

© В. П. Сахно, докт. техн. наук, професор,
зав. кафедри автомобілів,
ORCID: 0000-0002-5144-7131,
e-mail: svp_40@ukr.net;

© О. О. Разбойніков, канд. техн. наук,
доцент кафедри, ORCID: 0000-0003-3024-0999,
e-mail: razboyn1k@ukr.net

(Національний транспортний університет);

© О. В. Бугрик, канд. техн. наук,
науковий співробітник,
ORCID: 0000-0003-4581-3294,
e-mail: bugrikalex@gmail.com

© В. М. Трохимченко, заст. зав. відділу,
аспірант, ORCID: 0000-0002-8276-8675,
e-mail: vtrohymchenko@insat.org.ua
(ДП «ДержавтотрансНДІпроект»)

© Volodymyr Sakhno, Doctor of Technical Sciences,
Professor, Head of the Automobile Department,
ORCID: 0000-0002-5144-7131, e-mail: svp_40@ukr.net;

© Oleksandr Razboynikov, Ph.D.,
Associate Professor of Department of Automobiles,
ORCID: 0000-0003-3024-0999,
e-mail: razboyn1k@ukr.net

(National Transport University);

© Oleksii Bugryk, Ph.D., Researcher,
ORCID: 0000-0003-4581-3294,
e-mail: bugrikalex@gmail.com;

© Volodymyr Trokhymchenko, Deputy Head
of the Department, Postgraduate Student
ORCID: 0000-0002-8276-8675,
e-mail: vtrohymchenko@insat.org.ua
(SE «State Road Transport Research Institute»)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШТУЧНИХ ДОРОЖНІХ НЕРІВНОСТЕЙ НА ЗМІНУ ВЕРТИКАЛЬНИХ РЕАКЦІЙ У КОНТАКТІ ШИН ІЗ ДОРОГОЮ

RESEARCH ON THE IMPACT OF SPEED HUMPS ON THE VARIATION OF VERTICAL REACTIONS IN TIRE-ROAD CONTACT

Анотація. Розглянуто види та типи дорожніх нерівностей, здійснено вибір та опис параметрів обраних для проведення досліджень. Розроблено вимірювальний комплекс, який дозволяє фіксувати необхідні під час дослідження параметри. Проведено теоретичне та експериментальне дослідження впливу штучних дорожніх нерівностей на вертикальні коливання підресорених та невідресорених мас автомобіля. Здійснено порівняльний аналіз. Підтверджено адекватність математичної моделі, на якій отримано теоретичні залежності вертикальних коливань підресорених та невідресорених мас автомобіля під час долаття штучної дорожньої нерівності на швидкості 45 км/год (12,5 м/с). За результатами розрахунків, проведених на розробленій математичній моделі, отримано теоретичні відомості щодо зміни вертикальних реакцій у контакті шин коліс осей автомобіля з дорогою під час долаття штучної дорожньої нерівності на швидкості 45 км/год (12,5 м/с).

Ключові слова: автомобіль, штучні дорожні нерівності, вимірювальний комплекс, теоретичне та експериментальне дослідження, паливна економічність, забруднення навколишнього природного середовища, реакції в контакті шин з дорогою.

Abstract. The types and kinds of road irregularities are considered, and the parameters of the selected road irregularities for the research were chosen and described. To conduct experimental research, a measuring complex was developed that allows recording the parameters necessary during the research. Theoretical and experimental investigations were conducted on the impact of artificial road irregularities on the vertical oscillations of sprung and unsprung masses of the vehicle. A comparative analysis of the conducted studies was performed. The adequacy of the mathematical model, on which theoretical dependencies of the vertical oscillations of sprung and unsprung masses of the vehicle were obtained during the passage of an artificial road irregularity at a speed of 45 km/h (12.5 m/s), was confirmed. Based on the calculations performed using the developed mathematical model, theoretical data was obtained regarding the change in vertical reactions at the contact between the wheel tires of the vehicle's axles and the road when crossing an artificial road irregularity at a speed of 45 km/h (12.5 m/s). Research was conducted on the change in fuel consumption of automobile when overcoming selected types of road irregularities. The obtained data indicate that fuel consumption varies within very wide limits depending on driving conditions. Further analysis of the obtained fuel consumption results will make it possible to estimate the amount of pollutant emissions into the environment and to estimate the economic losses caused by each type of road irregularities.

