УДК 629.45:001.891.3/.5(479.24)

Л. В. УРСУЛЯК^{1*}, О. О. БОЛОТОВ^{2*}

^{1*}Каф. «Технічна механіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 286 63 49, ел. пошта lydm.urs@gmail.com, ORCID 0000-0001-5957-6926
 ^{2*}Каф. «Технічна механіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 977 57 08, ел. пошта о.o.bolotov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0807-0340

Дослідження поздовжньої динаміки пасажирських поїздів для надання рекомендацій з керування ними на нових ділянках Азербайджанської залізниці

Мета. Для організації безпечного, з позиції поздовжньої динаміки, руху поїздів на ділянках Азербайджанської залізниці, які вводять в експлуатацію, у роботі передбачено надати рекомендації щодо керування рухом пасажирських поїздів та електропоїздів для реалізації максимально можливої швидкості руху з урахуванням технічних можливостей локомотивів та параметрів поздовжнього профілю. Методика. Оцінку найбільших значень поздовжніх прискорень виконано за допомогою комп'ютерного моделювання поздовжніх коливань пасажирських поїздів під час їх руху з різними швидкостями на ділянках із найбільш несприятливими параметрами профілю та плану колії, які накладаються на збурення поїзда від дій машиніста з керування його рухом. Наведено математичне моделювання силових характеристик міжвагонних з'єднань пасажирських вагонів, обладнаних модернізованими гумометалевими поглинальними апаратами. Для підтвердження достовірності математичної моделі проведено порівняння максимальних величин поздовжніх прискорень вагонів та величин гальмівних шляхів, отриманих у результаті математичного моделювання руху пасажирських поїздів, з аналогічними величинами, які було отримано під час експериментальних поїздок. Результати. З допомогою комп'ютерного моделювання поздовжніх коливань поїздів отримано діаграми розподілу найбільших повздовжніх прискорень по довжині поїздів з різною кількістю вагонів, величини гальмівних шляхів та час гальмування. Для запропонованих режимів керування поїздами проаналізовано залежності швидкості руху від координати шляху. Зазначено, що для розглянутих режимів ведення пасажирських поїздів та електропоїздів із зазначеними швидкостями руху на визначених ділянках залізниць рівень поздовжніх прискорень вагонів не перевищує значень, які вплинуть на безпеку руху поїздів та комфорт поїздки пасажирів. Наукова новизна. Автори вперше запропонували математичну модель силової характеристики модернізованого поглинального апарата, яким оснащені пасажирські вагони на Азербайджанській залізниці. Досліджено поздовжню навантаженість електропоїздів та пасажирських поїздів, а також криві швидкості руху за різних режимів ведення поїздів на окремих ділянках Азербайджанської залізниці. Практична значимість. На основі отриманих результатів надано рекомендації з керування рухом пасажирських поїздів на реальних ділянках колії для підтримання заданої швидкості, з урахуванням технічних можливостей локомотивів та параметрів поздовжнього профілю.

Ключові слова: поздовжні прискорення; залізничний транспорт; параметри поздовжнього профілю; швидкість руху поїзда; реалізація керування; гальмівний шлях

Вступ

Під час вивчення поздовжніх коливань поїзда здебільшого досліджують перехідні режими, на які впливають зазори у міжвагонних з'єднаннях [3, 4, 6, 13]. При цьому найбільш небезпечним є режим гальмування, що супроводжується появою найбільших поздовжніх навантажень [5, 9, 10, 11, 12].

Слід також відзначити, що під час руху поїзда по поздовжньому профілю шляху збурення від зламів профілю можуть накладатися на збурення, які пов'язані з керування рухом. Це може, призвести до виникнення небезпечних поздовжніх прискорень вагонів не тільки в разі гальмування, а й у разі набору тяги [1].

У процесі пошуку причин виникнення небезпечних величин поздовжніх прискорень бажано використовувати не тільки результати експериментальних досліджень, а й методи математичного моделювання руху поїздів, які розглянуто.

Використання при цьому методів об'єктноорієнтованого програмування і сучасної обчислювальної техніки дозволяє розширити діапа-

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

зон задач та розглядати не тільки поздовжні, а й просторові коливання локомотивів і вагонів поїзда, які рухаються по криволінійній залізничній колії, що має нерівності [4, 7, 8].

Мета

Для організації безпечного, з позиції поздовжніх прискорень, руху пасажирських поїздів на ділянці довжиною 45 км Азербайджанської залізниці, яку вводять в експлуатацію, передбачено надати рекомендації щодо керування рухом пасажирських поїздів та електропоїздів, щоб реалізувати задану швидкість руху, урахувати технічні можливості локомотивів та параметри поздовжнього профілю колії. Слід розглянути ділянки обмеженої довжини з найбільш несприятливими параметрами профілю та плану колії, збудження від яких накладаються на збурення поїзда від дій машиніста з керування його рухом.

При цьому керування поїздом не повинно спричинити появу значних за величиною прискорень або уповільнень, які можуть призвести до виникнення небезпечних ситуацій або зменшити комфорт поїздки пасажирів.

Потрібно дослідити поздовжню навантаженість поїздів за різних режимів руху та проаналізувати залежності швидкості руху від координат колії з урахуванням параметрів профілю.

Методика

Для оцінки поздовжнього навантаження поїздів за математичну модель поздовжніх коливань взято систему істотно нелінійних диференціальних рівнянь, порядок якої залежить від кількості екіпажів у поїзді [3, 4].

Ці коливання супроводжуються дією поздовжніх сил на кожен екіпаж, викликаних перехідними або стаціонарними режимами руху поїзда та обумовлених впливом керівних збурень, переломами поздовжнього профілю колії та її криволінійності в плані.

За збурення, що діють на кожен екіпаж, взято: гальмівну силу, силу опору від профілю та плану колії, силу основного опору поступальному руху поїзда, силу тяги або силу електричного гальмування локомотива та поздовжні сили, що виникають у міжвагонних з'єднаннях [3, 4, 11].

