ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2024, № 3 (107)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4.027.31-272.82:625.151.8-047.44

А. Я. КУЗИШИН[1*], В. В. КОВАЛЬЧУК[2], Н. В. КОСТІВ[3]

[1*]Каф. «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79000, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-3012-5395
[2]Каф. «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79000, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-4350-1756
[3]Каф. «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79000, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта nzkostiv@gmail.com, ORCID 0009-0005-5832-9786

Дослідження впливу хрестовини стрілочного переводу на вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу

Мета. У роботі передбачено визначити величини вертикальних та горизонтальних деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу під час руху випробувальної установки по хрестовині стрілочного переводу в прямому та зворотному напрямках. **Методика.** Для визначення деформацій пневматичної ресори розроблено спеціальний випробувальний стенд, що складається із пневматичної ресори та спеціалізованого вимірювального обладнання. Деформації пневматичної ресори у вертикальній та горизонтальній площинах виміряно за допомогою високочастотних потенціометричних датчиків лінійних переміщень, сигнали від яких зчитано за допомогою запрограмованого аналогово-цифрового перетворювача. Для отримання достовірних даних щодо деформацій пневматичної ресори здійснено по шість проїздів випробувального стенда в прямому та зворотному напрямках хрестовини. **Результати.** Розроблено методологію динамічних випробувань пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу в прямому та зворотному напрямках. Отримано записи вертикальних та горизонтальних деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу. Установлено, що деформації пневматичної ресори у вертикальній площині є вищими за деформації в горизонтальній площині. Середнє значення вертикальних деформацій пневматичної ресори в прямому напрямку складає 3,15 мм, що на 9,98 % вище за середнє значення у зворотному напрямку руху випробувальної установки по хрестовині стрілочного переводу. У горизонтальному напрямку така різниця деформації пневматичної ресори складає 25,1 %. **Наукова новизна.** Уперше визначено вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу із врахуванням напряму руху, прямого та зворотного. **Практична значимість**. Визначення величин деформацій пневматичної ресори дозволить досліджувати її динамічні характеристики в різних умовах експлуатації рухомого складу, а на стадії його проєктування обирати відповідні характеристики пневматичної системи ресорного підвішування та визначати динамічні показники та показники безпеки руху рухомого складу.

Ключові слова: пневматична ресора; деформація; стрілочний перевід; хрестовина; прямий рух; зворотний рух

Вступ

На залізничному транспорті, в умовах підвищених швидкостей руху, використовують рухомий склад, механічна частина якого містить пневматичну систему ресорного підвішування. Така система складається із пневматичної ресори, додаткового резервуара, з'єднувального трубопроводу, клапанів висоторегулювання та перепаду тиску між пневматичними ресорами, а також іншого допоміжного обладнання. На залізницях України таким рухомим складом є дизель-поїзди ДПКр–2 та ДПКр–3, а також

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2024/312930
© А. Я. Кузишин, В. В. Ковальчук, Н. В. Костів, 2024

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2024, № 3 (107)

електропоїзди ЕКр–1 «Тарпан» та HRCS2 «Hyundai Rotem».

З огляду на експлуатацію рухомого складу в умовах підвищених швидкостей руху важливим є дотримання динамічних показників та показників безпеки руху [12]. Головним чином це залежить від динамічних характеристик в'язей, які з'єднують між собою складові елементи рухомого складу. Зокрема це пневматична ресора (рис. 1), яка знаходиться в другому ступені ресорного підвішування між кузовом та візком рухомого складу.

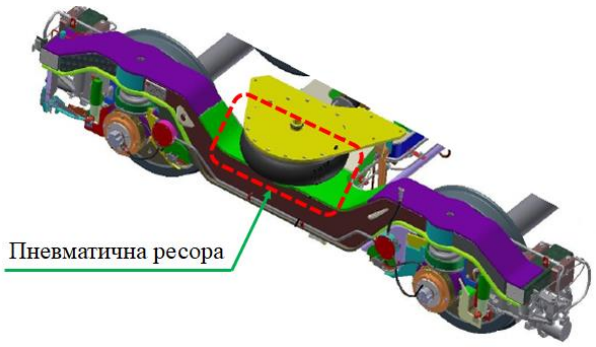

Рис. 1. Пневматична ресора другого ступеня ресорного підвішування швидкісного рухомого складу

Fig. 1. Pneumatic spring of the second stage of the spring suspension of high-speed rolling stock

Значне збурення механічна частина рухомого складу отримує внаслідок взаємодії колісної пари з елементами рейкової колії в межах хрестовини стрілочного переводу (рис. 2).

