

мах ТЭД и накопителя. Предполагается существенное повышение коэффициента рекуперации.

Выводы. Таким образом, в данной статье разработана математическая модель работы системы «тяговый привод – накопитель» в режиме торможения ЭПС. Эта модель позволяет определить закономерности протекания процессов обмена энергией, а также установить связь этих процессов с параметрами накопителя и тягового двигателя.

Эффективность использования накопителя на борту ЭПС оценивается с помощью коэффициента рекуперации, который в данном случае составил 0,46. Этот показатель может быть существенно повышены за счет применения в системе «тяговый привод – накопитель» полупроводникового повышающе-понижающего DC-DC преобразователя.

Список литературы: 1. *Омельяненко В.И., Рябов Е.С., Оверьянова Л.В.* Инерционный накопитель энергии – перспективная технология энергосбережения для электроподвижного состава // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2013. – № 1(65). – С. 38 – 54. 2. *Цукало П.В., Ерошкин Н.Г.* Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р. – М.: Транспорт. – 1986. – 359 с. 3. *Плаксин Ю.М.* Математические методы планирования эксперимента. – ДеЛи. – 2007. – 296 с. 4. *Li H., Peng F.Z.* A new ZVS bi-directional dc-dc converter for fuel cell and battery application // IEEE Trans. Power Electron. – 2004. – vol.19, no.1. – P. 54 – 65.

Bibliography (transliterated): 1. *Omelj'janenko, V. I., E. S. Rjabov and L. V. Over'janova.* "Inercionnyj napokitel' energii – perspektivnaja tehnologija energosberezhenija dlja elektropodvizhnogo sostava." *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovostozenia.* No. 1 (65). 2013. 38–54. Print. 2. *Cukalo, P. V., and N. G. Eroshkin.* *Elektropoezda ER2 i ER2R.* Moscow: Transport. 1986. Print. 3. *Plaksin, Ju. M.* *Matematicheskie metody planirovanija eksperimenta.* DeLi, 2007. Print. 4. *Li, H., and F. Z. Peng.* "A new ZVS bi-directional dc-dc converter for fuel cell and battery application." *IEEE Trans. Power Electron.* Vol. 19. No. 1. 2004. 54–65. Print.

Надійшла (received) 09.10.2014

УДК 629.429.3:621.313

С.Ю. ЧЕРВ'ЯКОВ, аспірант, НТУ «ХПІ»;

Б.Г. ЛЮБАРСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛІ ВАГОНА ЗІ ЗМІННИМ КУТОМ НАХИЛУ ПРИ ВИРШЕННІ ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОРУХОМИМ СКЛАДОМ

На поточний момент при розробці нових електрорухомих складів та при моделюванні їх руху виникає питання щодо збільшення середньої швидкості руху та доцільності використання вагонів зі змінним кутом нахилу. В роботі розглядається застосування нахилияемих вагонів для зменшення поперечного прискорення, що зазнає кузов вагона при проходженні кривої. Встановлено, що застосування подібних механізмів дозволяє значно підвищити допустиму швидкість прохо-

© С. Ю. Черв'яков, Б. Г. Любарський, 2014

дження кривої при зменшенні поперечного прискорення, що зазнає кузов. Проведено моделювання руху потягу на ділянці колії в кривих при застосуванні активних засобів нахилу. Рекомендовано застосовувати вагони з активною зміною кута нахилу з обмеженням від 4° .

Ключові слова: вагон зі змінним кутом нахилу, поперечне прискорення, проходження кривих, активний нахил кузова, пасивний нахил кузова.

Вступ. При проходженні горизонтальних кривих на колії потяг зазнає впливу бічних сил, що виражаються у поперечному прискоренні. Це негативно впливає як на комфорт поїздки для пасажирів, так і на безпеку. Задля дотримання вимог безпеки перевезення виникає необхідність зменшувати поперечне прискорення, що зазнає потяг. Це можна реалізувати або зменшуючи допустиму швидкість проходження кривої, або нахиляючи кузов всередину повороту. Останній підхід дозволяє суттєво збільшити швидкість проходження кривої та зменшити загальний час на подолання шляху з дотриманням всіх вимог безпечного перевезення. Нахил кузова досягається як шляхом нахилу колії так і шляхом зміни нахилу самого кузова. Під нахилом колії мається на увазі підняття рівня зовнішньої відносно центра кривої рейки над рівнем внутрішньої рейки.

