

ЕКСПЛУАТАЦІЙНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ АВТОМОБІЛІВ

© Нємий С. В., Бритковський В. М., 2017

Метою дослідження є аналіз факторів, що впливають на експлуатаційну ефективність автомобільних генераторів. Запропоновано показник оцінювання ефективності реалізації потенційних властивостей генераторів на автомобілях. Доведено, що важливим фактором ефективності використання генераторів на автомобілях є їх швидкісний режим в умовах експлуатації, який конструктивно задається передаточним відношенням приводу. Обґрунтовано оптимальне значення передаточного відношення приводу генератора на автомобілях.

Ключові слова: автомобіль, електроживлення автомобіля, генератор, баланс електроенергії, привід генератора, передаточне відношення, струмошвидкісна характеристика, віддача струму генератором, коефіцієнт ефективності використання.

S. Niemyj, V. Brytkovskyi

THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF VEHICLES

The aim of the study is analysis of the factors which affect the operational efficiency of automotive alternators. The proposed indicator effectiveness evaluation of the potential properties of the generators on the cars. It is proved that an important factor of the effectiveness of the usage of generators on cars is their speed in operation, which structurally sets the transmission ratio of the drive. It is justified the optimal value of the gear ratio of the drive of the generator on the car.

Keywords: car, car power supply, generator, power balance, generator drive, gear ratio, current-flow characteristic, return current of the generator, efficiency factor of use.

Формулювання проблеми. За принципом декомпозиції автомобільний транспортний засіб (АТЗ) можна зобразити структурною схемою (рис. 1).

На цій структурній схемі бачимо, що експлуатаційна ефективність АТЗ залежить від робочих характеристик функціональних систем, які, своєю чергою, формуються робочими характеристиками складових (агрегатів).

Експлуатаційна ефективність системи електроживлення (СЕЖ) АТЗ визначається здатністю генератора забезпечити позитивний баланс електроенергії у характерних умовах експлуатації [10]. Особливо важливим є недопущення прогресуючого розряду акумуляторних батарей впродовж добового циклу експлуатації. Це завдання здебільшого вирішують застосовуючи генератор великої потужності. Однак потужніший генератор має, відповідно, більшу вагу і габарити. Це є досить суттєвим, оскільки застосування агрегату, що має порівняно більшу вагу і габарити є, в принципі небажаним, тому що це збільшує конструктивну вагу і створює компоувальні проблеми у моторному відсіку АТЗ. Тому сьогодні актуальні дослідження з метою визначення основних факторів, що комплексно впливають на ефективність використання генераторів на АТЗ.

Аналіз відомих рішень і публікацій. У роботах [1 – 6] наведено результати досліджень, які характеризують умови експлуатації та відображають енергетичні витрати двигунів на привід генераторів. У публікаціях [7 – 10] висвітлено теоретичні основи розрахунку параметрів генераторів під час їх проектування.

