

# МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

---

УДК 621.43

С.В. Зайченко, д.т.н., професор, ORCID 0000-0002-8446-5408  
С.В. Король, кандидат технічних наук, ORCID 0000-0003-6521-6322  
Д.Г. Дерев'янку, доцент, к.т.н., ORCID 0000-0003-4963-2490  
В.П. Опришко, доцент, к.т.н., ORCID 0000-0003-4963-2490  
Н.І. Жукова, старший викладач, ORCID 0000-0002-4215-6981  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО УПРАВЛІННЯ ГАЗОРОЗПОДІЛОМ ГЕНЕРАТОРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З ДВИГУНОМ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

Використання генераторів при різному рівні навантаження дозволяє використовувати частину номінальної потужності двигунів шляхом зменшення частоти обертання двигуна внутрішнього згорання, таким чином зменшувати витрату палива і підвищити загальний коефіцієнт корисної дії системи в цілому. Однак слід зазначити, що оптимальна робота двигуна внутрішнього згорання при фіксованих параметрах газорозподілу можлива лише при певній частоті обертання двигуна. Зменшення частоти обертання двигуна призводить до погіршення його наповнення паливо-повітряною сумішшю і випуску відпрацьованих газів двигуна, що супроводжується впусканням вихлопних газів у впускний колектор і викиду частини горючої суміші в вихлопну трубу. У роботі представлено результати дослідження параметрів генераторів і загальна концепція створення системи управління автономним джерелом живлення на базі двигуна внутрішнього згорання, з метою зменшення питомих показників генерації електричної енергії. Експериментально доведена доцільність регулювання рівня потужності двигуна внутрішнього згорання. Для досягнення мети запропоновано регулювання кутів відкриття і закриття двигуна внутрішнього згорання електромагнітним клапаном. Застосування даної системи дозволяє зменшити питомі витрати більше ніж в 4 рази при генерації електричної енергії з низьким рівнем навантаження генератора. На основі діаграми фазового газорозподілу ДВС запропоновано залежність зміни кутів відкриття і закриття впускного і випускного клапанів від потужності автономного джерела енергії.

**Ключові слова:** автономне джерело енергії, коефіцієнт корисної дії, система газорозподілу, електромагнітний клапан

### Вступ

Сучасний етап розвитку енергетичної безпеки характеризується широким застосуванням альтернативних та відновлюваних джерел енергії. Такі системи в цілому є складними за своєю структурою і мають високу питому вартість електричної енергії. Доступність відновлюваних джерел енергії дозволяє використовувати їх як автономні, проте ефективність і надійність повністю залежить від циркадних ритмів і сезону. Вказані особливості суттєво обмежують застосування альтернативних джерел енергії у якості надійного автономного джерела живлення електричною енергією [1, 2]. Наявність надійного резервного джерела живлення електричною енергією на сучасному підприємстві є запорукою безпечної і якісної роботи.

Єдиним надійним і економічно ефективним рішенням резервування джерел живлення залишаються

© С.В. Зайченко, С.В. Король, Д.Г. Дерев'янку, В.П. Опришко, Н.І. Жукова, 2021

---

енергетичні установки на базі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ). Використання даного типу обладнання для генерації електричної енергії військовими та судовими енергетичними установками є свідченням його найвищої надійності і безпечності серед можливих варіантів автономного живлення [3].

Проте слід відзначити, що оптимальна робота двигуна внутрішнього згорання можлива при певній частоті обертання двигуна [4]. Це видно з діаграм ККД двигуна внутрішнього згорання, які мають куполоподібну форму з максимумом в точці 2500-3500 об/хв в залежності від конструкції. Зменшення частоти обертання двигуна призводить до погіршення наповнення паливо-повітряною сумішшю і випуску відпрацьованих газів двигуна, що супроводжується впуском вихлопних газів у впускний колектор і викиду частини горючої суміші в вихлопну трубу. Енергетичні втрати при виникненні даних ефектів можуть сягати до 20%, що суттєво знижує ефект використання інвертора при генерації електричної енергії.