Як відомо, величини поздовжніх зусиль залежать від характеристик поглинальних апаратів. Під час моделювання руху пасажирського поїзда враховано, що міжвагонні з'єднання обладнані модернізованими гумовометалевими поглинальними апаратами Р–5П. Силову характеристику зазначених поглинальних апаратів наведено на рис. 1 [3].

На рисунку зображено залежність поздовжньої сили S_i від величини стискання поглинального апарату q_i .



Рис. 1. Силова характеристика гумовометалевого поглинального апарату Р–5П

Fig. 1. Power characteristic of the rubber-metal absorber R–5P

Під час моделювання роботи міжвагонного з'єднання, оснащеного модернізованим поглинальним апаратом Р–5П, враховано також наявність комплектів буферних пристроїв.

Математичну залежність поздовжньої сили $S_i(q_i, \dot{q}_i)$ від деформації апарату q_i для *i*-го міжвагонного з'єднання можна описати таким чином:

$$S_{i}(q_{i},\dot{q}_{i}) = \begin{cases} q_{i} \cdot k_{ai}, \text{ якщо } 0 \leq 0 \leq \delta_{0i} \\ \text{ якщо } \delta'_{0i} < |q_{i}| < \Delta_{i} + \delta'_{0i} \text{ та } q_{i} \cdot \dot{q}_{i} \geq 0 \\ (\text{де } \delta'_{0i} = 0, \text{ якщо } q_{i} < 0 \\ \text{ та } \delta'_{0i} = \delta_{0i} \text{ , якщо } q_{i} > 0) \\ \text{C} \cdot e^{B \cdot (q_{i} - \dot{\delta_{oi}})} + D \cdot \dot{q}_{i} \\ \text{ якщо } \delta'_{0i} < |q_{i}| < \Delta_{i} + \delta'_{0i} \text{ та } q_{i} \cdot \dot{q}_{i} < 0 \\ (1 - \eta_{i}) \cdot (\text{C} \cdot e^{B \cdot (q_{i} - \dot{\delta_{oi}})} + D \cdot \dot{q}_{i}) \\ \text{ якщо } |q_{i} - \delta'_{0i}| > \Delta_{i} \\ k_{ki} \cdot (q_{i} - \Delta_{i} - \delta'_{0i}) + S_{\max_{i}} + \beta_{i} \cdot \dot{q}_{i} \end{cases}$$

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

де δ_{0i} – поздовжній зазор у з'єднанні; *i* – номер перерізу в поїзді; S_i – повздовжня сила; Δ_i – значення максимального ходу апарату; q_i – відносне переміщення суміжних вагонів; k_{ki}, k_{ai} – відповідно поздовжні жорсткості конструкції вагона та буферної пружини в *i*-му з'єднанні; β_i – коефіцієнт в'язкого опору деформування конструкції; η_i – коефіцієнт поглинання енергії поглинальним апаратом; $S_{\max i}$ – сила, за якої поглинальний апарат вимикається; C, B, D – коефіцієнти для визначення поздовжньої сили в разі навантаження та розвантаження поглинального апарату.

Загалом нелінійність силових характеристик поглинальних апаратів автозчепів і особливо наявність поздовжніх зазорів у міжвагонних з'єднаннях роблять механічну систему «Поїзд» суттєво нелінійною.

Силу, що діє на локомотив у тяговому режимі або під час електричного гальмування, визначено відповідно до наявних тягових або гальмівних характеристик, що відповідають обраному локомотиву [3, 4,].

Дослідження поздовжнього навантаження електропоїздів та пасажирських поїздів виконано за допомогою їх комп'ютерного моделювання повздовжніх коливань. При цьому проаналізовано швидкість руху в залежності від обраних режимів керування поїздами на деяких ділянках Азербайджанської залізниці обмеженої довжини, які введено в експлуатацію.

Для дослідження поздовжнього навантаження поїздів використано сучасний програмний комплекс, створений у галузевій лабораторії динаміки та міцності рухомого складу Українського державного університету науки і технологій [3, 4].

Під час математичного моделювання руху електропоїзда «Штадлер» (ЕШ–2) передбачено, що він сформований з 4 двоповерхових вагонів виробництва «Штадлер Райл» за такою схемою:

 – головний вагон (ГВ100) завдовжки 28,8 м, маса порожнього вагона – 58,2 т, маса завантаженого вагона – 84,05 т;

моторний вагон (МВ200) завдовжки
 22,05 м, (2 моторних візки), маса порожнього
 вагона –60,8 т, маса завантаженого вагона –
 81,07 т;

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

– моторний вагон (MB250) завдовжки 22,05 м (1 моторний візок), маса порожнього вагона – 52,2 т, маса завантаженого вагона – 76,47 т;

 головний вагон (ГВ150) завдовжки 28,8 м, маса порожнього вагона – 58,3 т, маса завантаженого вагона – 77,9 т.

Під час моделювання тягового та гальмівного режимів електропоїзда передбачено, що машиніст залежно від кута відхилення джойстика може реалізувати силу тяги або гальмівну силу різної величини.

У тяговому режимі максимальне відхилення джойстика машиніста становить 35°, а в гальмівному– 47°. Згідно з цим взято умовне позначення позицій, яке наведено в табл. 1. У чисельнику подано відповідні номери позицій для тягового, а в знаменнику – для гальмівного режимів.

Таблиця 1

Відповідність кута відхилення джойстика машиніста умовному номеру позиції в тяговому та гальмівному режимах

Table 1

Correspondence of the driver's joystick deflection angle to the conditional position number in the traction

Кут відхилення джойстика машиніста (градуси)	Номер по- зиції
7 / 9	1
14 / 18	2
21 / 27	3
28 / 37	4
35 / 47	5

Тягові та гальмівні характеристики моторних вагонів МВ–200 та МВ–250 представлено відповідно на рис. 2 і 3. Додатні значення сил відповідають тяговому режиму, а від'ємні – режиму гальмування.



