

**Лобунько Максим Валерійович**, аспірант PhD кафедри електричного транспорту та тепловозобудування, +38(093)975-78-80, maksym.lobunko@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-0863-0974

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002*

**Якунін Дмитро Ігорович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричного транспорту та тепловозобудування, +38(097)715-58-94, unicomber@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3995-3162

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002*

## ПЕРЕДУМОВИ ДЛЯ РОЗРОБКИ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ НАХИЛУ КУЗОВІВ ШВИДКІСНИХ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ

***Анотація.** У статті проведено оцінку мінімального часу руху екіпажу відрізком рейкової колії з метою виявити доцільність розробки комбінованої системи нахилу кузовів швидкісних електропоїздів для залізниць України.*

***Ключові слова:** мінімальний час руху, нахил кузова, лінійний електродвигун, електромеханічний привод.*

**Lobunko Maksym**, PhD student, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, +38(093)975-78-80, maksym.lobunko@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-0863-0974

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»  
2 Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002*

**Iakunin Dmytro**, PhD, Assistant Professor, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, +38(097)715-58-94, unicomber@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3995-3162

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»  
2 Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002*

## PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT OF A COMBINED CARBODY TILTING SYSTEM FOR HIGH-SPEED ELECTRIC TRAINS ON UKRAINIAN RAILWAYS

***Abstract.** The article evaluates the minimum time required for a train to travel a section of track in order to determine the feasibility of developing a combined carbody tilting system for high-speed electric trains on Ukrainian railways.*

***Keywords:** minimum travel time, body tilting, linear electric motor, electromechanical actuator*

**Постановка проблеми.** Будівництво високошвидкісних магістралей є досить витратним способом підвищення пропускної здатності пасажирських перевезень.

Менш витратною технологією є використання рухомого складу з кузовами, що нахилиються. Застосування цієї технології на залізничному рухомому складі має вже 50-річну історію [1].

Сьогодні поїзди із системами нахилу кузовів експлуатуються у таких європейських країнах як Італія – серія Pendolino (ETR 450, ETR 460, ETR 480, Frecciargento), Іспанія – RENFE Alaris та Talgo Pendular, Німеччина – ICE-T (серії 411, 415), Швейцарія – Cisalpino (ETR 470, ETR 610), Фінляндія – Sm3 Pendolino, Чехія – ČD Pendolino (Class 680), Польща – PKP Pendolino (ED250), Велика Британія – Virgin Pendolino (Class 390), Португалія – Alfa Pendular. І здебільшого усі ці поїзди базуються на технології FIAT Ferroviaria (тепер Alstom), яка й створила перші Pendolino у 1970-х.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Майже весь електрорухомий склад європейських залізниць із системами нахилу кузовів базується на *активній* системі нахилу кузова, яка включає в себе виконавчий механізм, силовий привод та систему керування. При цьому *виконавчий механізм* реалізований через важільний підвіс кузова до проміжної балки або важільний підвіс проміжної балки до рами візка. *Силовий привод* в цих схемах – гідравлічний або пневматичний.

Незважаючи на такі недоліки подібних систем нахилу кузова як складність важільної конструкції на візку; складність гідравлічного силового привода та можливість протікання рідини а також необхідність у наявності резерву; для пневматичного привода – низька жорсткість робочого середовища при низькому тиску повітря, модернізація існуючого рухомого складу залишається неможливою через значні зміни у конструкції.

Як альтернативний варіант пропонується розробка комбінованої системи нахилу кузовів для електрорухомого складу, що базується на глибокій модернізації системи нахилу кузовів японських поїздів серії 383. На відміну від конструкції японських поїздів, запропонована комбінована система нахилу кузова базується на електромеханічному силовому приводі із застосуванням лінійного двигуна замість пневматичної системи, а опори кузова мають вигляд кругового

сектора, що опирається на ролики та розміщені вже після другої ступені підресорювання. У свою чергу друга ступінь підресорювання також виконує роль керованої системи нахилу через пневматичні ресори з електропневмоклапанами.

