

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ПІД ДІЄЮ ВІБРАЦІЙ АВТОМОБІЛЬНОГО ДВИГУНА

Мирон Магац<sup>1</sup>, к. т. н., Іван Городецький<sup>1</sup>, к. т. н., Зеновій Гошко<sup>1</sup>, к. т. н.,  
Андрій Гнатів<sup>2</sup>, д. т. н., Юрій Дацюк<sup>3</sup>, ст. викладач

<sup>1</sup> Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: mironmahats@gmail.com,

<sup>2</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна,  
e-mail: kalifus76@gmail.com, zhiruha\_andrij\_0608@ukr.net,

<sup>3</sup> Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Грушевського, 4, м. Львів, Україна,  
e-mail: yuriy.datsyuk@lnu.edu.ua

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.134>

**Магац М., Городецький І., Гошко З., Гнатів А., Дацюк Ю. Дослідження генераторної установки під дією вібрацій автомобільного двигуна**

Досліджено напрями розвитку та підвищення вимог до автотранспортних засобів, які суттєво впливають на темпи розширення підприємницької діяльності в аграрній сфері. А це відповідно: їхня надійність, продуктивність, комфортність управління та високі економічні та екологічні показники. Доведено, що на вищеперелічені характеристики автомобілів значною мірою (особливо в продукуючих і акумулюючих енергетичних засобах), впливає система енергопостачання та енергоспоживання.

В основному сучасні автомобілі використовують системи енергопостачання постійного струму, з напругою від 12 до 24 В, до складу яких входять: генератор, акумуляторна батарея та регулювальні елементи, тобто регулятори напруги. Для контролю й захисту бортової електромережі автомобіля використовуються запобіжники та різного роду реле. Вимогою для генераторних установок (вітчизняних чи зарубіжних виробників) є їхнє налаштування на віддачу електронної енергії (номінальної величини) за мінімальних обертів вала двигуна (850–900 об./хв). Цей процес можливий завдяки підвищенню передатного числа приводу пасової передачі. Доведено, що за підвищення передатного числа вище 3 скорочується її експлуатаційний період та збільшується навантаження на обертові маси самого генератора. Злагоджена робота генераторної установки з акумуляторною батареєю веде до акумулювання електричного заряду (на різних режимах роботи двигуна), необхідного для забезпечення бортової електромережі автомобіля постійно стабільною напругою. Досліджено, що недостатня напруга (нижче 12 В), сприяє недозаряду батареї та утрудненому запуску двигуна, а відповідно підвищена – до перезаряду та скорочення її терміну експлуатації. Така енергетична нестабільність також негативно впливає й на роботу: електронного обладнання, електроприладів, освітлення та сигналізації сучасного автомобіля.

Відповідно до викладеного ми пропонуємо частково вирішити проблеми зменшення навантаження на систему «генераторна установка + акумуляторна батарея» бортової електромережі автомобіля і, відповідно, підвищити економічні та екологічні показники двигуна. Нами прийнято рішення щодо встановлення в бортову електромережу автомобіля незалежного генератора, укомплектованого постійними магнітами, який працює від вібрацій двигуна внутрішнього згорання.

**Ключові слова:** постійні магніти, незалежний генератор, вібрація двигуна, бортова електромережа, генераторна установка.

**Mahats M., Horodetskyi I., Hoshko Z., Hnatov A., Datsiuk Y. Study of a generator set under the influence of car engine vibrations**

The research studies directions of development and advanced requirements to motor vehicles, which significantly affect the pace of business growth in the agricultural sector. It is related with their reliability, productivity, comfort of management and high economic and environmental indices. It has been proven that the above-listed characteristics of cars are significantly (especially in the producing and accumulating energy units) influenced by the energy supply and energy consumption system.

Modern cars basically use direct current power supply systems, with a voltage from 12 to 24 V, which include: a generator, a battery and regulating elements, i.e. voltage regulators. Fuses and various types of relays are used to control and protect the car's on-board electrical network. It is required the generator units (domestic or foreign production) are arranged to give electronic energy (nominal value) back at the minimum revolutions of the engine shaft (850–900 rpm). This process is possible due to an increase in the gear ratio of the belt drive. It has been proven that the increase of the gear ratio above 3

