

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656:338

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.213-222](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.213-222)

Д. В. Голуб, доц., канд. техн. наук, В. В. Аулін, проф., д-р техн. наук
Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: Dimchik529@gmail.com, AulinVV@gmail.com

Удосконалення управління мехатронною системою впорскування двигуна внутрішнього згорання автомобіля

Проаналізовано сучасні методи та технічні рішення, що використовуються в мехатронних системах впорскування паливо-повітряної суміші, з метою зменшення токсичності викидів, покращення динамічних характеристик та економічності роботи двигуна внутрішнього згорання автомобіля. Розглянуто сильні та слабкі сторони резонансного, механічного й газотурбінного підходів до наддуву.

Приділено увагу імпульсному способу наддуву з використанням повітряно-тактових клапанів, який досі не застосовувався в двигунах внутрішнього згорання та зроблено припущення що система впорскування, оснащена пристроєм імпульсного наддуву з повітряно-тактовими клапанами, здатна для існуючих конструкцій бензинових і дизельних двигунів внутрішнього згорання знизити витрату пального, зменшити вміст шкідливих речовин у вихлопних газах і підвищити крутний момент у діапазонах низьких і середніх частот обертання.

Розроблено інтегровану математичну модель, яка об'єднує електричні та механічні компоненти, забезпечує можливість чисельного аналізу динамічних властивостей електромагнітного приводу, а також моделювання керованого об'єкта під час створення методів і алгоритмів роботи системи управління.

Розроблено метод керування швидкодіючим електромагнітним механізмом резонансного типу, який дозволяє забезпечити мінімальну швидкість посадки якоря під заданий час перемикання, навіть за умов зовнішніх збурюючих впливів. Запропоновано варіант створення адаптивної системи керування таким механізмом без використання спеціалізованих датчиків для визначення положення та швидкості виконавчого органу. Особливістю підходу є те, що регулювання кінцевої швидкості посадки якоря здійснюється на основі аналізу характеристик струму та напруги обмоток керування електромагнітним механізмом. Представлено методику визначення початкових параметрів для налаштування алгоритму керування електромагнітом.

мехатронний привід, управління, двигун внутрішнього згорання, система впорскування, структурна схема, електромагнітний механізм, повітряно-тактовий клапан

Постановка проблеми. Автомобільна промисловість є однією з провідних і динамічно розвиваючихся галузей, у якій різні пристрої зі жорстким кінематичним зв'язком поступово замінюються новітніми електронно-керованими системами [1-5]. Цей розвиток відбувається в умовах стрімкого зростання цін на паливно-мастильні матеріали (ПММ) та посилення екологічних проблем, спричинених шкідливими вихлопними газами. Така ситуація стимулює пошук шляхів зниження токсичності та підвищення економічної ефективності роботи двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) автомобілів. У відповідь на ці виклики розробники ДВЗ постійно вдосконалюють ключові елементи двигуна, зокрема газорозподільний механізм, впускний тракт паливної системи та систему відводу відпрацьованих газів. Одним із перспективних підходів до зменшення споживання палива та зниження викидів шкідливих речовин, при цьому суттєво підвищуючи потужність двигуна, є оптимізація складу і швидкості подачі паливно-повітряної суміші. Це досягається за допомогою впровадження електромагнітного впускного повітряно-тактового клапану (ПТК) [7]. Така технологія базується на створенні хвильових ефектів у системі впорскування завдяки швидкому відкриванню та закриванню впускного каналу ПТК під час такту впорскування. Для

цього в кожному циліндрі обладнується спеціальний клапан, яким управляє високошвидкісний електромагніт. З точки зору енергоефективності та динаміки роботи, найбільш перспективними для таких систем є електромагнітні механізми (ЕММ) резонансного типу управління. Вони утворюють разом із пристроєм складну мехатронну систему, здатну забезпечити високу продуктивність і точність роботи [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попри великий обсяг науково-технічних публікацій, залишаються невирішеними завдання створення високонадійних і швидкодіючих мехатронних приводів із заданими статичними та динамічними характеристиками, які водночас відповідають вимогам мінімізації масогабаритних параметрів автомобільних систем [2-8]. Найоптимальнішим підходом для досягнення необхідної динаміки електромагнітів в автомобілях із суттєвими масогабаритними обмеженнями є впровадження спеціалізованих мехатронних систем управління [9]. Аналіз існуючих систем та методів управління резонансними електромагнітами демонструє залежність від використання спеціалізованих датчиків, таких як датчики положення, швидкості чи магнітного потоку, що значно ускладнює конструкцію, підвищує її вагу, габарити й вартість, а також негативно позначається на надійності та ефективності роботи системи [5, 7, 9, 10]. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні нових рішень та методів управління швидкодіючими електромагнітними механізмами резонансного типу, які здатні забезпечувати мінімальну швидкість посадки впускного клапана автомобіля в обмежений час перемикання без застосування спеціалізованих датчиків виконавчого органу, навіть за умов зовнішніх впливів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є удосконалення мехатронного приводу управління електромагнітним впускним клапаном автомобільного двигуна внутрішнього згорання, що забезпечує мінімальну швидкість його посадки при заданому часі спрацювання в умовах зовнішніх збурюючих впливів.