Не дивлячись на те, що Чехія вже має досвід експлуатації поїздів із системами нахилу кузовів, останній подібний рухомий склад був придбаний ще у 2005 році [2]. При цьому варто зазначити, що Чехія має одну з найщільніших і найрозвиненіших залізничних мереж у Європі із загальною довжиною мережі близько 9 500 км із яких електрифіковано понад 3 200 км колій (для порівняння – Україна має близько 19 787 км колії із яких 9 319 км електрифіковано). На сьогодні Чехія продовжує закуповувати сучасний рухомий склад, але без активних систем нахилу кузовів, про це свідчить наявна інформація із відкритих джерел. Так у 2025 році був підписаний контракт на поставку 22-х швидкісних електропоїздів (до 200 км/год) Škoda 26Ev без активної системи нахилу кузовів. Експлуатація таких поїздів планується на двох лініях – Ех6: Прага – Пльзень – Хеб (Prague–Plzeň–Cheb) та R16: Прага – Бєроун – Пльзень – Клатови / Железна Руда (Prague–Beroun–Plzeň–Klatovy / Železná Ruda) [3] [4] [5].

Однак введення в експлуатацію рухомого складу із системами нахилу кузовів наразі не відбувається. Це пов'язано із тим, що багато залізничних маршрутів Чехії вже пройшли модернізацію колії та дозволяють рух поїздів зі швидкістю 160-200 км/год без застосування активних технологій нахилу кузовів. Проте маршрути Ех6: Прага – Пльзень – Хеб (Prague–Plzeň–Cheb) та R16: Прага – Бєроун – Пльзень – Клатови / Железна Руда (Prague–Beroun–Plzeň–Klatovy / Železná Ruda), все ще мають традиційну геометрію із великою кількістю кривих.

У процесі євроінтеграції в подальшому Україна має здобути достойне місце серед провідних країн як така, що має високий науковий потенціал. Отже інноваційні розробки дозволять підвищити привабливість електропоїздів українського виробництва на європейських ринках. Пропозиція до модернізації наявних швидкісних електропоїздів виробництва Чехії виглядає як можливість до впровадження наукових розробок українських вчених.

**Метою дослідження** є оцінка впливу кута нахилу кузова на мінімальний час проходження маршруту.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На прикладі маршрутів Ех6 та R16 методом моделювання руху поїзда з різними кутами нахилу кузовів проведена оцінка впливу параметрів підвіски на комфорт і енергоефективність, визначено доцільність розробки комбінованої системи нахилу кузовів та зіставлено отримані результати із аналогічною ситуацією на залізниці України. Визначено потенційні вигоди для майбутнього українського електрорухомого складу.

За допомогою формули [6]:

$$V = \sqrt{R \cdot \left\{ a_{H75\%} + g \cdot \sin \left[ \arcsin \left( \frac{h}{2S} \right) + \theta \right] \right\}} =$$

$$\sqrt{R \cdot \left\{ 0,175 + 9,81 \cdot \sin \left[ \arcsin \left( \frac{h}{1,435} \right) + \theta \right] \right\}},$$

де  $2S$  – ширина колії, 1435 мм, пораховані обмеження швидкості руху на всіх ділянках із параметрами нахилу кузовів  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $8^\circ$  та складено діаграми для відрізків Ех6: Прага – Пльзень – Хеб (Prague–Plzeň–Cheb) та R16: Прага – Бєроун – Пльзень – Клатови / Железна Руда (Prague–Beroun–Plzeň–Klatovy / Železná Ruda) які мають параметри профілю:

- відрізок Ех6 довжиною 213 000 м, який включає 268 кривих ділянок радіусом від 301 до 2225 м та підвищенням зовнішньої рейки від 0 до 150 мм;
- відрізок R16 довжиною 204 000 м, який включає 263 криві ділянки радіусом від 300 до 2246 м та підвищенням зовнішньої рейки від 0 до 150 мм.

Для обох маршрутів прийняте обмеження максимальної швидкості 200 км/год, що відповідає заявленій конструкційній швидкості поїздів, що плануються до експлуатації на відповідних ділянках.

Діаграми будуть мати вигляд, показаний на рис. 1–10.