Серед широкого асортименту автономних генераторів, авторами було приділено увагу генеруючим установкам на базі одноциліндрового бензинового чотирьох тактного двигуна внутрішнього згорання з орієнтовним об'ємом двигуна 180–220 см<sup>3</sup>. Вибір об'єкта дослідження було визначено з проведеного аналізу існуючого попиту генераторів і власною практикою, що обумовлено відносно низькою вартістю генеруючої установки порівняно з дизельними генераторами і мінімально необхідної потужності для роботи потужних побутових приладів, яка в середньому становить 2,2 кВт. Слід відзначити, що найбільш поширеним автономним джерелом електричної енергії залишаються синхронні генератори без інвертора, особливістю роботи яких є постійна частота обертання колінчастого валу двигуна без можливості регулювання потужності.

Враховуючи вищесказане, для підвищення енергоефективності автономного джерела живлення інвертором базі двигуна внутрішнього згорання шляхом регулювання механізму газорозподілу є актуальною науковою задачею.

#### **Мета і завдання дослідження**

Метою даного дослідження є визначення алгоритму роботи і параметрів системи керування автономного джерела електричної енергії з двигуном внутрішнього згорання енергії шляхом регулювання газорозподілу двигуна внутрішнього згорання з метою підвищення загального коефіцієнту корисної дії.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувались наступні задачі:

- Розробка схеми керування автономним джерелом живлення на базі двигуна внутрішнього згорання і інвертора.
- Дослідження зміни параметрів енергоефективності системи двигун-генератор від рівня навантаження.
- Створення рекомендацій щодо регулювання параметрів і способів реалізації керування двигуном внутрішнього згорання при зміні потужності автономного джерела живлення.
- Математичне моделювання процесу роботи електромагнітного клапану двигуна внутрішнього згорання при зміні навантаження генератора.

#### **Матеріал і результати дослідження**

При визначенні оптимальних керуючих впливів на складові елементи системи необхідно встановити особливості їх роботи при різному навантаженні окремо.

Для дослідження генератора при різних рівнях навантаження використано модель, яка знайшла найбільший попит на ринку України.



Рис.1 – Зовнішній вигляд генератора електричної енергії з двигуном внутрішнього згорання

У системі, що досліджується, двигун внутрішнього згоряння є найменш енергоєфективним елементом. Коефіцієнт корисної дії чотиритактних двигунів внутрішнього згоряння при оптимальній частоті обертання і навантаженні складає в межах 45%(50%) дизельних двигунів і 39% для бензинових. При цьому (рис. 2), аналізуючи графіки [5] зміни коефіцієнту корисної дії від потужності для ДВЗ, необхідно відзначити суттєве (до 30%) падіння з різким зростання питомих витрат палива (до 500%) [6, 7]. Так для випадку експериментального обладнання при використанні генератора потужності 0,7 і 0,2 від номінальної відношення питомих значень витрат палива становить 4,4. Адаптація процесу газорозподілу зі зменшенням частоти обертання двигуна дозволяє уникнути втрат палива.