Виклад основного матеріалу.

Привід ПТК ДВЗ повинен працювати при частоті обертання двигуна до 3000 об/хв. При великих частотах повітряно-тактовий клапан повинен знаходитися у відкритому стані. Привід ПТК ДВЗ повинен забезпечувати відкриття, закриття та фіксацію клапана в одному з крайніх положень. Час перемикання клапана t_3 має бути менше 4 мс. Для зниження акустичного шуму кінцева швидкість посадки рухливої частини електромагнітного приводу повинна знаходитися в діапазоні $v_3=0,2...0,4$ м/с [8].

Встановлено, що переважні характеристики, з точки зору швидкодії, енергоспоживання і масогабаритних показників, мають ЕММ резонансного типу, в яких малий час спрацювання досягається за рахунок накопиченої кінетичної енергії пружин. При цьому електромагнітні сили потрібні для утримання якоря в крайніх положеннях і компенсації сил протидії (рис.1, 2).

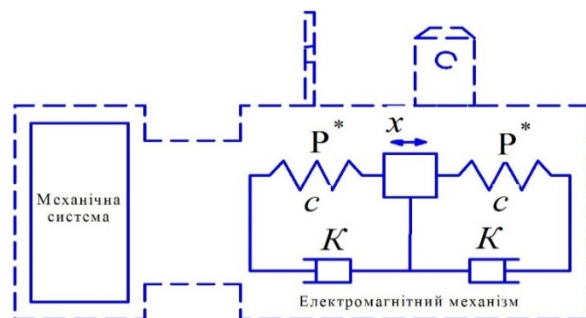
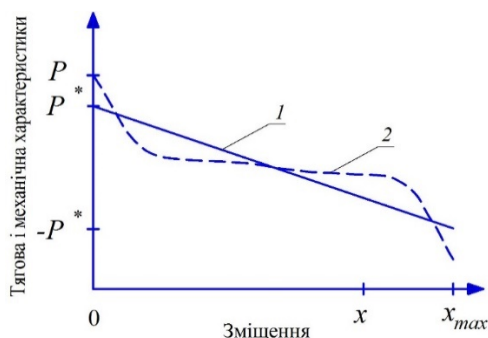


Рисунок 1 - Схема механічної системи та електромагнітного механізму

Джерело: розроблено авторами

ЕММ поворотно-обертальної дії з відповідною конфігурацією магнітопроводу може складатися з одного електромагніту і торсійної пружини. Перемикання з одного

стану в інший здійснюється за допомогою подання імпульсів напруги на обмотки відповідно до власної частоти коливальної системи ЕММ.

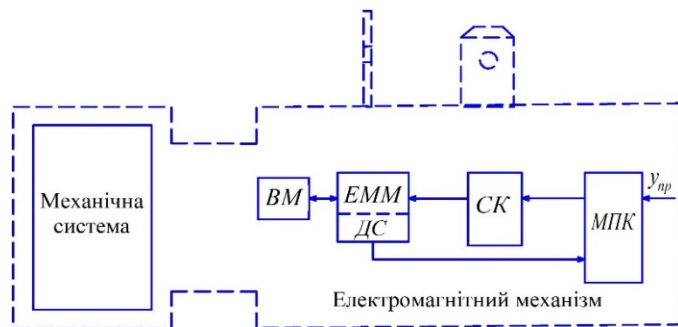


1 - пружина; 2 - електромагнітний механізм

Рисунок 2 - Тягова P і механічна P^* характеристики електромагнітного механізму резонансного типу
Джерело: розроблено авторами

Для забезпечення потрібних динамічних характеристик та утримання якоря в крайніх положеннях в швидкодіючих електромагнітних приводах (ЕМП) резонансного типу використовуються спеціалізовані пристрої управління. Ці пристрої в реальному часі визначають стан виконавчого органу приводу і формують керуючі впливи на обмотки ЕММ [7, 9].