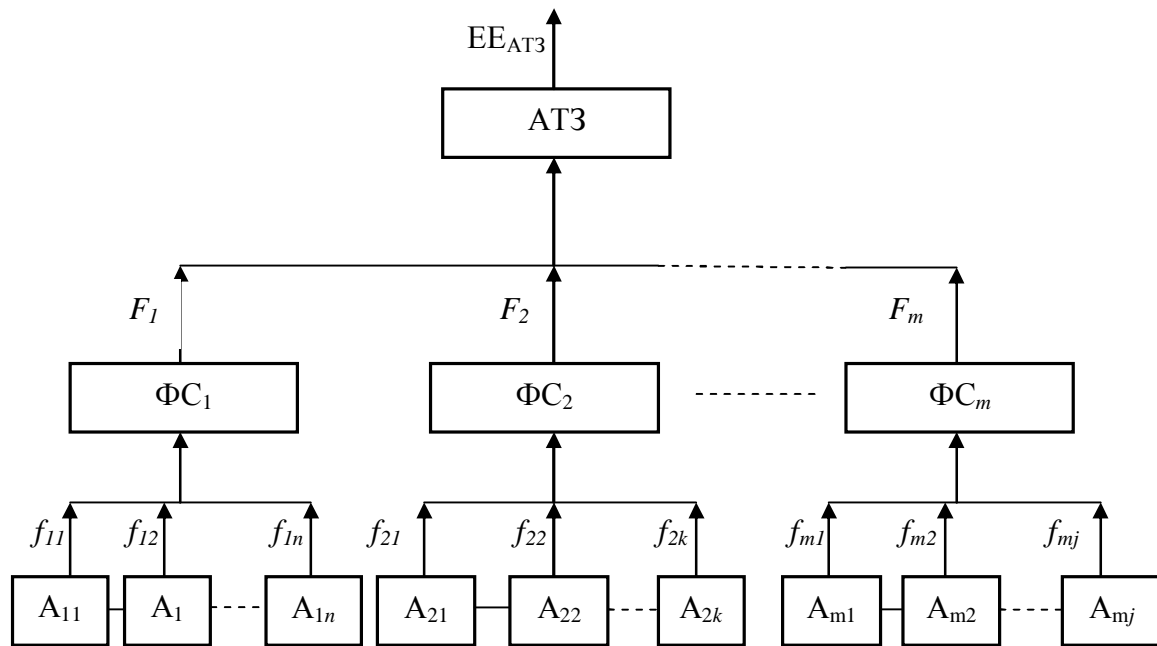


Рис. 1. Структурна схема АТЗ:

A – складова частина (агрегат) функціональної системи (ФС);

f – робочі характеристики складових (агрегатів); F – робочі характеристики функціональних систем;

EE_{AT3} – експлуатаційна ефективність АТЗ

У роботі [7] наведено коефіцієнти для оцінювання технічного рівня генераторів з метою їх порівняння як окремих виробів. Для оцінювання ефективності використання матеріалів генератора пропонується коефіцієнт використання (максимальний):

$$K_{max} = P_{z\ max}/G_z = UI_{max}/G_z, \quad (1)$$

де $P_{z\ max}$ – максимальна потужність генератора, Вт; G_z – вага генератора без шківів, Н; I_{max} – максимальний струм генератора згідно із струмшвидкісною характеристикою (СШХ), А.

У зв'язку із тим, що вага електричних машин залежить не від потужності, а від моменту, то цей коефіцієнт придатний тільки для порівняння технічного рівня генераторів із однаковими або близькими значеннями частот обертання. Для об'єктивнішого оцінювання технічного рівня генераторів застосовують питомий коефіцієнт використання [7], який враховує різну частоту обертання ротора:

$$K_{num} = UI_p/G_z n_p, \quad (2)$$

де I_p – розрахунковий струм генератора [7, 8, 9]; n_p – розрахункова частота обертання ротора генератора, що відповідає I_p .

У випадку, якщо СШХ генератора невідома, користуються питомим коефіцієнтом використання за марним ходом [7]:

$$K_x = UI_p/G_z n_o, \quad (3)$$

де n_o – частота обертання ротора генератора, що відповідає початку віддачі струму.

Однак наведені вище коефіцієнти не придатні для оцінювання ефективності використання генераторів на АТЗ. Теоретичні аспекти формування ефективності використання генераторів на АТЗ лише частково висвітлено у публікаціях [4, 5], що сьогодні є недостатнім для проектування і експлуатації ефективних СЕЖ на АТЗ.

Постановка задачі. Аналіз факторів, що впливають на ефективність використання генераторів з метою отримання максимальної ефективності СЕЖ на АТЗ.