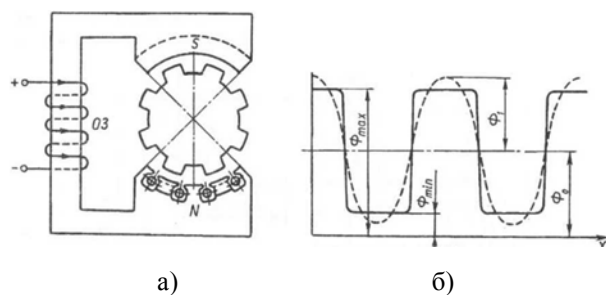
results in shortening of its operational period and increase of the load on the rotating masses of the generator. Coordinated operation of the generator unit with the battery leads to accumulation of electric charge (in different engine operating modes), which is necessary to provide the car's on-board electrical network with a constant stable voltage. It has been studied that insufficient voltage (below 12 V) contributes to undercharging the battery and difficult starting of the engine, and, accordingly, increased voltage – to overcharging and shortening its service life. Moreover, this energy instability has a negative effect on the operation of electronic equipment, electrical appliances, lighting and alarms of a modern car. Therefore, the authors of the research propose to partially solve the problems of reducing the load on the «generator unit + battery» system of the car's on-board electrical network and, accordingly, to increase the economic and environmental indicators of the engine. It is decided to install an independent generator equipped with permanent magnets, which operates from the vibrations of the internal combustion engine, in the car's on-board electrical network.

**Key words:** permanent magnets, independent generator, engine vibration, on-board electrical network, generator unit.

**Постановка проблеми.** Дослідження генераторних установок [2; 5; 12–14; 16] спрямовані на вдосконалення конструкцій і зменшення навантаження на двигун внутрішнього згоряння. Результати досліджень є постійно актуальними, як теоретично, так і практично. Зростання вимог до електротехнічних засобів першочергово спонукає до модернізації наявних конструкцій, що зумовлює перехід до створення технічних засобів нового, вищого рівня [3; 6; 8; 15].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Інженерами-конструкторами розроблені індукторні електромагнітні генератори, які, як правило, споживають корисну енергію від двигуна внутрішнього згоряння.

Їхня конструктивно-технологічна схема зображена на рис. 1.



**Рис. 1.** Конструктивно-технологічна схема безконтактного індукторного генератора:

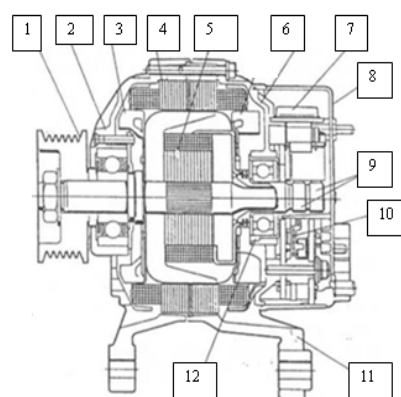
а – електромагніт, що обертається; б – магнітний потік у зазорі індукторної машини [4]

**Fig. 1.** Structural and technological diagram of a non-contact inductor generator: a) rotating electromagnet; б) magnetic flux in the gap of the inductor machine [4]

Особливістю їхньої конструкції є те, що електромагніт з обмоткою збудження розміщений у статорі генератора. Самі полюси електромагніту є з пазами, де поміщено обмотки. У середині між полюсами обертається зіркоподібний ротор, тіло якого зі зубцеподібними виступами розміщене по всій довжині електромагніту. Слід зазначити, що

кількість зубців ротора є удвічі більша за кількість пазів статора.

На рис. 2 зображений загальний вигляд (у розрізі) генератора фірми BOSCH [1; 12; 13; 15].



**Рис. 2.** Генератор типу GC фірми Bosch [7; 8]:

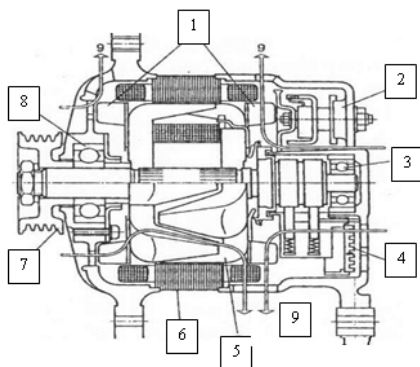
1 – шків; 2 і 6 – передня і задня кришки; 3 – вентилятор; 4 – статор; 5 – обмотка збудження; 7 – місце встановлення щіток та регулятор напруги; 8 – кожух; 9 – колектор (кільця); 10 – блок випрямлячів; 11 – кріпильні місця; 12 – опорний підшипник