Keywords: automobile, road irregularities, measuring complex, theoretical and experimental research, the vertical oscillations of sprung and unsprung masses, fuel consumption, environmental pollution, reactions in contact of tires with the road.

Вступ

Рух автотранспортних засобів дорогами загального призначення завжди пов'язаний з долаттям різних дорожніх нерівностей. Такі нерівності поділяють на два види: випадкові

(ямковість, колійність і напливи) та штучні (засоби заспокоєння дорожнього руху). Здійснивши попередній аналіз видів дорожніх нерівностей для визначення та врахування їхніх параметрів під час проведення

Класифікація засобів ЗДР*

Група, відповідно до застосованого заходу ЗДР	Назва засобу
Влаштування перешкоди на проїзній частині	Дорожні пагорби
	Підвищені пішохідні переходи
	Підвищені перехрестя
Зміна траєкторії руху	Шикани
	Міні-кільця
	Каналізування потоків
	Перекривання перехрестя
Зміна ширини проїзної частини	Чокери
	Вставки по осі дороги
*Примітка. Наведений перелік не є вичерпним	

теоретичних та експериментальних досліджень було вирішено обрати штучні дорожні нерівності, оскільки вони більш стандартизовані в порівнянні з випадковими.

Класифікація на групи та параметри засобів заспокоєння дорожнього руху (далі – засобів ЗДР) визначені в чинному стандарті ДСТУ 4123:2020 «Безпека дорожнього руху. Засоби заспокоєння руху. Загальні технічні вимоги» (табл. 1) [1]. Проте станом на сьогодні ще доволі часто на дорогах загального призначення зустрічаються штучні дорожні нерівності визначені попереднім стандартом ДСТУ 4123:2006 «Пристрій примусового зниження швидкості дорожньо-транспортної техніки на вулицях і дорогах» [2]. Тому було вирішено провести дослідження з врахуванням параметрів штучних дорожніх нерівностей визначених за обома стандартами.

Основна частина

Вибір відрізка дороги, де наявні штучні дорожні нерівності визначені за обома стандартами, описаний в попередній статті [3]. Нині використаємо лише визначені геометричні параметри нерівностей, які будуть внесені до математичної моделі та які долатиме автомобіль

під час експериментальних досліджень (табл. 2).

Під час експерименту на досліджуваний автомобіль було встановлено вимірювальний комплекс, який складався з:

1) об'ємного витратоміра палива ONO SOKKI DF-311 із датчиком ONO SOKKI FP-214 (рис. 1, 4), країна виробник – Японія, Ono Sokki Co, Ltd. Діапазон вимірювань паливного витратоміра складає від 0,3 до 120 л/год $\pm 0,5\%$ від вимірюваного значення [4, 5].

2) дистанційного вимірювача швидкості та пройденого шляху Radarex 4041-PPL із реєструючим пристроєм РП-001 (рис. 2, 4). Такий пристрій було виготовлено у Франції та доопрацьовано в лабораторії ДП «ДержавтотрансНДІпроект». Основні технічні характеристики Radarex 4041-PPL із реєструючим пристроєм РП-001 наведені в табл. 3 [3, 5]. Зазначений дистанційний вимірювач швидкості дозволяє фіксувати в режимі реального часу:

- шлях автомобіля під час дорожнього випробування;
- швидкість автомобіля на дорозі;
- час дорожнього випробування.

