

Дембіцький В.М., Павлюк В.І.
Луцький національний технічний університет

ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

Проведено дослідження процесу руху автомобіля у межах міста для визначення режимів гальмування транспортного засобу з електроприводом та системою рекуперації електричної енергії. Експериментально отримано вибірку даних, які характеризують режими гальмування за умови визначених інтервалів швидкостей. Розраховані енергетичні показники для даних режимів гальмування транспортного засобу з врахуванням ймовірності їх виникнення. За результатами *прогнозування* режимів роботи систем рекуперації можна удосконалити їх роботу та визначити потрібні характеристики накопичувачів електричної енергії.

Ключові слова: автомобіль, режими гальмування, рекуперація, електрична енергія.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку транспортних засобів все більшу нішу займають саме автомобілі з електричними силовими установками. Переваги таких транспортних засобів вже неодноразово доводилися та підтверджувалися науковими дослідженнями та реальною експлуатацією. Однією з особливостей автомобілів з електричним приводом є можливість застосування систем рекуперативного гальмування, які дозволяють під час гальмування акумулювати вироблену електричну енергію у накопичувачі. Особливо гостро питання акумулювання електричної енергії постає у гібридних транспортних засобах, оскільки спільне використання ДВЗ та електричного двигуна може призвести до того, що внаслідок руху на ДВЗ накопичувачі енергії не матимуть змоги акумулювати усю вироблену енергію. Дана робота є продовженням серії досліджень систем рекуперативного гальмування транспортних засобів [1, 2].

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідження питань пов'язаних з системами рекуперації енергії на даний час здійснюється досить різносторонньо як українськими так і зарубіжними науковцями, так вченими НАМІ здійснено розрахунок балансу потужності комбінованої енергоустановки гібридного автомобіля [3]. Науковцями ХНАДУ під керівництвом проф. Бажинова О.В. проводяться роботи по вдосконаленню та оптимізації систем управління електричними двигунами, а також розробці синергетичних систем автомобілів з електричним приводом [4 – 7]. Науковцями Національного транспортного університету ведуться роботи спрямовані на розробку вдосконалення систем управління гібридними силовими установками. Результати аналізу попередніх досліджень не повністю висвітлюють питання прогнозування режимів роботи системи рекуперативного гальмування.

Мета роботи полягає у визначенні деяких особливостей процесу рекуперативного гальмування під час руху транспортного засобу для можливості прогнозування режимів роботи систем рекуперації та визначення характеристик накопичувачів електричної енергії.

Для цього на даному етапі досліджень необхідно провести дорожні випробування в умовах міського руху. Встановити характерні режими гальмування та можливість їх появи, визначити для цих режимів основні енергетичні показники.

Результати досліджень. Застосування рекуперативного гальмування призводить до циклічної роботи накопичувачів енергії. Якщо не враховувати роботу системи рекуперації, то для автомобіля обладнаного електричним приводом, можна провести розрахунок довговічності накопичувачів енергії, виходячи з кількості циклів, на яку розраховані накопичувачі та враховуючи інтенсивність їх зарядки. Однак система рекуперації енергії забезпечує значно більшу кількість циклів заряду-розряду, що впливатиме на термін служби накопичувачів енергії.

Як відомо, [4, 5, 8 – 10] глибина розряду батареї має безпосередній вплив на термін її служби, тому важливим є на етапі проектування та експериментального виробництва автомобіля з електроприводом провести розрахунки довговічності акумуляторної батареї. Циклічність та глибина заряду-розряду батарей від стаціонарних джерел цілком залежить від запрограмованого режиму їх роботи та запасу ходу, тому дане питання у роботі не розглядається. Натомість необхідно розглянути о системи рекуперації енергії.

З метою накопичення статистичних даних під час поїздок м. Луцьк проводилася реєстрація режимів гальмування транспортного засобу. Результати отриманих даних наведено у таблиці 1 та у вигляді гістограми на рис. 1.

