

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 625.282:625.032.

В. Г. МАСЛІЄВ, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»;

Ю. В. МАКАРЕНКО, інженер «НПП «Техносінтез», Харків;

А. О. МАСЛІЄВ, студент НТУ «ХПІ»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ДИНАМІЧНИХ СИЛ, ЩО ДІЮТЬ НА ПУТНЮ СТРУКТУРУ ТА ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ – ВІД ФОРМИ ІМПУЛЬСНИХ ЗБУДЖЕНЬ

Встановлено залежності динамічних сил, що діють на путню структуру та транспортний засіб, який обладнано пневматичними ресорами, – від форми імпульсних збуджень, що виникають при спрацюванні регулятора положення кузова (РПК), та зроблено порівняння їх із силами, які обумовлені впливом нерівностей на путній структурі. Доведено, що завдяки використанню пневматичного ресорного підвішування, яке дозволяє суттєво збільшити статичний прогин у порівнянні з металевим на базі гвинтових пружин, зменшуються сили, що передаються від підресорної маси через колеса на путню структуру. Отримано залежності цих сил від статичного прогину пневматичних ресор та від швидкості руху транспортного засобу. Наведено приклад розрахунку раціональних геометричних та фізичних параметрів пневматичного ресорного підвішування транспортного засобу, яке можна рекомендувати на заміну металевого ресорного підвішування, щоб зменшити руйнівний вплив на путню структуру.

Ключові слова: транспортний засіб, колесо, путня структура, пневматична ресора, статичний прогин, сила, швидкість руху.

Вступ. Досвід експлуатації за кордоном великого різноманіття транспортних засобів, які обладнані пневматичним ресорним підвішуванням (Німеччина, Японія, Франція, Англія, Італія та ін), доводить доцільність його застосування, бо при цьому суттєво зменшуються витрати на ремонт та відновлення як самих транспортних засобів так і путніх структур, по яким вони рухаються, та сприяє суттєвому підвищенню комфорту для пасажирів.

Аналіз основних досягнень і літератури. Застосування на транспортних засобах пневматичного ресорного підвішування вважається перспективним напрямком вирішення проблеми збереження путніх структур, завдяки істотним перевагам перед металевим, оскільки воно дозволяє отримати (при однакових габаритах для розміщення), значно більшу величину статичного прогину, тобто реалізувати «м'яке підвішування». Це забезпечує власну частоту коливань кузова на пневморесорах меншу за 1 Гц. При цьому також зменшуються інерційні (динамічні) сили, що діють на путню структуру при русі транспортних засобів, забезпечується кращий захист від шуму та вібрацій, які виникають при котінні коліс по путній структурі [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8].

На часі це особливо важливо, бо путні структури, як на залізничному, так і на автомобільному транспорті – застаріли: вони створювалися для значно менших транспортних навантажень та швидкостей руху.

Мета дослідження, постановка задачі. Мета дослідження полягає у встановленні залежності динамічних сил, що діють на путню структуру та кузов транспортного засобу, який обладнано пневматичними ресорами, – від форми імпульсних збуджень, що виникають при спрацюванні регулятора положення кузова (РПК), та порівняння їх із силами, які обумовлені впливом нерівностей на путній структурі.

Матеріали досліджень. Системи пневматичного ресорного підвішування використовується на транспортних засобах вже більше, ніж 50 років, і безперервно удосконалюються, бо з'явилися нові матеріали та технології, які мають підвищити його техніко-економічні властивості. На часі створена вітчизняна компактна пневморесора, у якій гнучка оболонка виконана з поліуретану замість гуми. На основі комп'ютерних технологій створений і успішно пройшов випробування оригінальний мікропроцесорний регулятор положення кузова (РПК), який мінімізує витрати стислого повітря на підпитку пневморесори і забезпечує стабільність регулювання рівня підлоги кузова щодо путньої структури при зміні умов довколишнього середовища [4, 9, 11].

Мікропроцесорний (дискретний) РПК здійснює імпульсну подачу або випуск стислого повітря з пневморесори при відхиленні її висоти від номінальної. Це може створити додаткові силові збурення, що будуть діяти на кузов та путню структуру, рівень котрих досліджено недостатньо.