Основний матеріал. Основним критерієм ефективності використання генераторів на АТЗ є їх здатність забезпечити баланс електроенергії [11] за мінімальної власної ваги. При виборі моделі

генератора важливо прийняти оптимальне рішення, враховуючи його СШХ і еквівалентну годинну віддачу струму генератором, його вагу та еквівалентний струм навантаження споживачами електроенергії АТЗ. Тому для порівняльного оцінювання ефективності використання генератора на АТЗ, обґрунтовано і запропоновано відповідний показник – коефіцієнт ефективності використання генератора на АТЗ [6], який визначають за формулою:

$$K_e = \frac{I_n (q_z - I_n)}{m_z I_{max}} \text{ А/кг}, \quad (4)$$

де I_n – еквівалентний струм навантаження споживачами електроенергії АТЗ, А; q_z – еквівалентна годинна віддача струму генератором, А-год/год; m_z – маса генератора зі шківом, кг.

Розглянемо рівняння (4) щодо впливу його складових на коефіцієнт ефективності. Струм віддачі генератора I_i залежно від частоти обертів його ротора n описують струмшвидкісною характеристикою (СШХ) [7, 8, 9] за формулою

$$I_i = I_{max} \left[1 - \exp \left(\frac{n_o - n_{zi}}{n_p - n_o} \right) \right], \quad (5)$$

де n_{zi} – поточне значення частоти обертання ротора генератора залежно від швидкісного режиму двигуна.

Розбивши швидкісний діапазон генератора ($n_x - n_{max}$) на ряд елементарних інтервалів із кроком $\Delta n = (150 - 250) \text{ хв}^{-1}$, еквівалентну (експлуатаційну) годинну струмову віддачу генератора q_z , виходячи із змінного швидкісного режиму роботи двигуна, можна найпростіше розрахувати методом графічного інтегрування [4 – 7, 11] за формулою

$$q_z = I_x \Delta t_{ex} + \sum_{i=1}^k I_i \Delta t_{ei}, \quad (6)$$

де n_x – частота обертання генератора під час роботи двигуна на марному ході; n_{max} – частота обертання генератора під час роботи двигуна на марних обертах; I_x – віддача струму генератором під час роботи і двигуна на марному ході; Δt_{ex} – відносний час роботи двигуна на марному ході; k – кількість елементарних інтервалів; I_i – струм генератора у середині розглядуваного елементарного інтервалу; Δt_{ei} – відносний час роботи двигуна в розглядуваному елементарному інтервалі.

Виразивши значення струму віддачі генератора I_i через залежність (5), отримаємо:

$$q_z = I_{max} \left[1 - \exp \left(\frac{n_o - n_x}{n_p - n_o} \right) \Delta t_{ex} \right] + \sum_{i=1}^k I_{max} \left[1 - \exp \left(\frac{n_o - n_{zi}}{n_p - n_o} \right) \Delta t_{ei} \right] = I_{max} A, \quad (7)$$

де, врахувавши відносний час роботи Δt_{ei} разом із відносним часом роботи двигуна на марному ході:

$$A = \sum_{i=1}^{k+1} \left\{ \left[1 - \exp \left(\frac{n_o - n_{zi}}{n_p - n_o} \right) \right] \Delta t_{ei} \right\}. \quad (8)$$

Підставивши до рівняння (4) величину q_z згідно з виразом (7), отримаємо:

$$K_e = \frac{I_n (I_{max} A - I_n)}{m_z I_{max}} = \frac{I_n (A - 1/I_{max})}{m_z}, \text{ А/кг}. \quad (9)$$

Диференціюючи вираз (4) за змінною I_n , отримаємо:

$$\frac{dK_e}{dI_n} = \frac{d}{dI_n} \left[\frac{I_n (q_z - I_n)}{m_z I_{max}} \right] = \frac{q_z - 2I_n}{m_z I_{max}}. \quad (10)$$

Аналіз рівнянь (1, 9 і 10) показує, що: 1) збільшення маси генератора m_z призводить до зниження коефіцієнта його використання K_e на АТЗ; 2) збільшення максимального струму генератора I_{max} сприяє підвищенню ефективності його використання на АТЗ; 3) із виразу (10) випливає, що при $(q_z - I_n) > 0$ для підвищення ефективності використання генератора доцільно

реалізувати конструктивні рішення при проектуванні АТЗ – зменшити еквівалентний струм навантаження споживачами I_n за рахунок оптимізації енергоспоживання функціональними системами, що живляться від електричної мережі АТЗ; 4) збільшення еквівалентної годинної віддачі струму генератором q_e призводить до зростання ефективності його використання на АТЗ, чого можна досягти інтенсифікацією швидкісного режиму генератора підвищенням передаточного відношення його приводу.