Аналіз останніх досліджень. На теренах України широко застосовується нахил колії, а нахил кузова не отримав широкого розповсюдження. В той же час у світовій практиці дослідження нахилу кузова починається наприкінці 1930-х років [1, 2]. А перше серійне використання розпочалось в 1970-х [3]. В умовах підвищення вимог до швидкості та комфорту пасажирських перевезень постає питання, щодо модернізації колії та електрорухомих складів. Першим етапом модернізації має слугувати створення технічного завдання та моделювання руху. Тому робота, спрямована на моделювання руху потягів з системами нахилу кузова на реально існуючих та проєктованих коліях, є актуальною.

Мета роботи. Мета роботи полягає у тому, щоб проаналізувати сучасні підходи до нахилу кузова вагона ЕРС та особливості їх моделювання.

Математична модель. Основний принцип використання візка зі змінним кутом нахилу кузова вагона полягає у нахилі вагону до центра кривої при її проходженні. Рис. 1 відображає розподіл векторів сил у випадку використання вагону без механізму зміни кута нахилу та з його використанням.

Такий підхід при збільшенні прискорення в площині колії дозволяє зменшити поперечне прискорення, що зазнає вагон під час проходження кривої. Крім іншого, зменшення поперечного прискорення позитивно впливає на відчуття пасажирів.

При проходженні горизонтальної кривої, потяг зазнає горизонтальне прискорення, що є функцією швидкості v та радіусу кривої R (рівняння 1):

$$a_h = v^2 / R. \quad (1)$$

Поперечне прискорення в площині колії може бути зменшено в порівнянні з горизонтальним прискоренням шляхом підйому зовнішньої рейки D . Кут між горизонтальною площиною та площиною колії φ_i визначається як

функція підйому зовнішньої рейки та рейкової бази b_0 :

$$\varphi_t = \arcsin\left(\frac{D}{b_0}\right). \quad (2)$$

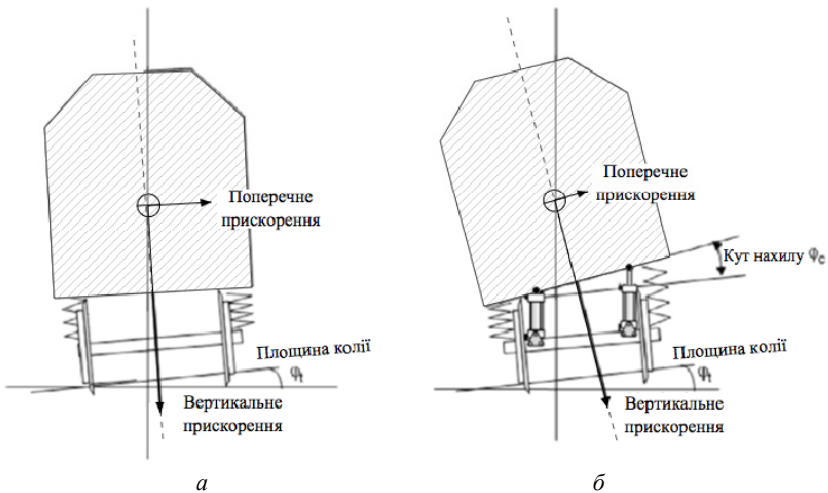


Рис. 1 – Базовий принцип візка з приводом нахилу:
 а – вагон без приводу нахилу; б – вагон з приводом нахилу.

