

ПОСЛІДОВНЕ ВСТАНОВЛЕННЯ ДВОХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ НА АВТОМОБІЛІ ЯК МЕТОД ЗНИЖЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ КРУТНОГО МОМЕНТУ

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Проведено аналіз досліджень щодо можливості зменшення витрати палива автомобілів шляхом заміни їх силових установок двома послідовно встановленими двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ). Визначено, що зменшити витрату палива можливо за рахунок зниження на вхідному валу трансмісії нерівномірності крутного моменту, а це своєю чергою залежить від відносної кутової орієнтації колінчастих валів встановлених двигунів внутрішнього згорання. У дослідженні визначено, що при встановленні двох послідовних двигунів внутрішнього згорання, кожен із яких генерує індикаторний крутний момент, що підкоряється гармонійному закону, дає змогу змістити криві індикаторного крутного моменту та кута повороту колінчастого вала так, щоб обидва двигуни працювали в протифазах. Запропоновано використовувати метод підвищення енергетичної ефективності автомобілів шляхом використання двох послідовно встановлених двигунів внутрішнього згорання, колінчасті вали яких встановлені відносно свого початкового кутового положення з різницею кутових координат (кутів повороту) колінчастих валів обох двигунів щодо початкового положення, що дає змогу зменшити непродуктивні втрати енергії. Апроксимуючи дійсні криві зміни індикаторного крутного моменту гармонійним законом, враховуючи кут повороту колінчастого вала, побудовано графіки залежності індикаторного крутного моменту до кута повороту колінчастого вала чотиритактних двигунів внутрішнього згорання із різною кількістю циліндрів. Визначено, що зі збільшенням кількості циліндрів двигуна внутрішнього згорання і коефіцієнта частки крутного моменту на ведучих колесах відбувається зниження коефіцієнта непродуктивних витрат енергії, що враховує вплив нерівномірності індикаторного крутного моменту. Вирішена задача забезпечення роботи другого двигуна в протифазі першому двигуну, яка має виконуватися співвідношенням кутів повороту колінчастих валів першого і другого двигунів відносно початкового (нульового) положення з різницею кутових координат (кутів повороту) колінчастих валів обох двигунів щодо початкового положення. Результати розрахунку кута взаємного розташування колінчастих валів за послідовного встановлення двох ДВЗ у протифазі вказують на зменшення зазначеного кута зі збільшенням кількості циліндрів.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, колінчастий вал, автомобіль, крутний момент, енергія, кут повороту.

Вступ

Дослідженню ефективності використання на автомобілях силових установок із двома послідовно встановленими ДВЗ присвячено значну кількість наукових робіт. Однак таке технічне рішення розглядалося як альтернатива методу вимкнення частини циліндрів при зниженні зовнішнього навантаження на автомобіль [1].

Встановлення послідовно двох ДВЗ дає змогу також зменшити витрату палива шляхом зниження нерівномірності крутного моменту на вхідному валу трансмісії. Останнє можливе за певної відносної кутової орієнтації колінчастих валів обох двигунів внутрішнього згорання.

У цій статті визначено кути взаємного розташування колінчастих валів обох ДВЗ залежно від кількості циліндрів.

Аналіз останніх досягнень та публікацій

Двигун внутрішнього згорання є джерелом механічних коливань у трансмісії автомобіля, оскільки генерує крутний момент, що змінюється за періодичним законом. На рисунку 1 наведено криві крутних моментів чотиритактних ДВЗ із різною кількістю циліндрів [2].

У роботі [2] запропоновано апроксимувати дійсні криві зміни індикаторного крутного моменту гармонійним законом

$$M_i = \overline{M}_i \left[1 + \frac{k_i}{2} \sin \left(\frac{\omega_e i_q}{2} t \right) \right], \quad (1)$$

де M_i – індикаторний крутний момент; \overline{M}_i – середнє за цикл коливань значення індикаторного крутного моменту; k_i – коефіцієнт нерівномірності крутного моменту,

$$k_i = \frac{M_{i\max} - M_{i\min}}{\overline{M}_i}, \quad (2)$$

де $M_{i\max}$; $M_{i\min}$ – максимальне та мінімальне значення індикаторного крутного моменту за цикл роботи ДВЗ; $\overline{\omega}_e$ – середня кутова швидкість колінчастого вала за цикл роботи ДВЗ; i_y – кількість циліндрів двигуна; t – час.