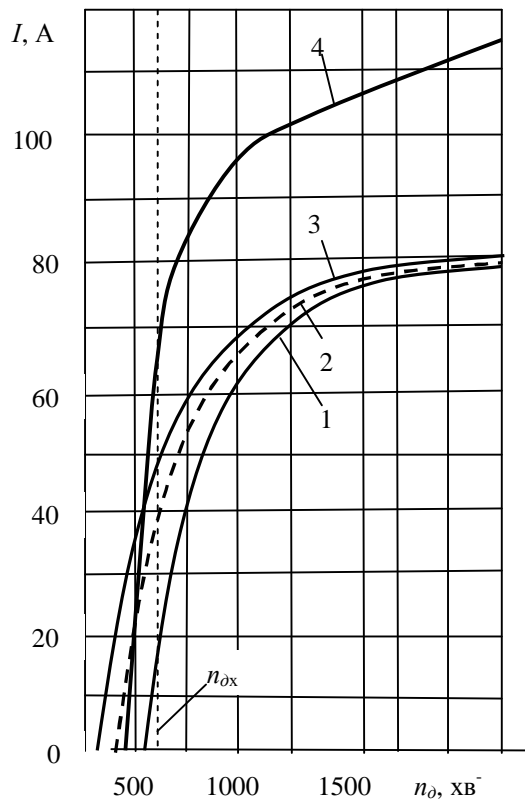


Рис. 2. Струмошвидкісні характеристики генераторів 65.3701 (1 – 3) і 85.00 (4), приведені до частоти обертання колінчатого вала двигуна за різних значень передаточного відношення їх приводу: 1, 4 – $u_e = 2,35$; 2 – $u_e = 2,77$; 3 – 3,3

n_{dx} – значення частоти обертання колінчатого вала під час марного ходу двигуна. На рис. 2 наочно відображено, те що передаточне відношення приводу генератора особливо впливає на величину віддачі ним струму під час марного ходу двигуна.

Криві на рисунку наочно ілюструють фізичну суть передаточного відношення приводу генератора – передаточне відношення приводу визначає місцерозташування СШХ у швидкісному діапазоні роботи двигуна.

Підвищення передаточного відношення приводу зміщує СШХ в область з низькою частотою обертання колінчатого вала двигуна, що сприяє збільшенню струмової віддачі під час роботи двигуна на марному ході і, відповідно, збільшенню годинної віддачі струму генератором.

Наприклад, показники, що характеризують ефективність використання генераторів на великому міському автобусі ЛАЗ-А183 за різних значень передаточного відношення приводу генератора, наведено у табл. 1.

У роботі [6] показано результати досліджень швидкісного режиму генераторів автобусів, із яких випливає, що відносна тривалість роботи двигуна на марному ході може сягати 45 % часу експлуатації. Це свідчить про те, що потенційні властивості генераторів необхідно формувати,

Цілком очевидно, що застосування коефіцієнта K_e для порівняльного оцінювання ефективності використання генератора на АТЗ є практично доречним тільки при $(q_e - I_n) > 0$, тобто при забезпеченні генератором додатного балансу електроенергії. При $(q_e - I_n) = 0$ баланс електроенергії є нульовим, і практично відсутній резерв за заряджанням акумуляторних батарей у процесі експлуатації АТЗ, що може призвести до їх прогресуючого розряду і передчасного виходу з ладу. При $(q_e - I_n) < 0$ баланс електроенергії АТЗ є від’ємним, що призводить до постійного розряду акумуляторних батарей і їх швидкої відмови. Обидва ці режими є практично аварійними щодо умов роботи акумуляторних батарей та неприпустимими в експлуатації АТЗ.