Водночас, поперечне прискорення в вагоні, котре зазнають пасажирів або вантаж, може бути знижено ще більш значуще, якщо ввести кут нахилу кузова φ_c відносно колії. Вплив підйому зовнішньої рейки та нахилу кузова на прискорення кузова математично можна представити як трансформацію системи координат. Позначимо поперечне прискорення кузова як \ddot{y} , а вертикальне прискорення, яке перпендикулярне підлозі кузова, як \ddot{z} , тоді:

$$\ddot{y} = \frac{v^2}{R} \cdot \cos(\varphi_t + \varphi_c) - g \cdot \sin(\varphi_t + \varphi_c), \quad (3)$$

$$\ddot{z} = \frac{v^2}{R} \cdot \sin(\varphi_t + \varphi_c) - g \cdot \cos(\varphi_t + \varphi_c), \quad (4)$$

де g – прискорення вільного падіння, що для цієї задачі є сталою величиною.

Зменшення поперечного прискорення кузова шляхом підйому зовнішньої рейки та нахилу кузова супроводжується незначним збільшенням вертикального прискорення. Типові значення поперечного та вертикального прискорення для пасажирських потягів наведені в табл. 1. Таблиця побудована для значення поперечного прискорення 1 м/с^2 та кривизни повороту 1000 м для різних швидкостей. У випадку відсутності механізму нахилу кузова через прогини підвіски має місце незначний зворотній нахил. Згідно [3] прийемо його таким: $\varphi_{c0} = -1^\circ$. Для зручності сприйняття вертикальне прискорення

наведено не в абсолютних значеннях, а у вигляді відхилення від прискорення вільного падіння g .

Таблиця 1 – Типові значення прискорень при проходженні кривої

Швидкість v , км/г	Радіус кривої R , м	Кут нахилу колії φ_c , °	Кут нахилу кузова φ_t , °	Поперечне прискорення \ddot{y} , м/с ²	Відхилення вертикального прискорення від g ($\ddot{z} - g$), м/с ²
104	1000	0	-1	1,0	-0,02
153	1000	5,7	-1	1,0	0,11
200	1000	5,7	6,5	1,0	0,43

Останній рядок табл. 1 репрезентує типові значення для потяга з механізмом активного нахилу кузова.

Існує 2 головних підходи до зміни кута нахилу кузова вагона [4]:

- природній або пасивний нахил;
- активний нахил.

Вагони з пасивним нахилом являють собою аналог гойдалки з центром нахилу, розміщеному значно вище центру мас кузова. При проходженні кривої під впливом поперечного прискорення нижня частина кузова зміщується назовні і, таким чином, компенсує поперечне прискорення, яке зазнає вагон. Пасивний нахил ґрунтується на базових законах фізики і через це також називається *природнім нахилом*.

Активний нахил вагонів, в свою чергу, ґрунтується на технології керування, що використовує сенсори, керівну електроніку та реалізує нахил за допомогою гідравлічного або електричного привода.

Для вагонів з пасивним нахилом через наявність ненульового опору ухилу кузов все ще зазнає залишкового поперечного прискорення. Подібний розподіл сил відображений на рис. 2 а. Також через опір ухилу має місце інерційність системи, котра викликає деяку затримку нахилу. Через це в системі пасивного нахилу іноді додають управляючий привід для підтримки задовільних динамічних характеристик.

В системі з пасивним нахилом ефективний центр мас з урахуванням ефекту від додаткової підвіски має бути нижче центра нахилу задля збереження стабільності кузова. Для керування відносно незатухаючими коливаннями кузова додається вторинна амортизація, як на рис. 2 б. Коли додається додаткова гнучкість між механізмом нахилу та кузовом, така як вторинна підвіска, змальована на рис. 2 б, центр мас кузова зазнає поперечного зміщення. Це виникає через поперечне прискорення з урахуванням моменту опору τ_r .

$$\tau_r = dmg, \quad (5)$$

де d – зміщення центра мас; m – маса кузова.

Такий процес зменшує кут нахилу.

Підсумовуючи, можна виділити наступні переваги кузова з пасивним механізмом нахилу:

- простота та надійність системи;
- низька вартість виробництва та обслуговування;
- неможливість зворотного нахилу;
- система керування дуже проста або взагалі відсутня.