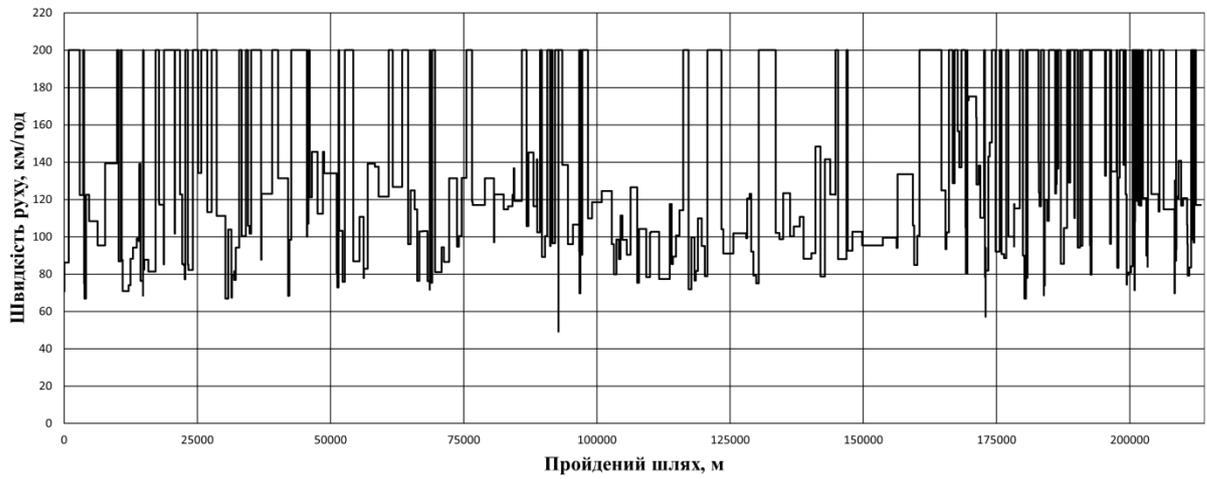


Рисунок 1 – Граничні обмеження швидкості по ділянках за відсутності нахилу кузова для Ех6

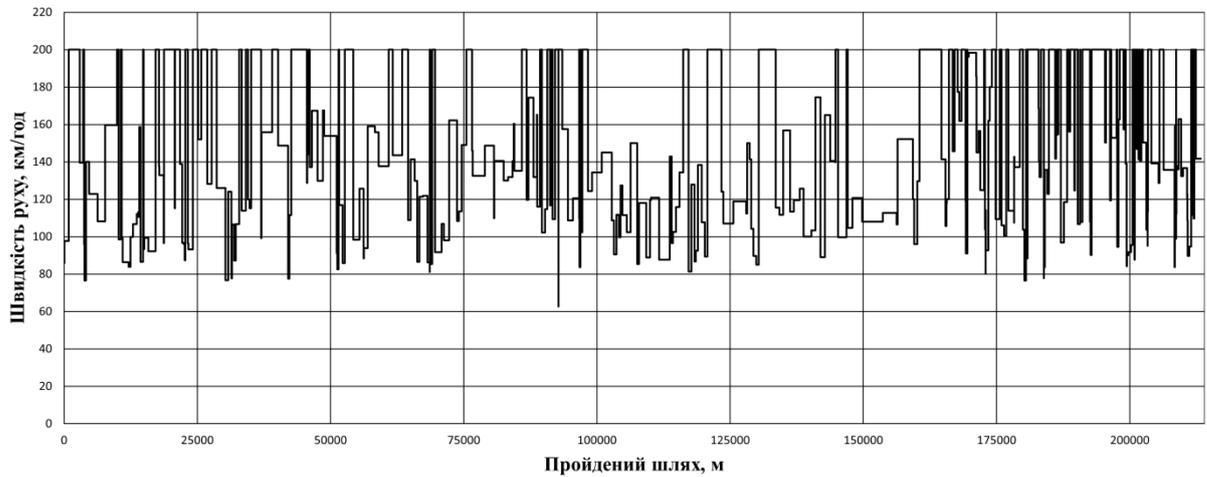


Рисунок 2 – Граничні обмеження швидкості по ділянках при нахилу кузова до 2° для Ех6