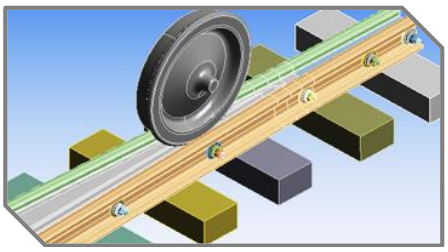

Рис. 2. Рух колеса по хрестовині стрілочного переводу

Fig. 2. Movement of the wheel along the crosspiece of the turnout

Сліз зазначити, що більшість досліджень динамічної поведінки пневматичної ресори спрямовані на знаходження характеристик жорсткості та демпфування, за умови попереднього задання синусоїдального збурення. Однак збурення у межах хрестовини стрілочного переводу має складний випадковий характер, що передбачає необхідність проведення натурних досліджень динамічної роботи пневматичної ресори.

Отже, дослідження впливу хрестовини стрілочного переводу на вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу є актуальним завданням. Це дозволить установити закономірності зміни вертикальних та горизонтальних деформацій пневматичної ресори та достовірніше визначати динамічні показники, а саме коефіцієнти вертикальної та горизонтальної динаміки швидкісного рухомого складу в межах хрестовини стрілочного переводу.

Мета

Основною метою роботи є експериментальне встановлення величин деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу у вертикальній та горизонтальній площинах під час руху випробувальної установки по хрестовині стрілочного переводу у прямому та зворотному напрямках.

Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати такі завдання:

1. Розробити методологію динамічних випробувань пневматичної ресори в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу.

2. Дослідити особливості зміни величин деформацій пневматичної ресори у вертикальній та горизонтальній площинах в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу.

Методика

Для визначення динамічних характеристик пневматичної ресори використовують теоретичні та експериментальні методи. Теоретичні методи передбачають використання механічних, термодинамічних та скінченноелементних математичних моделей [2]. Експериментальні методи передбачають виконання статичних або динамічних випробувань пневматичної ресори, за допомогою силового та вимірювального обладнання [1].

Механічні нелінійні динамічні моделі [5–6] передбачають взаємозв'язок між силою та деформацією, вони засновані на суперпозиції сил пружності, тертя і в'язкості. Залучення сили тер-

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2024/312930
© А. Я. Кузишин, В. В. Ковальчук, Н. В. Костів, 2024

тя означає, що можна враховувати підвищену жорсткість за малих амплітуд зміщення, а також незалежне від швидкості демпфування (гістерезис).

Термодинамічні математичні моделі [9, 23] передусім дають можливість провести дослідження вертикальної поведінки пневматичної системи ресорного підвішування, із врахуванням додаткового резервуара та з'єднувального трубопроводу, на основі законів гідро- та термодинаміки.

Використання скінченноелементних моделей пневматичної ресори [7, 13, 19, 20] передбачає знаходження її втомної міцності, а також динамічних характеристик у разі зміни факторів, які пов'язані як із конструкцією самої ресори, так і з конструкцією ходової частини. Такі дослідження виконують із використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

У праці [22] проведено теоретичне та експериментальне визначення вертикальної жорсткості пневматичної ресори. Для теоретичного визначення застосовано рівняння термодинаміки та гідродинаміки, а зміну геометричних параметрів визначено аналітичним методом. Під час експериментального дослідження застосовувано випробувальну установку з приводом для задання синусоїдального збурення.

У роботі [18] досліджено вплив об'єму додаткового резервуара, довжини та діаметра з'єднувального трубопроводу на характеристики пневматичної системи ресорного підвішування. Стендові випробування проведено відповідно до стандарту EN13597 за вертикального навантаження 109,8 кН з амплітудою ±10 мм і частотою від 0,5 до 10 Гц.

Вплив характеристик пневматичної системи ресорного підвішування на комфортність руху рухомого складу досліджено в [4]. Динамічні характеристики пневматичної ресори знайдено експериментальним шляхом із застосовуванням випробувального стенда, який створює горизонтальні, вертикальні та обертові сили. Для аналізу впливу моделі підвіски на характеристики комфорту використано функції частотної характеристики, які дають вертикальне прискорення центра ваги кузова як функцію синусоїдальної нерівності рейкової колії.

У роботі [8] представлено декілька моделей з'єднувального трубопроводу. Установлено, що для коротких з'єднувальних трубопроводів достатньо використовувати алгебраїчну модель, а для врахування динаміки більш довгих з'єднувальних трубопроводів необхідно застосовувати диференціальну модель. У подальшому модель пневматичної системи ресорного підвішування поєднано із багатокорпусною моделлю SIMPACK та проаналізовано динамічну поведінку рухомого складу.

Комплексне експериментальне дослідження динамічної поведінки пневматичної системи ресорного підвішування проведено в [10]. Розроблено два різних підходи: квазістатичний – із частотою збурення 0,05 Гц, за якого нехтують залежною від частоти поведінкою підвіски, але враховують зв'язок між жорсткістю на зсув і крен, і динамічний – із частотою збурення до 20 Гц, за якого частотно-залежна поведінка підвіски у вертикальному напрямку представлена за допомогою термодинамічної моделі, а також додатково врахована залежність параметрів поперечної жорсткості від навантаження.