Рис. 2. Тягові / гальмівні характеристики моторного вагона MB-250 електропоїзда ЕШ-2

Fig. 2. Traction / braking characteristics of the motor car MC-250 of the electric train ESh-2



Рис. 3. Тягові / гальмівні характеристики моторного вагона MB-200 електропоїзда ЕШ-2

Fig. 3. Traction / braking characteristics of the motor car MB-200 of the electric train ESh-2

Для оцінки величин поздовжніх прискорень вагонів пасажирських поїздів взято, що вони сформовані з чотиривісних спальних вагонів з одним електровозом AZ4, розташованим у голові поїзда. Передбачено також, що вагони обладнані розподільниками повітря з умов. № 292, увімкненими на короткоскладовий режим роботи, електроповітророзподільниками з умов. № 305, чавунними гальмівними колодками та модернізованими гумовометалевими поглинальними апаратами Р–5П. Комп'ютерне моделювання руху проведено для пасажирсь-

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

ких поїздів різної довжини (8–10 вагонів). Для порівняння розглянуто рух пасажирських поїздів із завантаженими та порожніми вагонами. Маса порожнього пасажирського вагона взято рівною 56 т, а завантаженого – 60 т.

Максимальний зазор у міжвагонному з'єднанні взято рівним 45 мм.

На рис. 4 і 5 наведено тягові та гальмівні характеристики пасажирського електровоза AZ4 відповідно.



Рис. 4. Тягові характеристики електровоза AZ4

Fig. 4. Traction characteristics of the AZ4 electric locomotive



Рис. 5. Гальмівні характеристики електровоза AZ4

Fig. 5. Braking characteristics of the AZ4 electric locomotive

Силу основного опору поступальному руху пасажирських вагонів визначено за методикою, яка наведена в тягових розрахунках [2].

Силу основного опору поступальному руху двоповерхових вагонів виробництва «Штадлер Райл», із яких був сформований швидкісний електропоїзд ЕШ–2, визначено за формулою:

$$W_{0_i} = (2.273 \times 10^{-6} \times V_i^2 + 7.5 \times 10^{-3}) \times m_i, \quad (1)$$

де V_i – швидкість вагона км/год; m_i – маса вагона, т.

Сила опору від профілю та плану колії визначено за формулою:

$$W_{p_i} = (-j - \frac{200}{R} - 1.495 \frac{V_i^2}{R} + 9.197 \cdot H_r) \times \\ \times 0.001 \times g \times m_i, (2)$$

де j – величина ухилу, проміле (знак ухилу задають згідно з правилами тягових розрахунків: на спуску – зі знаком «–», на підйомі – зі знаком «+»); V_i – швидкість екіпажу; R – радіус колової кривої в плані; H_r – підвищення зовнішньої рейки. У наведеній формулі величини радіуса колової кривої та підвищення зовнішньої рейки змінюються на вхідний та вихідний кривих від нуля до заданого значення.

Результати

Для підтвердження достовірності математичної моделі проведено порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними. Як контрольовані параметри обрано максимальні поздовжні прискорення вагонів та гальмівні шляхи в разі екстреного гальмування.

На рис. 6 і 7 наведено порівняння розподілу максимальних поздовжніх прискорень вагонів по довжині поїзда, отриманих у результаті розрахунку, з аналогічними величинами, які було отримано під час експериментальних поїздок с пасажирськими поїздами із 10 завантажених вагонів за екстреного гальмування з початкових швидкостей 70 км/год та 75 км/год відповідно на різних ділянках залізниці. Взято, що до початку процесу гальмування величини зазорів у міжвагонних з'єднаннях мали випадковий розподіл.

На цих графіках і далі в тексті додатні значення прискорень – прискорювальні, від'ємні – уповільнювальні.

На наведених рисунках маркерами позначені максимальні значення прискорень, отримані в результаті експерименту, суцільними лініями – у результаті розрахунку.



Рис. 6. Розподіл максимальних значень поздовжніх прискорень вагонів по довжині пасажирського поїзда за екстреного гальмування з початкової швидкості 70 км/год

Fig. 6. Distribution of maximum values of longitudinal accelerations of cars along the length of a passenger train during emergency braking from an initial speed of 70 km/h





Fig. 7. Distribution of maximum values of longitudinal accelerations of cars along the length of a passenger train during emergency braking from an initial speed of 75 km/h

Нижче в табл. 2 і 3 відповідно наведено порівняння величин гальмівних шляхів за екстрених гальмувань електропоїзда ЕШ–2 та пасажирських поїздів з різних початкових швидкостей руху, які отримано під час комп'ютерного моделювання та в результаті експериментальних поїздок на розглянутих ділянках залізниці.

Граничні значення гальмівних шляхів, які наведені в табл. 2, надано розробником електропоїздів «Штадлер Райл».

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

Наука та прогрес транспорту, 2025, № 1 (109)

Таблиця 2

Значення гальмівних шляхів за екстреного гальмування електропоїзда ЕШ–2 з різної початкової швидкості руху для завантажених та порожніх вагонів

Table 2

Values of braking distances during emergency braking of electric train ESh	I–2
with different initial speeds for loaded and empty cars	

V, км/год		100		120			140			160		
Гальмівний шлях, м	Експеримент	Розрахунок	Похибка, %									
Заванта- жені	443	455	2,7	620	660	6,5	824	910	10	1 057	1 195	13
Порожні	451	460	2	630	670	6,3	838	922	10	1 073	1 209	13
Граничні значення		544			721			982			1 282	

Таблиця З

Значення гальмівних шляхів за екстреного гальмування пасажирського поїзда

Table 3

Braking distances for emergency braking of a passenger train

	Гальмівний шлях, м						
Координата шляху початку гальмування	37 км 3 пк	42 км 4 пк					
Початкова швидкість, км/год	75	70					
Експеримент	355	525					
Розрахунок	370	529					

Аналіз наведених результатів на рис. 6 і 7 та в табл. 2 і 3 показує, що отримані результати комп'ютерного моделювання цілком задовільно (похибка не більше ніж 13 %) узгоджуються з результатами експериментів. Це дозволяє вважати, що запропонована математична модель та її програмна реалізація досить близько відображають процеси, що відбуваються під час перехідних режимів руху в пасажирських поїздах та електропоїздах.