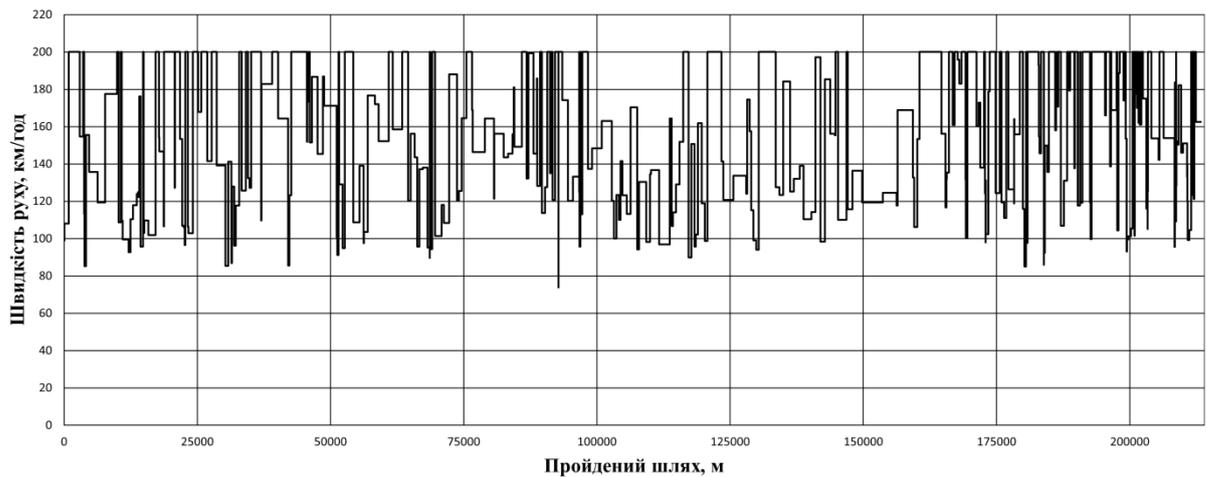


Рисунок 3 – Граничні обмеження швидкості по ділянках при нахилу кузова до 4° для Ех6

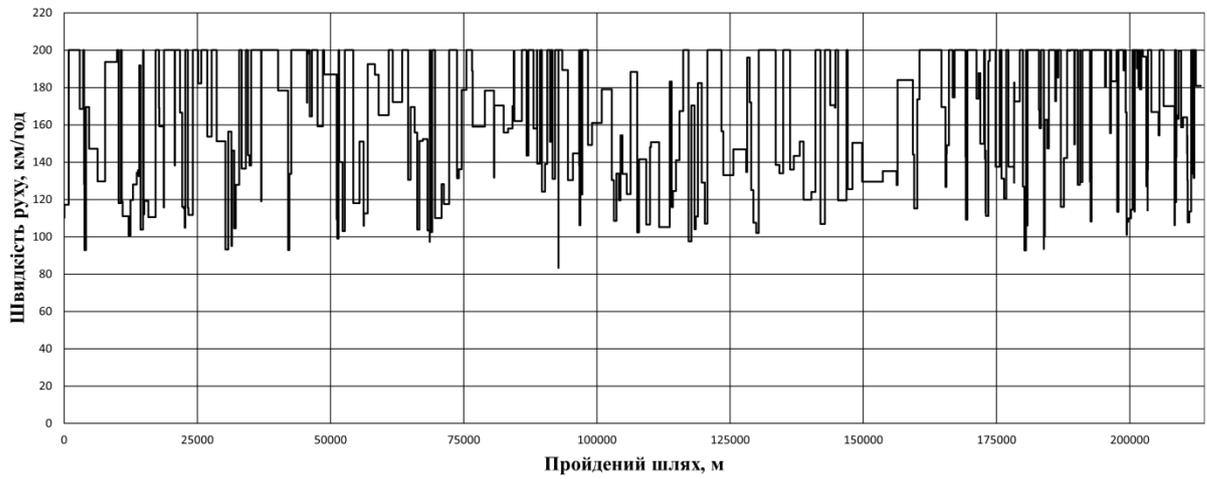


Рисунок 4 – Граничні обмеження швидкості по ділянках при нахилу кузова до  $6^\circ$  для Ех6