Після огляду та аналізу силових схем управління було обрано схему силового перетворювача, яка дозволяє підвищити енергетичні показники споживання ЕМП з мережі шляхом використання індуктивної енергії обмоток ЕММ. Під час огляду та аналізу методів керування швидкодіючими ЕМП було виявлено, що для досягнення потрібних характеристик в умовах зовнішнього впливу необхідно використовувати спеціалізовані датчики (положення, швидкості, магнітного потоку тощо). Це призводить до ускладнення системи, збільшення розмірних і вартісних показників та зниження надійності системи в цілому. Зважаючи на це, дослідження в даній предметній області потребують подальшого розвитку шляхом створення нових методів управління ЕМП (рис. 3) резонансного типу.



МПК - мікропроцесорний контролер, СК - силовий комутатор, ЕММ - електромагнітний механізм,
ДС - датчики стану, ВМ - виконавчий механізм

Рисунок 3 - Структурна схема мехатронного ЕМП автомобіля

Джерело: розроблено авторами

Ці методи мають забезпечувати мінімальну швидкість посадки клапана за заданий час перемикання без використання спеціалізованих датчиків положення і швидкості виконавчого органу ЕМП в умовах зовнішніх збурюючих впливів, що дозволяють використати єдиний підхід до управління, незалежно від модифікацій його конструкцій.

Вирішення цих завдань вимагає створення математичного апарату для представлення електромеханічних процесів в ЕМП, теплових і електричних процесів в

системі управління і об'єднання їх в єдину модель із-за високої міри і взаємного впливу. Структурна схема математичної моделі, що реалізує управління електромагнітним приводом із заданими динамічними параметрами, приведена на рис. 4.

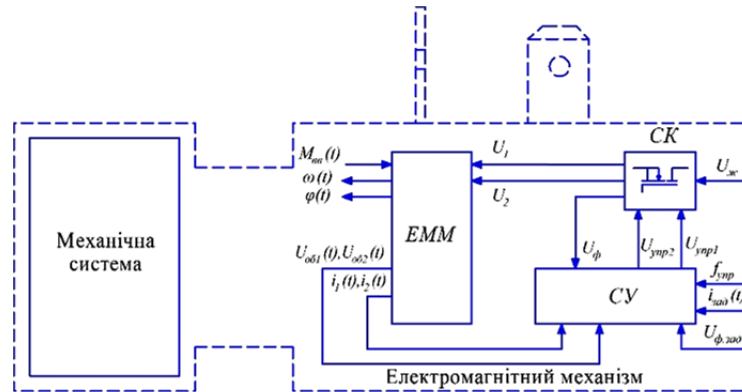


Рисунок 4 - Структурна схема комплексної математичної моделі ЕМП спільно з системою управління
Джерело: розроблено авторами

Вхідними даними мехатронної системи управління є: напруга живлення $U_{жс}$; сигнал управління режимом роботи приводу f_{ynp} ; задана функція зміни струму в обмотці управління від часу перемикання $i_{зад}(t)$; значення напруги форсованого включення приводу U_{ϕ} .

Мехатронна система управління формує сигнали управління U_{ynp1} , U_{ynp2} силовим комутатором в залежності від сигналу управління приводом і його поточного стану. Внаслідок чого подаються сформовані рівні напруги управління приводом U_1 , U_2 на входи відповідних обмоток ЕМП, з виходу перетворювача. В результаті дії прикладеної до обмотки управління напруги відбувається рух якоря електромагніту і на виході блоку формуються миттєві значення струмів в кожній обмотці $i_1(t)$, $i_2(t)$, які є параметрами зворотного зв'язку регулятора.