Нижче наведено дослідження поздовжньої динаміки електропоїздів та пасажирських поїздів за різних режимів керування поїздами. Також проаналізовано криві швидкості залежно від обраних режимів керування поїздами.

На рис. 9 і 10 подано результати математичного моделювання розгону порожнього та завантаженого електропоїздів ЕШ–2 зі станції Лякі на ділянці колії довжиною 1 300 м, поздовжній профіль якої зображено на рис. 8.



Рис. 8. Поздовжній профіль ділянки

Режими ведення поїзда, наведені в табл. 4, обрано з умови розгону електропоїзда до 60 –75 км/год за 2 хв.

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

Fig. 8. Longitudinal profile of the site

[©] Л. В. Урсуляк, О. О. Болотов, 2025

Таблиця 4

Режимна карта при розгоні електропоїзда ЕШ–2

Table 4

Mode map for acceleration of electric train ESh–2

Інтервал часу з початку руху, сек	Номер тягової позиції джойстика
0	1
20	2
30	0 (вибіг)
50	1

На рис. 9 наведено графіки зміни швидкості руху електропоїзда залежно від часу ходу порожнього (суцільна лінія) та завантаженого (пунктирна лінія) електропоїздів у тяговому режимі. Маркерами на цьому графіку показані зміни режимів керування поїздом.

На рис. 10 зображено графік розподілу максимальних значень поздовжніх прискорень вагонів у частках «g» по довжині порожнього та завантаженого електропоїздів. Суцільні лінії відповідають розподілу максимальних поздовжніх прискорень вздовж порожнього електропоїзда, а пунктирні — вздовж завантаженого електропоїзда.



Рис. 9. Залежність швидкості руху від часу ходу порожнього та завантаженого електропоїздів

Fig. 9. Dependence of speed on running time of empty and loaded electric trains

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352



Рис. 10. Графік розподілу величин максимальних поздовжніх прискорень по довжині порожнього (суцільна лінія) та завантаженого (пунктирна лінія) електропоїздів у тяговому режимі

Fig. 10. Diagram of the distribution of maximum longitudinal accelerations along the length of an empty (solid line) and loaded (dashed line) electric train in traction mode

Як видно з графіка, наведеного на рис. 9, електропоїзд із порожніми вагонами, як і очікувалося, розігнався до більшої швидкості. Рівень найбільших поздовжніх прискорень (див. рис. 10) у порожньому електропоїзді виявився трохи вищим, ніж у завантаженому, але не перевищив допустимих прискорень 0,5 g [3].

Як відомо, гальмівний режим є більш небезпечним із позиції рівня поздовжніх прискорень. Тому гальмування електропоїзда, особливо на ухилах великої довжини, розглянемо більш детально.

Проведемо комп'ютерне моделювання електродинамічного гальмування завантаженого електропоїзда ЕШ–2 з початкової швидкості руху 50 км/год на ділянці колії довжиною 1 600 м з елементами поздовжнього профілю, які мають ухили до 29 проміле. Поздовжній профіль ділянки зображено на рис. 11.



Напрямок руху

Рис. 11. Поздовжній профіль ділянки

Fig. 11. Longitudinal profile of the site

У табл. 5 наведено режими керування електропоїздом для підтримки початкової швидкості руху 50 км/год. Координати шляху в цій та наступних таблицях відповідають реальному кілометражу розглянутих ділянок залізниці.

Таблиця 5

Режимна карта завантаженого електропоїзда ЕШ–2 для підтримки швидкості руху 50 км/год на затяжному спуску в разі електродинамічного гальмування

Table 5

Mode map of a loaded electric train ESh–2
for maintaining a speed of 50 km/h on a long descent
in case of electrodynamic braking

Координата шляху, м	Номер гальмівної позиції
15 592	1
15 750	вибіг
16 050	1
16 300	2
16 500	вибіг
16 600	1
17 000	вибіг
17 192	Кінець розрахунку

На рис. 12 наведено графік зміни швидкості руху завантаженого електропоїзда залежно від координати шляху. Маркерами позначено режими керування електропоїздом.





Fig. 12. Dependence of the speed of a loaded electric train ESh–2 on the coordinate of the path under electrodynamic braking

Із наведених результатів видно, що рекомендовані режими керування електропоїздом дають можливість підтримувати задану швидкість руху V = 50 км/год на розглянутій ділянці залізниці.

На рис. 13 представлено осцилограми поздовжніх прискорень 1, 2 і 3-го екіпажів електропоїзда. Стрибки прискорень на осцилограмах зафіксовано в моменти зміни режимів керування електропоїздом.



Рис. 13. Осцилограми поздовжніх прискорень вагонів завантаженого електропоїзда за електродинамічного гальмування

Fig. 13. Oscillograms of longitudinal accelerations of cars of a loaded electric train under electrodynamic braking

Якщо за такою ж режимною картою вести порожній електропоїзд, це призведе до його зупинки в координаті шляху 16 200 м. Тому для підтримки швидкості 50 км/год електропоїзда з порожніми вагонами на розглянутій ділянці треба застосувати інші режими керування, які наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Режимна карта для підтриманні швидкості руху 50 км/год на затяжному спуску порожнього електропоїзду ЕШ–2 при електродинамічному гальмуванні

Table 6

Mode map for maintaining a speed of 50 km/h on a long descent of an empty electric train ESH–2 with electrodynamic braking

Координата шляху, м	Номер гальмівної по- зициії
15 592	1
15 700	вибіг
16 000	1
17 000	вибіг
17 192	Кінець розрахунку

На рис. 14 наведено графік кривої швидкості руху порожнього електропоїзда залежно від координати шляху за електродинамічного гальмування.