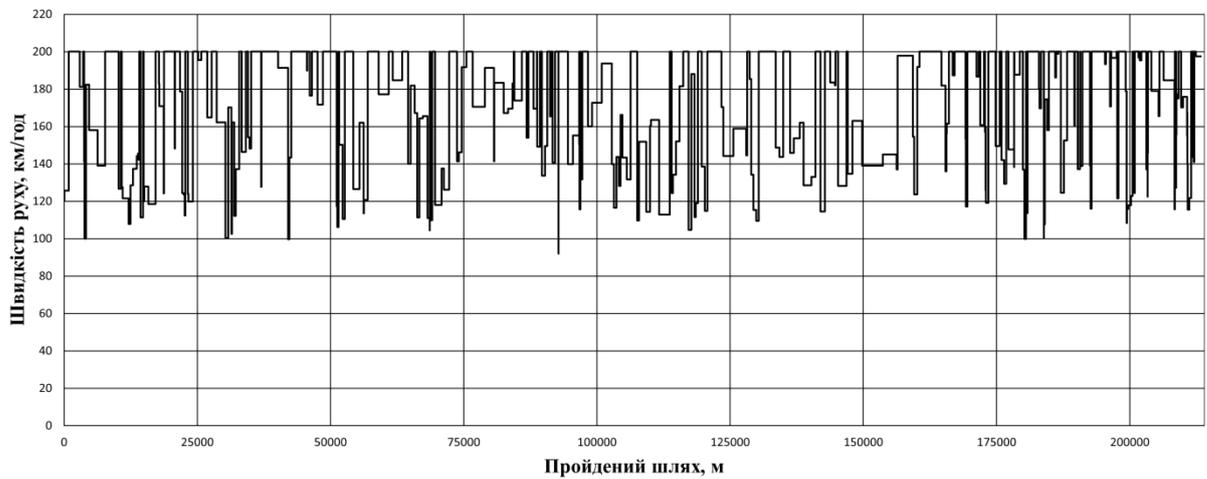


Рисунок 5 – Граничні обмеження швидкості по ділянках при нахилу кузова до  $8^\circ$  для Ех6

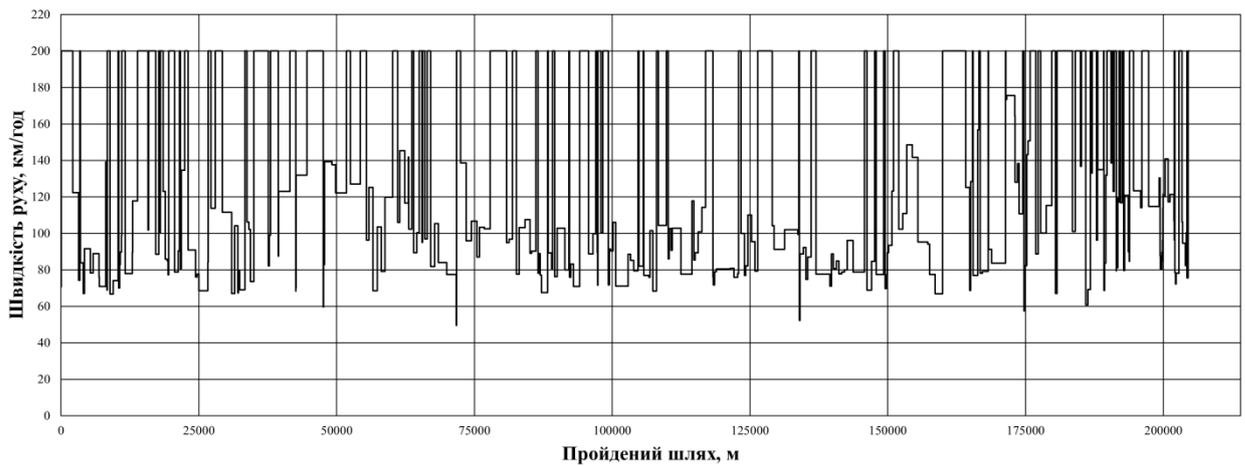


Рисунок 6 – Граничні обмеження швидкості по ділянках за відсутності нахилу кузова для R16

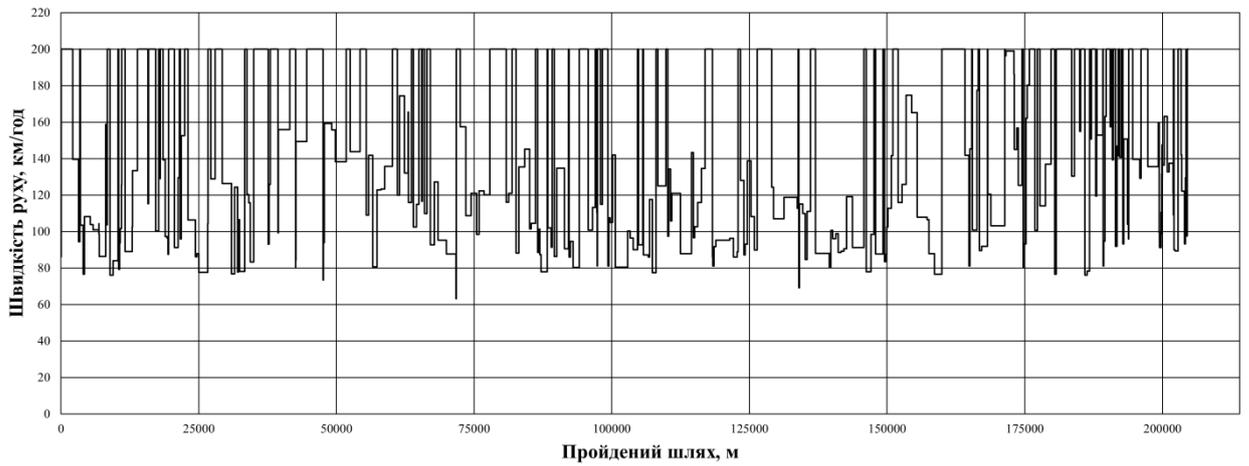


Рисунок 7 – Граничні обмеження швидкості по ділянках при нахилу кузова до 2° для R16