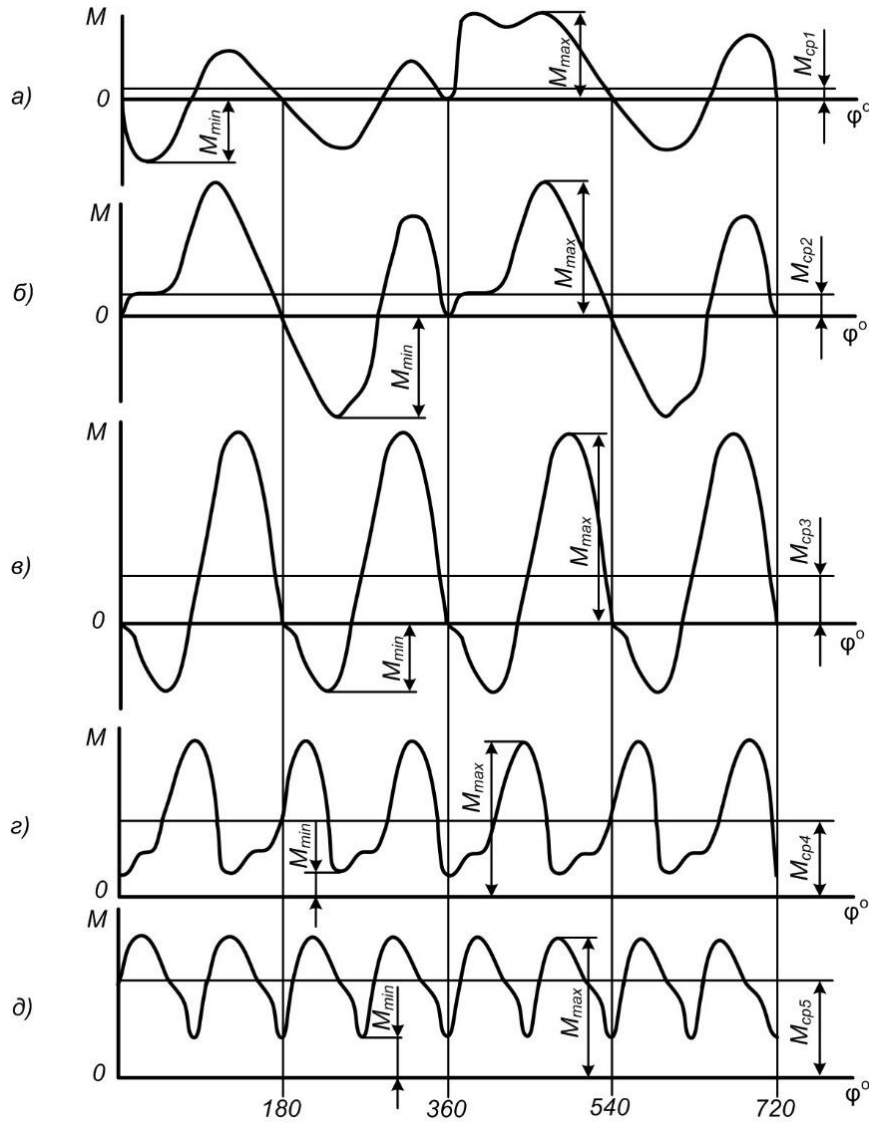


Рис. 1. Криві крутильних моментів 4-тактних ДВЗ із різною кількістю циліндрів [2]: а – одноциліндрового; б – двоциліндрового; в – чотирициліндрового; г – шестициліндрового; д – восьмициліндрового.

Залежність (1), враховуючи, що кут повороту колінчастого вала дорівнює

$$\varphi_B = \overline{\omega}_e t, \quad (3)$$

можна перетворити до вигляду

$$M_i = \overline{M}_i \left[1 + \frac{k_i}{2} \sin \left(\varphi_B \frac{i_y}{2} \right) \right]. \quad (4)$$

Графіки залежності (4) подано на рисунку 2.