Певною мірою показником рівня реалізації потенційних властивостей генератора є його СШХ, приведена до частоти обертання колінчатого вала двигуна. Швидкісний показник СШХ при цьому виражається залежністю:

$$n_{oi} = n_e / u_e, \quad (11)$$

де n_{oi} – поточне значення частоти обертання колінчатого вала двигуна; u_e – передаточне відношення приводу генератора.

На рис. 2 показано СШХ генераторів 65.3701 (КЗАТЕ, м. Самара, РФ) і 85.00 (ЗАТ “Електромаш”, м. Херсон), приведені до частоти обертання колінчатого вала двигуна n_{oi} при різних значеннях передаточного відношення приводу генератора u_e , де

враховуючи вимог забезпечення віддачі струму під час роботи двигуна на марному ході. Тут цілком очевидним є те, що з метою запобігання надмірному розряду акумуляторних батарей струмова віддача генератора у вказаному режимі роботи двигуна повинна бути по якомога більшою. У цьому аспекті важливим фактором, поряд із передаточним відношенням приводу генератора, є його частота обертання початку віддачі струму n_o і максимальний струм віддачі I_{max} .

Таблиця 1

Ефективність використання генераторів на великому міському автобусі ЛАЗ-А183

Модель генератора	I_{max} , А	m_z , кг	u_z	I_x , А	q_z , А·год/год	I_n , А	K_e , А/кг
65.3701	80	9,9	2,35	17	35,72	65,43	-2,45
65.3701	80		2,77	35	47,4		-1,49
65.3701	80		3,3	47	64,97		0,645
85.00	120	15,4	2,35	65	80,3	65,43	0,526
						55,82	0,739

Частота обертання початку віддачі струму генератором n_o , за заданої намагнічувальної сили, визначається кількістю послідовно з'єднаних витків фази w [8, 9]. За збільшення кількості витків фази w частота обертання початку віддачі струму генератором n_o пропорційно зменшується. При цьому максимальний струм генератора I_{max} пов'язаний із обмотковими параметрами фаз залежністю [7]

$$I_{max} = c/w, \tag{12}$$

де c – коефіцієнт пропорційності.

Отже, із збільшенням кількості витків фази генератора w зменшується кількість обертів початку віддачі струму генератором n_o і величини максимального струму генератора I_{max} .

Характерним прикладом у цьому відношенні можуть слугувати СШХ генератора змінного струму Г250 [8] залежно від кількості витків фази (рис. 3).

Крива 1 найвигідніше відрізняється в аспекті максимального струму генератора, однак вона є найгіршою за частотою обертів початку віддачі струму. З іншого боку, СШХ 3 має якнайкращі швидкісні показники за обертами початку віддачі струму, але і найменше значення максимального струму генератора. Із наведеного видно, що вибираючи величину передаточного відношення приводу генератора, яке забезпечить частоту обертання генератора, під час роботи двигуна на марному ході практично понад 1800 хв^{-1} генератор із СШХ 1 буде ефективнішим, оскільки його еквівалентний струм віддачі q_z буде значно більшим, що дасть змогу забезпечити баланс електроенергії АТЗ, особливо автобуса, із більшою кількістю споживачів електроенергії. Із зазначеного вище випливає, що зменшуючи кількість витків обмоток статора w , можна збільшити величину максимального струму генератора I_{max} до найбільш можливого значення, виходячи із оптимізаційного аспекту. Внаслідок цього параметри СШХ погіршуються через збільшення частоти обертів початку віддачі струму