Таблиця 2

Геометричні параметри штучних дорожніх нерівностей

Тип	Назва дорожньої нерівності	Довжина, м	Висота, м
I	Підвищений пішохідний перехід	8,20	0,14
II	«Лежачий поліцейський»	0,66	0,04



Рис. 1. Встановлений витратомір палива

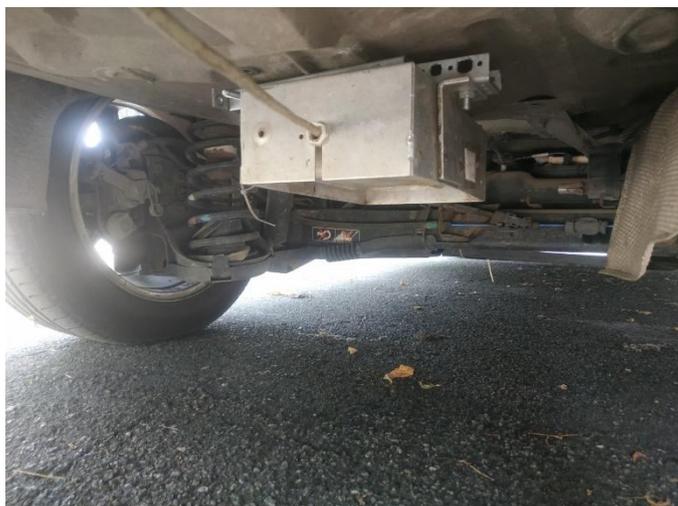


Рис. 2. Встановлений пристрій Radarex 4041-PPL із реєструючим пристроєм РП-001

3) обладнання для визначення прискорень і переміщень, які виникають у підвісці автомобіля під час долаття дорожніх нерівностей (**рис. 3, 4**). До складу такого обладнання входить датчик MPU6050, який є модулем, що складається з 3-осьового гіроскопа, 3-осьового акселерометра та температурного сенсора в одному корпусі та мікроконтролер Arduino [6].

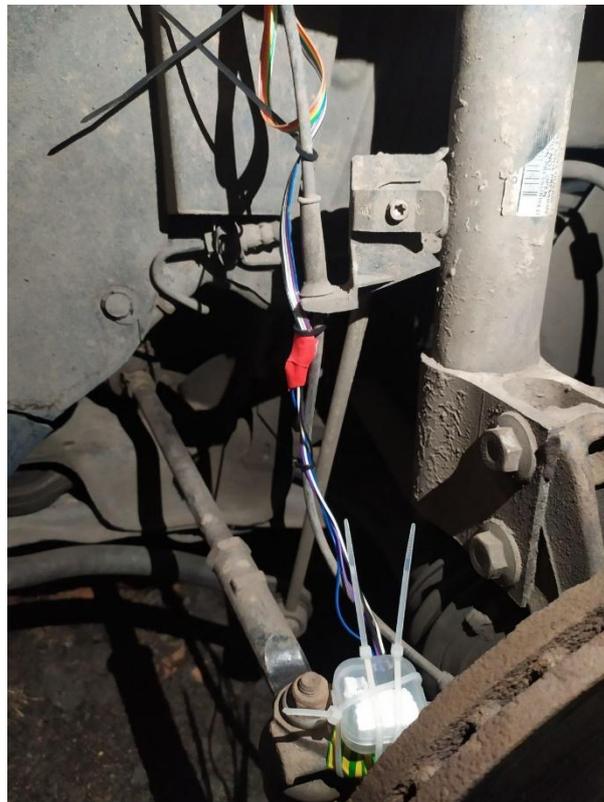


Рис. 3. Датчики MPU6050 встановлені на підресорену та не підресорену масу автомобіля