**Fig. 2.** Generator of GC type, Bosch [7; 8]: 1 – pulley; 2 and 6 – front and back covers; 3 – fan; 4 – stator; 5 – excitation winding; 7 – the place where the brushes are made and the voltage regulator; 8 – casing; 9 – collector (rings); 10 – block of rectifiers; 11 – mounting points; 12 – support bearing

Електромагнітна система цих генераторів є дванадцятиполюсною. Сам статор виготовлений з навіски сталеві стрічки на ребро і має 36 напівзакритих пазів та ізольоване покриття. Обмотки збудження (у різних генераторах) мають опір у межах 4,5–2,6 Ом, а їхня потужність забезпечується різною кількістю витків та товщиною провідників статора і ротора.

Особливістю генераторів фірми Bosch є забезпечення значного передатного числа приводу від 2,5 до 3,0. І тому електрична енергія, що віддається генератором на холостому ходу, відповідає обертам вала генератора 1800 об./хв. Тому генера-

тор такого типу комплектується двома вентиляторами 3 і схема вентиляції двопотокова, що, своєю чергою, чинить додаткове навантаження на двигун. А це, відповідно, підвищене використання корисної енергії відносно вищезгадуваних генераторів близько 3 % [5; 9; 11; 16]. До цього типу можна віднести й генератори фірми «Ніаскі» (Японія) з номінальною напругою 14 В і вихідними номінальними струмами: 45, 55, 65, 70, 75, 80, 90, 110 і 120 А. Один із таких генераторів зображено на рис. 3.



**Рис. 3.** Генераторна установка БК-16014У60А фірми «Ніаскі» (Японія): 1 – вентилятори; 2 – блок випрямлячів; 3 і 8 – підшипники; 4 – регулятор напруги із щіткотримачами; 5 – ротор; 6 – статор; 7 – шків; 9 – напрям потоків охолоджувального повітря [8]

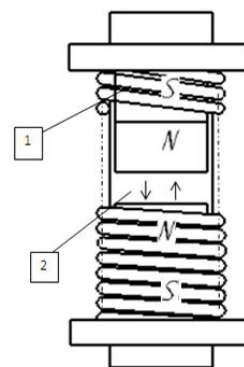
**Fig. 3.** Generator unit BK-16014U60A of the company «Niaski» (Japan): 1 – fans; 2 – block of rectifiers; 3 and 8 – bearings; 4 – voltage regulator with brush holders; 5 – rotor; 6 – stator; 7 – pulley; 9 – direction of cooling air flows [8]

Недоліками вищеперелічених генераторних установок є їхня збільшена маса, проблематичне встановлення обмотки збудження та використання корисної енергії двигуна до 6...10 %.

**Постановка завдання.** Для зменшення витрат корисної енергії двигуна внутрішнього згоряння, що частково використовується на привід генераторної установки, а вона, своєю чергою, забезпечує живлення електричною енергією сучасного автомобіля, є необхідність встановлення додаткового енергоощадного генератора, що працюватиме від вібрацій двигуна. Такий додатковий генератор повинен забезпечити електричною енергією габаритні вогні автомобіля.

**Виклад основного матеріалу.** Для оцінки величини генерації електричної напруги новоствореної моделі генератора (конструктивно-

технологічна схема якого зображена на рис. 4), що приводиться в дію внаслідок руху постійних магнітів усередині котушки (від вібрацій двигуна), підтверджується законом електромагнітної індукції [10]. Тобто в контурі формується магнітний потік  $\Phi$ , що пронизує поле магнітної індукції, створюючи напругу.



**Рис. 4.** Конструктивно-технологічна схема додаткового генератора: 1 – обмотка статора, 2 – повітряний відштовхувальний простір між магнітами

**Fig. 4.** Structural and technological scheme of the additional generator: 1 – stator winding, 2 – repulsive air space between the magnets

Виходячи з цього запишемо залежність

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Сумарне значення напруги котушки:

$$U = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

де  $N$  – кількість витків у котушці.

Оцінимо величину магнітного потоку  $\Phi$  через контур:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha \quad (3)$$

де  $B$  – значення індукції магнітного поля, спричиненого полями індукції постійних магнітів;

$S = \frac{\pi \cdot D^2}{2}$  – площа поперечного перерізу котушки діаметром  $D$ ;  $\cos\alpha$  – косинус кута між напрямками магнітної індукції і площини поперечного перерізу витків.