У [15] використано чотири різні експериментальні методи для дослідження статичної та квазістатичної вертикальної жорсткості пневматичної ресори.

Вплив геометричних параметрів пневматичної ресори на її вертикальну жорсткість досліджено в [14]. Для перевірки адекватності запропонованої математичної моделі проведено експериментальні дослідження за частоти збурення 0,125 Гц. Однак точність запропонованої математичної моделі погіршується для випадку значного об'єму додаткового резервуара.

У праці [16] розглянуто шість моделей пневматичної ресори другого ступеня ресорного підвішування рухомого складу, які оцінено на основі порівняння з експериментами. Частотний діапазон експериментальних досліджень перебував у межах до 20 Гц з амплітудою деформування 4 мм. Установлено, що за частоти понад 2 Гц необхідно враховувати нелінійне в'язке демпфування.

Вплив роботи клапанів висоторегулювання та перепаду тиску між пневматичними ресорами на динамічні характеристики пневматичної системи ресорного підвішування досліджено у [17] теоретичним та експериментальним шляхом. Результати показали необхідність врахування цих особливостей під час руху кривими

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2024/312930
© А. Я. Кузишин, В. В. Ковальчук, Н. В. Костів, 2024

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2024, № 3 (107)

ділянками малого радіуса з невеликими швидкостями руху. Крім цього, у роботі [21] досліджено вплив початкового кута нахилу важеля клапана висоторегулювання на дисбаланс вертикального навантаження від колісних пар рухомого складу на рейкову колію.

Проведений аналіз праць вказує на значну зацікавленість як науковців, так і практиків питаннями дослідження та встановлення динамічних характеристик пневматичної системи ресорного підвішування рухомого складу. Однак в експериментальних дослідженнях основним збурювальним фактором виступає синусоїдальна нерівність або крива ділянка залізничної колії. Відтак невирішеним залишається завдання дослідження особливостей деформування пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу.

Особливий інтерес викликає деформування пневматичної ресори під час проїзду колеса із вусовика на сердечник та із сердечника на вусовик хрестовини стрілочного переводу. Оскільки через специфіку конструкції та вертикальних і бокових зносів сердечника і вусовиків колесо рухомого складу проїжджає вертикальну нерівність. Це викликає значне динамічне додавання сил [3, 11] на рухомий склад, а відповідно, і пневматичну ресору.

Дослідження деформацій ресори у вертикальному та горизонтальному напрямах під час руху стенда по хрестовині проведено експериментально. Для цього запропоновано рухомий стенд із пневматичною ресорою та спеціалізованим вимірювальним обладнанням. Розміщення стенда на хрестовині наведено на рис. 3.

Рис. 3. Стенд для дослідження деформування пневматичної ресори

Fig. 3. Test bench for studying the deformation of a pneumatic spring

Конструктивно стенд складається із несної конструкції – рами, яка встановлена на чотири рухомих колеса. До верхньої металевої пластини, яка жорстко з'єднана з рамою, чотирма високоміцними болтами прикріплено пневматичну ресору швидкісного рухомого складу. На ресору прикладено навантажувальний блок, що дозволяє візуалізувати її коливання під час руху по хрестовині стрілочного переводу.

У результаті руху стенда по хрестовині відбувається деформування ресори у вертикальному та горизонтальному напрямах. Для вимірювання деформацій використано високочастотні потенціометричні датчики лінійних переміщень, які встановлено у вертикальній та горизонтальній площинах відносно до ресори (рис. 4).

Рис. 4. Вигляд встановлених потенціометричних датчиків лінійних переміщень на пневматичній ресорі швидкісного рухомого складу

Fig. 4. View of the installed potentiometric linear displacement sensors on the pneumatic spring of high-speed rolling stock

Сигнал переміщень із потенціометричних датчиків зчитують за допомогою запрограмованого аналогово-цифрового перетворювача. Отримані дані через USB порт надходять на комп'ютер та накопичуються в його пам'яті.

Програма експериментальних досліджень деформування пневматичної ресори передбачала вимірювання деформацій у вертикальній та горизонтальній площині. При цьому вимірювання відбувалося під час руху стенда в прямому та зворотному у напрямах по хрестовині стрілочного переводу. З метою отримання достовірних

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2024/312930
© А. Я. Кузишин, В. В. Ковальчук, Н. В. Костів, 2024

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2024, № 3 (107)

значень деформацій пневматичної ресори, проведено по шість проїздів стенда в прямому та зворотному напрямах хрестовини. Під час кожного проїзду випробувального стенда записано деформації пневматичної ресори, а виміряні дані збережено в окремий файл на комп'ютері.

Результати

На підставі натурних випробувань пневматичної ресори швидкісного рухомого складу отримано записи її вертикальних (рис. 5–6) та горизонтальних (рис. 7–8) деформацій в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу.

На основі аналізу отриманих даних установлено, що в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу у вертикальній площині є значно вищими за деформації у горизонтальній площині.