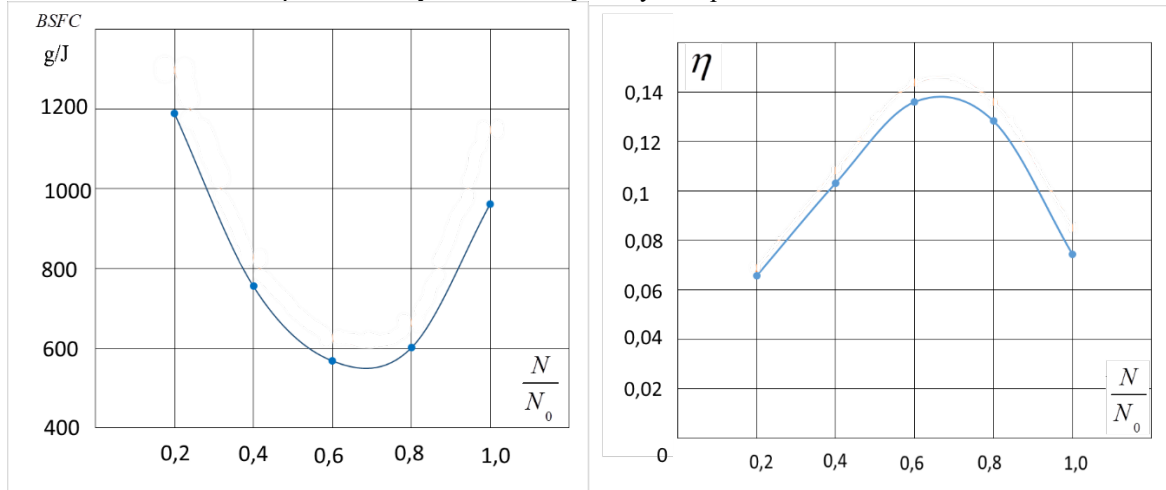
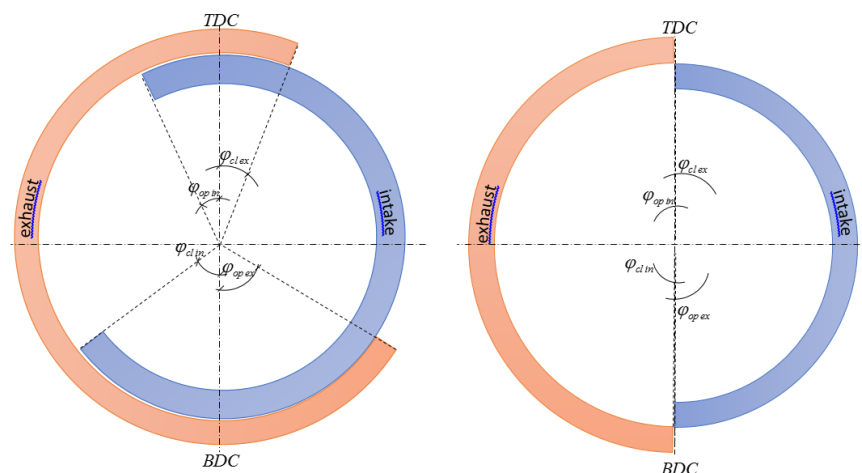


Рис. 2 – Графіки зміни ККД і BSFC

Причиною даного явища є цілий ряд негативних явищ, що супроводжують процес зменшення частоти обертання двигуна. До основних слід віднести погіршення газонаповнення циліндра, зменшення турбулізації з викидом частини заряду з циліндра у вхідну систему в період запізнювання закриття впускного клапана після НМТ. Попередження даного явища можливе шляхом регулювання часу і висоти відкриття клапанів, а саме – звуження циклів з пізнім відкриттям і раннім закриттям клапанів без перекриття[8].

На рис. 3, а представлено типову діаграму фазового газорозподілення ДВС при номінальній частоті обертання. З діаграми очевидно, що перекриття кутів зон випуску і впуску на величину кутів відкриття впускного  $\varphi_{op in}$  і закриття впускного  $\varphi_{cl ex}$  клапанів. Значення кутів підбирається з умови отримання максимального крутного моменту і ККД двигуна[9]. Один із можливих варіантів, при якому можливе уникнення вказаних негативних явищ, – це зменшення до мінімуму кутів відкриття впускного і закриття впускного клапанів (рис. 2, б) при зниженні обертів двигуна.



аб

Рис. 3 – Діаграми фазового газорозподілу ДВС:  
а – при номінальних обертах; б - при мінімальних обертах.