Для дослідження обрано метод математичного моделювання [10] з використанням програмного комплексу Simulink.

На рис.1 наведена розрахункова схематично система пневматичного ресорного підвішування, яка досліджувалась.

Система працює таким чином. При номінальній висоті кузова 1 відносно маточини колісної осі 2 (або путньої структури), тиск повітря в пневматичній ресорі 3 урівноважує силу від ваги кузова. При цьому пневморесора від'єднана від компресора і не сполучається з атмосферою.

Якщо маса повітря в пневморесорі зменшиться, наприклад, із-за витоків його через нещільні з'єднання, або додасться навантаження до кузова, він опуститься долу, пружина приводу 7 стиснеться і діятиме на РПК, який при цьому відкриє отвір, що сполучатиме пневморесору з компресором. Це буде відтворюватися за декілька етапів з проміжними вимірюваннями, поки рівень кузова повернеться до номінального. Програмою роботи мікропроцесора РПК передбачено відкриття отвору на короткий час, який задається, щоб обмежити «пере регулювання» у системі.

Так створюється імпульсна («дискретна», на відміну від механічних РПК, які працюють за аналоговим принципом) подача стислого повітря до системи пневматичного ресорного підвішування, що спричиняє виникнення небажаних силових поштовхів на кузов та путню структуру.

Результати досліджень. На рис. 2 наведено осцилограму процесу відновлення висоти кузова відносно путньої структури за два етапи.

При збільшенні навантаження на пневморесору, (наприклад, внаслідок посадки до вагону електропотяга пасажирів), кузов опустився долу на 10мм за декілька секунд (на рис. 2 це інтервал часу від 0 до 0,5с.). Через наступні 0,5с РПК спрацював і додав стислого повітря за 0.4с від компресора до пневморесори. Це створило імпульс сили, котрий підняв кузов до гори на 10мм, (від -10 до 0 мм).