Fig. 14. Dependence of the speed of an empty electric train ESh-2 on the coordinate of the path under electrodynamic braking

Як видно з наведеного графіка, запропоновані режими керування електропоїздом забезпечують підтримку швидкості руху 50 км/год.

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

На рис. 15 зображено графік зміни максимальних значень поздовжніх прискорень вагонів по довжині електропоїзда, отримані за весь період моделювання руху електропоїздів за режимними картами, наведеними в табл. 5 і 6.

Суцільна лінія відповідає максимальним значенням поздовжніх прискорень порожніх вагонів, а пунктирна – завантажених вагонів.



Рис. 15. Розподіл максимальних поздовжніх прискорень по довжині електропоїзда ЕШ–2 різної ваги за електродинамічного гальмування

Fig. 15. Distribution of maximum longitudinal accelerations along the length of electric train ESh–2 of different weights under electrodynamic braking

Як випливає з графіка, наведеного на рис. 15, рівень максимальних поздовжніх прискорень вагонів, що виникає в електропоїзді ЕШ–2 під час розглянутих режимів гальмування, не перевищує допустимого значення 0,5 g та забезпечує комфортабельність поїздки пасажирів.

Нижче розглянемо різні варіанти гальмування (електричне гальмування локомотивом, електропневматичне та пневматичне гальмування вагонів) порожнього та завантаженого пасажирських поїздів, сформованих із 10 вагонів, з різних початкових швидкостей руху ($V_0 = 50 \text{ км} / \text{год}, V_0 = 80 \text{ км} / \text{год}, 110 \text{ км} / \text{год}$) на реальній ділянці колії довжиною 1 600 м, параметри якої наведено на рис. 11.

Для оцінки найбільших значень поздовжніх прискорень розглянуто гальмування попередньо зазначених пасажирських поїздів.

Як і раніше, режими керування поїздом обрано з умови підтримки початкової швидкості руху. Як контрольовані параметри обрано величини поздовжніх прискорень вагонів та криву швидкості руху.

У табл. 7 наведено режими керування поїздом у разі гальмування тільки електричними гальмами локомотива з початкової швидкості руху $V_0 = 50$ км/год.

Таблиця 7

Режими керування пасажирським поїздом за електричного гальмування локомотивом

Table 7

Modes of passenger train control with electric braking by a locomotive

Координата шляху, м	Номер гальмівної позиції локомотива
15 592	1
15 800	2
16 100	3
16 400	4
16 800	3
17 000	2
17 192	Кінець розрахунку

Як приклад, на рис. 16 зображено розподіл найбільших значень поздовжніх прискорень по довжині порожнього та завантаженого пасажирських поїздів у разі електричного гальмування з початкової швидкості руху $V_0 = 50$ км/год.







Оскільки довжина пасажирського поїзда складала всього 10 вагонів, а маса завантаженого і порожнього вагонів відрізнялась на 9 %, то рівень найбільших поздовжніх прискорень у порожньому та завантаженому поїздах для розглянутої швидкості руху виявився майже однаковим за електричного гальмування локо-

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

мотивом. Тому надалі результати комп'ютерного моделювання наведено тільки для завантажених пасажирських поїздів.

У табл. 8 наведено режими керування поїздом за електропневматичного гальмування (ЕПГ) з початкової швидкості руху $V_0 = 50$ км/год.

```
Таблиця 8
```

Режими керування пасажирським поїздом за електропневматичного гальмування

Table 8

Modes of passenger train control with electropneumatic braking

Координата шляху, м	Положення гальмівного крана
15 592	ЕПГ І ступінь
15 800	відпуск гальм
16 100	вибіг
16 400	ЕПГ І ступінь
17 000	відпуск гальм
17 192	Кінець розрахунку

На рис. 17 зображено розподіл найбільших значень поздовжніх прискорень вагонів по довжині завантаженого пасажирського поїзда за електропневматичного я з початкової швидкості руху $V_0 = 50 \text{ км/год.}$



Рис. 17. Розподіл максимальних значень поздовжніх прискорень вагонів по довжині завантаженого пасажирського поїзда за електропневматичного гальмування

Fig. 17. Distribution of maximum values of longitudinal accelerations of cars along the length of a loaded passenger train under electropneumatic braking

© Л. В. Урсуляк, О. О. Болотов, 2025

Наука та прогрес транспорту, 2025, № 1 (109)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

На рис. 18 і 19 наведено результати комп'ютерного моделювання пневматичного гальмування – регулювальні гальмування з розрядженням гальмівної магістралі на 0,06 МПа (СТ І – перший ступінь гальмування) або на 0,08 МПа (СТ ІІ – другий ступінь гальмування) завантаженого пасажирського поїзда з різних початкових швидкостей руху на ділянці колії, параметри якої зображено на рис. 11.

Режими керування поїздом за пневматичного гальмування (ПГ) наведено у табл. 9.

На рис. 18 зображено залежності швидкості руху поїзда від координати шляху за пневматичного гальмування для різних початкових швидкостей руху (суцільна лінія – $V_0 = 50 \text{ км} / \text{год}$, пунктирна лінія – $V_0 = 80 \text{ км} / \text{год}$, штрихпунктирна лінія $V_0 = 110 \text{ км} / \text{год}$). Маркерами на графіку показані режими керування поїздом.