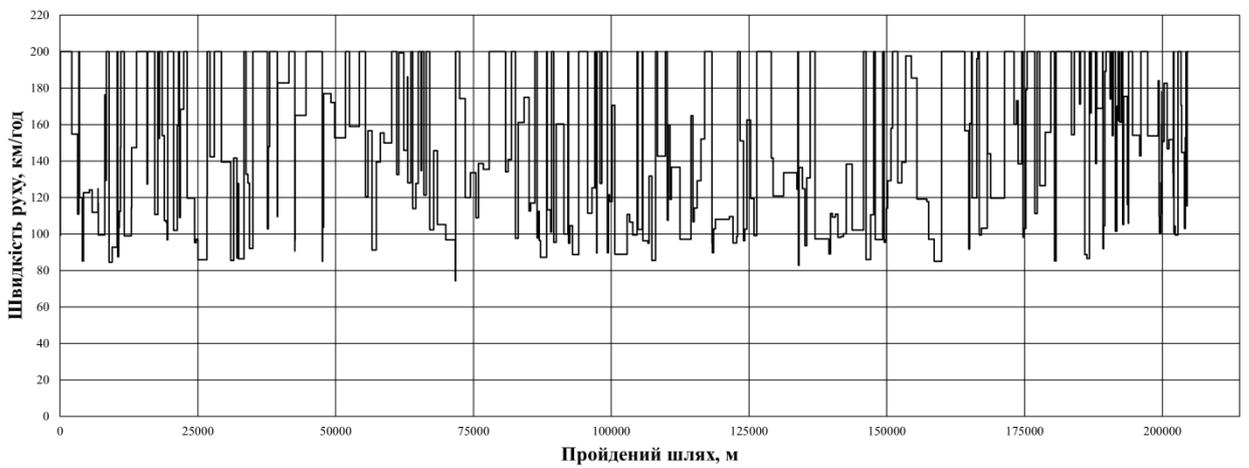


Рисунок 8 – Граничні обмеження швидкості по ділянках при нахилу кузова до 4° для R16

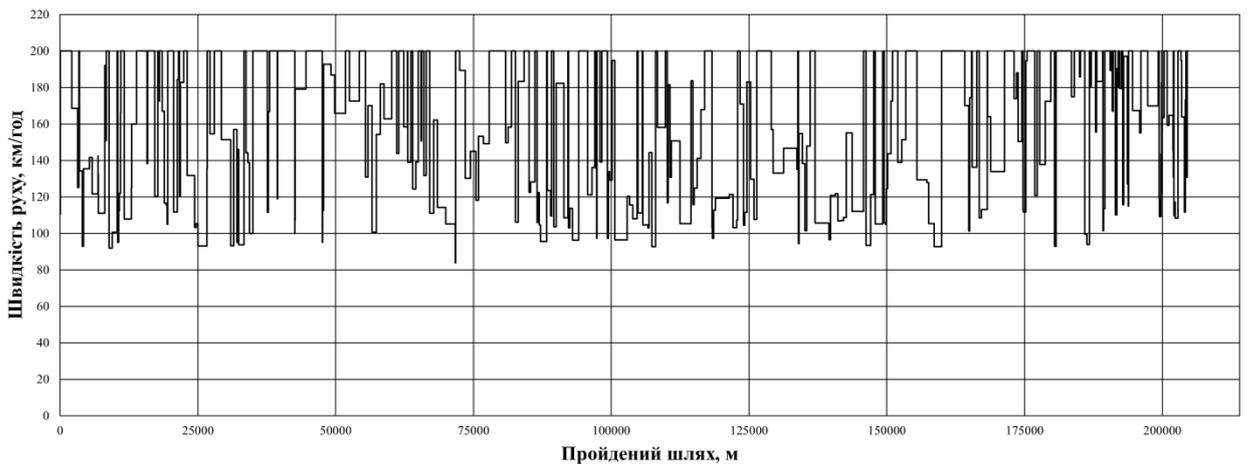


Рисунок 9 – Граничні обмеження швидкості по ділянках при нахилу кузова до 6° для R16