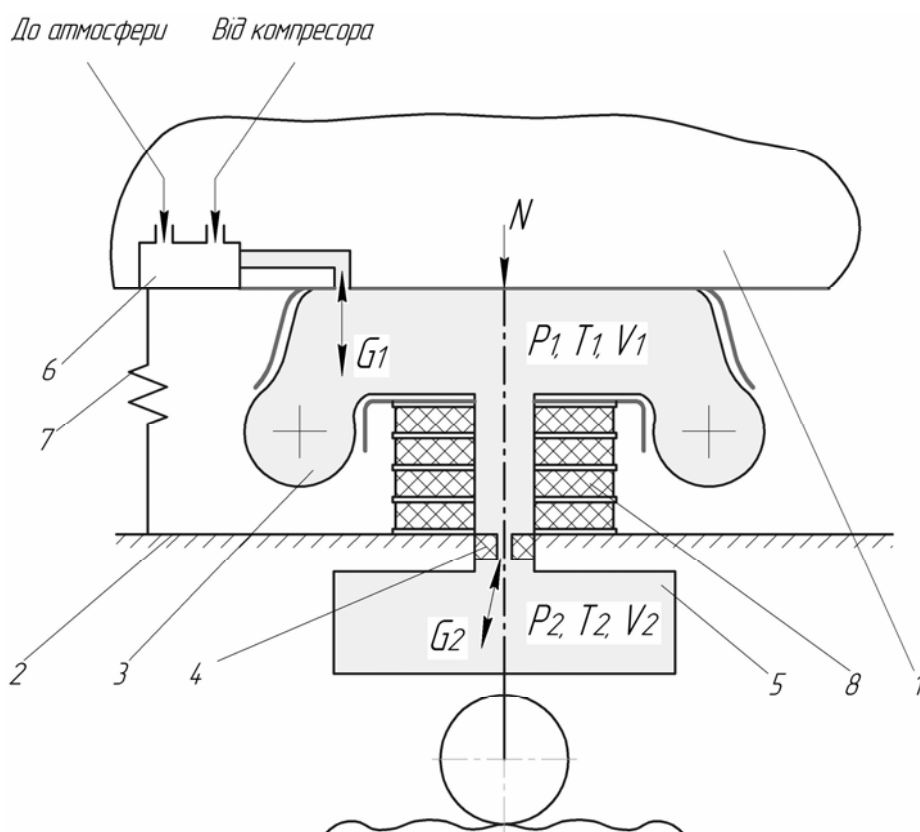


Рис. 1 – Схема системи пневматичного ресорного підвішування: 1 – кузов; 2 – маточина колісної осі; 3 – пневматична ресора; 4 – дросель; 5 – додатковий резервуар; 6 – регулятор положення кузова (РПК); 7 – пружина приводу РПК; 8 – пружний буфер;

На інтервалі від 1с до 4с спостерігається перехідний процес: кузов відтворює періодичні коливання й встановлюється на висоті – 5мм. Оскільки при перехідному процесі коливання затухають, то вочевидь, система регулювання є «стійкою».

Від 4с і до 6с РПК робить ряд вимірювань висоти кузова відносно площини шляху. Мікроконтролер їх обробляє і приймає рішення про подання наступної порції стислого повітря в пневморесорі. Після цього висота кузова відносно площини путньої структури досягає номінального значення - в межах заданої величини «нев'язки», яка зазвичай призначається близько 5мм і зветься «зоною нечутливості» РПК.

З осцилограми видно, що на початку кожного перехідного процесу (при $t=1,3$ і $6,5$ с) спостерігається перерегулювання, яке становить 5мм.

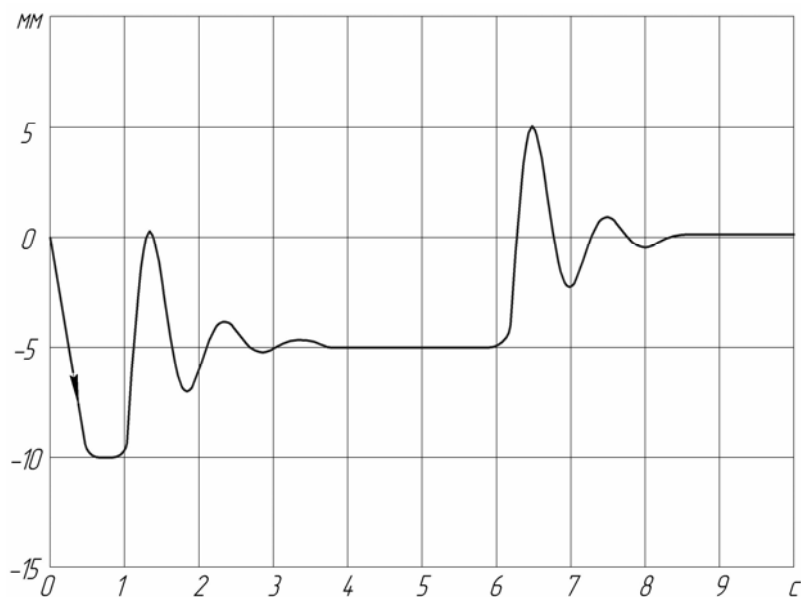


Рис. 2 – Залежність від часу зміни висоти кузова відносно площини путньої структури при імпульсній подачі стислого повітря до пневморесори

Якщо для вагона електропоїзда обрано наступні параметри: тиск повітря в пневморесорі $5,45 \cdot 10^5$ Па, ефективна площа пневморесори $0,3 \text{ м}^2$, показник політропи стиснення повітря 1,35, загальний об'єм повітря в пневматичній системі $0,1 \text{ м}^3$, статичне навантаження, що припадає на пневморесорі від кузова $mg = 137000 \text{ Н}$, її статична жорсткість складе [5]

$$C_{\text{П}} \approx \frac{n P_1 F^2}{V_1 + V_2} = \frac{1,35 \cdot 5,45 \cdot 10^5 \cdot 0,3^2}{0,03 + 0,07} = 662175, \text{ Н/м.}$$