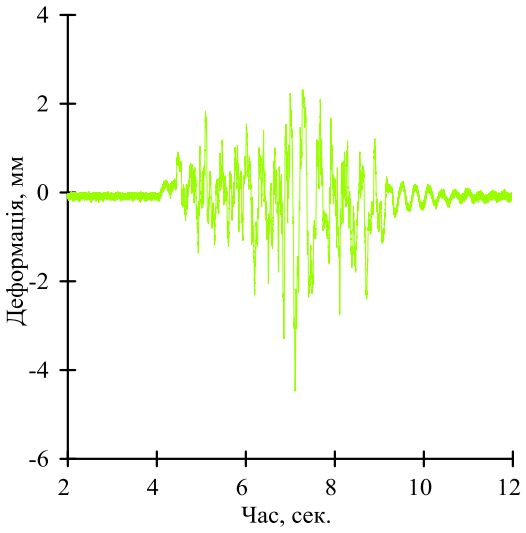

Рис. 5. Запис вертикальних деформацій пневматичної ресори в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу в прямому напрямку

Fig. 5. Recording of vertical deformations of the pneumatic spring in the conditions of movement along the crosshead of the switch translation in the forward direction

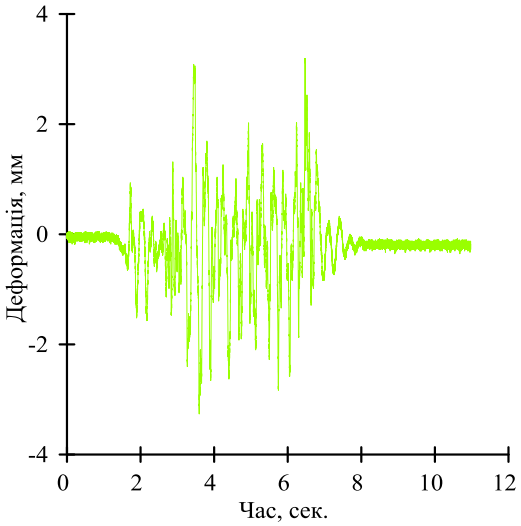

Рис. 6. Запис вертикальних деформацій пневматичної ресори в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу у зворотному напрямку

Fig. 6. Recording of vertical deformations of a pneumatic spring under conditions of movement along the crosshead of a turnout in the opposite direction

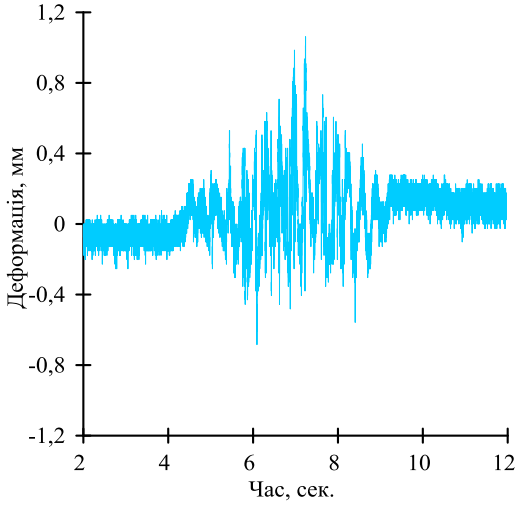

Рис. 7. Запис горизонтальних деформацій пневматичної ресори в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу у прямому напрямку

Fig. 7. Recording of horizontal deformations of a pneumatic spring under conditions of movement along the crosshead of a turnout in the forward direction

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2024/312930
© А. Я. Кузишин, В. В. Ковальчук, Н. В. Костів, 2024

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту, 2024, № 3 (107)

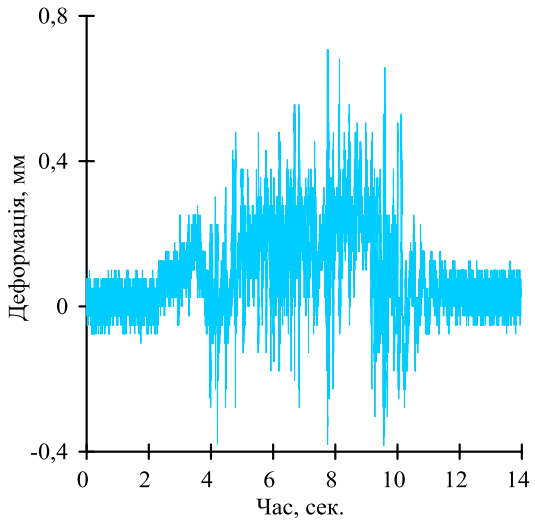

Рис. 8. Запис горизонтальних деформацій пневматичної ресори в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу у зворотному напрямку

Fig. 8. Recording of horizontal deformations of a pneumatic spring under conditions of movement along the crosshead of a turnout in the opposite direction

