

Міністерство освіти і науки України
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
Фізико-математичний факультет
Кафедра комп'ютерних наук

Кваліфікаційна робота бакалавра
з теми: «Аналіз руху залізничного потяга на основі його комп'ютерної моделі»

Виконав: здобувач вищої освіти групи KN1-B21
спеціальності 122 Комп'ютерні науки

Іжицький Павло Володимирович

Керівник: Федорчук Володимир Анатолійович,
професор кафедри комп'ютерних наук, доктор
технічних наук, професор

Рецензент: Ковальська Ірина Борисівна,
доцент кафедри математики, кандидат фізико-
математичних наук, доцент

м. Кам'янець-Подільський – 2025 р.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	3
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ АНАЛІЗУ РУХУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ПОТЯГА	6
1.1 Аналіз сучасних підходів до моделювання руху потяга	6
1.2 Особливості механіки залізничного руху: основні параметри та характеристики	9
1.3 Постановка задачі дослідження	11
Висновки до розділу 1	13
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ РУХУ ПОТЯГА	14
2.1 Вибір математичної моделі руху потяга	14
2.1.1 Апроксимація моделі методом прямих	14
2.1.2 Побудова моделі з урахуванням нелінійних ефектів	16
2.1.3 Вибір програмного засобу для числової реалізації моделі	17
2.2 Реалізація комп'ютерної моделі у програмному середовищі	18
Висновки до розділу 2	20
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ.....	21
3.1 Загальна структура моделі.....	21
3.2 Проведення обчислювальних експериментів	23
3.2.1 Лінійна модель (без Dead Zone).....	23
3.2.2 Модель із зоною нечутливості (Dead Zone).....	26
3.3 Аналіз результатів моделювання	30
3.4 Оцінка точності та адекватності моделі.....	31
Висновки до розділу 3	34
ВИСНОВКИ.....	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена розробці та аналізу комп'ютерної моделі руху залізничного потяга в середовищі комп'ютерного моделювання. В роботі проаналізовано сучасні методи моделювання динаміки залізничного транспорту, розглянуто основні параметри та характеристики, що впливають на рух потяга.

Проведено аналіз математичних підходів до моделювання, на основі якого обрано метод представлення залізничного потяга як системи дискретних мас із пружними та демпфувальними зв'язками. Реалізована Simulink-модель дозволяє враховувати важливі нелінійні ефекти, зокрема наявність люфтів у зчепленнях між вагонами, що суттєво впливає на передачу сили та динаміку руху рухомого складу.

Проведено числові експерименти для двох основних випадків: лінійної моделі без люфтів і нелінійної моделі із зоною нечутливості. Виявлено, що наявність люфтів призводить до ступінчастого характеру передачі тягового зусилля та виникнення затримок передачі зусилля, що відповідає реальній поведінці довгих залізничних рухомих складів.

Оцінено точність та адекватність отриманих результатів, проведено порівняння числових значень швидкості з аналітичними розрахунками. Отримано високу точність, що підтверджує ефективність моделі для практичного застосування.

Розроблена модель є ефективним інструментом для прогнозування поведінки залізничного потяга та може використовуватися для задач оптимізації руху, підвищення ефективності й забезпечення безпеки залізничного транспорту. Робота містить 37 сторінок, включає 3 розділи, 14 рисунків, 1 таблицю та список з 24 джерел.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний транспортний сектор потребує впровадження новітніх технологій для забезпечення ефективності, безпеки та оптимізації перевезень. Залізничний транспорт відіграє ключову роль у перевезенні вантажів і пасажирів, але для досягнення максимальної ефективності необхідно розуміти та моделювати складні динамічні процеси, що відбуваються під час руху потяга [8; 24]. Комп'ютерне моделювання дозволяє вивчати поведінку залізничного рухомого складу за різних умов експлуатації, аналізувати взаємодію вагонів та прогнозувати вплив зовнішніх факторів [14; 20]. Проблема ефективного аналізу динаміки руху залізничного потяга є актуальною з огляду на необхідність підвищення енергоефективності, зменшення зносу елементів рухомого складу та покращення безпеки залізничного транспорту [8].

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес руху залізничного потяга. Предметом дослідження є методи та інструменти комп'ютерного моделювання динаміки руху залізничного потяга.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є створення комп'ютерної моделі руху залізничного потяга для аналізу його динаміки та оцінки впливу взаємодії вагонів на параметри руху. Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

1. Провести аналіз існуючих методів моделювання динаміки руху потяга.
2. Розробити математичну модель взаємодії елементів залізничного потяга.
3. Побудувати комп'ютерну модель на основі обраного програмного середовища.
4. Провести обчислювальні експерименти для дослідження впливу різних факторів на рух потяга.

5. Проаналізувати отримані результати та сформулювати рекомендації для подальшого використання моделі.

Методи дослідження. У роботі застосовуються аналітичні методи для розробки математичних моделей [7; 14], методи комп'ютерного моделювання для реалізації цифрових моделей [10], а також методи аналізу даних для оцінки результатів обчислювальних експериментів [12].

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена комп'ютерна модель дозволяє досліджувати динаміку руху залізничного потяга з урахуванням взаємодії між вагонами. Її використання сприятиме підвищенню точності прогнозування поведінки потяга, покращенню безпеки руху та оптимізації експлуатаційних параметрів залізничного транспорту.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел (23). У першому розділі подано огляд теоретичних підходів до моделювання динаміки залізничного транспорту. Другий розділ присвячений розробці математичної та комп'ютерної моделі руху потяга. У третьому розділі проведено аналіз отриманих результатів обчислювальних експериментів.