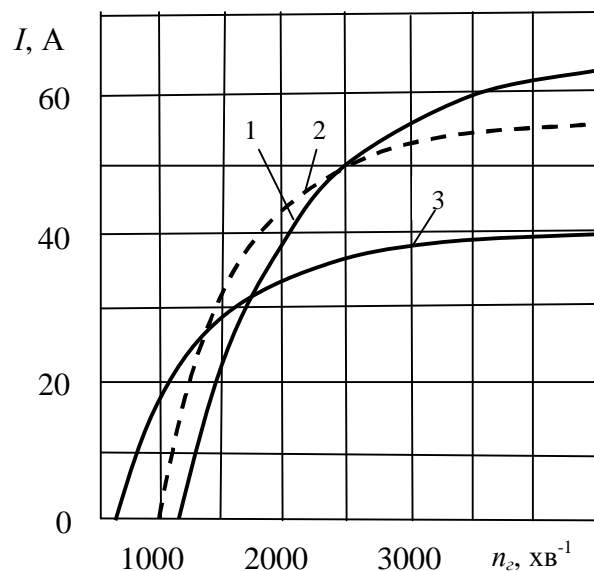


Рис. 3. Струмошвидкісні характеристики генератора при різних значеннях числа витків фази: 1 – $w = 48$; 2 – $w = 60$; 3 – $w = 78$

генератором n_o . Однак це можна компенсувати завдяки інтенсифікації швидкісного режиму генератора збільшенням передаточного відношення його приводу, у результаті чого під час роботи двигуна на марному ходу буде досягнуте такого значення частоти обертання генератора, яке забезпечить необхідну віддачу струму.

Визначаючи максимальне значення передаточного відношення приводу генераторів, доцільно враховувати два аспекти.

1. Середнє значення частоти обертання ротора генератора не має перевищувати допустимої величини частоти обертання підшипників.

2. Під час роботи двигуна на марному ходу доцільно забезпечити струмову віддачу генератора не меншою за $(0,7-0,8)I_{max}$, що відповідає значенню [7-9] розрахункового струму генератора I_p .

У сучасних моделях автомобільних генераторів переважно застосовують підшипники типу 6-180304, 6-180603 і 6-180605. Розрахункова частота обертання вказаних підшипників $n_n = 10000 - 12500$ хв⁻¹. Максимально допустиме значення передаточного відношення приводу генераторів отримаємо за формулою [6]

$$u_{z,max} = n_n/n_{oc} = n_n u_z/n_{zc}, \quad (13)$$

де n_{oc} – середня частота обертання вала двигуна згідно з функцією розподілу [6]; u_z – реальне значення передаточного відношення приводу генераторів (за моделями аналогів); n_{zc} – середня частота обертання роторів генераторів при даному значенні передаточного відношення приводу.

Для прикладу, розглянемо параметри швидкісного режиму генераторів автобусів (табл. 2) [6].

Таблиця 2

Параметри швидкісного режиму генераторів автобусів

Модель автобуса	Передаточне відношення приводу генератора u_z	Умови руху	Відносний час роботи двигуна на марному ходу, $\Delta t_{вх}$	Середня частота обертання, хв ⁻¹	
				двигуна n_{oc}	генератора n_{zc}
ЛіАЗ-5256	2,54	в місті	0,45	969	2461
ЛАЗ-695Н	2,0	в місті	0,20	1276	2551
		за містом	0,15	1562	3123
ЛАЗ-42021	2,3	в місті	0,20	1132	2602
		за містом	0,15	1327	3051

Виконавши обчислення за формулою (13) і даними табл. 2 отримаємо максимально допустимі значення передаточного відношення приводу генераторів вказаних моделей автобусів, зокрема: для ЛіАЗ-5256 – $u_{z,max} = 13$; для ЛАЗ-695Н – $u_{z,max} = 8$; для ЛАЗ-42021 – $u_{z,max} = 9,4$.