Математична модель ЕМП являє собою систему звичайних диференціальних (1)-(4) і алгебраїчних (5)-(8) рівнянь та сукупності функцій.

$$U_1(t) = i_1(t) \cdot R_0(1 + \alpha_t \cdot T_1) + \frac{df_{ynp}(i_1, \varphi)}{dt}; \quad (1)$$

$$U_2(t) = i_2(t) \cdot R_0(1 + \alpha_t \cdot T_2) + \frac{df_{ynp}(i_2, \varphi)}{dt}; \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{I} (M_{iM1} - M_{iM2} - M_{oM1} - M_{mp} - M_{op} \pm M_{num}); \quad (3)$$

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}; \quad (4)$$

$$M_{op} = c_{np} \cdot \varphi; \quad (5)$$

$$c_k = \frac{\pi D^4}{32 \cdot l \cdot G(T)}; \quad (6)$$

$$M_{mp} = b_1 + b_2 \cdot (b_3 \cdot \omega)^{\frac{2}{3}}; \quad (7)$$

$$M_{num} = \begin{cases} \frac{I \cdot \omega_0}{t_{num}} \cdot k_{on} \text{ при } |\varphi| = \varphi_{max} ; \\ 0, \text{ при } \varphi_{min} < \varphi < \varphi_{max} \end{cases} ; \quad (8)$$

$$M_{op} = f(t); \quad (9)$$

$$M_{EM1} = f(i_1, \varphi); \quad (10)$$

$$M_{EM2} = f(i_2, \varphi); \quad (11)$$

$$U_1(t) = f(U_{ynp1}(t)); \quad (12)$$

$$U_2(t) = f(U_{ynp2}(t)); \quad (13)$$

$$f_{ynp}(t) = \begin{cases} U_{ynp1}(t) = f(i_1, U_2, U_\varphi, i_3, t), U_{ynp2}(t) = f(t), \text{ при } f_{ynp} = \text{"Пуск"}, \\ U_{ynp1}(t) = f(i_1, U_2, U_\varphi, i_3, t), U_{ynp2}(t) = 0, \text{ при } f_{ynp} = \text{"Відкрити"}, \\ U_{ynp2}(t) = f(i_2, U_1, U_\varphi, i_3, t), U_{ynp1}(t) = 0, \text{ при } f_{ynp} = \text{"Закрити"}, \end{cases} \quad (14)$$

де M_{EM1}, M_{EM2} - електромагнітні моменти;

M_{op} - момент опору руху;

M_{onn} - момент опору протидіючої пружини;

M_K - момент контактної взаємодії;

k_{op} - коефіцієнт опору руху;

c_{np} - жорсткість пружин;

c_k - контактна жорсткість;

d_{dk} - коефіцієнт демпфування в контакті;

φ - повітряний проміжок;

$\varphi_{max}, \varphi_{min}$ - максимальний і мінімальний повітряні проміжки;

ω - кутова швидкість;

J - момент інерції;

G - модуль зсуву.

Модель генератора збурюючих впливів та параметр температури довкілля враховує вплив зовнішніх факторів на систему. Математична модель описує процеси в електромагніті та пристроях управління, де час є незалежною змінною, постійно змінюючись. Сімейства статичних характеристик потокозчеплення обмоток і електромагнітного моменту $M(i, \varphi)$ визначаються з рішення задачі розрахунку електромагнітного поля методом кінцевих елементів, для діапазону значень струму і кута повороту якоря.

ЕМП зворотно-поступальної дії, в основі якого закладений принцип пружинно-маятникової механічної системи, в ідеальному випадку повинен забезпечувати кінцеву швидкість $\omega_k = 0$ і час перемикавання, що дорівнює половині періоду власної частоти

$t = \pi \sqrt{\frac{J}{c}}$. В реальних умовах, для компенсації протидіючих моментів і збурюючих впливів, необхідно формувати форму струму $i(t)$ в обмотці ЕММ, щоб забезпечити електромагнітний момент $M_{el}(\varphi) \geq M_{np_o}(\varphi)$, де $M_{np_o}(\varphi)$ - протидіючий момент сил опору (рис. 5).

Закон зміни струму $i(t)$ (рис. 6) призначений для досягнення бажаної динаміки перемикавання ЕМП, враховуючи розрахункові умови, але не враховуючи вплив таких факторів, як технологічні відхилення в параметрах електромагнітного поля, зміни умов експлуатації, зміни моменту опору об'єкта управління тощо.

Для ефективного перемикавання з мінімальною кінцевою швидкістю анкера, необхідно, щоб система управління враховувала зміни зовнішніх сил, які впливають на виконавчий орган приводу, а також коригувала параметри сигналу управління в

залежності від змін температури довкілля та приводу, що впливають на жорсткість пружинної системи.