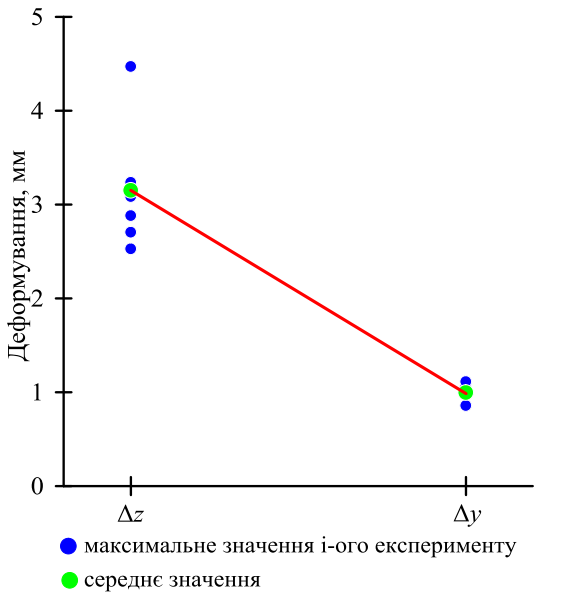

Рис. 9. Вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори під час руху по хрестовині стрілочного переводу у прямого напрямку

Fig. 9. Vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring during movement along the crosshead of a turnout in the forward direction

Для порівняння максимальних і середніх значень вертикальних та горизонтальних деформацій пневматичної ресори використаємо записи всіх дванадцяти проїздів випробувальної установки по хрестовині стрілочного переводу в прямому та зворотному напрямках (рис. 9–10).

Установлено, що під час проїзду випробувальної установки по хрестовині стрілочного переводу максимальні значення вертикальних деформацій пневматичної ресори швидкісного рухомого складу складають у разі прямого руху по стрілочному переводу – від 2,53 до 4,47 мм, а в разі зворотного руху – від 2,46 до 3,26 мм. У горизонтальному напрямку максимальні деформації такі: у разі прямого руху по хрестовині стрілочного переводу – від 0,86 до 1,06 мм, а в разі зворотного руху – від 0,68 до 0,80 мм.

Із рис. 9–10 установлено, що середнє значення вертикальних деформацій пневматичної ресори в прямому напрямку складає 3,15 мм, що на 9,98 % вище за середнє значення у зворотному напрямку руху випробувальної установки по хрестовині стрілочного переводу. У горизонтальному напрямку така різниця деформацій складає 25,1 %. Зазначена особливість пояснюється умовами руху колеса колісної пари рухомого складу по хрестовині стрілочного переводу.

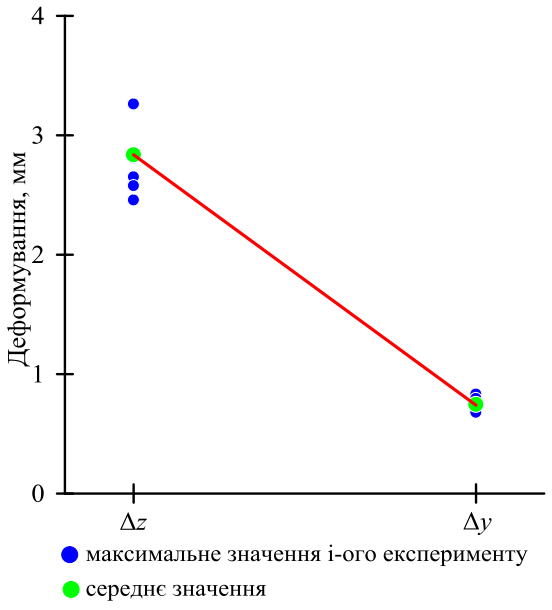

Рис. 10. Вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори під час руху по хрестовині стрілочного переводу у зворотному напрямку

Fig. 10. Vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring during movement along the crosshead of a turnout in the opposite direction

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2024/312930
© А. Я. Кузишин, В. В. Ковальчук, Н. В. Костів, 2024

Отже, дослідження динамічної поведінки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в подальшому дозволить перейти до визначення її динамічних характеристик у випадку взаємодії швидкісного рухомого складу з елементами стрілочного переводу.

Із практичної точки зору це дозволить ще на етапі проєктування швидкісного рухомого складу проводити визначення динамічних показників та показників безпеки руху для різних умов його експлуатації.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше визначено вертикальні та горизонтальні деформації пневматичної ресори швидкісного рухомого складу в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу із врахуванням напряму руху, прямого та зворотного. Визначення величин деформацій пневматичної ресори дозволить досліджувати її динамічні характеристики в різних умовах експлуатації рухомого складу, а на стадії його проєктування обирати відповідні характеристики пневматичної системи ресорного підвішування та визначати динамічні показники та показники безпеки руху рухомого складу.

Висновки

1. Розроблено методологію динамічних випробувань пневматичної ресори швидкісного рухомого складу залізниці в умовах руху по хрестовині стрілочного переводу і прямому та зворотному напрямках.