З метою накопичення статистичних даних, що характеризують рух автомобіля в умовах міста, здійснена реєстрація режимів гальмування транспортного засобу за прийнятий один умовний цикл. Дорожні випробування проведені на визначеному маршруті у м. Луцьку. Результати отриманих даних наведено у таблиці 1 та у вигляді гістограми на рисунку 1.

Наведена гістограма (рис. 1) відображає розподіл режимів гальмування транспортного засобу за інтервалами зміни швидкостей протягом періоду спостережень.

Якщо за один умовний цикл прийняти період спостережень під час випробувань та перейти до імовірності станів системи, то можна отримати матрицю імовірностей переходів станів системи.

Таблиця 1 – Розподіл гальмівних режимів транспортного засобу (N , випадків)

Початкова швидкість гальмування V_1 , км/год	Кінцева швидкість гальмування V_2 , км/год								Всього випадків
	70	60	50	40	30	20	10	0	
70	0	2	14	3	5	0	2	12	38
60	-	0	4	5	17	11	5	21	63
50	-	-	0	5	13	19	1	29	67
40	-	-	-	0	11	23	10	41	85
30	-	-	-	-	0	19	1	59	79
20	-	-	-	-	-	0	4	59	63
10	-	-	-	-	-	-	0	7	7
Всього випадків	0	2	18	13	46	72	23	228	402

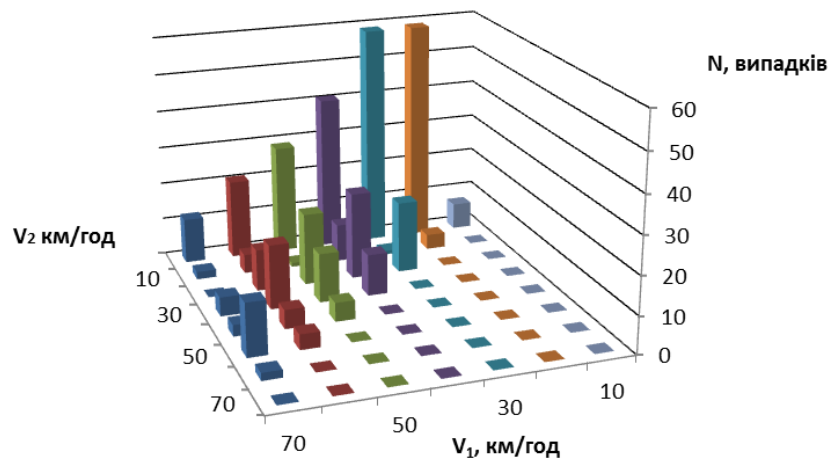


Рисунок 1 – Розподіл гальмівних режимів транспортного засобу

Матриця імовірності станів запишеться у вигляді:

$$A = \begin{pmatrix} P_{70-60} & P_{70-50} & P_{70-40} & P_{70-30} & P_{70-20} & P_{70-10} & P_{70-0} \\ 0 & P_{60-50} & P_{60-40} & P_{60-30} & P_{60-20} & P_{60-10} & P_{60-0} \\ 0 & 0 & P_{50-40} & P_{50-30} & P_{50-20} & P_{50-10} & P_{50-0} \\ 0 & 0 & 0 & P_{40-30} & P_{40-20} & P_{40-10} & P_{40-0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{30-20} & P_{30-10} & P_{30-0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{20-10} & P_{20-0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{10-0} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де $P_{V_1-V_2}$ - імовірність переходу системи зі стану 1 у стан 2.

Таблиця 2 – Матриця ймовірності переходів гальмівних режимів транспортного засобу

Початкова швидкість гальмування V_1 , км/год	Кінцева швидкість гальмування V_2 , км/год								Сума імовірностей подій
	70	60	50	40	30	20	10	0	
70	0,000	0,005	0,035	0,007	0,012	0,000	0,005	0,030	0,0945
60	0,000	0,000	0,010	0,012	0,042	0,027	0,012	0,052	0,1567
50	0,000	0,000	0,000	0,012	0,032	0,047	0,002	0,072	0,1667
40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,057	0,025	0,102	0,2114
30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,047	0,002	0,147	0,1965
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,147	0,1567
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,0174
Сума імовірностей подій	0,000	0,005	0,045	0,032	0,114	0,179	0,057	0,567	1,000

Сума усіх стовпців та рядків матриці дорівнює 1, оскільки події вважаються несумісними. Графічно розподіл переходів станів системи зображено на рисунку 2.