Таблиця 9

Режими керування пасажирським поїздом за пневматичного гальмування

Table 9

Modes of passenger train control with pneumatic braking

Координата шляху, м	Положення гальмівного крана
15 592	CT I
15 800	відпуск гальм
16 100	CT II
17 000	відпуск гальм
17 192	Кінець розрахунку



Рис. 18. Зміна кривої швидкості залежно від положення завантаженого пасажирського поїзда на ділянці колії за пневматичного гальмування з різних початкових швидкостей

Fig. 18. Change in the speed curve depending on the position of a loaded passenger train on the track section under pneumatic braking from different initial speeds

Як видно з наведених графіків, запропоновані режими керування пасажирським поїздом дають змогу підтримувати початкову (задану) швидкість руху на складній ділянці поздовжнього профілю з довгим спуском та великими ухилами.

На рис. 19 наведено графіки розподілу максимальних значень поздовжніх прискорень за довжиною завантаженого пасажирського поїзда

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

в разі регулювального гальмування з різних початкових швидкостей гальмування.

Як видно з графіка, наведеного на рис. 19, найбільше значення поздовжніх прискорень отримано за максимальної швидкості руху 110 км/год, що виникає в останньому вагоні.



Рис. 19. Розподіл максимальних поздовжніх прискорень вагонів по довжині завантаженого пасажирського поїзда за регулювального гальмування з різних початкових швидкостей руху

Fig. 19. Distribution of maximum longitudinal accelerations of cars along the length of a loaded passenger train under control braking from different initial speeds Нижче в табл. 10 наведено значення найбільших додатних та від'ємних прискорень вагонів за різних режимів гальмування (електричного, електропневматичного та пневматичного) для завантаженого (чисельник) та порожнього (знаменник) пасажирських поїздів із різних початкових швидкостей руху на ділянці колії, зображеної на рис. 11. Режими керування поїздом за електричного, електропневматичного та пневматичного та пневматичного гальмування зазначено в табл. 7, 8 і 9 відповідно. У всіх випадках проведено моделювання на ділянці колії довжиною 1 600 м. У таблиці зазначено також час ходу на розглянутій ділянці.

Таблиця 10

Значення найбільших поздовжніх прискорень (у частках «g «) для різних видів гальмування пасажирського поїзда з різних початкових швидкостей руху

Table 10

Вид гальму- вання		Електричне		Елек	тропневмат	гичне	Пневматичне		
V9, км/год	50	80	110	50	80	110	50	80	110
Час ходу, сек	$\frac{121}{126}$	$\frac{75}{76}$	$\frac{54}{55}$	$\frac{119}{123}$	$\frac{71}{72}$	$\frac{52}{53}$	$\frac{128}{132}$	$\frac{73}{74}$	$\frac{53}{53}$
Wmax, g	$\frac{0,1}{0,11}$	$\frac{0,09}{0,1}$	$\frac{0,09}{0,1}$	$\frac{0,11}{0,11}$	$\frac{0,12}{0,13}$	$\frac{0,11}{0,12}$	$\frac{0,18}{0,08}$	$\frac{0,34}{0,1}$	$\frac{0,38}{0,11}$
Wmin, g	$\frac{-0,14}{-0,15}$	$\frac{-0,15}{-0,15}$	$\frac{-0,14}{-0,15}$	$\frac{-0,1}{-0,11}$	$\frac{-0,11}{-0,12}$	$\frac{-0,13}{-0,12}$	$\frac{-0,13}{-0,07}$	$\frac{-0,35}{-0,09}$	$\frac{-0,37}{-0,12}$

Values of the largest longitudinal accelerations (in fractions of «g») for different types of braking of a passenger train from different initial speeds

З наведеної таблиці видно, що рівень найбільших поздовжніх прискорень зростає зі збільшенням початкової швидкості руху та досягає найбільшого значення в разі пневматичного гальмування, але не перевищую допустимих значень 0,5 g.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що запропоновані режими керування пасажирськими поїздами можуть бути застосовані на розглянутій ділянці залізниці для підтримання заданої (початкової) швидкості руху. Під час руху поїздів у тяговому режимі питання про поздовжню динаміку не настільки актуальне, як під час гальмування. Але в разі руху в тяговому режимі по довгому підйому з ухилами майже 30 ‰ може постати питання, яким чином керувати поїздом, щоб на підйомі такої величини не втратити дільничну швидкість.

Нижче проведено комп'ютерне моделювання тягового режиму завантажених пасажирських поїздів на затяжному підйомі з ухилом 29,89 ‰ довжиною 1 300 м. Розглянуто рух за-

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

[©] Л. В. Урсуляк, О. О. Болотов, 2025

вантажених пасажирських поїздів різної довжини (10, 9 або 8 вагонів). Номер тягової позиції зазначено в табл. 11.

Як контрольовані параметри взято швидкість руху поїздів та величини поздовжніх прискорень вагонів.

Таблиця 11

Режимна карта руху в тяговому	7
режимі завантаженого пасажирського	поїзда

Table 11

Traffic mode map in the traction mode of a loaded passenger train

Координата шляху, м	Номер тягової позиції
35 400	18
35 800	20
36 200	22
36 800	Кінець розрахунку

Для оцінки величин найбільших поздовжніх прискорень взято, що в початковий момент руху величини зазорів у міжвагонних з'єднаннях мали випадковий розподіл.

Початкову швидкість руху взято рівною 84 км/год. Залежність значень швидкості руху від координати шляху для розглянутих пасажирських поїздів наведено на рис. 20. Маркерами на вказаних графіках зазначено номери тягових позицій.

На рис. 21 зображено розподіл максимальних прискорень по довжині поїзда в тяговому режимі.

На наведених рисунках суцільні лінії відповідають результатам моделювання поїзда з 10 вагонів, пунктирні – поїзда з 9 вагонів, штрих пунктирні – поїзда з 8 вагонів.