Припустимо, що магніти здійснюють колиливний рух за гармонічним законом, тоді значення магнітної індукції змінюється за законом

$$B = B_0 + \Delta B \cdot \cos\omega t \quad (4)$$

де  $\omega = 2\pi \cdot \nu$  – циклічна частота.

Розкриємо вираз (2), взявши до уваги (3) і (4):

$$U = N \cdot \omega \cdot \Delta B \cdot \frac{\pi D^2}{2} \cdot \cos\alpha \cdot \sin\omega t \quad (5)$$

Величина  $U$  змінюється за гармонічним законом, тому усереднене значення напруги в коштуці для змінної напруги буде:

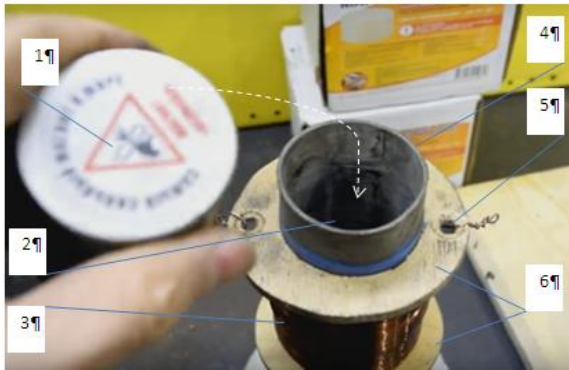
$$\bar{U} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \omega \cdot \Delta B \cdot N \cdot \frac{\pi D^2}{2} \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

Оцінімо величину генерації напруги для реальних параметрів магнітів, котушок і коливань двигуна. У розрахунках прийємо:  $D = 0,05$  м,  $N = 63$  витків,  $\omega = 2\pi \cdot 900/60$  с<sup>-1</sup>,  $\Delta B = 1/2$  Тл (для неодимових магнітів),  $\cos \alpha = 0,5$ .

У результаті підстановки отримаємо

$$\bar{U} = 2 \text{ В.} \quad (7)$$

Для підтвердження теоретичних досліджень виготовлено експериментальну модель генератора (рис. 5), у конструкцію якого входять: пластмасовий корпус 2, два постійних магніти 1 (висотою  $h = 30$  мм і діаметром  $\varnothing = 50$  мм) зі силою притягання 1200 Н, обмотки збудження 3 (мідний електропровідник довжиною  $l = 10$  м та діаметром  $\varnothing = 0,2$  мм), дві фіксувальні вставки 6.



**Рис. 5.** Конструктивні елементи додаткового генератора: 1 – постійний магніт; 2 – камера встановлення постійних магнітів; 3 – обмотка збудження; 4 – пластмасовий корпус; 5 – вивідні кінці обмотки; 6 – фіксувальні вставки

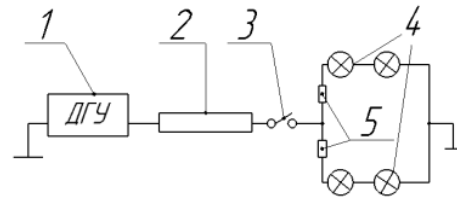
**Fig. 5.** Structural elements of the additional generator: 1 – permanent magnet; 2 – chamber for installation of permanent magnets; 3 – excitation winding; 4 – plastic case; 5 – output ends of the winding; 6 – fixing inserts

Додатковий генератор у бортову електромережу автомобіля підключається незалежно. Схема підключення зображена на рис. 6.

Робота додаткового генератора полягає в електричному живленні габаритних вогнів автомобіля під час його експлуатації за умов недостатньої видимості.

Як правило, приводом головної енергетичної установки слугує пасова передача від двигуна внутрішнього згоряння, що становить близько 6 %

виробленої ним енергії. Для зменшення цих витрат і слугуватиме новостворена модель додаткового генератора. Його робота полягає в такому: після запуску автомобільного двигуна та його прогрівання до експлуатаційного режиму вмикаємо вмикач незалежної мережі, тобто тоді, коли двигун працює на холостих обертах. Відповідно амплітуда коливання двигуна є максимально стабільною, що забезпечує повний поступальний хід магнітів, які у своєму корпусі-статорі починають поздовжньо-зворотний рух, формуючи в обмотці ЕРС. Далі через дводіодний міст вироблений електричний струм рухається на контакти вимикача, запобіжники і на габаритні лампи автомобіля.