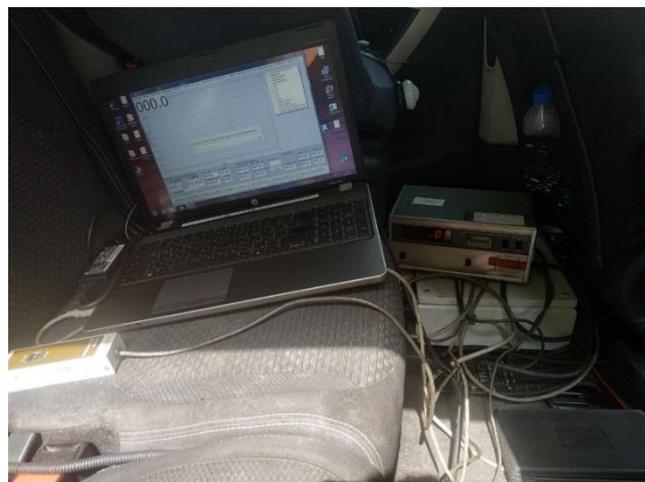


Рис. 4. Частина вимірювального комплексу, що розташована на борту автомобіля

Таблиця 3

Основні технічні характеристики Radarex 4041-PPL з РП-001

Назва випробувального устаткування	Назва параметру, що визначається	Основні технічні характеристики
Radarex 4041-PPL з реєструючим пристроєм РП-001	шлях автомобіля під час дорожнього випробування	(0,1...9999999)м ± 0,3 % U= 5,99*10 ⁴ с
	швидкість автомобіля на дорозі	(0...138) км/год ± 0,3 % U= 0,78 км/год
	час дорожнього випробування	(0,1...99999) с ± 0,01 с U=19,9 с

Використовуючи розроблений вимірювальний комплекс, було проведено експериментальне дослідження. У результаті проведених експериментальних досліджень із застосуванням зазначеного вимірювального комплексу були отримані дані щодо витрати палива, швидкості руху та переміщень, які відбуваються в підвісці автомобіля під час долаття ним штучних дорожніх нерівностей типу I та типу II.

Проведені дослідження умовно можна розділити на кілька етапів.

Етап 1. Долання штучної дорожньої нерівності типу I без зупинки автомобіля.

Етап 2. Долання штучної дорожньої нерівності типу I із повною зупинкою автомобіля.

Етап 3. Долання штучної дорожньої нерівності типу II без зупинки автомобіля.

Етап 4. Долання штучної дорожньої нерівності типу II із повною зупинкою автомобіля.

Під час проведення експериментальних досліджень легкового автомобіля, на етапі 1, значних змін витрати палива не було зафіксовано, тому графічного зображення щодо витрати палива під час долаття нерівності типу I не наведено.

На **рис. 5** зображено інформацію щодо витрати палива у разі руху автомобіля із заданою швидкістю (45 км/год) з подальшою повною зупинкою перед нерівностями типу I і типу II. Після зупинки було здійснено долаття зазначених нерівностей із подальшим рухом до заданої швидкості (45 км/год).