Із результатів, наведених на рис. 20, як і слід було очікувати, видно, що зниження маси поїзда (за рахунок кількості вагонів) дозволить збільшити швидкість руху на розглянутій ділянці колії. При цьому для підтримки швидкості руху близько 84 км/год наприкінці затяжного підйому в поїзді з 10 вагонів необхідний більш потужний локомотив. У поїзді з 9 вагонів швидкість руху наприкінці затяжного підйому не знизилася нижче 82 км/год, а в поїзді, який складався з 8 вагонів, швидкість руху незначно

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

збільшилась (відхилення від заданої швидкості склало 4 %).

Рівень найбільших поздовжніх прискорень, що виникає в розглянутих поїздах (див. рис. 21), виявився практично однаковим та безпечним для пасажирів.



Рис. 20. Зміна кривої швидкості залежно від положення завантажених пасажирських поїздів на ділянці колії в тяговому режимі







Fig. 21. Distribution of the maximum longitudinal prime roots along the length of a loaded passenger train in traction mode

Наукова новизна та практична значимість

Автори вперше запропонували математична модель силової характеристики модернізованого поглинального апарату Р–5П, яким оснащені пасажирські вагони на Азербайджанській залізниці. Проведено апробації запропонованої математичної моделі шляхом порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними. За контрольованв параметри обрано значення найбільших поздовжніх прискорень вагонів та гальмівні шляхи.

Надано рекомендації щодо керування електропоїздами «Штадлер» та пасажирськими поїздами на окремих ділянках Азербайджанської залізниці, які вводять в експлуатацію, для підтримки заданої швидкості руху.

Висновки

1. Досліджено поздовжню навантаженість електропоїздів та пасажирських поїздів для різних режимів ведення з різними швидкостями руху. Розглянуто пасажирські поїзди різної довжини (8, 9 і 10 вагонів) та різної ваги (порожні та завантаженні).

2. Надані рекомендації з керування рухом електропоїзда ЕШ–2 та пасажирським поїздом на реальних ділянках колії Азербайджанської залізниці для підтримки заданої швидкості руху. Проаналізовано криві швидкості руху поїздів та величини поздовжніх прискорень вагонів для запропонованих режимів керування поїздами.

3. Для розглянутих режимів ведення поїздів зі швидкостями руху в діапазоні 50–110 км/год на розглянутих ділянках колії рівень величин поздовжніх прискорень вагонів у пасажирських поїздах та в електропоїзді не перевищував допустимих значень 0,5 g. Таким чином, запропоновані режими керування рухом можуть бути застосовані машиністами на розглянутих ділянках Азербайджанської залізниці для підтримки заданої швидкості руху.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1. Блохин Е. П., Железнов К. И., Урсуляк Л. В. Вычислительный комплекс для решения задач безопасности и устойчивости движения подвижного состава железных дорог. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. № 18. Вип. 18. С. 106–114. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2007/17457
- 2. Бобирь Д. В., Грищенко М. А., Сердюк В. Н. *Теорія локомотивної тяги*: підручник. Дніпро : Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2022. 385 с.
- 3. Blochinas E., Dailydka S., Lingaitis L., Ursuliak L. *Nestacionarieji ir kvazistatiniai geleźinkelio traukinių judėjimo režimai.* Vilnius: Technika, 2015. 168 c.
- 4. Bosso N., Zampieri N. Real-time implementation of a traction control algorithm on a scaled roller rig. *Vehicle System Dynamics*. 2012. № 51 (4). C. 517–541. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2012.750001
- Liu K., Wang Z., Liu P., Liu G., Wang Y., Zhang W. A heavy-haul train longitudinal-vertical coupled dynamics model and its dynamic behaviour under emergency braking. *Vehicle System Dynamics*. 2024. P. 1–24. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2353705
- Liu W., Su S., Tang T., Cao Y. Study on longitudinal dynamics of heavy haul trains running on long and steep downhills. *Vehicle System Dynamics*. 2021. Vol. 60. Iss. 12. P. 4079–4097. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1998559
- Pogorelov D., Yazykov V., Lysikov N., Oztemel E., Arar O. F., Rende F. S. Train 3D: the tech-nique for inclusion of three-dimensional models in longitudinal train dynamics and its application in derail-ment studies and train simulators. Vehicle System Dynamics. 2017. Vol. 55. Iss. 4. P. 583–600. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1273532
- Pshinko O. M., Ursulyak L. V., Zhelieznov K. I., Shvets A. O. To the problem of train running safe-ty. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. Iss. 1. P. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012014
- Pshinko O., Ursulyak L., Kostrytsia S., Fedorov Y., Shvets A. The influence of the «train-track» system parameters on the maximum longitudinal forces' level. *Transport Problems*. 2019. Vol. 14. Iss. 4. P. 161–172. DOI: https://doi.org/10.20858/tp.2019.14.4.14

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

- Serajian R., Mohammadi S., Nasr A. Influence of train length on in-train longitudinal forces during brake application. *Vehicle System Dynamics*. 2018. Viol. 57. Iss. 2. P. 192–206. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2018.1456667
- Ursulyak L., Zheleznov K. Simulation of Braking Processes in Freight Trains. *Transport Means* 2022. Proceedings of the 26th International Scientific Conference (Kaunas, 05–07 Oct., 2022). Kaunas, 2022. P. 788–791.
- Wu Q., Cole C., Spiryagin M., Chang C., Wei W., Ursulyak L., ... Cantone L. Freight train air brake models. *International Journal of Rail Transportation*. 2021. Vol. 11. Iss. 1. P. 1-49. DOI: https://doi.org/10.1080/23248378.2021.2006808
- 13. Wu Q., Spiryagin M., Cole C., McSweeney T. Parallel computing in railway research. *International Journal of Rail Transportation*. 2018. Vol. 8. Iss. 2. P. 111–134. DOI: https://doi.org/10.1080/23248378.2018.1553115

L. V. URSULYAK^{1*}, O. O. BOLOTOV^{2*}

^{1*}Dep. «Technical Mechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lasaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 286 63 49, e-mail lydm.urs@gmail.com, ORCID 0000-0001-5957-6926
 ^{2*}Dep. «Technical Mechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lasaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 977 57 08, e-mail o.o.bolotov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0807-0340