**Рис. 6.** Схема підключення додаткового генератора: 1 – генератор; 2 – випрямляч; 3 – незалежний вмикач; 4 – габаритні вогні автомобіля; 5 – запобіжники

**Fig. 6.** Scheme of the additional generator connecting: 1 – generator; 2 – rectifier; 3 – independent switch; 4 – side lights of the car; 5 – fuses

Отже, використання генератора з двома постійними магнітами дасть змогу зменшити навантаження на головну генераторну установку та, відповідно, знизить витрату палива двигуна.



**Рис. 7.** Додаткова генераторна установка в бортовій мережі автомобіля

**Fig. 7.** Additional generator installation in the on-board network of the car

Обладнання, яке використовували в процесі проведення експериментальних досліджень: авто-

мобілі ВАЗ «Калина» з об'ємом двигуна  $V = 1,5$  л та «Опель-Омега»  $V = 2$  л, бортова електромережа автомобілів (генераторна установка) та додаткова генераторна установка (див. рис. 7).

Для проведення експерименту двигун прогрівали до  $80^\circ\text{C}$ . Встановили час проведення одного досліду – 1 хв.

Три досліди проводили з базовою бортовою електромережею і записували середні значення витрати палива за 1 хв, а інші аналогічно проводили з додатковою генераторною установкою та здійснювали заміри витрати палива і вихідної напруги на клеммах.

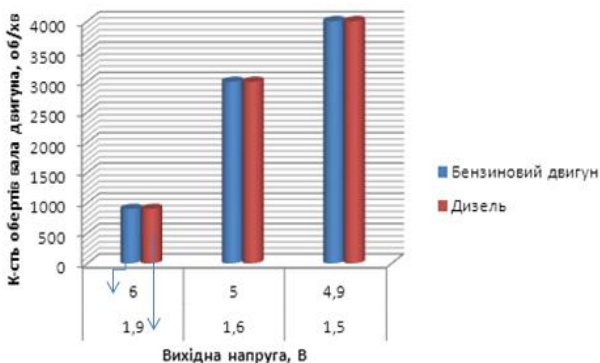
Отримані значення досліджуваних параметрів занесені в таблицю.

Аналіз таблиці доводить, що за використання додаткової установки витрата палива знижується майже однаково: у дизеля на  $4,7\text{ см}^3/\text{хв}$ , у бензинового двигуна – на  $4,6\text{ см}^3/\text{хв}$ . Відповідно найбільші значення вихідної напруги спостерігаються на холостому ходу дизеля –  $6,0\text{ В}$ .

Згідно з таблицею побудовано діаграми залежностей вихідної напруги додаткової генераторної установки відносно обертів колінчастого вала двигуна (рис. 8).

**Таблиця.** Результати експериментальних досліджень  
**Table.** Results of experimental studies

№ з/п	Параметр	Середні значення		Витрата палива (середні значення), $\text{см}^3/\text{хв}$							
		бензиновий двигун	дизель	базова		з генератором					
				бензиновий двигун	дизель	бензиновий двигун	дизель				
900 об./хв											
1	Хід магнітів, мм	5,8	14,7	64,2	46,4	59,6	41,7				
2	Вихідна напруга, В	1,9	6,0								
3000 об./хв											
1	Хід магнітів, мм	5,8	9,7								
2	Вихідна напруга, В	1,6	5,0								
4000 об./хв											
1	Хід магнітів, мм	5,8	9,5								
2	Вихідна напруга, В	1,5	4,9								



**Рис. 8.** Діаграми залежностей вихідної напруги додаткового генератора від обертів колінчастого вала двигуна

**Fig. 8.** Diagrams of dependences of the output voltage of the additional generator on the revolutions of the engine crankshaft

Аналізуючи теоретичні й експериментальні дослідження, можна стверджувати, що при частоті обертання двигуна  $900\text{ об./хв}$  ми отримали добру узгодженість (6) з експериментальним значенням  $U = 1,9\text{ В}$ . Але при інших частотах,  $3000$  і

$4000\text{ об./хв}$ , розбіжність буде значною, у кілька разів. Отримана нами оцінка є дуже наближеною, з припущенням, що магнітний потік змінюється за гармонічним законом, а в кожному витку котушки індуктивності генерується однакова електрорушійна сила. Недоліком нашої моделі є те, що зі зростанням частоти коливань двигуна значення напруги мали б збільшуватися прямо пропорційно частоті, а на практиці значення напруги, навпаки, зменшується від  $1,9\text{ В}$  до  $1,5\text{ В}$  (для бензинового двигуна) при збільшенні частоти від  $900\text{ об./хв}$  до  $4000\text{ об./хв}$  відповідно.