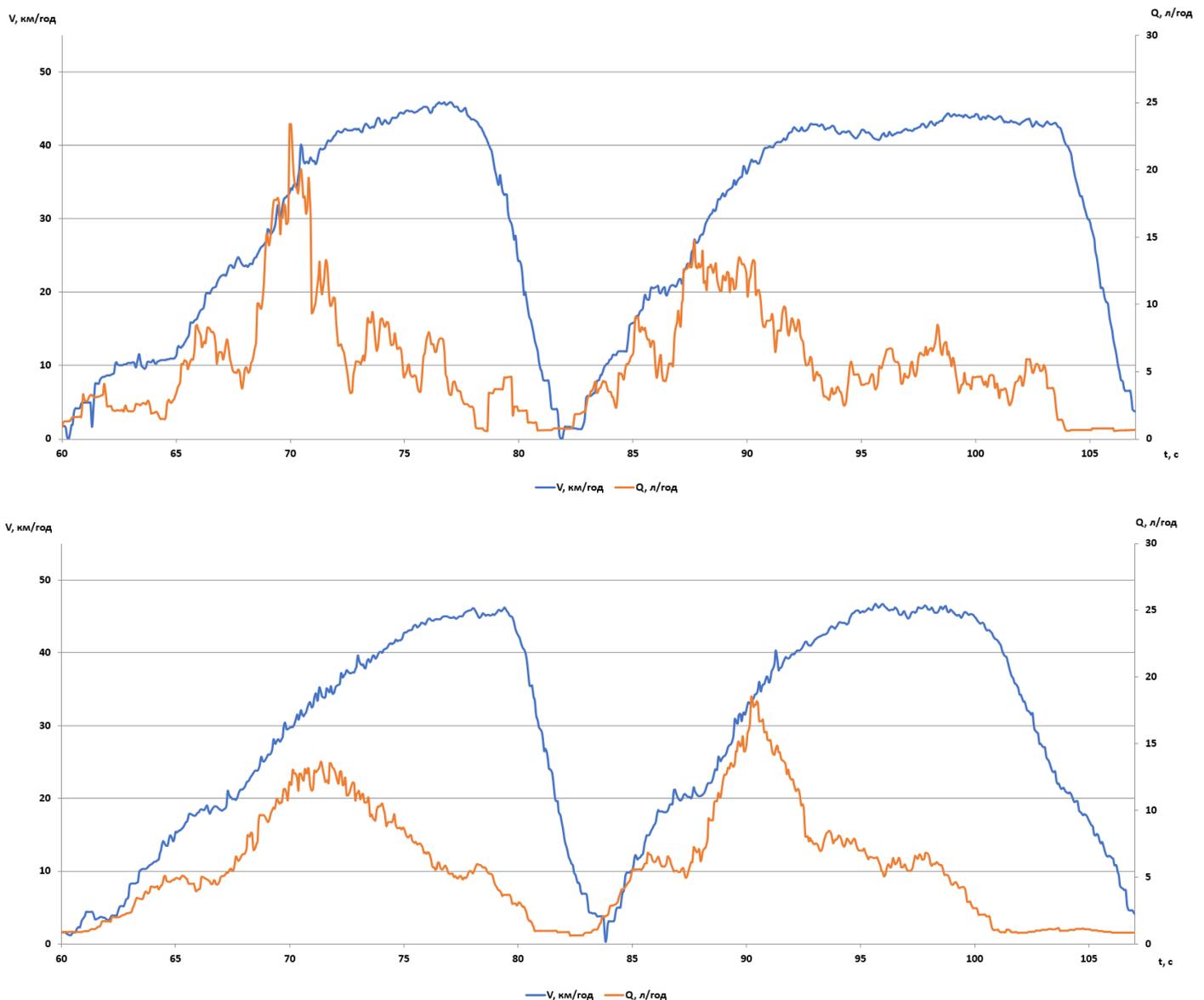


Рис. 5. Приклад (фрагмент) запису даних швидкості (V , км/год) та витрати палива (Q , л/год) під час долаття штучних дорожніх нерівностей типу I і типу II із зупинкою та подальшим рухом

Аналіз отриманих даних (**рис. 5**) свідчить, що витрата палива змінюється в дуже широких межах залежно від умов руху (наявності зупинок під час руху, обраного швидкісного режиму тощо). Збільшення витрати палива фіксуються в діапазоні, під час якого автомобіль долав нерівності та продовжував подальший рух після зупинки, що своєю чергою свідчить про збільшення викидів забруднюючих речовин у навколишнє середовище.

Проведений порівняльний аналіз витрати палива при доланні нерівностей типу I і типу II із зупинкою та подальшим рухом свідчить, що під час додання нерівності типу II витрата палива збільшилась майже на 4 % у порівнянні з витратою палива при доданні нерівності типу I.

На **рис. 6** відображено результати теоретичних та експериментальних досліджень, щодо зміни вертикального положення підресорених S_z та непідресорених U_z мас автомобіля під час додання штучної дорожньої нерівності типу II передніми (з нижнім індексом «1») та задніми (з нижнім індексом «2») колесами автомобіля на швидкості 45 км/год (12,5 м/с).

Аналіз отриманих результатів (**рис. 6**) свідчить про високий рівень співпадіння теоретичних та експериментальних відомостей, щодо характеру вертикальних коливань підресорених S_z та непідресорених U_z мас автомобіля під час додання штучної дорожньої нерівності на швидкості 45 км/год. Зазначене свідчить про адекватність використаної математичної

моделі [7] та достовірність отриманих на ній теоретичних відомостей.

Варто підкреслити, що причиною вертикальних коливань підресорених і непідресорених мас автомобіля в зазначених умовах є зміна вертикальних реакцій, що діють в контактні його шин із дорогою. Тож отримані на математичній моделі теоретичні відомості щодо зміни вертикальних реакцій між шинами та дорогою є також достовірними (**рис. 7**). Такий підхід використано зокрема в роботі [7].

На **рис. 7** відображено результати теоретичних досліджень щодо зміни вертикальних реакцій R_z у контактні шин автомобіля з дорогою під час додання штучної дорожньої нерівності типу II передніми (з нижнім індексом «1») і задніми (з нижнім індексом «2») колесами автомобіля на швидкості 45 км/год.