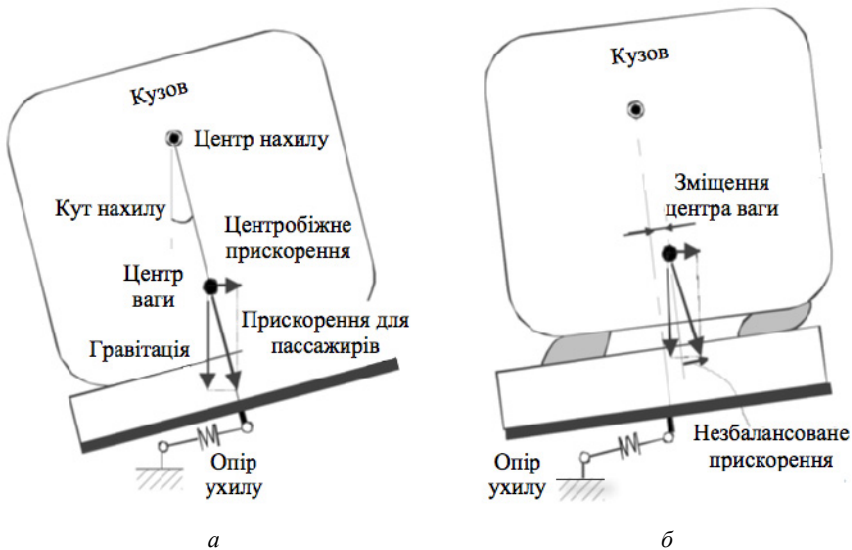


Рис. 2 – Механізми пасивного нахилу кузова:
 а – без вторинної підвіски; б – з вторинною підвіскою.

У той самий час такому механізму властиві наступні недоліки:

- високе розміщення центру обертання зумовлює поперечний рух центру мас, що збільшує ризик перевертання;
- момент інерції кузова затримує зміну кута нахилу, що викликає дисбаланс між прискоренням в площині колії та компенсацією нахилом. В перехідних кривих це викликає низькочастотні поперечні прискорення, котрі зменшують комфорт перевезень;
- поперечний рух нижньої частини кузова обмежує його можливу ширину.

На відміну від систем пасивного нахилу кузова, системи активного нахилу значно менше впливають на безпеку потяга, адже цент мас кузова не змінює свого поперечного положення. Звісно, дещо підвищений ризик перекидання все ще залишається через більші сили в кривих, але вони не підсилюються поперечним зміщенням центру мас. Тож для потягів з активним нахилом питання безпеки постає тільки при русі в умовах сильного бічного вітру.

В той час, як вагони з пасивним нахилом майже повністю компенсують поперечне прискорення, керівні системи вагонів з активним нахилом можуть бути налаштовані як для повної, так і для часткової компенсації. Досліджен-

ня демонструють, що оптимальною для комфорту є компенсація 50 – 70% поперечного прискорення [3].

Результати моделювання. Для розрахунку можливості підвищення швидкості руху та зменшення поперечного прискорення, що зазнають пасажери, було проведено моделювання руху потягу на ділянці колії Полтава-Красноград. При цьому було вирішено та оптимізовано *тягову задачу* [5, 6, 7, 8].

Моделювання проводилось для потягу без використання системи нахилу та з використанням активної системи з можливістю нахилу кузова до 6° . На рис. 3 зображено графік поперечного прискорення, що зазнає кузов при проходженні кривої, для ЕРС без використання нахилу та з нахилом до 4° . Від'ємне прискорення відображає зміну напрямку повороту.

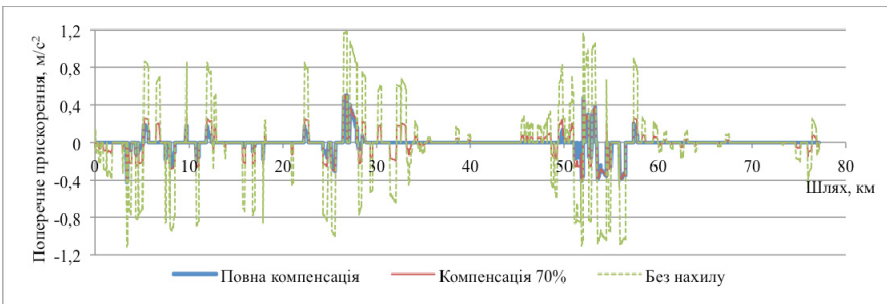


Рис. 3 – Поперечне прискорення, що зазнає кузов при використанні активної системи нахилу до 4° в порівнянні з прискоренням без нахилу.