ВИСНОВКИ

У межах цієї кваліфікаційної роботи було виконано аналіз руху залізничного потяга на основі розробленої комп'ютерної моделі у середовищі MATLAB/Simulink. Проведене дослідження дозволило вирішити поставлені завдання, підтвердити адекватність розробленої моделі та отримати ряд важливих результатів.

Проаналізовано сучасні підходи до моделювання динаміки залізничного рухомого складу, вибрано відповідні математичні моделі, які найбільш точно відображають реальні фізичні процеси. Використано метод прямих для перетворення диференціальних рівнянь із частинними похідними в систему звичайних диференціальних рівнянь, що дало змогу реалізувати чисельні експерименти.

Розроблено і реалізовано Simulink-модель, яка враховує взаємодію між 20 вагонами, параметри демпфування, жорсткості зчеплень та нелінійності у вигляді зон нечутливості. Встановлено, що врахування люфтів у зчепленнях суттєво впливає на динаміку руху, створюючи ступінчастий характер передачі сили вздовж складу та збільшуючи затримку передачі сигналу. Проведено серію обчислювальних експериментів, які продемонстрували вплив різних факторів на динамічні характеристики потяга. Зокрема, виявлено, що збільшення тягової сили зменшує час затримки передачі сигналу завдяки швидшій вибірці люфту, хоча швидкість поширення пружних коливань залишається незмінною. Оцінка точності моделі показала, що чисельні результати добре узгоджуються з аналітичними розрахунками, що свідчить про високу точність та надійність моделі.

Таким чином, створена комп'ютерна модель є ефективним інструментом для аналізу й прогнозування поведінки залізничного потяга в різних умовах експлуатації та може бути рекомендована для практичного застосування в задачах оптимізації, підвищення ефективності та безпеки руху залізничного транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Верлань А. Ф., Федорчук В. А. *Моделі динаміки електромеханічних систем*. Київ: Наукова думка, 2013. 222 с.
2. Іжицький П.В. *Збірник матеріалів наукової конференції за підсумками науково-дослідної роботи здобувачів вищої освіти фізико-математичного факультету Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка у 2024-2025 н.р., 9-10 квітня 2025 року* [Електронний ресурс]. Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, фізико-математичний факультет, 2025. 109 с.
3. Колесніков В. П. *Динаміка руху поїздів*. Київ: Транспорт, 2003. 280 с.
4. Bae D. S., Haug E. J. A Recursive Formulation for Constrained Multibody Dynamics // *Mechanism and Machine Theory*. 1987. Vol. 22, No. 4. P. 313–330.
5. Esvelde C. *Modern Railway Track*. 2nd ed. Zaltbommel: MRT-Productions, 2001. 653 p.
6. Garg V. K., Dukkipati R. V. *Dynamics of Railway Vehicle Systems*. Boca Raton: CRC Press, 1984. 400 p.
7. Iwnicki S. (ed.). *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2020. 684 p.
8. Karnopp D. C., Margolis D. L., Rosenberg R. C. *System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems*. New York: Wiley, 2012. 656 p.
9. Knothe K., Stichel S. *Rail Vehicle Dynamics*. Berlin: Springer, 2017. 321 p.
10. MATLAB Simulink Documentation [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink> (дата звернення: 03.04.2025).
11. Pelz G. *Mechatronic Systems: Modeling and Simulation with HDL: Principles of Modeling and Simulation*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003. 223 p.
12. Persson R. *On Wheel–Rail Contact and Surface Wear Prediction: PhD Thesis*. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2002. 150 p.

13. Popp K., Schiehlen W. *System Dynamics and Railway Vehicle Dynamics*. Berlin: Springer, 2010. 406 p.
14. Popp K., Kruse H., Kaiser I. Vehicle–Track Interaction in the Presence of Structural and Contact Nonlinearities // *Vehicle System Dynamics*. 2002. Vol. 37, Suppl. 1. P. 360–370.
15. Railway Technical Research Institute. *Railway Dynamics*. Tokyo: RTRI, 2015. 178 p.
16. Ruge P., Birk C. *Dynamic Analysis of Railway Track and Subgrade*. Berlin: Springer, 2016. 300 p.
17. Scilab/Xcos Documentation [Электронный ресурс]. Scilab Enterprises. URL: https://help.scilab.org/docs/6.1.1/en_US/Xcos.html (дата звернения: 03.04.2025).
18. Shabana A. A. *Dynamics of Multibody Systems*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 500 p.
19. True H. On Railway Vehicle Dynamics – from Running Stability to Optimization // *Vehicle System Dynamics*. 2009. Vol. 47, No. 8. P. 1051–1074.
20. Universal Mechanism Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.universalmechanism.com> (дата звернения: 03.04.2025).
21. Uzzal M. A. Train Dynamics Simulation for Freight Transport // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. – 2020. – Vol. 14. – P. 100–110.
22. Wickens A. H. *Fundamentals of Rail Vehicle Dynamics: Guidance for the Design and Optimization of Railway Vehicles*. London: Taylor & Francis, 2003. 344 p.
23. Zobory I. Longitudinal Train Dynamics // *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2001. Vol. 29, No. 1. P. 3–18.
24. Zobory I. *Rail Vehicle Dynamics: Lecture Notes*. Budapest: Budapest University of Technology and Economics, 2013. 120 p.