Для зручності аналізу отриманих результатів на **рис. 6** і **7** наведено вертикальні прямі «п», «в» та «к», що позначають момент додання переднім (з нижнім індексом «1») та заднім (з нижнім індексом «2») колесом автомобіля початку нерівності (п), її вершини (в) та кінця (к).

Видно, що до початку додання штучної дорожньої нерівності колесами передньої осі (вертикаль «п1»), як вертикальне положення підресорених та непідресорених мас автомобіля (**рис. 6**), так і вертикальні реакції дороги на його колеса (**рис. 7**) постійні і відповідають своїм статичним значенням.

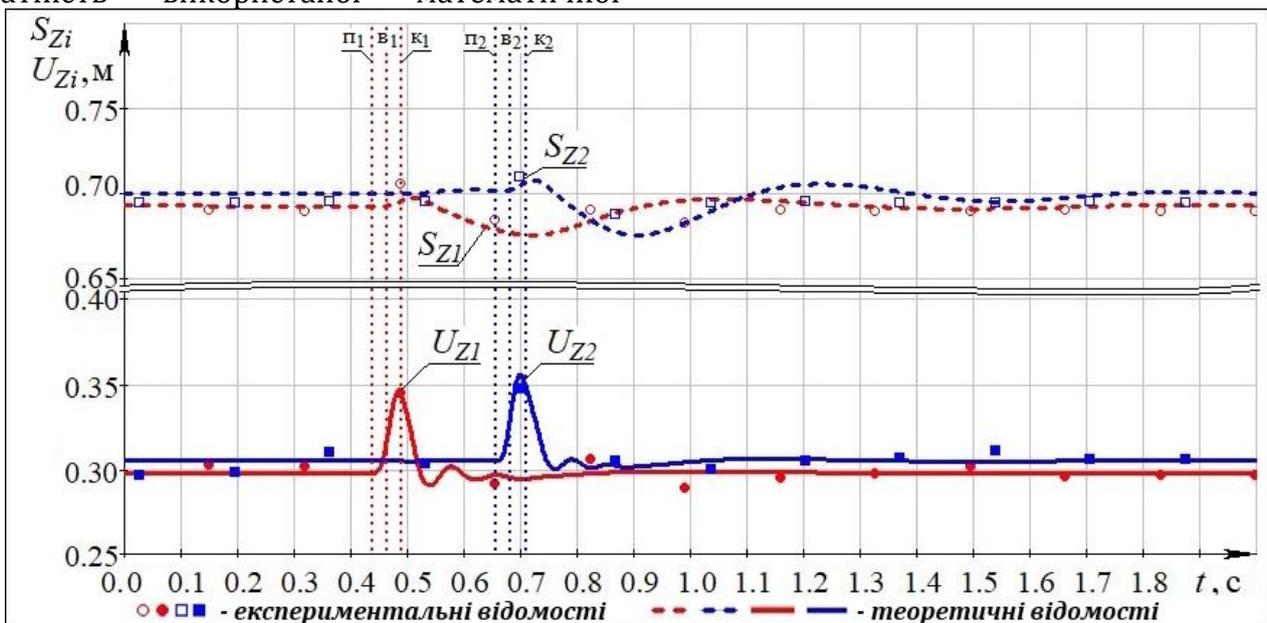


Рис. 6. Залежності зміни поточного вертикального положення приведених до передніх і задніх коліс автомобіля підресорених мас S_{z1} та S_{z2} , а також непідресорених U_{z1} та U_{z2} мас автомобіля, що долає штучну дорожню нерівність типу II на швидкості 45 км/год, від часу t