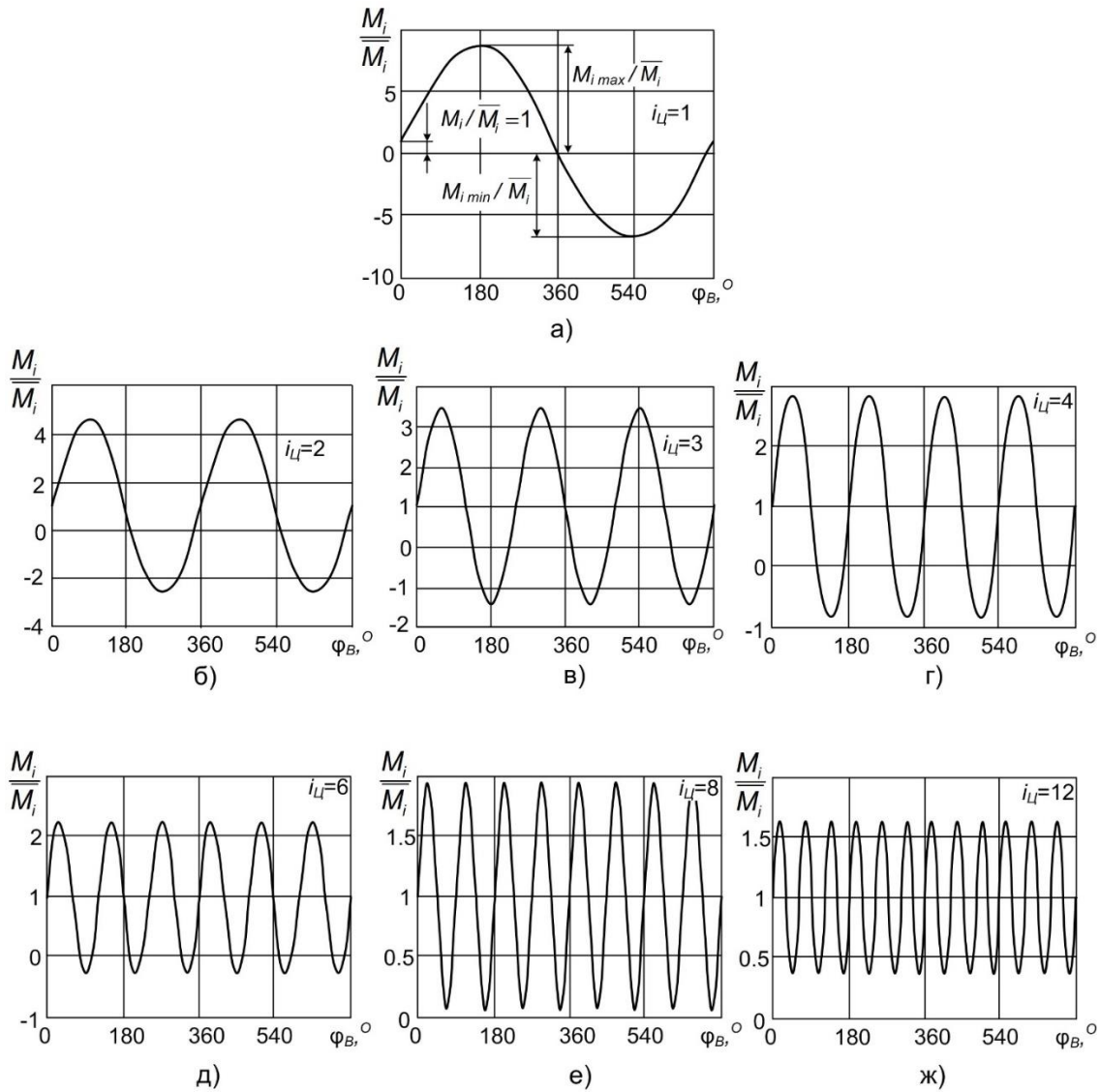


Рис. 2. Графіки залежності $\frac{M_i}{\bar{M}_i} = f(\phi_B)$ [2]:

а – за $i_U = 1$; б – за $i_U = 2$; в – за $i_U = 3$; г – за $i_U = 4$; д – за $i_U = 6$; е – за $i_U = 8$; ж – за $i_U = 12$

У роботі Д. В. Абрамова [3] визначено, що додаткові витрати енергії ΔW на рух автомобіля спричинені нерівномірністю крутильного моменту M_i і, відповідно, тягової сили, визначаються такою залежністю:

$$\Delta W = \frac{A_{pk}}{\pi} \cdot S, \quad (5)$$

де A_{pk} – амплітуда коливань тягової сили P_k автомобіля, що визначається амплітудою коливань A_{M_i} індикаторного крутного моменту; π – число Піфагора, $\pi = 3,1416$; S – шлях, пройдений автомобілем.