Еквівалентний статичний прогин пневморесори складе

$$Z_{\text{ст}} = mg / C_{\text{П}} = 137000 / 662175 = 0,207 \text{ м.}$$

По збуренню, тобто переміщенню кузова (з урахуванням перерегулювання) на 10мм, можна оцінити коефіцієнт вертикальної динаміки - як відношення цього збурення до еквівалентного статичного прогину пневморесори

$$K_{дв} = \frac{\Delta z}{z_{ст}} = \frac{0,01}{0,207} = 0,05$$

Такий коефіцієнт вертикальної динаміки суттєво менше його припустимої величини, що встановлена для вагонів електропоїздів ($\leq 0,2$) і не погіршить комфорт пасажирів.

Дослідимо шляхом моделювання залежності динамічних сил, що будуть діяти на путню структуру та транспортний засіб, який обладнано пневматичними ресорами, – від форми імпульсних збуджень, що виникають при спрацюванні РПК, та порівняємо їх із силами, які обумовлені впливом нерівностей на путній структурі, з використанням програмного комплексу Simulink.

До входу моделі надавалися збурення – зміни висоти пневморесори у вигляді однієї «сходинки» з різним нахилом, що має відтворювати тривалість імпульсу. Тривалість імпульсу дорівнює нулю при $\alpha = 90^\circ$ (миттєва подача повітря, рис.3, а). При зменшенні α тривалість імпульсу зростатиме (рис.3, б). Для перевірки адекватності такої форми імпульсів, до входу моделі також подавалися імпульси у вигляді чверті синусоїди, яка апроксимує ці імпульси.

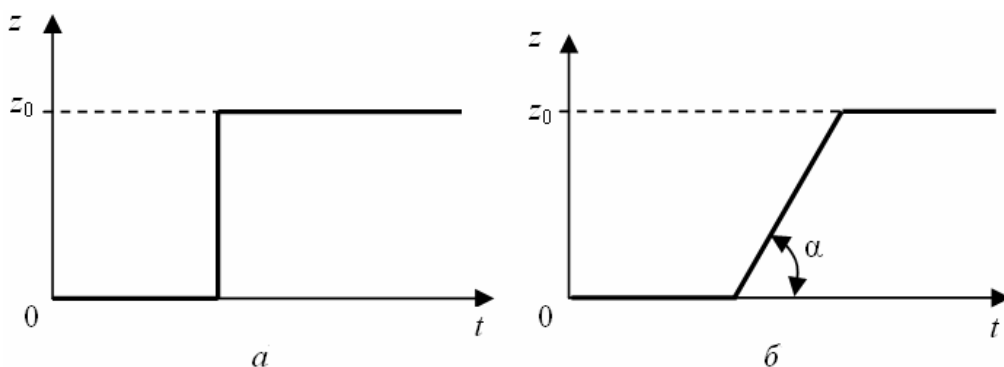


Рис. 3 – Форма імпульсів обумовлених зміною висоти пневморесори:
 $a - \alpha = 90^\circ$; $b - \alpha < 90^\circ$.

За результатами моделювання отримано осцилограми змін тиску повітря у пневморесорі при спрацюванні РПК. Одна з них наведена на рис.4.

Як видно з рис. 4, при спрацюванні РПК на впуск до пневморесори порції стислого повітря виникає перехідний процес. Такий випадок зазвичай має місце коли висота кузова над путньою структурою знизилась з якоїсь причини (наприклад, при вході транспортного засобу у криву ділянку колії). Тиск в пневморесорі зріс від 0,55 до 0,63 МПа, тобто став більше, ніж потрібно (0,575 МПа). Отже, має місце перерегулювання у системі ($\Delta p = 0,63 - 0,575 = 0,055$ МПа = 55 кПа).

Сила поштовху, що буде діяти як на кузов, так і через колеса на путню структуру, при цьому складе

$$N = \Delta\rho \cdot F = 55 \cdot 0,3 = 16,5 \text{ кН.}$$

На цьому прикладі можна побачити, що поштовх може бути досить значним. Для зменшення сили поштовхів, доцільно збільшувати час дії імпульсу Δt , або розділяти його на декілька імпульсів, як показано на рис.2.