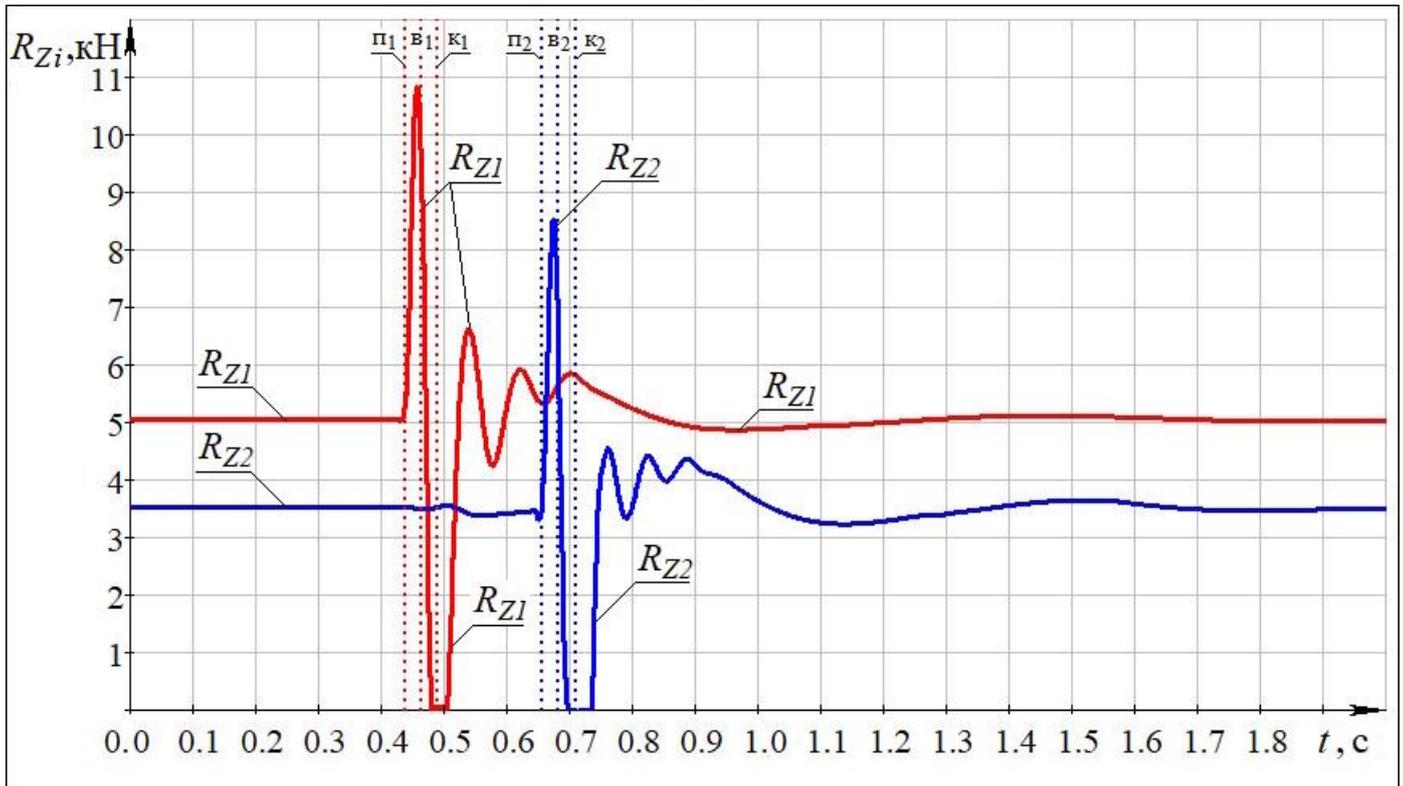


Рис. 7. Залежності зміни вертикальних реакцій дороги на шини передніх R_{Z1} і задніх R_{Z2} коліс автомобіля, що долає штучну дорожню нерівність типу II на швидкості 45 км/год, від часу t

Після початку долаття передніми колесами автомобіля штучної дорожньої нерівності (вертикаль «П1») (рис. 7) спостерігається стрімке збільшення вертикальної реакції дороги на шину переднього колеса R_{Z1} , яке досягає свого максимального значення (10,8 кН) в області вершини нерівності (вертикаль «В1»). Вертикальна реакція на шину заднього колеса R_{Z1} збільшується до 8,5 кН в області вершини нерівності (вертикаль «В2») (рис. 7). В області долаття кінця нерівності (вертикаль «В») (рис. 7) спостерігається зменшення вертикальних реакцій дороги R_z до нуля (відрив колеса від опорної поверхні), як на шини передніх, так і задніх коліс автомобіля. Зазначене пояснює зміну вертикального положення підресорених S_z і непідресорених U_z мас автомобіля (рис. 6), а також зміну витрати палива (рис. 5) під час долаття штучної дорожньої нерівності.