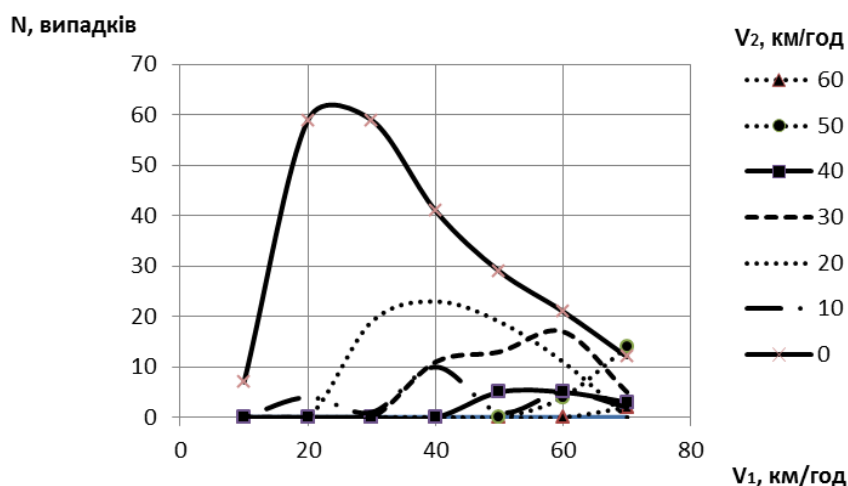


Рисунок 2 – Розподіл переходів станів системи під час рекуперативного гальмування

Маючи дані розподілу гальмівних режимів можна здійснити розрахунок енергетичних показників системи рекуперативного гальмування для кожного можливого стану системи.

Рекуперована енергія E , залежить від конструкційних, масово-інерційних параметрів автомобіля та величини його сповільнення j і розрахована за формулами (2) та (3):

$$E = A_\tau = \int_{t_n}^{t_k} P_j \cdot V dt = \int_{t_n}^{t_k} m_a \cdot j \cdot \delta_{об} \cdot V dt, \quad (2)$$

$$j = \frac{1}{m_a \cdot \delta_{об}} \cdot \left(\frac{30 \cdot U \cdot \eta_e \cdot u_{мре} \cdot I(n)}{\pi \cdot n \cdot r_k \cdot \eta_{мре}} + k_w \cdot B \cdot H \cdot V^2 + m_a \cdot g \cdot \psi \right), \quad (3)$$

де m_a – маса автомобіля, кг;

η_e – коефіцієнт корисної дії електродвигуна, який працює в режимі генератора;

n – оберти електродвигуна, хв.⁻¹;

$u_{мре}$ – передатне число трансмісії електричного привода;

$\eta_{мре}$ – коефіцієнт корисної дії трансмісії, який має місце під час здійснення рекуперативного гальмування;

r_k – радіус кочення колеса, м

B – колія транспортного засобу, м;

H – максимальна висота транспортного засобу, м;
 k_w – коефіцієнт обтічності транспортного засобу;
 V – швидкість транспортного засобу, м/с;
 $\delta_{об}$ – коефіцієнт врахування обертових мас автомобіля;
 ψ – сумарний опір дороги;
 U – напруга накопичувачів, В;
 I – сила струму, А;
 t – час, с;
 P_j – сила інерції автомобіля, Н;
 S – пройдений шлях, м;
 $t_{1,2}$ – час початку та закінчення рекуперативного гальмування, с.

Розраховані прогнозовані енергетичні показники, для матриці зміни станів одиничного випадку гальмування та з врахуванням ймовірності його появи наведено у таблиці 3, 4 відповідно та проілюстровано на рисунку 3.