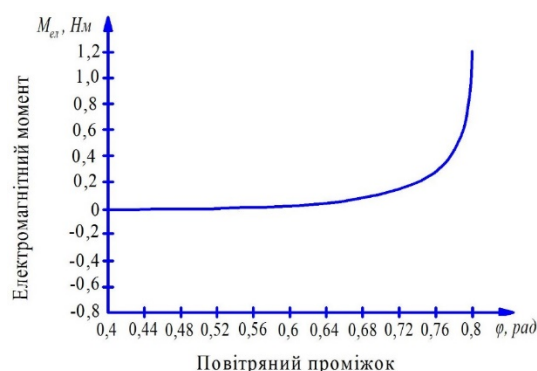


Рисунок 5 - Залежність електромагнітного моменту від кута повороту якоря електромагнітного механізму

Джерело: розроблено авторами

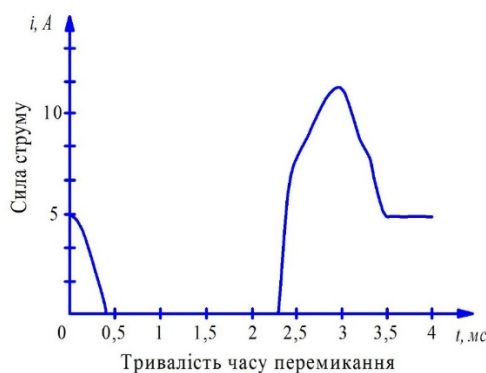


Рисунок 6 - Залежність електромагнітної сили від часу

Джерело: розроблено авторами

Аналіз результатів математичного моделювання процесів перемикання дав можливість запропонувати метод управління, який дозволяє побічно визначати просторове положення і величину кінцевої швидкості якоря у момент підходу до полюса в режимі реального часу за характером зміни струму в обмотках, напрузі на них та впливати на швидкість якоря у кінці ходу, що враховує вплив зовнішніх дестабілізуючих чинників.

Запропонований метод заснований на взаємозв'язку електричних процесів, що відбуваються в обмотці електромагнітного приводу з механічними процесами, які обумовлені рухом рухомого елемента магнітної системи та відповідають рівнянню для електричного ланцюга ЕММ:

$$U(t) = i(t)R + \frac{df(i, \varphi)}{dt}. \quad (15)$$

При русі якоря виникає електрорушійна сила (ЕРС) самоіндукції, обумовлена зміною струму в обмотці і проти-ЕРС руху, пов'язана зі зміною робочого повітряного проміжку:

$$U(t) = i(t)R + \frac{df(i, \varphi)}{di} \frac{di}{dt} + \frac{df(i, \varphi)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt}. \quad (16)$$

За умов обмеженої максимальної потужності джерела живлення $U_{max}(t)$ виникає зниження струму в обмотці електромагнітного механізму, спричинене рухом якоря. Таке падіння струму дозволяє непрямо оцінити швидкість руху якоря наприкінці його

ходу та може слугувати основою для коригування параметрів процесу в наступному циклі переміщення.

Для регулювання швидкості якоря в межах поточного циклу переміщення запропоновано метод управління, який передбачає створення в обмотці управління електромагнітного механізму такої форми струму (див. рис. 7), що розрахована для режиму навантаження моментом електромагнітного приводу, який відповідає максимальному значенню, здатному забезпечити задані динамічні характеристики.

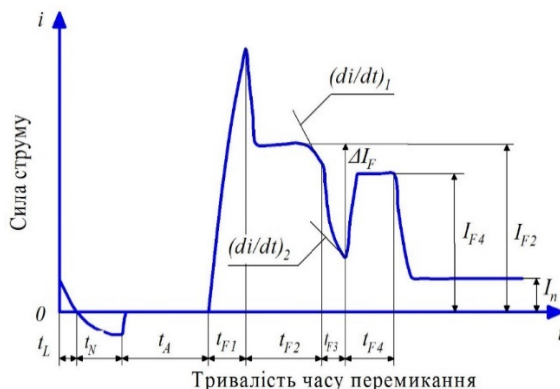


Рисунок 7 - Характер графічного відображення залежності сили струму від часу

Джерело: розроблено авторами

Струм в обмотці ЕММ $i(t)$ (рис. 7) може бути представлений наступними фазами: рушання t_a , некерований рух t_A , форсоване включення t_{F1} , контроль енергії руху якоря t_{F2} , підхід якоря до полюса t_{F3} , підхоплення і утримання якоря t_{F4} . На ділянці t_{F2} струм в обмотці ЕМ $i(t) = I_{F2} = const$, тоді у відповідності з виразом (3) для енергетичного балансу:

$$iU(t)dt = i^2(t)R + i \frac{df(i, \varphi)}{d\varphi} dx, \quad (4)$$

де $i \frac{df(i, \varphi)}{d\varphi} dx$ - енергія руху якоря ЕММ, що викликає зміну похідної струму в

ланцюзі обмотки $\left(\frac{di}{dt}\right)_1$ за умови обмеженої вихідної потужності джерела струму.