Висновки

Проведено дослідження щодо витрати палива автомобілем під час долаття штучних дорожніх нерівностей типу I і типу II. Отримані дані дозволяють зробити попередню оцінку впливу штучних дорожніх нерівностей на забруднення навколишнього природного середовища під час їхнього долаття залежно від

обраного швидкісного режиму та наявності зупинок під час руху.

Проведено теоретичне та експериментальне дослідження впливу штучних дорожніх нерівностей на вертикальні коливання підресорених та непідресорених мас автомобіля. Аналіз отриманих експериментальних результатів свідчить про адекватність математичної моделі та достовірність отриманих на ній теоретичних відомостей.

За результатами розрахунку на зазначеній математичній моделі визначено зміну вертикальних реакцій у контакті шин автомобіля з дорогою під час долаття штучної дорожньої нерівності типу II передніми та задніми колесами автомобіля на швидкості 45 км/год.

Після початку долаття колесами автомобіля штучної дорожньої нерівності спостерігається стрімке збільшення вертикальної реакції дороги на його шини. Для переднього колеса вертикальна реакція дороги на шину досягає свого максимального значення в області вершини нерівності 10,8 кН, для заднього – 8,5 кН. В області долаття кінця нерівності спостерігається зменшення вертикальних реакцій дороги до нуля (відрив колеса від опорної поверхні), як на шини передніх, так і задніх коліс автомобіля. Зазначене пояснює

зміну вертикальних координат підресорених та невідресорених мас автомобіля, а також зміну витрати палива під час долаття штучної дорожньої нерівності.

References

1. DSTU 4123:2020. (2020). Bezpeka dorozhn'oho rukhu. Zasoby zaspokoyennya rukhu. Zahal'ni tekhnichni vymohy. [Traffic safety. Means of traffic calming. General technical requirements].
2. DSTU 4123:2006. (2006). Prystryy prymusovoho znyzhennya shvydkosti dorozhn'о-transportnoyi tekhniky na vulytsyakh i dorohakh. Zahal'ni tekhnichni vymohy. [Device for forced reduction of speed of road transport equipment on streets and roads. General technical requirements].
3. Volodymyr Trokhymchenko (2022). Impact of road irregularities on the automobile, road safety and environmental pollution. Development of a measuring complex to determine such an impact. Kyiv, Naukovo-vyrobnychyy zhurnal "Avtoshlyakhovyk Ukrainy", 3, 271, 8-13, DOI: 10.33868/0365-8392-2022-3-271-8-13. Retrieved from: https://journal.insat.org.ua/?page_id=5417&lang=uk
4. Ono Sokki. FP-2000/200 Series. Positive displacement type flow detector. Instruction manual. Retrieved from: https://www.onosokki.net/pdf/fp2000_200e2.pdf
5. Volodymyr Sakhno, Mykola Nazarenko, Serhii Durytskyi, Yurii Kolinchenko, Volodymyr Trokhymchenko. (2022). Impact of road irregularities on the automobile, road safety and environmental pollution. Kyiv, SE "State Road Transport Research Institute" (SE SRTRI), Prospects for the development of road transport and infrastructure: challenges of wartime: collection of abstracts from the International Scientific-Practical Conference, 250-255. Retrieved from: https://journal.insat.org.ua/wp-content/uploads/2023/06/Thesis_Collect_-2022.pdf
6. Kharakterystyka Arduino UNO. (2022). Kharakterystyka ta zahal'ni vidomosti shchodo mikrokontrolera Arduino UNO. [Characteristics and general information about the Arduino UNO microcontroller]. Retrieved from: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno>.
7. O. Slavinska, O. Razboinikov, I. Kozarchuk, A. Bubela, O. Ivanushko, A. Klochan. (2024). Study of the dynamics of truck movement across a bridge crossing. Katowice – Ojców National Park, XVI International Scientific Conference "Transport Problems", 538-550. DOI: 10.20858/tp.2024.19.4.09.