Для встановлення кутів відкриття і закриття впускних клапанів від рівня потужності  $P$  запропоновано систему лінійних рівнянь [10, 11]:

$$\varphi_{opin}(P) = \frac{\varphi_{opin}}{P_0 - P_1}(P - P_1); \quad (1)$$

$$\varphi_{opex}(P) = \frac{\varphi_{opex}}{P_0 - P_1}(P - P_1); \quad (2)$$

$$\varphi_{clin}(P) = \frac{\varphi_{clin}}{P_0 - P_1}(P - P_1); \quad (3)$$

$$\varphi_{cl ex}(P) = \frac{\varphi_{cl ex}}{P_0 - P_1}(P - P_1). \quad (4)$$

Реалізація запропонованого методу керування газорозподілом ДВС автономного джерела живлення можлива шляхом використання спеціальних приводів газорозподільного механізму. Серед поширених варіантів механічні, гідромеханічні і електричні приводи. Причому серед вказаних видів приводів високим ступенем швидкодії відрізняються приводи з електромагнітним приводом, з причини повільного руху клапана при кулачковому і гідравлічному приводах [12, 13].

Визначимо головні параметри процесу руху випускного клапана двигуна при дії електромагніту (рис. 4). При русі клапана 2 в низ електромагніт 1 повинен розвивати силу  $F_{em}$  яка дорівнює сумарному опору від дії пружини 3  $F_1$ , від дії газів  $F_2$  і сил інерції. В загальному випадку рівняння динаміки руху клапана має наступний вигляд:

$$m_v \frac{d^2 \bar{z}}{dt^2} + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_{em} = 0, \quad (5)$$

де  $m_v$  – маса клапана з якорем.

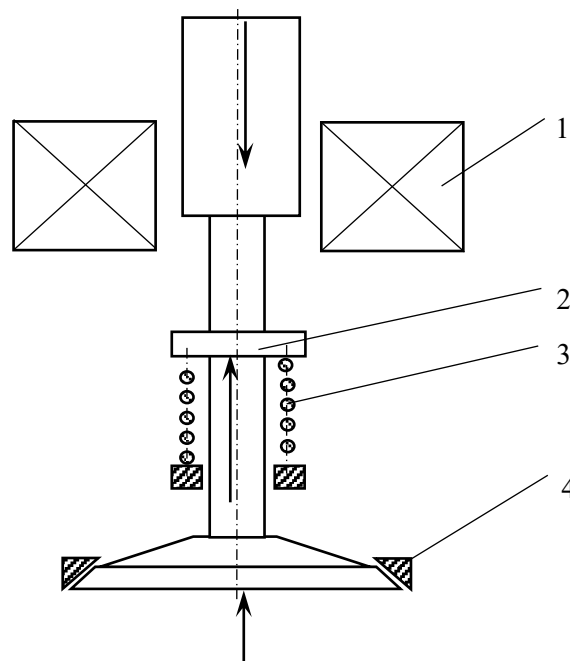


Рис. 4 Схема дії сил електромагнітного випускного клапана:  
1 – електромагніт; 2 – клапан; 3 – пружина; 4 – сідло клапана

Сила опору від дії пружини:

$$F_1 = F_1' + cz, \quad (5)$$

$F_1'$  – попередня сила стиснення пружини;  $c$  – жорсткість пружини.

Сила опору від дії стиснених газів залежить від моменту і висоти відкриття клапана. Значення початкового тиску відповідає кінцю такту розширення і для випадку бензинового двигуна складає

$p_1 = 0,3 - 0,4 \text{ MPa}$ . Подальший рух клапана супроводжується стрімким падінням тиску до  $p_2 = 0,03 - 0,04 \text{ MPa}$ . Закриття клапана відбувається при розрідженні. Як зазначено вище, головною перевагою електромагнітного приводу механізму газорозподілення двигуна є швидкодія. Для визначення необхідної сили електромагніту при реалізації рівноприскореного руху клапана встановимо параметри тахограми руху (Рис. 4). Загальний час руху клапана:

$$t_0 = \frac{\varphi_{opex} + \varphi_{cl ex} + \frac{\pi}{2}}{\omega} \quad (6)$$

$\omega$  – швидкість обертання колінчастого валу.