2. На основі отриманих експериментальних даних вертикальних та горизонтальних деформацій пневматичної ресори встановлено, що її деформації у вертикальній площині є значно вищими за деформації в горизонтальній площині.

3. Установлено, що середнє значення вертикальних деформацій пневматичної ресори в прямому напрямку складає 3,15 мм, що на 9,98 % вище за середнє значення у зворотному напрямку руху випробувальної установки по хрестовині стрілочного переводу. У горизонтальному напрямку така різниця деформацій пневматичної складає 25,1 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузишин А. Я., Ковальчук В. В. Експериментальні дослідження закономірностей деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 2 (106). С. 53–63. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2024/306143
2. Кузишин А. Я., Кострица С. А., Соболевська Ю. Г., Батіг А. В. Світовий досвід створення математичних моделей пневматичної ресори: переваги та недоліки. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 4 (94). С. 25–42. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2021/245974
3. Орловський А. М., Каленик К. Л., Ковальчук В. В. Дослідження поздовжнього профілю жорстких хрестовин на залізобетонних брусах. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2012. № 41. С. 130–135.
4. Alonso A., Giménez J. G., Nieto J., Vinolas J. Air suspension characterisation and effectiveness of a variable area orifice. *Vehicle System Dynamics*. 2010. Vol. 48. Iss. sup1. P. 271–286. DOI: https://doi.org/10.1080/00423111003731258
5. Berg M. A model for rubber springs in the dynamic analysis of rail vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 1997. Vol. 211. Iss. 2. P. 95–108. DOI: https://doi.org/10.1243/0954409971530941
6. Berg M. A three-dimensional airspring model with friction and orifice damping. *Vehicle System Dynamics*. Vol. 33. Iss. sup1. P. 528–539. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063109
7. Bešter T., Oman S., Nagode M. Determining influential factors for an air spring fatigue life. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2018. Vol. 42. Iss. 1. P. 284–294. DOI: https://doi.org/10.1111/ffe.12904
8. Docquier N., Fisette P., Jeanmart H. Multiphysic modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics*. 2007. Vol. 45. Iss. 6. P. 505–524. DOI: https://doi.org/10.1080/00423110601050848

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2024/312930
© А. Я. Кузишин, В. В. Ковальчук, Н. В. Костів, 2024

9. Docquier N., Fisette P., Jeanmart H. Model-based evaluation of railway pneumatic suspension. *Vehicle System Dynamics.* 2008. Vol. 46. Iss. sup1. P. 481–493. DOI: https://doi.org/10.1080/00423110801993110
10. Facchinetti A., Mazzola L., Alfi S., Bruni S. Mathematical modelling of the secondary airspring suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort. *Vehicle System Dynamics*. 2010. Vol. 48. Iss. sup1. P. 429–449. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2010.486036
11. Kovalchuk V., Bolzhelarskyi Y., Parneta B., Pentsak A., Petrenko O., Mudryy I. Evaluation of the stressed-strained state of crossings of the 1/11 type turnouts by the finite element method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4. No. 7 (88). P. 10–16. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107024
12. Kuzyshyn A., Batig A., Kostritsa S., Sobolevska J., Kovalchuk V., Dovhanyuk S., Voznyak O. Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension. *MATEC Web of Conferences.* 2018. Vol. 234. P. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201823405003
13. Li F., Yang W., Ding Y. Simulation of Static Test of Air-Spring. *Advanced Materials Research.* 2009. Vol. 11–12. Iss. 1. P. 713–716. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.11-12.713
14. Li X., He Y., Liu W., Wei Y. Research on the vertical stiffness of a rolling lobe air spring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 2015. Vol. 230. Iss. 4. P. 1172–1183. DOI: https://doi.org/10.1177/0954409715585370
15. Li X., Li T. Research on vertical stiffness of belted air springs. *Vehicle System Dynamics.* 2013. Vol. 51. Iss. 11. P. 1655–1673. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2013.819984
16. Mazzola L., Berg M. Secondary suspension of railway vehicles – air spring modelling: performance and critical issues. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit.* 2014. Vol. 228. Iss. 3. P. 225–241. DOI: https://doi.org/10.1177/0954409712470641
17. Nakajima T., Shimokawa Y., Mizuno M., Sugiyama H. Air Suspension System Model Coupled With Leveling and Differential Pressure Valves for Railroad Vehicle Dynamics Simulation. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics.* 2014. Vol. 9. Iss. 3. P. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1115/1.4026275
18. Sayyaadi H., Shokouhi N. Effects of air reservoir volume and connecting pipes length and diameter on the air spring behavior in rail vehicles. *Iranian Journal of Science and Technology Transaction B : Engineering*. 2010. Vol. 34, № B 5. P. 499–508.
19. Sun J. Calculation of vertical stiffness of air spring with FEM. *4th ANSA & META International Conference*. 2011. P. 1–4.
20. Sun L., Li Z., Shen X., Zhu J. Simulation and test study on dynamic characteristic of air spring with auxiliary chamber. *Applied Mechanics and Materials.* 2013. Vol. 341–342. P. 391–394. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.341-342.391
21. Tanaka T., Sugiyama H. Prediction of railway wheel load unbalance induced by air suspension leveling valves using quasi-steady curve negotiation analysis procedure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*. 2019. Vol. 234. P. 19–37. DOI: https://doi.org/10.1177/1464419319867179
22. Xu L. Mathematical modeling and characteristic analysis of the vertical stiffness for railway vehicle air spring system. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 220. P. 1–12. DOI: https://doi.org/10.1155/2020/2036563
23. Zhu H., Yang J., Zhang Y. A novel air spring dynamic model with pneumatic thermodynamics, effective friction and viscoelastic damping. *Journal of Sound and Vibration*. 2017. Vol. 408. P. 87–104. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.07.015