Таблиця 3 – Рекуперована енергія для матриці зміни станів одиничного випадку гальмування, (Дж)

Початкова швидкість гальмування V_1 , км/год	Кінцева швидкість гальмування V_2 , км/год						
	60	50	40	30	20	10	0
70	25132	50264	75395	100527	125659	150791	175923
60	0	22228	44456	66684	88911	111139	133367
50	-	0	18981	37962	56943	75924	94904
40	-	-	0	15468	30936	46404	61871
30	-	-	-	0	11678	23357	35035
20	-	-	-	-	0	7469	14938
10	-	-	-	-	-	0	51

Таблиця 4 – Рекуперована енергія з врахуванням ймовірності зміни станів режиму гальмування, (Дж)

Початкова швидкість гальмування V_1 , км/год	Кінцева швидкість гальмування V_2 , км/год						
	60	50	40	30	20	10	0
70	125,0	1750,5	562,7	1250,3	1562,9	750,2	5251,4
60	0,0	221,2	552,9	2820,0	2432,9	1382,3	6966,9
50	-	0,0	236,1	1227,6	2691,3	188,9	6846,3
40	-	-	0,0	423,3	1770,0	1154,3	6310,3
30	-	-	-	0,0	552,0	1336,3	5142,0
20	-	-	-	-	0,0	74,3	2192,4
10	-	-	-	-	-	0,0	0,9

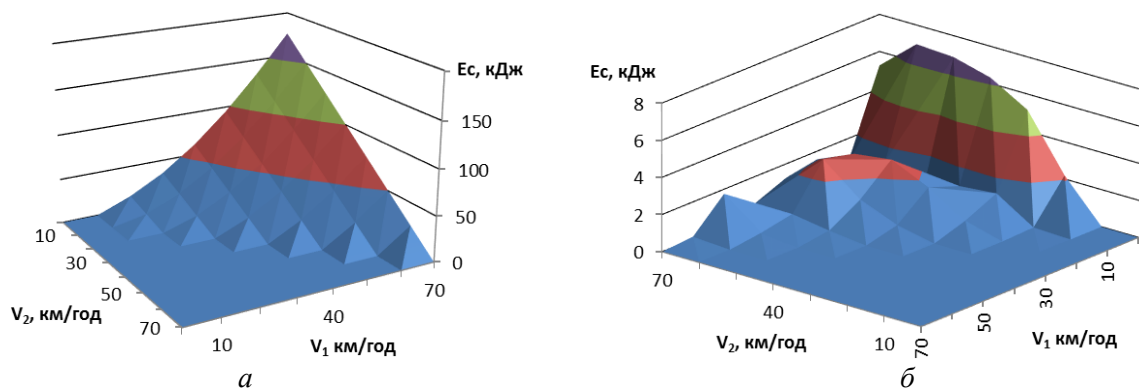


Рисунок 3 – Ілюстрація величини рекуперованої енергії для матриці зміни станів режиму гальмування: *а* – для одиничних випадків гальмування; *б* – з врахуванням ймовірності появи зміни станів за період умовного циклу.

Отримані результати вказують на потребу врахування впливу особливостей режимів руху автомобіля на енергетичні показники рекуперативного гальмування. Так, наприклад, порівнюючи зменшення швидкості на 10 км/год для зміни станів 70-60 і 20-10 км/год отримано різницю кількості рекуперованої енергії для одиничних випадків у 70,3%. У той же час, враховуючи при цьому ймовірність появи вказаних випадків переходу станів за один умовний цикл, різниця отриманої енергії становить лише 40,6%.

Однак варто зазначити, що наведені результати щодо режимів руху потребують певних уточнень, зокрема корегування їздового циклу, збільшення статистичної вибірки та врахування зовнішніх впливів.

Висновки. За результатами досліджень встановлено, що під час однакової зміни швидкості, для різних станів, кількість рекуперованої енергії одиничних випадків може відрізнятись до 70 %. Використовуючи дану методику визначення енергетичних показників процесу рекуперації електричної енергії під час гальмування автомобіля та застосовуючи положення теорії ймовірності можливо удосконалити алгоритм роботи систем рекуперативного гальмування, враховуючи прогнозований стан накопичувачів енергії.