Study of the Longitudinal Dynamics of Passenger Trains to Provide Recommendations for Their Control on New Sections of the Azerbaijan Railways

Purpose. In order to organize safe, longitudinal dynamics, train traffic on the sections of the Azerbaijan Railways that are being put into operation, the paper provides recommendations for controlling the movement of passenger trains and electric trains to realize the maximum possible speed, taking into account the technical capabilities of locomotives and the parameters of the longitudinal profile. Methodology. The estimation of the largest values of longitudinal accelerations was performed by means of computer modeling of longitudinal oscillations of passenger trains while they are moving at different speeds in areas with the most unfavorable parameters of the profile and track plan, which are superimposed on the train disturbances caused by the driver's actions to control its movement. The paper presents mathematical modeling of the force characteristics of inter-car connections of passenger cars equipped with modernized rubber-metal absorbing devices. To confirm the validity of the mathematical model, the maximum values of longitudinal accelerations of cars and braking distances obtained as a result of mathematical modeling of passenger trains were compared with similar values obtained during experimental trips. Findings. Using computer modeling of longitudinal train oscillations, diagrams of the distribution of the largest longitudinal accelerations along the length of trains with different numbers of cars, the magnitude of braking distances, and braking times were obtained. For the proposed modes of train control, the dependence of the speed on the track coordinate is analyzed. It is noted that for the considered modes of operation of passenger trains and electric trains with the specified speeds on certain sections of railways, the level of longitudinal accelerations of cars does not exceed the values that will affect the safety of train traffic and the comfort of passenger travel. Originality. For the first time, the authors proposed a mathematical model of the power characteristic of the modernized absorber apparatus, which is used in passenger cars on the Azerbaijan Railways. The longitudinal load of electric trains and passenger trains, as well as speed curves in different modes of train operation on certain sections of the Azerbaijan Railways were investigated. Practical value. Based on the results obtained, recommendations for controlling the movement of passenger trains on real track sections to maintain a given speed, taking into account the technical capabilities of locomotives and longitudinal profile parameters, were provided.

Keywords: longitudinal accelerations; railway transport; longitudinal profile parameters; train speed; control implementation; braking distance

REFERENCES

1. Blokhin, Y. P., Zheleznov, K. I., & Ursuliak, L. V. (2007). Computing complex for solving problems of safety and stability of the movement of rolling stock of railways. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 18*(18), 106-114. DOI: https://doi.org/10.15802/stp2007/17457 (in Russian)

Creative Commons Attribution 4.0 International doi: https://doi.org/10.15802/stp2025/325352

- 2. Bobyr, D., Grischenko, N., & Serdyuk, V. N. (2022). The theory of locomotive traction. *Dnipro: Educational and scientific institute «Dnipro Institute of Infrastructure and Transport»*. (in Ukrainian)
- 3. Blochinas, E., Dailydka, S., Lingaitis, L., & Ursuliak, L. (2015). *Nestacionarieji ir kvazistatiniai geležinkelio traukinių judėjimo režimai*. Vilnius: Technika. (in Lithuanian)
- Bosso, N., & Zampieri, N. (2012). Real-time implementation of a traction control algorithm on a scaled roller rig. *Vehicle System Dynamics*, 51(4), 517-541. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2012.750001 (in English)
- Liu, K., Wang, Z., Liu, P., Liu, G., Wang, Y., & Zhang, W. (2024). A heavy-haul train longitudinal-vertical coupled dynamics model and its dynamic behaviour under emergency braking. *Vehicle System Dynamics*, 1-24. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2353705 (in English)
- Liu, W., Su, S., Tang, T., & Cao, Y. (2021). Study on longitudinal dynamics of heavy haul trains running on long and steep downhills. *Vehicle System Dynamics*, 60(12), 4079-4097. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1998559 (in English)
- Pogorelov, D., Yazykov, V., Lysikov, N., Oztemel, E., Arar, O. F., & Rende, F. S. (2017). Train 3D: the technique for inclusion of three-dimensional models in longitudinal train dynamics and its application in derailment studies and train simulators. *Vehicle System Dynamics*, 55(4), 583-600. DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1273532 (in English)
- Pshinko, O. M., Ursulyak, L. V., Zhelieznov, K. I., & Shvets, A. O. (2020). To the problem of train running safety. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985(1), 1-10. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012014 (in English)
- Pshinko, O., Ursulyak, L., Kostrytsia, S., Fedorov, Y., & Shvets, A. (2019). The influence of the «train-track» system parameters on the maximum longitudinal forces' level. *Transport Problems*, 14(4), 161-172. DOI: https://doi.org/10.20858/tp.2019.14.4.14 (in English)
- Serajian, R., Mohammadi, S., & Nasr, A. (2018). Influence of train length on in-train longitudinal forces during brake application. *Vehicle System Dynamics*, 57(2), 192-206.
 DOI: https://doi.org/10.1080/00423114.2018.1456667 (in English)
- 11.Ursulyak, L., & Zheleznov, K. (2022. Oct.). Simulation of braking processes in freight trains. In *Transport Means 2022: Proceedings of the 26th International Scientific Conference* (pp. 788-791). (in English)
- 12. Wu, Q., Cole, C., Spiryagin, M., Chang, C., Wei, W., Ursulyak, L., ... Cantone, L. (2021). Freight train air brake models. *International Journal of Rail Transportation*, 11(1), 1-49. DOI: https://doi.org/10.1080/23248378.2021.2006808 (in English)
- 13. Wu, Q., Spiryagin, M., Cole, C., & McSweeney, T. (2018). Parallel computing in railway research. *International Journal of Rail Transportation*, 8(2), 111-134. DOI: https://doi.org/10.1080/23248378.2018.1553115 (in English)

Надійшла до редколегії: 04.11.2024 Прийнята до друку: 24.03.2025