A. YA. KUZYSHYN[1*], V. V. KOVALCHUK[2], N. V. KOSTIV[3]

[1*]Dep. «Railway Transport», Lviv Polytechnic National University, S. Bandery St., 12, Lviv, Ukraine, 79000, tel. (032)267 99 74, e-mail kuzyshyn1993@gmail.com, ORCID 0000-0002-3012-5395
[2]Dep. «Railway Transport», Lviv Polytechnic National University, S. Bandery St., 12, Lviv, Ukraine, 79000, tel. (032) 267 99 74, e-mail kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-4350-1756
[3]Dep. «Railway Transport», Lviv Polytechnic National University, S. Bandery St., 12, Lviv, Ukraine, 79000, tel. (032) 267 99 74, e-mail nzkostiv@gmail.com, ORCID 0009-0005-5832-9786

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2024/312930
© А. Я. Кузишин, В. В. Ковальчук, Н. В. Костів, 2024

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Investigation of the Influence of a Turnout Cross on Vertical and Horizontal Deformations of a Pneumatic Spring of High-Speed Rolling Stock

Purpose. The aim of the study is to determine the values of vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring of high-speed rolling stock during the movement of the test setup along the cross of the switch in the forward and reverse directions. **Methodology.** To determine the deformations of the pneumatic spring, a special test bench consisting of a pneumatic spring and specialized measuring equipment was developed. The deformations of the air spring in the vertical and horizontal planes were measured using high-frequency potentiometric linear displacement sensors, the signals from which were read using a programmed analog-to-digital converter. To obtain reliable data on the deformations of the air spring, six passes of the test bench were made in the forward and reverse directions of the cross member. **Findings.** A methodology for dynamic testing of a pneumatic spring of high-speed rolling stock under conditions of movement along the crosshead of a turnout in the forward and reverse directions was developed. The records of vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring of high-speed rolling stock under the conditions of movement along the crossover of a switch were obtained. It is established that the deformations of the pneumatic spring in the vertical plane are higher than those in the horizontal plane. The average value of the vertical deformations of the pneumatic spring in the forward direction is 3.15 mm, which is 9.98 % higher than the average value in the opposite direction of the test unit's movement along the cross-section of the switch. In the horizontal direction, this difference in deformation of the air spring is 25.1 %. **Originality.** For the first time, the vertical and horizontal deformations of the pneumatic spring of high-speed rolling stock under the conditions of movement along the crossbar of a switch were determined, taking into account the direction of movement, forward and reverse. **Practical value.** Determining the values of deformations of the pneumatic spring will allow to study its dynamic characteristics in different operating conditions of rolling stock, and at the design stage to select the appropriate characteristics of the pneumatic spring suspension system and determine the dynamic and safety indicators of rolling stock.

Key words: pneumatic spring; deformation; turnout; cross member; forward motion; reverse motion

REFERENCES

1. Kuzyshyn, A. Ya., & Kovalchuk, V. V. (2024). Experimental Study of the Regularities of Deformation of the Rubber Cord Shell of a Pneumatic Spring of High-Speed Rolling Stock. *Science and Transport Progress, 2*(106), 53-63. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2024/306143 (in Ukrainian)
2. Kuzyshyn, A. Y., Kostritsia, S. A., Sobolevska, Yu. H., & Batih, A. V. (2021). World Experience in Creating Mathematical Models of Air Springs: Advantages and Disadvantages. *Science and Transport Progress, 4*(94), 25-42. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2021/245974 (in Ukrainian)
3. Orlovskyi, A. M,. Kalenyk, K. L., & Kovalchuk, V. V. (2012). Investigation of longitudinal profile of rigid frogs on reinforced concrete sleepers. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, *41*, 130-135. (in Ukrainian)
4. Alonso, A., Giménez, J. G., Nieto, J., & Vinolas, J. (2010). Air suspension characterisation and effectiveness of a variable area orifice. *Vehicle System Dynamics*, *48(*sup1), 271-286. DOI:https://doi.org/10.1080/00423111003731258 (in English)
5. Berg, M. (1997). A model for rubber springs in the dynamic analysis of rail vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 211*(2), 95-108. DOI: https://doi.org/10.1243/0954409971530941 (in English)
6. Berg, M. (1999). A Three–Dimensional Airspring Model with Friction and Orifice Damping. *Vehicle System Dynamics*, *33*(sup1), 528-539. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063109 (in English)
7. Bešter, T., Oman, S., & Nagode, M. (2018). Determining influential factors for an air spring fatigue life. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, *42*(1), 284-294. DOI: https://doi.org/10.1111/ffe.12904 (in English)
8. Docquier, N., Fisette, P., & Jeanmart, H. (2008). Model-based evaluation of railway pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics, 46*(sup1), 481-493. DOI: https://doi.org/10.1080/00423110801993110 (in English)
9. Docquier, N., Fisette, P., & Jeanmart, H. (2007). Multiphysic modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics*, *45*(6), 505-524. DOI: https://doi.org/10.1080/00423110601050848 (in English)