Професором Р. О. Кайдаловим [4], під час дослідження комбінованого електромеханічного приводу автомобілів введено показник $\eta_{\Delta W}$ – коефіцієнт непродуктивних витрат енергії, що враховує вплив нерівномірності індикаторного крутного моменту

$$\eta_{\Delta W} = \frac{0,04 + \frac{7,22}{i_U}}{\pi} (1 - K_{e0}), \quad (6)$$

де 0,04; 7,22 – коефіцієнти регресії; K_{e0} – частка крутного моменту на ведучих колесах, створювана електродвигунами,

$$K_{e\partial} = \frac{M_{e\partial} n}{r_{\partial} \Sigma P_c}, \quad (7)$$

$M_{e\partial}$ – момент, створюваний одним електродвигуном; n – кількість електродвигунів; r_{∂} – динамічний радіус ведучих коліс; ΣP_c – сумарна сила опору руху автомобіля.

У роботі [4] показано, що зі збільшенням кількості циліндрів $i_{ц}$ ДВЗ і коефіцієнта $K_{e\partial}$ відбувається зниження коефіцієнта непродуктивних витрат $\eta_{\Delta W}$ (таблиця 1 [4]).

Таблиця 1

Коефіцієнт непродуктивних витрат енергії [4]

$i_{ц}$	$\eta_{\Delta W}$					
	$K_{e\partial} = 0$	$K_{e\partial} = 0,2$	$K_{e\partial} = 0,4$	$K_{e\partial} = 0,6$	$K_{e\partial} = 0,8$	$K_{e\partial} = 1,0$
1	2,310	1,849	1,386	0,924	0,462	0
2	1,162	0,929	0,697	0,464	0,232	0
4	0,587	0,470	0,352	0,235	0,117	0
6	0,396	0,317	0,237	0,158	0,079	0
8	0,300	0,240	0,180	0,120	0,060	0
10	0,242	0,194	0,145	0,097	0,048	0
12	0,204	0,163	0,123	0,082	0,040	0

Зазначене зниження коефіцієнта $\eta_{\Delta W}$ зумовлене зниженням амплітуди коливань A_{M_i} індикаторного крутного моменту M_i та амплітуди коливань A_{P_k} тягової сили P_k автомобіля.

Мета та постановка задачі

Метою дослідження є підвищення енергоефективності автомобілів шляхом встановлення двох двигунів внутрішнього згорання шляхом раціональної синхронізації їхніх робочих циклів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити завдання вибору раціонального кута взаємного розташування колінчастих валів обох ДВЗ.

Виклад основного матеріалу

Встановлення двох послідовних ДВЗ, кожен з яких генерує індикаторний крутильний момент M_i , що підкоряється гармонійному закону, дає змогу змістити криві M_i (φ_B) так, щоб обидва двигуни працювали у протифазах (рис. 3).

Рівняння індикаторного крутного моменту (4) для 1-го і 2-го двигунів внутрішнього згорання матимуть вигляд:

$$M_{i1} = \overline{M_{i1}} \left[1 + \frac{k_i}{2} \sin \left(\varphi_{B1} \frac{i_{ц1}}{2} \right) \right]; \quad (8)$$

$$M_{i2} = \overline{M_{i2}} \left[1 + \frac{k_i}{2} \sin \left(\varphi_{B2} \frac{i_{ц2}}{2} \right) \right]. \quad (9)$$

Прийmemo припущення того, що використовуються два абсолютно однакові двигуни, при цьому $M_{i1} = M_{i2} = M_i$; $\overline{M_{i1}} = \overline{M_{i2}} = \overline{M_i}$; $i_{ц1} = i_{ц2} = i_{ц}$.