Час відкриття і закриття клапана в сучасних двигунах з кулачковим приводом залежить від заданого профілю кулачка і для деяких випадків може дорівнювати загальному часу руху клапану. Прийнемо фіксоване значення кутів  $\varphi'_{opex}, \varphi'_{cl ex}$  ( $5$  і  $5^\circ$ ), при яких випускний клапан повністю відкриється на висоту  $h$ . Час відкриття і закриття клапану:

$$t_1 = \frac{\varphi'_{opex}}{\omega}; t_2 = \frac{\varphi'_{cl ex}}{\omega} \cdot 5/57/314 \quad (8)$$

Відповідно прискорення:

$$a_1 = \pm 4h \left( \frac{\omega}{\varphi'_{opex}} \right)^2; a_1 = \mp 4h \left( \frac{\omega}{\varphi'_{cl ex}} \right)^2. \quad (9)$$

Враховуючи сказане, сила опору від дії стиснених газів і розрідження :

$$F_2 = \frac{\pi D^2}{4} \frac{(p_1 - p_2)}{t_1} t; F_2' = \frac{\pi D^2}{4} p'. \quad (10)$$

де  $D$  - діаметр поршня.

Для моделювання використаємо найбільш поширений тип двигуна внутрішнього згорання, що використовується для автономних джерел енергії: Honda GX-200. Параметри необхідні для розрахунку наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри системи газорозподілення Honda GX-200

№ параметру	Параметр	Одиниця виміру	Значення
1	Маса клапана	kg	0,022
2	Висота відкриття клапана	m	0,006
3	Швидкість обертання колінчастого валу	$c^{-1}$	302
4	Кут відкриття клапана $\varphi'_{opex}$	rad	0,35
5	Попередня сила стискання пружини	H	100
6	Жорсткість пружини	H/m	10000
7	Діаметр головки поршня	m	0,027
8	Початковий тиск	Pa	300000
9	Кінцевий тиск	Pa	30000

Математичне моделювання системи було виконано з використанням пакету прикладних програм Matlab/Simulink(рис.4).

Проведене дослідження за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням блоку інтегрування дозволила встановити кінематичні характеристики руху переміщення клапана за конкретних умов(табл. 1). Дія електромагніту представлена постійною складовою. Графіки переміщення швидкості представлено на рис. 5.

З діаграм швидкості прискорення видно, що відкриття і закриття клапана відбувається по параболічному закону з миттєвою зупинкою і нижній точці(6мм), що відповідає точці упору клапана. Дане негативне явище запропоновано усунути шляхом зміни сили дії електромагніту, під час руху клапана.

В цілому математичне моделювання підтвердило можливість керування клапаном двигуна внутрішнього згорання електричного генератора з метою зменшення питомих енергетичних витрат.