Було проведено кілька експериментів з різними обмеженнями по куту нахилу та з повною або частковою (до 70%) компенсацією поперечного прискорення.

На рис. 4 наведений графік поперечного прискорення для дозволеного кута нахилу кузова до 6° . На рис. 5 – зміна кута нахилу під час руху. В табл. 2 наведені середні показники швидкості, часу руху та максимального поперечного прискорення для різних кутів нахилу кузова.



Рис. 4 – Поперечне прискорення, що зазнає кузов при використанні активної системи нахилу до 6° .

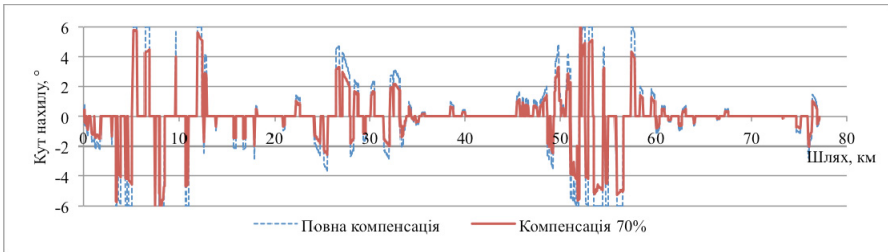


Рис. 5 – Нахил кузова при використанні активної системи нахилу до 6°.

Таблиця 2 – Вплив дозволеного кута нахилу на динамічні показники потягу на ділянці колії Полтава-Красноград

Кут нахилу кузова до, °	Середня швидкість руху, км/г	Тривалість руху, хв	Максимальне поперечне прискорення, м/с ²
0	76,52	61	1,187
1	84,34	55	1,016
2	95,94	48	0,844
3	103,82	45	0,672
4	113,16	41	0,5
5	119,32	39	0,504
6	123,28	38	0,507

Як можна бачити, без системи нахилу кузов зазнає поперечне прискорення до 1,2 м/с². В той же час, нахил до 4°, при збільшенні середньої швидкості, дозволяє зменшити поперечне прискорення до не більше як 0,5 м/с² при проходженні тієї самої ділянки. Подальше збільшення максимального кута нахилу дозволяє ще більше підвищити швидкість та вже незначно впливає на поперечне прискорення, котре зазнає кузов. Таким чином, можна зробити висновок, що для міжрегіональних перевезень загалом та зокрема для ділянки колії Полтава-Красноград, доцільно використання систем активного нахилу з обмеженням від 4°. Саме нахил 4°, забезпечує і найбільшу енергетичну ефективність [5].

На сьогоднішній день застосовуються вагони як з пасивним, так і активним нахилом. Здебільшого саме вагони з активним нахилом застосовуються в Європі, та розглядаються до застосування на теренах України. Водночас, в Японії успішно використовуються вагони з пасивним нахилом. Проте, враховуючи безпекові та інші фактори, котрі наведені вище, використання вагонів з активним механізмом зміни кута нахилу представляються більш доцільним.

Висновки. В роботі розглядається застосування вагонів зі змінним кутом нахилу для зменшення поперечного прискорення, що зазнає кузов вагона при проходженні кривої. Встановлено, що застосування подібних механізмів дозволяє значно підвищити допустиму швидкість проходження кривої при зменшенні поперечного прискорення, що зазнає кузов. Проведено моделювання руху потягу на ділянці колії в кривих при застосуванні активних засо-

бів нахилу. Рекомендовано застосовувати вагони з активною зміною кута нахилу з обмеженням від 4° .