1. Ситовский, О.Ф. Математическое моделирование процесса движения автомобиля с электрическим приводом / О.Ф. Ситовский, В.Н. Дембицкий, А.Н. Кашуба // Вестник БрГТУ. – 2015. – № 4(94): Машиностроение. – С. 55–57.

2. Дембіцький В.М. Застосування систем автоматичного гальмування на транспортних засобах з електричним приводом /В.М. Дембіцький, О.П. Сітовський // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцьк: Луцький НТУ, 2016. – №1 (5). – 177 с., С. 68 – 72.

3. Ломакин В. В. К расчёту баланса мощности комбинированной энергоустановки гибридного автомобиля / В. В. Ломакин, к.т.н., А. В. Шабанов, к.т.н., А. А. Шабанов // Журнал автомобильных инженеров. – М.: 2014. – № 1 (84). – С. 24 – 27.

4. Гібридні автомобілі: моногр. / Бажинов О. В. [та ін.]; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т. – Х. : Крок, 2008. – 327 с.: рис., табл.

5. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / [Бажинов О. В., Смирнов О. П., Серіков С. А., Двадненко В. Я.]. – Харків: ХНАДУ, 2011. – 236 с.

6. Сериков С. А. Теория управления силовой установкой гибридного автомобиля: дисс. на соискание уч. степени доктора технических наук: спец. 05.22.02 “Автомобили и тракторы” / Сериков Сергей Анатольевич. – Харьков, 2013. – 367с.

7. Смирнов О. П. Характерні режими роботи гібридної енергетичної установки автомобіля / О. П. Смирнов, В. І. Калмиков // Автомобильный транспорт / Сб. научн. тр. Харьков: РИО ХНАДУ. – 2006. – № 18. – С. 13–15.

8. Акумуляторні батареї [Електронний ресурс] – 2014. – Режим доступу: <http://sutem.com.ua/923alten.php>. Дата звернення: 25.06.2015 р.

9. Расчет емкости аккумуляторных батарей [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступу: http://avtonom.com.ua/stati/towari_akkumuljatornie_batarei/akkumuljatoridlyaiibp/raschet-emkosti. Дата звернення: 25.06.2015р.

10. Суперконденсаторы или ионисторы вместо аккумулятора. Новая технология Ё-мобиль. [Електронний ресурс] – 2013. – Режим доступу: http://green-car.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=%2062&Itemid=78. Дата звернення: 25.06.2015 р.

REFERENCES

1. Sitovskij O.F. (2015). *Mathematical modeling of process movement of the car with an electric drive* [Matematicheskoe modelirovanie processa dvizhenija avtomobilja s elektricheskim privodom] / O.F. Sitovskij, V.M. Dembickij, A.N. Kashuba // Vestnik BrGTU. – 2015. – № 4(94): Mashinostroenie. – pp. 55–57.

2. Dembickij V.M. (2016). *The use of automatic braking in vehicles with electric drive* [Zastosuvannja sistem avtomatichnogo galmuvannja na transportnih zasobah z elektrichnim privodom] /V.M. Dembickij, O.P. Sitovskij // Modern technologies in engineering and transport. Science journal №1 (5). Lutsk, Lutsk NTU Publ, pp. 68 – 72.

3. Lomakin V. V. (2014). *For the calculation of the balance of power of the combined power installations of a hybrid car* [K raschjotu balansa mocshnosti kombinirovannoj energoustanovki gibridnogo avtomobilja] / V. V. Lomakin, k.t.n., A. V. Shabanov, k.t.n., A. A. Shabanov // Journal of automobile engineers. – Moscow. – № 1 (84). – pp. 24 – 27.

4. Bazhinov O. V. (2008). *Hybrid cars: monograph* [Gibridni avtomobili: monografija]. / O. V. Bazhinov [and other.]; Kharkov: Krok. – 327 p.

5. Bazhinov O. V. (2011) *Synergetic car. Theory and practice* [Sinergetichnij avtomobil]. / [Bazhinov O. V., Smirnov O. P., Serikov S. A., Dvadenko V. Ja.]. – Kharkov: HNADU. – 236 p.