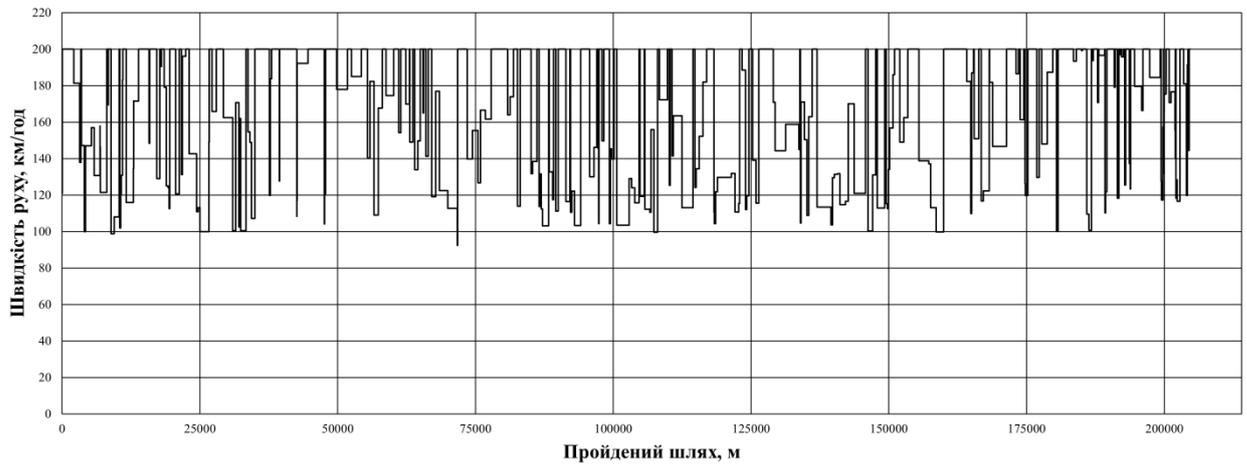


Рисунок 10 – Граничні обмеження швидкості по ділянках при нахилу кузова до  $8^\circ$  для R16

Нахил кузовів до  $8^\circ$  теоретично дає змогу скоротити час проходження маршрутів на 24 відсотка. У той же час, нахил кузовів на  $2^\circ$  за рахунок керування 2 ступенем ресорного підвішування дає можливість підвищення швидкості лише на 10 відсотків. На основі отриманих результатів побудовано графік залежності середньої швидкості руху від кута нахилу кузова (рис. 11).

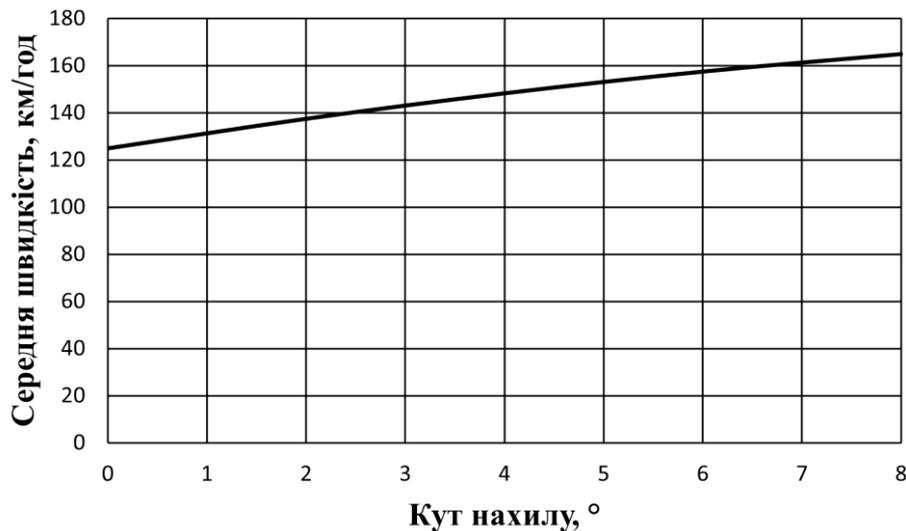


Рисунок 11 – Залежність середньої швидкості руху від кута нахилу кузовів

Він демонструє суттєве зростання середньої швидкості при збільшенні кута нахилу до  $8^\circ$  без перевищення допустимих норм перевантаження.