Список літератури: 1. *Deischl W.* Linienverbesserungen oder gesteuerte Achsen. Verkehrstechnische Woche, Volume 31, No. 9, sp. 97 – 108, Berlin 1937. 2. *Van Dorn W., Beemer P.* Suspension for vehicles. US Patent 2.225.242, 1938. 3. *Persson R.* Tilting trains – Enhanced benefits and strategies for less motion sickness. Doctoral thesis. ISBN 978-91-7415-948-6, KTH Engineering Sciences, Stockholm 2011. – 50p. 4. *Persson R., Goodall R., Sasaki K.* Carbody Tilting – Technologies and Benefits. *Vehicle System Dynamics*, Volume 47, No. 8, sp. 949 – 981, London 2009. 5. *Любарський Б.Г.* Теоретичні основи для вибору і оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу: автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.22.09 / Любарський Б.Г.; Нац. техн. ун-т «ХПІ». – Харків, 2014. – 36 с. 6. *Черв'яков С.Ю., Любарський Б.Г., Єриця Б.Х. та ін.* Режим руху електрорухомого складу з електромеханічним перетворювачем змінного струму на ділянці шляху для якого задано профіль та графік руху. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2014. – № 22 (1065). – С. 56 – 60 7. *Червяков С.Ю., Любарский Б.Г., Омеляненко В.И.* Определение эффективности тягового привода электропоездов. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – № 32 – С. 67 – 75 8. *Любарский Б.Г.* Выбор типа тягового электромеханического преобразователя энергии для пригородного электропоезда. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 36 (1009) – С. 195 – 197.

Bibliography (transliterated): 1. Deischl, W. "Linienverbesserungen oder gesteuerte Achsen. Verkehrstechnische Woche." Vol. 31. No. 9. Berlin. 1937. 97–108. Print. 2. Van Dorn, W., and P. Beemer. Suspension for vehicles. Patent US № 2.225.242. 1938. 3. Persson, R. *Tilting trains – Enhanced benefits and strategies for less motion sickness. Doctoral thesis.* ISBN 978-91-7415-948-6. Stockholm: KTH Engineering Sciences, 2011. Print. 4. Persson, R., R. Goodall and K. Sasaki. "Carbody Tilting – Technologies and Benefits." *Vehicle System Dynamics*. Vol. 47. No. 8. London. 2009. 949–981. Print. 5. Lubars'kij, B. G. *Teoretychni osnovy dlja vyboru i ocinky perspektyvnyh system elektromehaničnogo peretvorennja energii elektroruhomogo skladu. Avtoref. dys. ... d-ra tehn. nauk.* Kharkiv. 2014. Print. 6. Cherv'jakov, S. Ju. et ai. "Rezhymy ruhu elektroruhomogo skladu z elektromehaničnym peretvorjuvachem zminnogo strumu na diljanci shljahu dlja jakogo zadano profil' ta grafik ruhy." *Visnyk NTU «KhPI»*. No. 22 (1065). Kharkiv. 2014. 56–60. Print. 7. Cherv'jakov, S. Ju., B. G. Lubarskij and V. I. Omel'janenko. "Opredelenie jeffektivnosti tjagovogo privoda jelektropoezdov." *Visnyk NTU «KhPI»*. No. 32. Kharkiv. 2013. 67–75. Print. 8. Lubarskij, B. G. "Vybor tipa tjagovogo jelektromehaničeskogo preobrazovatelja jenerгии dlja prigorodnogo jelektropoezda." *Visnyk NTU «KhPI»*. No. 36 (1009). Kharkiv. 2014. 195–197. Print.

Надійшла (received) 06.10.2014

УДК 532.5:621.65.0

Н.Г. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;
О.Л. ШУДРИК, аспірант, НТУ «ХПІ»

ПРОГРАМНИЙ МОДУЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОРІДИННОЇ СУМІШІ СВЕРДЛОВИНИ ПРИ МЕХАНІЗОВАНОМУ ВИДОБУТКУ НАФТИ

© Н. Г. Шевченко, О. Л. Шудрик, 2014