Цілком очевидно, що отримані значення передаточного відношення не є раціональними із таких причин. По-перше, частота обертання генераторів буде у декілька разів більшою, ніж це потрібно навіть для того, щоб струм віддачі генератора при роботі двигуна на марному ходу практично дорівнював максимальному значенню I_{max} . По-друге, швидкісний режим при $u_z = 8 - 13$ сприятиме різкому зниженню надійності генератора через прискорене спрацювання підшипників, щіткового вузла та привідних пасів. По-третє, діаметри ведучих шківів (колінчатого вала двигуна) будуть надто великими і, відповідно, неприйнятними із компоновальних міркувань.

У автомобільних генераторів сучасних конструкцій розрахункова частота обертання n_p , що відповідає розрахунковому струму генератора I_p , не перевищує 2100 – 2400 хв⁻¹. Отже, при частоті обертання вала двигуна на марному ходу, що дорівнює 600 хв⁻¹, оптимальне передаточне відношення приводу генераторів знаходитиметься у діапазоні $u_z = 3,5 - 4$. При цьому за результатами досліджень [6], 90 % часу експлуатації максимальне значення частоти обертання роторів генераторів досліджуваних автобусів не перевищує 8000 хв⁻¹.

Висновки

1. Обґрунтовано показник ефективності використання генераторів на АТЗ.
2. Формування ефективності СЕЖ у процесі конструювання АТЗ є завданням дискретної оптимізації, основні аспекти якої полягають у мінімізації споживання електричного струму найбільш енергоємними системами оптимізацією їхніх параметрів і обґрунтованому виборі передаточного відношення привода генератора.
3. Оптимальні параметри СШХ генераторів на АТЗ значною мірою формуються обмотковими параметрами статора і швидкісним режимом генераторів.
4. Ефективність генераторів також значною мірою залежить від передаточного відношення їх привода, прийнятого у процесі проектування АТЗ. З метою найефективнішого використання генераторів на АТЗ обґрунтовано оптимальне значення передаточного відношення їх привода в межах $u_2 = 3,5 - 4$.

1. Немий С. В. Розрахунок енергетичних витрат для приводу автомобільних генераторів // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів". – 2010. – № 678. – С. 83–88. 2. Немий С. В. Енергетична структура автомобільного транспортного засобу / Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів". – 2015. – № 820. – С. 90–96. 3. Немый С. В. Чтобы обеспечить баланс электроэнергии на автобусах с дизелями. – М.: Автомобильная промышленность, 2003. – № 8. – С. 12–13. 4. Немый С. В. Эффективность автомобильных генераторов: сб.: Труды ВКЭИавтобусапрома. – 1989. – С. 56–62. 5. Немый С. В. Об использовании потенциальных возможностей генераторов. Автомобильная промышленность. – 1998. – № 4. – С. 19–20. 6. Немий С. В. Формування ефективності автобусних генераторів на основі оптимізації показників та експлуатаційних режимів їх роботи: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.20 "Експлуатація і ремонт транспортних засобів". – Львів, 1998. – 168 с. 7. Василевский В. И. Автомобильные генераторы / В. И. Василевский, Ю. А. Купеев. – М.: Транспорт, 1979. – 159 с. 8. Купеев Ю. А. Влияние параметров обмотки статора на токоскоростную характеристику автомобильного генератора переменного тока // Сб. Автотракторное электрооборудование. НИИНАвтопром. – 1969. – Вып. 3. – С. 9–11. 9. Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования /Л. В. Копылова, В. И. Коротков, В. Е. Красильников и др.; под ред. М. Н. Фесенко. – М.: Машиностроение, 1979. – 355 с. 10. Чижков Ю. П. Электрооборудование автомобилей: учебник для ВУЗов / Ю. П. Чижков, А. В. Акимов. – М.: За рулем, 1999. – 384 с. 11. Баланс электроэнергии автомобилей и автобусов. Метод расчета критерии оценки. ОСТ 37.003.034 – 77. – М., 1977. – 21 с.