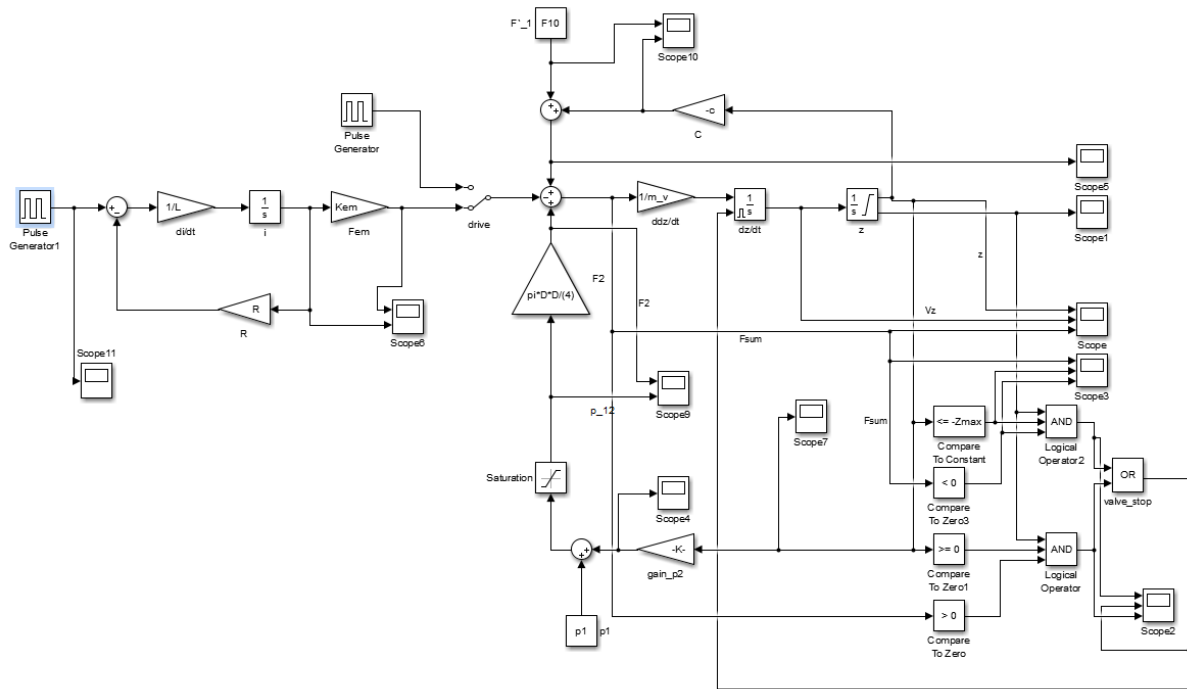


Рис. 4 Структурна схема системи керування електромагнітним клапаном двигуна внутрішнього згорання

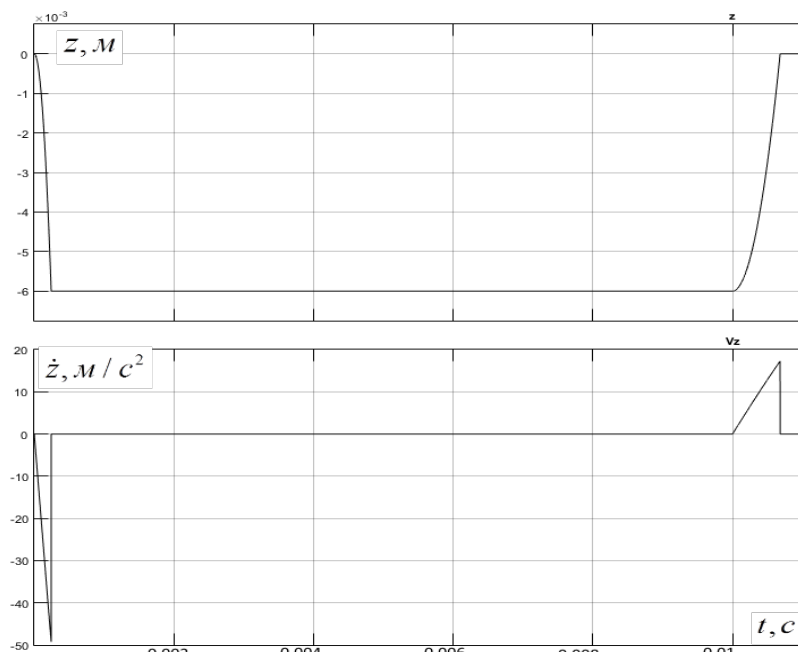


Рис. 6 Діаграми переміщення і прискорення клапана

**Висновки.**

1. В роботі представлено загальну концепцію створення системи керування автономним джерелом живлення на базі двигуна внутрішнього згорання та інвертора. Шляхом аналізу експериментальних даних доведено доцільність регулювання кутів відкриття і закриття двигуна внутрішнього згорання, який працює як джерело механічної енергії автономного джерела електричної енергії. Застосування даної системи дозволяє зменшити питомі витрати в 4 рази при генерації електричної енергії.

2. На основі запропонованої діаграми фазового газорозподілення ДВС (рис.3,а) для умов мінімальних витрат при генерації енергії проведено комп'ютерне моделювання з використанням блоку інтегрування, що дозволило встановити кінематичні характеристики руху переміщення клапана за конкретних умов.