Причину розбіжності слід шукати в описі рухів магнітів. Очевидно, що необхідно розглядати дисипативні сили, тобто гальмування самих магнітів внаслідок взаємодії між собою. Тоді закон руху буде не гармонічним, а амплітуда коливань магнітів залежатиме від частоти.

**Висновки.** За частоти обертання  $900\text{ об./хв}$  величина генерації електричної напруги в котушці добре узгоджується з припущенням про гармонічний рух магнітів, які генерують електрорушійну силу згідно із законом електромагнітної індукції.

При зростанні частоти обертання двигуна рух магнітів стає негармонічним, тобто проявляється взаємодія між магнітами.

Експериментальна установка може бути оптимізована: за рахунок розміщення магнітів і катушки (для отримання вищих значень генерації напруги) та більшої віддачі коливного руху двигуна на генерацію електричної енергії.

Завдяки використанню вібрації двигуна зменшується навантаження на основну генераторну установку.

Максимальна вихідна напруга на клеммах додаткового генератора (для дизелів) досягла близько 6,0 В, а мінімальна – 4,9 В. Для бензинового двигуна: максимальна – 1,9 В, мінімальна – 1,5 В.

Ефективність використання додаткового генератора на дизельних двигунах зростає до 31,7 % відносно базової комплектації.

#### Бібліографічний список

1. Анализ перспектив развития нетрадиционных источников энергии и оценка возможностей их использования / В. В. Тарасова и др. *Автомобиль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. 12. С. 50-56.
2. Асташенко С. Б. Топливная аппаратура легковых автомобилей. Дизель. Устройство и обслуживание. Минск: Автостиль, 2001. 112 с.
3. Березин С. В. Справочник автомеханика. Ростов-на-Дону: Феникс, 2008. 353 с.
4. Бойко М. Ф. Трактори та автомобілі. Ч. 2: Електрообладнання: навч. посіб. Київ: Вища шк., 2001. 180 с.
5. Гнатов А. В., Аргун І. В., Улянець О. А. Електромобілі – майбутнє, яке вже настало. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. 11. С. 24-28.
6. Елементи електронних систем керування автомобільними двигунами: навч. посіб. / Л. П. Клименко, О. Ф. Прищепов, В. І. Андреев, В. Ю. Голдун. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. П. Могили, 2013. 132 с.
7. Марченко А. П. Двигуни внутрішнього згоряння: підручник: у 6 т. / за ред. проф. А. П. Марченка, засл. діяча науки України, проф. А. Ф. Шеховцова. Т. 1: Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. Харків: Вид. центр НТУ «ХП», 2004. 493 с.
8. Марченко А. П. Двигуни внутрішнього згоряння: підручник: у 6 т. / за ред. проф. А. П. Марченка, засл. діяча науки України, проф. А. Ф. Шеховцова. Т. 2: Доводка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. Харків: Вид. центр НТУ «ХП», 2004. 367 с.
9. Марченко А. П. Двигуни внутрішнього згоряння: підручник: у 6 т. / за ред. А. П. Марченка, засл. діяча науки України, проф. А. Ф. Шеховцова. Т. 3: Комп'ютерні системи керування ДВЗ. Харків: Вид. центр НТУ «ХП», 2004. 429 с.
10. Понеділок Г. В., Данилов А. Б. Курс загальної фізики. Електрика і магнетизм: навч. посіб. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2010. 516 с.
11. Руководство по ремонту автомобиля «SENS» / ЗАО «ЗАЗ» Запорожский автомобилестроительный завод». Запорожье, 2007. 296 с.
12. Сажко В. А. Электричне та електронне обладнання автомобілів. Київ: Каравела, 2004. 304 с.
13. Сажко В. А. Електрообладнання автомобілів і тракторів: підручник. Київ: Каравела, 2009. 400 с.
14. Трактори та автомобілі. Ч. 3: Шасі: навч. посіб. / А. Т. Лебедев, В. М. Антощенко, М. Ф. Бойко; за ред. проф. А. Т. Лебедева. Київ: Вища шк., 2004. 336 с.
15. Трантер А. Руководство по электрическому оборудованию автомобилей. ЗАО «Альфамер паблшинг», 2001. 284 с.
16. Herman A. Mathematical modeling of asynchronous generators with an active-inductive load. *Motrol*. 2017. Vol. 19, No 1. P. 71-74.

Стаття надійшла 29.08.2022