двигатели внутреннего сгорания" / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. — М.: Машиностроение, 1983. — 372 с.
15. Довбиш І. О. Силові установки та джерела енергії сучасних БПЛА / І. О. Довбиш та ін. // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. — Том 34 (73). — № 5. — 2023. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/04>.

Bibliography (transliterated):

1. Klymenko L.P., Pryschev O.F., Andrieiev V. I. (2013). *Elements of electronic control systems for automotive engines*» Mykolaiv [Elementy elektronnykh system keruvannya avtomobilnyy dvyhunamy], Petro Mohyla National University Publishing House, pp. 62-63, ISBN 978-966-336-289-2.
2. Pischger M., Salber W., Staay F.V.D., Baumgarten H., Kemper H. (2000). Low fuel consumption and low emissions, *Electromechanical valvetrain in vehicle operation*, Int. J. Autom. Technol. — 2000. — № 1. — P. 17–25.

- chanical valvetrain in vehicle operation. *Int. J. Autom. Technol.*, № 1. — pp. 17–25. 3. Rebhan M., Stokes J. (2009), Two-stroke/four-stroke multicylinder gasoline engine for downsizing applications, *MTZ Worldw.*, vol.70, pp. 40–45, <https://doi.org/10.1007/BF03226944/>. 4. (2004, June), *European Centers of Power : Automotive Engineering International*, P. 67. 5. Hoffman B. (2006), «Fully Variable Valve actuation with electromagnetic Linear Motor SIA», *Conference on Variable Valve Actuation. IFP Rueil*, 30 November. 6. Cope D., Wright A., Corcoran C.J., Pasch K. and Fischer D. (2008). *Fully Flexible Electromagnetic Valve Actuator: Design, Modeling, and Measurements*. SAE technical papers on CD-ROM/SAE technical paper series. <https://doi.org/10.4271/2008-01-1350>. 7. Kim J. and Lieu D.K. (2007). A new electromagnetic engine valve actuator with less energy consumption for variable valve timing. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 21(4), pp.602–606. <https://doi.org/10.1007/bf03026964>. 8. Zhao, J. and Seethaler, R.J. (2011). A Fully Flexible Valve Actuation System for Internal Combustion Engines. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16(2), pp.361–370. <https://doi.org/10.1109/tmech.2010.2043850>. 9. Flierl R. and M. Klüting (2000). *The Third Generation of Valvetrains - New Fully Variable Valvetrains for Throttle-Free Load Control*. SAE technical papers on CD-ROM/SAE technical paper series. <https://doi.org/10.4271/2000-01-1227>. 10. Hoffmann W., Peterson K. and Stefanopoulou A.G. (2003). Iterative learning control for soft landing of electromechanical valve actuator in camless engines. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 11(2), pp.174–184. <https://doi.org/10.1109/tcst.2003.809242>. 11. (2000). *Renault Research : Automotive Engineering International*, P. 114. 12. Chun Tai, Stubbs, A. and Tsu-Chin Tsao (2001). Modeling and controller design of an electromagnetic engine valve. *Proceedings of the 2001 American Control Conference*. (Cat. No.01CH37148), [online] pp.2890–2895 vol.4. <https://doi.org/10.1109/acc.2001.946339>. 13. Official site of SAE International [Electronic resource]: New powertrain enhancements from Valeo, Access mode: <http://www.sae.org/mags/aei/AFTRM/1439>. 14. A. S. Orlin, M. G. Kruglov (1983) *Internal combustion engines. Theory of piston and combined engines [Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teoriya porshnevnyh i kombinirovannyh dvigateley]*, M. : Mashinostroenie, 372 p. 15. Dovbysh I.O., Muraviov O.V., Galagan R.M., Bohdan H.A. and Momot A.S. (2023). *Power systems and energy sources of modern UAVS. Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, (5), pp.16–21. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/04>.

Надійшла до редакції 16.06.2025 р.

Клименко Леонід Павлович – доктор техн. наук, професор кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна, e-mail: rector@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3458-9453.

Прищепов Олег Федорович – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна, e-mail: priof@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9608-2703.

Андрєєв Вячеслав Іванович – канд. техн. наук, доцент, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна, e-mail: avi@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1143-8043.

Щесюк Олег Володимирович – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна, e-mail: taifun.kv@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1467-3751.

Сідєєв Микола Іванович – канд. техн. наук, доцент, в.о. завідувача кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна, e-mail: nikolay.sidelev@chmnu.edu.ua.

MODELLING THE OPERATION OF AN ELECTRONIC GAS DISTRIBUTION SYSTEM FOR LOW-POWER INTERNAL COMBUSTION ENGINES

L.P. Klymenko, O.F. Pryshchepov, V.I. Andrieiev, O.V. Shchesiuk, N.I. Sidelev

Electronic control units control the vast majority of internal combustion engine systems. In the future, the maximum automation of engines must necessarily include full self-acting control of gas exchange in the cylinders. An innovative idea for the design of the gas exchange mechanism is the electromagnetic drive of the camshafts. Such innovations are being actively studied in automotive engines, but there is little information about their application to low-power internal combustion engines, which are basic for small mechanization and, in wartime, sometimes have a dual purpose. The physical model considered by the authors assumes that, instead of a camshaft, very fast electromagnetic actuators at the command of an electronic control unit control the opening and closing of the valves. The input to the unit comes from sensors and transducers that monitor the crankshaft position, intake manifold pressure, engine temperature and crankshaft speed. The output is used to control the position of the intake and exhaust valves. The technology allows you to change the valve opening and closing moments relative to the engine's dead points and operating cycles, influence the duration of the open and closed valve states, vary the valve overlap time (simultaneous open state), perform a stroke-by-stroke phase shift, etc. The C# programming language was used for modelling the gas exchange system in low-power internal combustion engines with electronic valve control using an object-oriented approach. The results of the model presented in the article are in agreement with the data of recent open publications. The study was carried out on prototypes created by an experimental selection of operating parameters. The system requirements for the power supply of the electronic control unit are quite low - it is possible to operate from a 12 V electrical network. The research has demonstrated that the drive achieves the desired power, play and performance requirements.

Keywords: internal combustion engines; gas distribution system; gas exchange phases; electronic valve control system; actuator; modeling; engine weight; fuel economy; environmental friendliness.