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2024/312930
© А. Я. Кузишин, В. В. Ковальчук, Н. В. Костів, 2024

10. Facchinetti, A., Mazzola, L., Alfi, S., & Bruni, S. (2010). Mathematical modelling of the secondary airspring suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort. *Vehicle System Dynamics, 48*(sup1), 429-449. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2010.486036 (in English)
11. Kovalchuk, V., Bolzhelarskyi, Y., Parneta, B., Pentsak, A., Petrenko, O., & Mudryy, I. (2017). Evaluation of the stressed-strained state of crossings of the 1/11 type turnouts by the finite element method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4*(7(88)), 10-16. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107024 (in English)
12. Kuzyshyn, A., Batig, A., Kostritsa, S., Sobolevska, J., Kovalchuk, V., Dovhanyuk, S., & Voznyak, O. (2018). Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension. *MATEC Web of Conferences, 234*, 1-6. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201823405003 (in English)
13. Li, F. X., Yang, W. M., & Ding, Y. M. (2006). Simulation of Static Test of Air-Spring. *Advanced Materials Research, 11-12*, 713-716. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.11-12.713 (in English)
14. Li, X., He, Y., Liu, W., & Wei, Y. (2015). Research on the vertical stiffness of a rolling lobe air spring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 230*(4), 1172-1183. DOI: https://doi.org/10.1177/0954409715585370 (in English)
15. Li, X., & Li, T. (2013). Research on vertical stiffness of belted air springs. *Vehicle System Dynamics, 51*(11), 1655-1673. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2013.819984 (in English)
16. Mazzola, L., & Berg, M. (2012). Secondary suspension of railway vehicles - air spring modelling: Performance and critical issues. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 228*(3), 225-241. DOI: https://doi.org/10.1177/0954409712470641 (in English)
17. Nakajima, T., Shimokawa, Y., Mizuno, M., & Sugiyama, H. (2014). Air Suspension System Model Coupled With Leveling and Differential Pressure Valves for Railroad Vehicle Dynamics Simulation. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 9*(3), 1-9. DOI: https://doi.org/10.1115/1.4026275 (in English)
18. Sayyaadi, H., & Shokouhi, N. (2010). Effects of air reservoir volume and connecting pipes length and diameter on the air spring behavior in rail vehicles. *Iranian Journal of Science and Technology Transaction B: Engineering, 34*(B5), 499-508. (in English)
19. Sun, J. (2011). Calculation of vertical stiffness of air spring with FEM. *4th ANSA & META International Conference*, 1-4. (in English)
20. Sun, L., Li, Z., Shen, X., & Zhu, J. (2013). Simulation and test study on dynamic characteristic of air spring with auxiliary chamber. *Applied Mechanics and Materials, 341-342*, 391-394. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.341-342.391 (in English)
21. Tanaka, T., & Sugiyama, H. (2019). Prediction of railway wheel load unbalance induced by air suspension leveling valves using quasi-steady curve negotiation analysis procedure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics, 234*(1), 19-37. https://doi.org/10.1177/1464419319867179 (in English)
22. Xu, L. (2020). Mathematical Modeling and Characteristic Analysis of the Vertical Stiffness for Railway Vehicle Air Spring System. *Mathematical Problems in Engineering, 2020*, 1-12. DOI: https://doi.org/10.1155/2020/2036563 (in English)
23. Zhu, H., Yang, J., Zhang, Y., & Feng, X. (2017). A novel air spring dynamic model with pneumatic thermodynamics, effective friction and viscoelastic damping. *Journal of Sound and Vibration, 408*, 87-104. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.07.015 (in English)

Надійшла до редколегії: 20.05.2024
Прийнята до друку: 23.09.2024

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: https://doi.org/10.15802/stp2024/312930
© А. Я. Кузишин, В. В. Ковальчук, Н. В. Костів, 2024