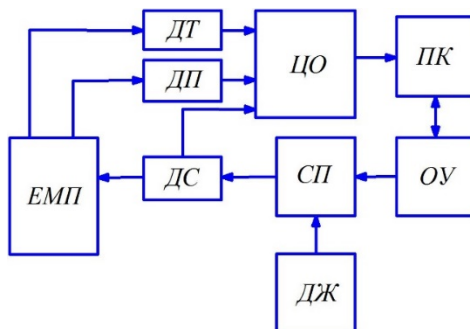
Відстежуючи момент часу $t\left(\frac{di}{dt}\right)_1$ проводиться відключення струму в обмотці і її шунтування. При цьому рівняння електричного ланцюга набирає вигляду:

$$0 = i(t)R + \frac{df(i, \varphi)}{di} \frac{di}{dt} + \frac{df(i, \varphi)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt}. \quad (5)$$

За величиною першої похідної струму за часом визначається момент часу підходу якоря до полюса електромагніту $\left(\frac{di}{dt}\right)_2$, після чого, в обмотці формується струм підхоплення I_{F4} і утримання I_h якоря в кінцевому положенні.

На основі запропонованого методу управління за характером струму в обмотці ЕММ та розробленого програмно-апаратного комплексу (рис. 8) отримані результати показали, що він дозволяє забезпечити необхідну швидкість посадки якоря ЕММ при дії зовнішніх збурюючих впливів і без використання спеціалізованих датчиків положення і швидкості виконавчого органу приводу.

Програмно-апаратний комплекс забезпечує реєстрацію залежностей ходу якоря від часу, залежності швидкості переміщення якоря від часу, процесу зміни струму і напруги в обмотці.



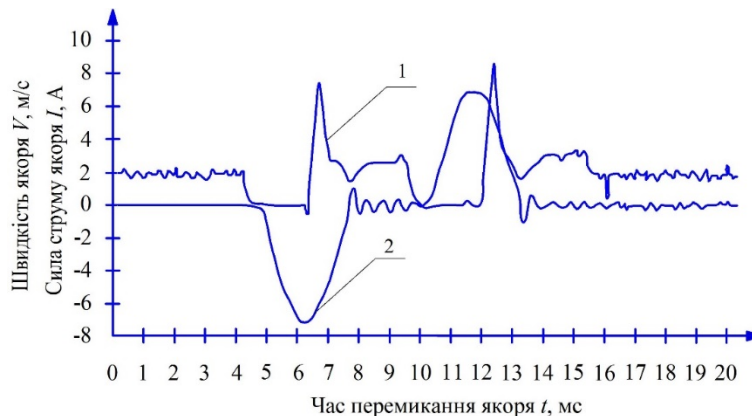
ДЖ - джерело живлення, ОУ - обладнання управління, СП - силовий перетворювач, ДС - датчик струму, ЕМП - електромагнітний привід, ПК - персональний комп'ютер, ДП - датчик положення, ДШ - датчик швидкості, ЦО - цифровий осцилограф

Рисунок 8 - Структурно-функціональна схема програмно-апаратного комплексу визначення початкових параметрів струмової характеристики управління ЕМП

Джерело: розроблено авторами

Основними елементами комплексу є випробувальний стенд на базі чотирьох циліндрового ДВЗ HYUNDAI 1,6 L 120л.с., персональний комп'ютер (ПК), лазерна установка вимірювання лінійної швидкості і переміщення Politec CLV-2534, цифровий осцилограф YOKOGAWA DL7440, джерело живлення Д40-40-01Ц.

Експериментальні характеристики ЕМП ПТК із застосуванням бездатчикового способу управління при дослідженні у складі ДВЗ в діапазоні частот обертання 700-3000 об/хв. показали, що швидкість посадки якоря не перевищує заданої 0,42 м/с (рис. 9), час перемикання складає 3,76 мс і варіюється в діапазоні від 3,22 до 4,2 мс.