6. Serikov S. A. (2013) *The theory of propulsion hybrid car control: the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: specialty 05.22.02 "Automobiles and Tractors"* [Teoriya upravljenija silovoj ustanovkoj gibridnogo avtomobilja: diss. na soiskanie uch. stepeni doktora tehniceskikh nauk: spec. 05.22.02 “Avtomobili i traktory” / Serikov Sergej Anatolevich]. – Kharkov. – 367 p.

7. Smirnov O. P. (2006) *The characteristic modes of operation the hybrid car power installation* [Характерні режими роботи гібридної енергетичної установки автомобіля] / O. P. Smirnov, V. I. Kalmikov // Car transport collection of the Scientific of labor Kharkov: RIO HNADU. – № 18. – pp. 13–15.

8. *Accumulator batteries* (2014) [Electron resource] / [Акумуляторні батареї]. – URL: <http://sutem.com.ua/923alten.php>.

9. *Calculation of battery capacity* (2013) [Electron resource] / [Расчет емкости аккумуляторов батареї]. URL: http://avtonom.com.ua/stati/towari_akkumuljatornie_batarei/akkumuljatoridlyaip/raschet-embkosti.

10. *Supercapacitors instead of accumulator or electric double layer capacitors. New Technology E-Car* (2013) [Electron resource] / [Суперконденсаторы или ионисторы вместо аккумулятора. Новая технология Jo-mobil] – URL: http://green-car.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=%2062&Itemid=78.

Дембіцький В.Н., Павлюк В.І. Прогнозирование режимов работы систем рекуперативного торможения.

Проведено дослідження процесу руху автомобіля в межах міста для визначення режимів торможения транспортного средства с електроприводом и системой рекуперации электрической энергии. Экспериментально получено вибірку даних, характеризуючих режими торможения при определенных интервалах скоростей. Рассчитаны энергетические показатели для данных режимов торможения транспортного средства с учетом вероятности их возникновения. По результатам прогнозирования режимов работы систем рекуперации можно совершенствовать их работу и определять необходимые параметры накопителей электрической энергии.

Ключевые слова: автомобиль, режимы торможения, рекуперация, электрическая энергия.

V. Dembitskyi, V. Pavliuk. Forecasting system modes of recuperation of electrical energy during application of brakes.

The Provision of environmental requirements has led to the appearance of the car with hybrid power plants for the conservation and proper use of energy. An increasing number of vehicles with alternative electric power plants at the present stage of development of the cars. One of the features of electric cars is the possibility of using recuperation systems electrical energy during braking. These systems allow the braking time to accumulate the generated electric energy to the storage drives.

This work is a continuation of a series of researches of process of braking of vehicles with possibility of use of recuperation systems of electrical energy. This paper proposes to predict the modes of storage of electrical energy during braking of the vehicle depending on the driving mode of the vehicle. Conducted research in real urban driving conditions of the vehicle. Through experimental studies, obtained sample values, characterizing the braking operation provided certain intervals of velocity. The results of the experiment were obtained the likelihood of certain modes of braking. Calculated energy datum for these modes of braking of the vehicle.

According to the results of prediction modes of operation of the recuperation systems to determine the desired characteristics of the storages of electric energy. In addition, to determine the peculiarities of the algorithm of the process control systems power storage drives.

Keywords: vehicle, braking modes, recuperation, electric energy.

АВТОРИ:

ДЕМБІЦЬКИЙ Валерій Миколайович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький НТУ, e-mail: dvm2@meta.ua

ПАВЛЮК Василь Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький НТУ, e-mail: wasilijpi@mail.ru

АВТОРЫ:

ДЕМБИЦКИЙ Валерий Николаевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автомобилей и транспортных технологий, Луцкий НТУ, e-mail : dvm2@meta.ua

ПАВЛЮК Василий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и транспортных технологий, Луцкий НТУ, e-mail: wasilijpi@mail.ru

AUTHORS:

Valerii DEMBITSKYI PhD. in Engineering, senior lecturer of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: dvm2@meta.ua

Vasyl PAVLIUK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: wasilijpi@mail.ru

Стаття надійшла в редакцію 05.10.2016р.