Для забезпечення роботи 2-го двигуна в протифазі 1-му двигуну має виконуватися співвідношення

$$\varphi_{B2} \frac{i_{ц}}{2} = \varphi_{B1} \frac{i_{ц}}{2} + \pi, \quad (10)$$

де φ_{B1} , φ_{B2} – кути повороту колінчастих валів першого і другого двигунів відносно початкового (нульового) положення,

$$\varphi_{B2} = \varphi_{B1} + \psi; \quad (11)$$

ψ – різниця кутових координат (кутів повороту) колінчастих валів обох двигунів щодо початкового положення.

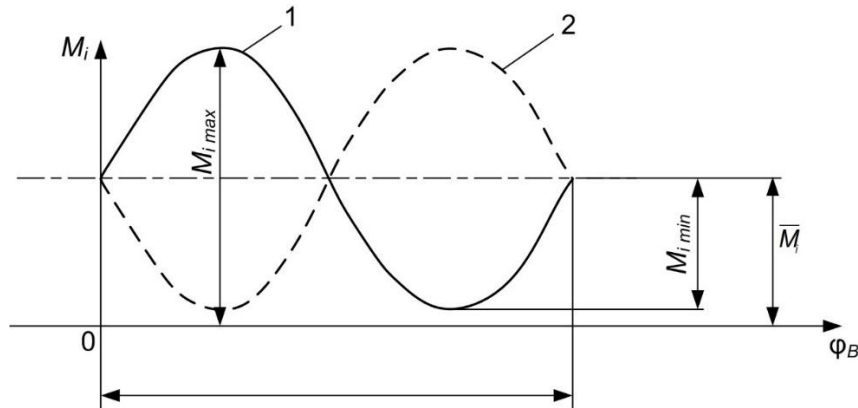


Рис. 3. Графіки зміни індикаторних крутних моментів під час роботи ДВЗ у «протифазях»: 1 – перший двигун, 2 – другий двигун

Спільне розв'язання рівнянь (10) і (11) дає змогу визначити кут ψ

$$\psi = \frac{2\pi}{i_y}. \quad (12)$$

Сумарний індикаторний крутний момент, створюваний двома двигунами в цьому випадку

$$M_{i\Sigma} = \overline{M}_i \left[1 + \frac{k_i}{2} \sin \left(\varphi_{B1} \frac{i_y}{2} \right) \right] + \overline{M}_i \left[1 + \frac{k_i}{2} \sin \left(\varphi_{B1} \frac{i_y}{2} + \pi \right) \right]. \quad (13)$$

Підставляючи вираз (10) у рівняння (13), отримаємо після перетворення

$$M_{i\Sigma} = 2 \left[\overline{M}_i + \frac{k_i}{2} \sin \left(\varphi_{B1} \frac{i_y}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \cos \frac{\pi}{2} \right]. \quad (14)$$

Оскільки $\cos \frac{\pi}{2} = 0$, то вираз (14) набуде вигляду

$$M_{i\Sigma} = 2\overline{M}_i. \quad (15)$$

Отже, під час установа колінчастих валів двох ДВЗ із виконанням умови (12) на вході в трансмісію ми отримуємо постійну величину крутного моменту

$$M_{ex} = 2M_i\eta_M\eta_{зч} = const, \quad (16)$$

де $\eta_M, \eta_{зч}$ – механічний коефіцієнт корисної дії (ККД) ДВЗ і ККД зчеплення.

Отже, відсутність нерівномірності сумарного індикаторного крутного моменту двох ДВЗ і крутного моменту на вході в трансмісію дає змогу звести до нуля додаткові втрати енергії, які характеризуються $\eta_{\Delta W}$ за умови $K_{e0} = 0$ (табл. 1).

У таблиці 2 наведено результати розрахунку кута ψ і зниження коефіцієнта непродуктивних втрат енергії $\eta_{\Delta W}$ за послідовного встановлення двох ДВЗ у протифазі.