1 - струм якоря ЕМП ПТК I , А; 2 - швидкість якоря ЕМП ПТК V , м/с

Рисунок 9 - Осцилограми струму і швидкості якоря електромагнітного привіду повітряно-тактового клапану

Джерело: розроблено авторами

Зважаючи на неможливість практичної реалізації нульового значення струмового коридору, а так само впливом модуля формування форсованої напруги на постійну часу ланцюга розсіяння енергії, що запасена в обмотці ЕММ була виявлена нестабільність часу рушання якоря $\Delta t_{руш} = 0 \div 500$ мкс при незмінних значеннях температури ЕМП, струму утримання і перепаду тиску на клапані, що пояснюється неточністю виготовлення контактних поверхонь полюс-якір і принципом формування струму утримання.

Встановлено, що формування негативного імпульсу напруги на відпускаючій обмотці ЕММ дозволяє стабілізувати зміну часу рушання $\Delta t_{руш} = 0 \div 50$ мкс.

У процесі дослідження ЕМП ПТК ДВЗ було виконано завдання перевірки достовірності математичних моделей, які застосовуються для аналізу динамічних характеристик приводів. Для цього використовувався метод управління, заснований на аналізі струмів і напруги обмоток. Точність результатів оцінювалася шляхом порівняння розрахункових і експериментальних даних із визначенням абсолютних та відносних похибок. Результати перевірки достовірності створеної математичної моделі свідчать про можливість її застосування для визначення початкових параметрів керуючих сигналів у методі управління мехатронним електромагнітним приводом резонансного типу без використання датчиків для вимірювання положення та швидкості.

Висновки.

1. Запропоновано метод управління електромагнітним приводом клапану резонансного типу автомобільного двигуна внутрішнього згорання без використання спеціальних датчиків положення і швидкості, що здатен забезпечити меншу кінцеву швидкість його посадки в умовах зовнішніх збурюючих впливів при заданому часі спрацьовування.

2. Розроблено підхід до визначення початкових параметрів характеристики струму управління електромагнітним приводом повітряно-тактового клапану автомобільного двигуна внутрішнього згорання для здійснення первинного налаштування регулятора системи управління та створено алгоритм їх визначення.

3. Розроблено математичні моделі і алгоритми для обчислення статичних і динамічних параметрів мехатронного приводу повітряно-тактового клапану автомобільного двигуна внутрішнього згорання з інтегрованими моделями керованого силового перетворювача і системи управління, що дозволяють скоротити час на налаштування пристрою управління в реальних умовах тп підтверджена їх адекватність.

4. На основі отриманих результатів досліджень удосконалено мехатронний привід повітряно-тактового клапану автомобільного двигуна внутрішнього згорання з системою управління, стендові випробування яких засвідчили збільшення тиску в циліндрі, після закінчення фази впорскування, більш ніж на 20,3 %.

5. Забезпечено зниження споживання потужності за період перемикання мехатронного приводу повітряно-тактового клапану автомобільного двигуна внутрішнього згорання на 24,1 % за рахунок оптимізації його силової схеми управління, що дозволила стабілізувати час руху якоря в межах $0,1 \pm 10\%$ мс.

Список літератури

1. Аулін В.В., Голуб Д.В., Агапоненко М.І. Розробка критерію вдосконалення системи технічної експлуатації засобів транспорту з врахуванням необхідної діагностичної інформації. Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". 2018. №62. С.17-20.
2. Аулін В.В., Голуб Д.В. Обґрунтування механізму функціонування мехатронної системи склоочиснення автомобіля. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. Вип. 7(38). Ч.1 С. 167-176.
3. Аулін В.В., Голуб Д.В., Замуренко А.С. Розробка математичної моделі мехатронного модуля системи рульового управління вантажних автомобілів. Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем: V Міжнар. наук.-практ. конф., 19-21 квіт. 2023 р., м. Кропивницький : матеріали конф. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. С. 9-11.
4. Голуб Д.В., Аулін В.В. Математична модель підвищення якості управління мехатронною системою мікроклімату салону автомобіля. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Вип. 9(40). Ч.2, 2024. С. 186-197.
5. Мигаль В. Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія. Харків: Майдан, 2018. 262 с.
6. Павленко Т. П., Шавкун В. М., Козлова О. С. та ін. Сучасні електромехатронні комплекси і системи: навч. посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 116 с.
7. Gogola R., Kósa A. Electronic control of fuel mixture preparation and injection in internal combustion engines. American journal of mechanical engineering, 2014, Vol. 2, No. 7. P. 231-238.
8. William Bolton. Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering. Harlow:

- Pearson, 2015. 663 p.
9. Tutaj J., Fijałkowski B. A new fuel-injection mechatronic control method for direct-injection internal combustion engines. *Acta mechanica et automatica*, Vol. 12, No. 4, 2018. P. 276-280.
 10. Kortam M. Development of a mechatronic control system for a mechanical fuel injection system of a four cylinder automotive diesel engine. *Advances in Automobile Engineering*, Vol. 7, 2018. P. 2-9.