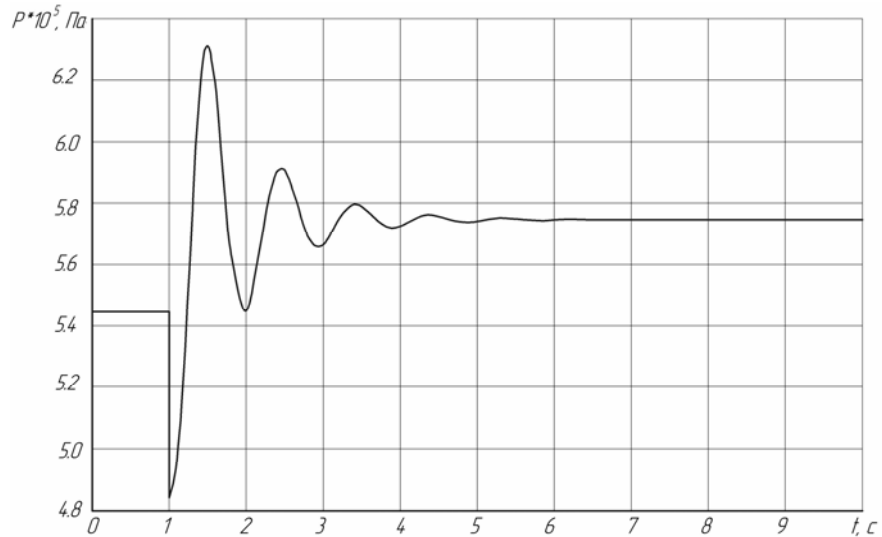


Рис. 4 – Осцилограма зміни тиску повітря у пневморесорі при спрацюванні РПК від дії імпульсу (рис. 3, а)

На рис. 5 наведено залежність сили поштовхів від нахилу сходинки збурення від спрацювання РПК.

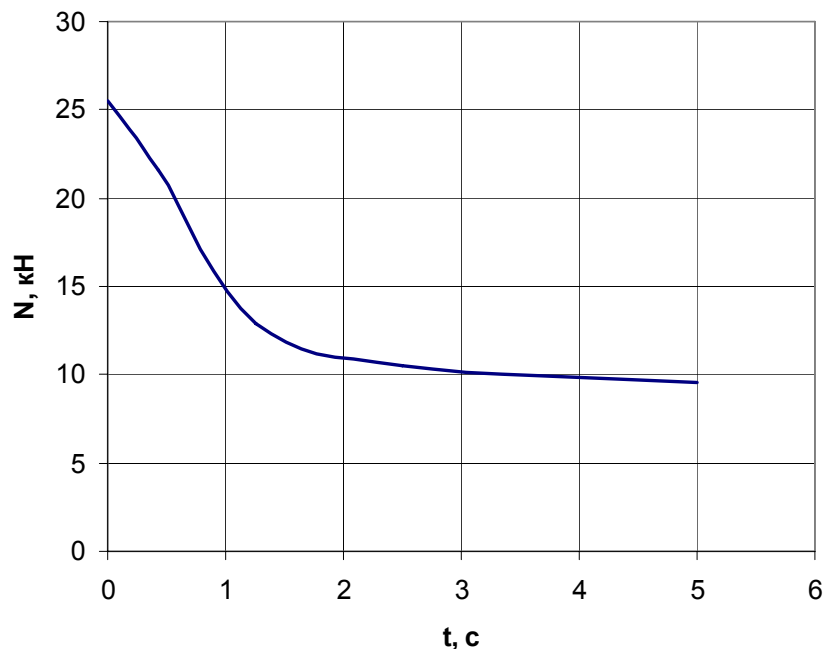


Рис. 5 – Сили, що діють від пневморесори при спрацюванні РПК на путню структуру та кузов

З рис. 5 видно, що суттєве зменшення сили поштовхів спостерігається при їх тривалості від нуля до двох секунд, а надалі вони майже не змінюються і залишаються на рівні $N = 10\text{кН}$.