Таблиця 2

Розрахунок кута і зниження непродуктивних втрат енергії автомобілем

Кількість циліндрів i	2	4	6	8	10	12
Коефіцієнт додаткових втрат енергії $\eta_{\Delta W}$	1,162	0,587	0,396	0,300	0,242	0,204
Кут ψ	π	$\pi/2$	$\pi/3$	$\pi/4$	$\pi/5$	$\pi/6$

Висновки

1. У результаті проведеного дослідження запропоновано метод підвищення енергетичної ефективності автомобілів шляхом використання двох послідовно встановлених ДВЗ, колінчасті вали яких встановлені відносно свого початкового кутового положення з різницею ψ .

2. Величина зазначеного кута ψ зменшується зі збільшенням кількості циліндрів i_c і визначається за формулою (12).

3 Використання запропонованого методу дає змогу зменшити непродуктивні втрати енергії на 116 % для 2-циліндрових двигунів, 58,7 % – 4-циліндрових двигунів, 39,6 % – 6-циліндрових двигунів, 30 % – 8-циліндрових двигунів, 24,2 % – 10-циліндрових двигунів і 20,4 % – 12-циліндрових двигунів. Для одноциліндрових двигунів (у разі встановлення двох ДВЗ) зазначене зменшення становитиме 231 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Молодан А. О. Наукові основи забезпечення надійності і функціональної стабільності колісних машин в режимі відключення частини циліндрів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.22.20. Харків, 2021, 40 с.

[2] Подригало Н. М. Концепція забезпечення ефективності та контролю функціональної стабільності моторно-трансмісійних установок транспортно-тягових засобів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.22.20. Харків, 2016, 36 с.

[3] Абрамов Д. В. Концепція покращення функціональної стабільності динамічних та енергоперетворюючих властивостей автомобілів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.22.02. Харків, 2018, 40 с.

[4] Кайдалов Д. В. Наукові основи створення автомобілів з комбінованою енергетичною установкою: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.22.02. Харків, 2018, 40 с.

Подригало Михайло Абович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та ремонту машин, e-mail: pmikhab@gmail.com

Вахнюк Сергій Анатолійович – аспірант кафедри технології машинобудування та ремонту машин, e-mail: vakhniuk.ser@gmail.com

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків

M. Podryhalo
S. Vakhniuk

Installing two internal combustion engines in series on a vehicle as a method of reducing torque unevenness

Kharkiv National Automobile and Highway University

An analysis of studies on the possibility of reducing fuel consumption of cars by replacing their power plants with two internal combustion engines installed in series is carried out. It has been determined that it is possible to reduce fuel consumption by reducing the unevenness of torque at the transmission input shaft, which in turn depends on the relative angular orientation of the crankshafts of the installed internal combustion engines. The study has determined that when installing two consecutive internal combustion engines, each of which generates an indicator torque that obeys the harmonic law, it makes it possible to shift the curves of the indicator torque and the crankshaft angle so that both engines operate in opposite phases. It is proposed to use a method of increasing the energy efficiency of cars by using two consecutive internal combustion engines, the crankshafts of which are installed relative to their initial angular position with the difference in the angular coordinates (angles of rotation) of the crankshafts of both engines relative to the initial position, which allows to reduce unproductive energy losses. Approximating the actual curves of change of the indicator torque by the harmonic law, taking into account the angle of rotation of the crankshaft, graphs of dependence of the indicator torque on the angle of rotation of the crankshaft of four-stroke internal combustion engines with different numbers of cylinders are constructed. It has been determined that with an increase in the number of cylinders of an internal combustion engine and the coefficient of the share of torque on the drive wheels, there is a decrease in the coefficient of unproductive energy consumption, which takes into account the influence of the unevenness of the indicator torque. The problem of ensuring the operation of the second engine in the counterphase of the first engine is solved, which should be fulfilled by the ratio of the angles of rotation of the crankshafts of the first and second engines relative to the initial (zero) position with the difference in the angular coordinates (angles of rotation) of the crankshafts of both engines relative to the initial position. The results of calculating the angle of the crankshafts' relative position when two internal combustion engines are installed sequentially in the opposite phase indicate a decrease in this angle with an increase in the number of cylinders.

Key words: internal combustion engine, crankshaft, car, torque, energy, angle of rotation.

Podryhalo Mykhailo – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology and Machine Repair, e-mail: pmikhab@gmail.com

Vakhniuk Serhii – graduate student, Department of Mechanical Engineering Technology and Machine Repair, e-mail: vakhniuk.ser@gmail.com