#### **Список використаної літератури**

1. Інтелектуальні електроенергетичні системи: елементи та режими: За загальном. ред. Акад. НАН України А.В. Кириленко / Інститут електродинаміки НАН України. - К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2014.- 408 с.
2. Галіуллін Р. Р. До питання регулювання швидкості обертання колінчастого валу дизельної автономної електростанції малої потужності // Вісник БДАУ. - 2012.- С. 37-40.
3. Баширов Р.М. Основи теорії та розрахунку автомобільних двигунів. Уфа: БДАУ, 2008. 304 с.
4. Галіуллін Р. Р., Гайсін Є. М. Регулювання дизельних двигунів шляхом пропуску поставок палива // Механізація та електрифікація сільського господарства, 2005. No 11. С. 30-31.
5. Козлов А.Н., Худякова Г.І., Свіщов Д.А. Ефективність двигуна внутрішнього згоряння з використанням синтез -газу // Енергозбереження та ресурси. Блок живлення. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. - Єкатеринбург, 2016. - 2016. - С. 548-552.
6. Хватов О. С., Дарієнков А. Б., Самоявчев І. С. Паливна ефективність однієї електростанції автономного об'єкта на базі двигуна внутрішнього згоряння зі змінною швидкістю обертання // Експлуатація морського транспорту. - 2013.- No 1.- С. 71.
7. Алексеєнко В. А., Юров Б. Б., Остапенко В. В. Навантажувальна характеристика двигуна карбюратора // Збірник наукових праць Sworld. - 2014. - Т. 2. - No 2. - С. 29-31.
8. Ахромешин А. В. Сучасні системи управління газообміном двигунів внутрішнього згоряння (огляд) // Вісник Тульського державного університету. Технічна наука. - 2008. - No 3.- С. 151-158.
9. Захаров Л. А., Хрунков С. Н., Лімонов А. К. Методи вибору раціональних технічних характеристик механізму газорозподілу поршневого двигуна внутрішнього згоряння // Угоди НГТУ ім. Р. Е. Алексєєва. - 2010. - No 4. - С. 181-189.
10. Зайченко С., Шевчук С., Опришко В., Прядко С. та Галем А. (2020, травень). Підвищення енергоефективності автономного джерела електроенергії за допомогою контролю розподілу газів двигуна внутрішнього згоряння. У 2020 році 7-я Міжнародна конференція IEEE з інтелектуальних систем енергії (ESS) (стор. 262-265). IEEE.
11. Зайченко С., Шевчук С., Галем А. Підвищення енергоефективності автономного джерела електричної енергії шляхом регулювання газорозподілу двигуна внутрішнього згоряння // ЕНЕРГЕТИКА: економіка, техніка, екологія. - 2019. - No 3. - С. 74-81.
12. Захаров Л. А., Хрунков С. Н., Лімонов А. К. Методика вибору раціональних технічних характеристик механізму газорозподілу поршневого двигуна внутрішнього згоряння // НГТУ ім. Р. Е. Алексєєва. - 2010. - No 4. - С. 96-105.
13. Ахромешин А. В. Сучасні системи управління газообміном двигунів внутрішнього згоряння (огляд) // Вісник Тульського державного університету. Технічна наука. - 2008. - No 3. - С. 151-158.

**S. Zaichenko**, Doc., Professor, **ORCID** 0000-0002-8446-5408  
**S. Korol**, Candidate of Technical Sciences, **ORCID** 0000-0003-6521-6322  
**V. Opryshko**, Associate Professor, Ph.D., **ORCID** 0000-0003-4963-2490  
**D. Derevyanko**, Associate Professor, Ph.D., **ORCID** 0000-0003-4963-2490  
**N. Zhukova**, senior lecturer, **ORCID** 0000-0002-4215-6981  
**National Technical University of Ukraine**  
**"Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"**

## **MODELING OF THE PROCESS OF ELECTROMECHANICAL CONTROL OF GAS DISTRIBUTION OF AN ELECTRIC ENERGY GENERATOR WITH AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE**