Порівняємо ці сили із динамічними додатками, що мають місце при русі транспортного засобу по рейковій колії задовільного стану. Припустимі коефіцієнти динаміки для пасажирських вагонів за звичай не повинні перевищувати $K_d \leq 0,2$ [12]. При навантаженні від колеса на рейку $P_{\text{СТ}} = 100\text{кН}$ і не обрєсореній масі $q = 10\text{кН}$ динамічний додаток дорівнюватиме

$$S = K_d(P_{\text{СТ}} - q) = 0,2 \cdot (100 - 10) = 18\text{кН},$$

тобто майже в двічі більше ніж отриманий нами в процесі моделювання ($N = 10\text{кН}$).

Висновки. Таким чином, за допомогою математичного моделювання з використанням ПЕОМ MATLAB Simulink можна відобразити фізичні процеси, що відбуваються в системі пневматичного ресорного підвішування. Модель може бути використана при дослідженні впливів імпульсів збурень будь-якої форми. Модель дозволяє проводити оцінку динамічних показників транспортних засобів, які обладнано пневматичним ресорним підвішуванням, при різних збуреннях, що надходять від РПК або від колії.

Тривалість одного імпульсу подачі стислого повітря від РПК до пневматичної ресори повинен бути не менше ніж 2 с, щоб обмежити динамічної сили, що діятиме на путню структуру величиною 10 кН, або використовувати декілька імпульсів подачі стислого повітря.

Список літератури: 1. Макаренко Ю. В., Маслієв В. Г., Маслієв А. О. Исследование динамики транспортных средств, оборудованных пневматическими ресорами, при импульсных возмущениях. – Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Транспортне машинобудування.– Харків: НТУ«ХПІ».-2012.-№20.-С.73-79. 2. Макаренко Ю. В., Балєв В. Н., Маслієв В. Г. Результаты исследования системы пневматического ресорного подвешивания транспортного средства с микропроцессорным управлением. – Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Транспортне машинобудування.– Харків: НТУ«ХПІ».-2011.-№18.-С.69-74. 3. Маслієв В. Г., Якунин Д. И., Макаренко Ю. В., Краснобрыжева Ю. С. Некоторые результаты компьютерного моделирования динамики перспективного подвижного состава Вісник Східноукраїнського Національного університету імені В.Даля. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2007. - № 8 (114). – 4 с. 4. Патент на корисну модель № 68457. МПК В61F 5/00. Заявл. 09.09.2011. Опубл. 26.03.2012. Бюл.№6. «Пристрій для керування рівнем підресорної частини транспортного засобу при пневматичному ресорному підвішуванні» Маслієв В. Г., Макаренко Ю. В., Балєв В. М., Маслієв А. О. Власник НТУ «ХПІ». 5. Bruhat Lois. Suspension pneumatique et bogies. "Chemins de Fer", № 267, 1967. 6. Приходько В. И., Мямлин С. В.: Научные основы Создания пассажирских вагонов для скоростных перевозок: Монография [Текст]/ В. И. Приходько, С. В. Мямлин – Дн-вск: Изд-во Маковецкой, 2011. – 356 с. 7. Коробка Б. А., Шкабров О. А., Коваленко Ю. Н., Назаренко В. Ф. Отечественная пассажирская тележка на пневматическом подвешивании. – Вагонный парк. – 2010. - № 6. – 48-51 с. 8. Yoshie N. 500-Series Shinkansen for commercial operation at 300 km/h of JR West // Elektrische Bahnen – 1999. – №12. – P.421-427. 9. U.S.Patent 5947031, 105/453; 105/199.1; 105/199.2. Railway truck leveling valve

arrangement for closer overall height control / *Richard V Polley, Gahanna, Ohio.* – No.: 08/946,276. – Sep. 7,1999. **10.** Пневматическое рессорное подвешивание тепловозов / *Куценко С. М., Елбаев Э. П., Кирпичников В. Г., Маслиев В. Г., Рубан А. Н.* / Под ред. С. М. Куценко. – Харьков: Вища школа, 1978. – 97 с. **11.** Теоретическое исследование пневматического рессорного подвешивания при линейном регуляторе / *Закорецкий В. А., Куценко С. М., Савушкин С. С., Шевченко П. М.* Сб. «Локомотивостроение», вып. 1, 1968. – с 35–43 **12.** *Вершинский С. В., Данилов В. Н., Хусидов В. Д.* Динамика вагона [Текст]: Учебн. для вузов ж.д. трансп. / Под ред.. С. В. Вершинского. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1991, – 360 с