### Висновки

1. Аналіз отриманих даних дозволив оцінити вплив кута нахилу на час руху поїзда вказаними маршрутами та побудувати графік залежності середньої

швидкості руху від кута нахилу кузовів. Так, без урахування динаміки поїзда, час руху склав:

- для маршруту Ехб: без нахилу кузовів – 6 148 с., з нахилом кузовів до 2° – 5 587 с., з нахилом кузовів до 4° – 5 181 с., з нахилом кузовів до 6° – 4 878 с., з нахилом кузовів до 8° – 4 659 с.;
- для маршруту R16: без нахилу кузовів – 6 197 с., з нахилом кузовів до 2° – 5 595 с., з нахилом кузовів до 4° – 5 170 с., з нахилом кузовів до 6° – 4 854 с., з нахилом кузовів до 8° – 4 620 с.

2. Використання комбінованої системи нахилу кузова з пневматичним і електромеханічним приводом дозволяє:

- скоротити час руху на 20–25 %;
- зменшити споживання енергії на 10–15 % завдяки зниженню кількості гальмувань і розгонів;
- підвищити комфорт пасажирів.

Подальші дослідження передбачають моделювання автоведення потяга на реальних ділянках колії з урахуванням фаз гальмування і розгону. Це дозволить більш точно оцінити потенційний ефект системи та її енергетичну ефективність. Очікується, що застосування комбінованої системи нахилу кузова дасть можливість не лише зменшити час руху, а й знизити витрати енергії, зменшивши кількість циклів гальмування та прискорення.

3. Встановлено доцільність розробки комбінованої системи нахилу кузова для електрорухомого складу України з урахуванням досвіду Чехії. Використання системи дозволяє скоротити час руху по кривих на 20–25 % без погіршення комфорту. У перспективі розробка стане основою для створення українських швидкісних поїздів європейського рівня.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Корниенко В. В., Омеляненко В. И. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт. Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. 159 с.
2. Elektrické jednotky na našich kolejích: řada 680 [Електронний ресурс] // Vlaky.net, 2009. – URL: <https://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/003349-Elektricke-jednotky-na-nasich-kolejich-rada-680/>

3. Prague-West Bohemia rail upgrade: Faster, greener trains from 2028 [Electronic resource] // Prague Daily News, 2025. – URL: <https://www.praguedaily.news/2025/07/20/prague-west-bohemia-rail-upgrade-faster-greener-trains-from-2028/>
4. Relation: Railway Line 170 (9445213) [Електронний ресурс] // OpenStreetMap, 2026. – URL: <https://www.openstreetmap.org/relation/9445213>
5. Relation: Railway Line 220 (9445214) [Електронний ресурс] // OpenStreetMap, 2026. – URL: <https://www.openstreetmap.org/relation/9445214>
6. Якунин Д. И., Зверев Е. Ю., Срибник А. Н. Предпосылки для моделирования движения по рельсовому пути экипажа, оборудованного устройствами для наклона кузова. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Транспортне машинобудування, 2013. № 32 (1005). С. 76–80.

#### REFERENCES:

1. Korniienko V. V., Omelianenko V. I. Vysokoshvydkisnyi elektrychnyi transport. Svitovyi dosvid : monohrafiia. Kharkiv : NTU «KhPI», 2007. 159 s.
2. Elektrické jednotky na našich kolejích: řada 680 [Electronic resource] // Vlaky.net, 2009. – URL: <https://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/003349-Elektricke-jednotky-na-nasich-kolejich-rada-680/>
3. Prague-West Bohemia rail upgrade: Faster, greener trains from 2028 [Electronic resource] // Prague Daily News, 2025. – URL: <https://www.praguedaily.news/2025/07/20/prague-west-bohemia-rail-upgrade-faster-greener-trains-from-2028/>
4. Relation: Railway Line 170 (9445213) [Electronic resource] // OpenStreetMap, 2026. – URL: <https://www.openstreetmap.org/relation/9445213>
5. Relation: Railway Line 220 (9445214) [Electronic resource] // OpenStreetMap, 2026. – URL: <https://www.openstreetmap.org/relation/9445214>
6. Iakunin D. I., Zvieriev Ye. Yu., Sribnyk A. M. Peredumovy dlia modeliuvannia rukhu po reikovii kolii ekipazhu, obladnanoho prystroiamy dlia nakhyly kuzova. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriiia: *Transportne mashynobuduvannia*, 2013. № 32 (1005). S. 76–80.

*Стаття надійшла до редакції: 18.10.2025; рецензування: 22.10.2025;*

*прийнята до публікації 05.11.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису.*

*The article was submitted on 18.10.2025; revised on 22.10.2025; and accepted for publication on 05.11.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.*