*The use of generators at different load levels allows you to use part of the rated power of the engines, by reducing the speed of the internal combustion engine, thus reducing fuel consumption and increase the overall efficiency of the system as a whole. However, it should be noted that the optimal operation of the internal combustion engine at fixed gas distribution parameters is possible only at a certain engine speed. Reducing the engine speed leads to a deterioration of the filling of the fuel-air mixture and the release of exhaust gases from the engine, accompanied by the intake of exhaust gases into the intake manifold and the emission of part of the fuel*

*mixture into the exhaust pipe. The paper presents the results of the study of generator parameters and the general concept of creating an autonomous power supply control system based on an internal combustion engine in order to reduce the specific indicators of electricity generation. The expediency of regulating the power level of an internal combustion engine has been experimentally proved. To achieve this goal, it is proposed to adjust the opening and closing angles of the internal combustion engine with a solenoid valve. The use of this system allows to reduce the specific costs by more than 4 times when generating electricity with low generator load. Based on the phase distribution diagram of the internal combustion engine, the dependence of the change of the opening and closing angles of the inlet and outlet valves on the power of the autonomous energy source is proposed.*

**Keywords:** *autonomous energy source, efficiency, gas distribution system, solenoid valve.*

#### REFERENCES

1. Intelligent electric power systems: elements and modes: Under the general. ed. Acad. NAS of Ukraine A.V. Kirilenko / Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. - K.: Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, 2014. -- 408 p.
2. Galiullin R. R. On the issue of regulating the rotational speed of the crankshaft of a diesel autonomous power plant of low power // Vestnik BGAU. - 2012. -- S. 37-40.
3. Bashirov R.M. Fundamentals of the theory and calculation of automotive engines. Ufa: BGAU, 2008. 304 p.
4. Galiullin R.R., Gaysin E.M. Regulation of diesel engines by skipping fuel supplies // Mechanization and Electrification of Agriculture, 2005. No. 11. P. 30-31.
5. Kozlov A.N., Khudyakova G.I., Svishchev D.A. Efficiency of the internal combustion engine using synthesis gas // Energy and Resource Saving. Power supply. Unconventional and renewable energy sources. — Yekaterinburg, 2016. - 2016. - S. 548-552.
6. Khvatov O.S., Daryenkov A. B., Samoyavchev I. S. Fuel efficiency of a single power plant of an autonomous facility based on an internal combustion engine of variable rotational speed // Operation of sea transport. - 2013. - No. 1. -- S. 71.
7. Alekseenko V. A., Yurov B. B., Ostapenko V. V. Load characteristic of the carburetor engine // Collection of scientific papers Sworld. - 2014. - T. 2. - No. 2. - S. 29-31.
8. Akhromeshin A. V. Modern gas exchange control systems for internal combustion engines (review) // Bulletin of Tula State University. Technical science. - 2008. - No. 3. — S. 151-158.
9. Zakharov L. A., Khrunkov S. N., Limonov A. K. Methods for choosing the rational technical characteristics of the gas distribution mechanism of a reciprocating internal combustion engine // Transactions of NGTU im. RE Alekseeva. - 2010. - No. 4. - S. 181-189.
10. Zaichenko, S., Shevchuk, S., Opryshko, V., Pryadko, S., & Halem, A. (2020, May). Autonomous electric power source energy efficiency improvement by internal combustion engine gases distribution control. In 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) (pp. 262-265). IEEE.
11. Zaichenko S., Shevchuk S., Halem A. Improving the energy efficiency of an autonomous source of electric energy by regulating the gas distribution of an internal combustion engine // POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology. - 2019. - No. 3. - S. 74-81.
12. Zakharov L. A., Khrunkov S. N., Limonov A. K. The methodology for choosing the rational technical characteristics of the gas distribution mechanism of a reciprocating internal combustion engine // Transactions of NGTU im. RE Alekseeva. - 2010. - No. 4. - S. 96-105.
13. Akhromeshin A. V. Modern gas exchange control systems for internal combustion engines (review) // Bulletin of Tula State University. Technical science. - 2008. - No. 3. - S. 151-158.

Надійшла 27.03.2021

Received 27.03.2021