Bibliography (transliterated): **1.** *Makarenko Ju. V., Masliev V. G., Masliev A. O.* Issledovanie dinamiki transportnih sredstv, oborudovannyh pnevmaticheskimi resorami, pri impul'snyh vozmushhenijah. – Visnik NTU «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vipusk: Transportne mashinobuduvannja.– Harkiv: NTU»HPI».–2012.–№20. **2.** *Makarenko Ju. V., Balev V. N., Masliev V. G.* Rezul'taty issledovanija sistemy pnevmaticheskogo resornogo podveshivaniya transportnogo sredstva s mikroprocessornym upravlenim. – Visnik NTU «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vipusk: Transportne mashinobuduvannja.– Harkiv: NTU»HPI».–2011.–№18. **3.** *Masliev V. G., Jakunin D. I., Makarenko Ju. V., Krasnobryzheva Ju. S.* Nekotorye rezul'taty komp'juternogo modelirovanija dinamiki perspektivnogo podvizhnogo sostava Visnik Shidnoukraïns'kogo Nacional'nogo universitetu imeni V.Dalja. – Lugans'k: SNU im. V.Dalja, 2007. - № 8 (114). **4.** Patent na korisnu model' № 68457. MPK V61F 5/00. Zajavl. 09.09.2011. Opubl. 26.03.2012. Bjul.№6. «Pristrij dlja keruvannja rivnem pidresorenoï chastini transportnogo zasobu pri pnevmatichnomu resornomu pidvishuvanni» *Masliev V. G., Makarenko Ju. V., Balev V. M., Masliev A. O.* Vlasnik NTU «HPI». **5.** Bruhat Lois. Suspension pneumatique et bogies. "Chemins de Fer", № 267, 1967. **6.** *Prihod'ko V. I., Mjamlin S. V.* Nauchnye osnovy Sozdaniya passazhirskih vagonov dlja skorostnyh perevozok: Monografija: Izd-vo Makoveckij, 2011. – 356 s. **7.** *Korobka B. A., Shkabrov O. A., Kovalenko Ju. N., Nazarenko V. F.* Otechestvennaja passazhirskaja telezhka na pnevmaticheskom podveshivanii. – Vagonnyj park. – 2010. - № 6. – 48-51 s. **8.** *Yoshie N.* 500-Series Shinkansen for commercial operation at 300 km/h of JR West // Elektrische Bahnen – 1999. – №12. – P.421-427. **9.** U.S.Patent 5947031, 105/453; 105/199.1; 105/199.2. Railway truck leveling valve arrangement for closer overall height control. *Richard V Polley, Gahanna, Ohio.* – No.: 08/946,276. – Sep. 7,1999. **10.** Пневматическое рессорное подвешивание тепловозов. *Kucenko S. M., Elbaev Je. P., Kirpichnikov V. G., Masliev V. G., Ruban A. N.* Pod red. S. M. Kucenko. – Har'kov: Vishha shkola, 1978. **11.** Теоретическое исследование пневматического рессорного подвешивания при линейном регуляторе. *Zakoreckij V. A., Kucenko S. M., Savushkin S. S., Shevchenko P. M.* Sb. «Lokomotivostroenie», vyp. 1, 1968. **12.** *Vershinskij S. V., Danilov V. N., Husidov V. D.* Dinamika vagona [Tekst]: Uchebn. dlja vuzov zh.d. transp. Pod red.. S. V. Vershinskogo. – 3-е изд. pererab. i.dop. – М.: Transport, 1991.

Надійшла (received) 16.05.2014