References

1. Aulin, V. V., Holub, D. V., & Ahaponenko, M. I. (2018). Development of criteria for improving the technical maintenance system of vehicles considering necessary diagnostic information. *Mizhvuzivskyi zbirnyk "Naukovi notatky"*, (62), 17–20 [in Ukrainian].
2. Aulin, V. V., & Holub, D. V. (2023). Substantiation of the operational mechanism of the automotive windshield mechatronic system. *Tsentralkoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 7(38), Part 1, 167–176 [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., Holub, D. V., & Zamurenko, A. S. (2023). Development of a mathematical model of a mechatronic steering module for trucks. In *Improving reliability and efficiency of machines, processes, and systems: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*, April 19–21, 2023 (pp. 9–11). Kropyvnytskyi: CNTU [in Ukrainian].
4. Holub, D. V., & Aulin, V. V. (2024). Mathematical model for improving control quality of the automotive cabin microclimate mechatronic system. *Tsentralkoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 9(40), Part 2, 186–197 [in Ukrainian].
5. Myhal, V. D. (2018). *Intelligent systems in automotive maintenance [Monograph]*. Kharkiv: Maidan [in Ukrainian].
6. Pavlenko, T. P., Shavkun, V. M., Kozlova, O. S., et al. (2019). *Modern electromechatronic complexes and systems [Textbook]*. Kharkiv: O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv [in Ukrainian].
7. Gogola, R., & Kósa, A. (2014). Electronic control of fuel mixture preparation and injection in internal combustion engines. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2(7), 231–238.
8. Bolton, W. (2015). *Mechatronics: Electronic control systems in mechanical and electrical engineering*. Harlow: Pearson.
9. Tutaj, J., & Fijałkowski, B. (2018). A new fuel-injection mechatronic control method for direct-injection internal combustion engines. *Acta Mechanica et Automatica*, 12(4), 276–280.
10. Kortam, M. (2018). Development of a mechatronic control system for a mechanical fuel injection system of a four-cylinder automotive diesel engine. *Advances in Automobile Engineering*, 7, 2–9.

Dmytro Holub, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Viktor Aulin**, Prof., DSc.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improvement of Control of the Mechatronic System of Injection of the Internal Combustion Engine of the Car

Modern methods and technical solutions used in mechatronic fuel-air injection systems are analyzed to reduce emissions, improve dynamic characteristics and efficiency of the internal combustion engine of a car. The strengths and weaknesses of resonant, mechanical and gas turbine approaches to supercharging are considered.

Attention is paid to the pulsed method of supercharging using air-cycle valves, which has not yet been used in internal combustion engines and it is assumed that an injection system equipped with a pulse supercharging device with air-cycle valves is capable of reducing fuel consumption, reducing the content of harmful substances in exhaust gases, and increasing torque in the low and medium speed ranges for existing designs of gasoline and diesel internal combustion engines.

An integrated mathematical model has been developed that combines electrical and mechanical components, provides the possibility of numerical analysis of the dynamic properties of the electromagnetic drive, as well as modeling of the controlled object when creating methods and algorithms for the operation of the control system.

A method of controlling a high-speed electromagnetic mechanism of the resonant type has been developed, which allows ensuring the minimum anchor landing speed at a given switching time, even under conditions of external disturbing influences. A variant of creating an adaptive control system for such a mechanism without using specialized sensors to determine the position and speed of the executive body has been proposed. A feature of the approach is that the final anchor landing speed is regulated based on the analysis of the current and voltage characteristics of the electromagnetic mechanism control windings. A method for determining the initial parameters for tuning the electromagnet control algorithm is presented.

mechatronic drive, control, internal combustion engine, injection system, electromagnetic mechanism, air-stroke valve, structural diagram

Одержано (Received) 17.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 19.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 21.03.2025