

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-65-71>

УДК 625.031;625.033

## ВИБІР МОДЕЛІ ЗЧЕПЛЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ЛОКОМОТИВІВ

Ковтанець М.В., Цигановський І.О., Сергієнко О.В., Ноженко В.С., Ковтанець Т.М.

### CHOICE OF A COUPLING MODEL FOR SIMULATING THE DYNAMIC BEHAVIOR OF LOCOMOTIVES

Kovtanets M.V., Tsyganovskiy I.O., Sergienko O.V. Nozhenko V.S., Kovtanets T.M.

У статті проведено огляд основних моделей, що застосовуються у сучасних програмних комплексах моделювання динаміки рейкових екіпажів. Детально розглянуто, що обчислення дотичних сил у контакті «колесо-рейка» при моделюванні динаміки рейкових екіпажів може здійснюватися трьома способами: «швидкі» алгоритми, апроксимація аналітичних рішень, чисельних експериментів чи експериментальних даних, використання розрахованих наперед довідкових таблиць. Авторами було розроблено програму VDEUNU CONTACT, оскільки обчислення у даній програмі є досить трудомісткими, програма використовується для упорядкування довідкових таблиць. Проведено дослідження методів розв'язання тангенціальної задачі у сучасних програмних комплексах моделювання динаміки рейкових екіпажів та побудована інформаційна таблиця. Побудовані криві зчеплення, розраховані за допомогою різних методик для одних і тих самих умов контактування. Значення критичного ковзання, отриманого з допомогою програм FASTSIM, дорівнює приблизно 0.03%, тоді як експериментально отримане значення становить близько 2,5%. Після зриву в буксування коефіцієнт зчеплення у всіх теоріях, крім Мінова і VDEUNU CONTACT вважається константою, тоді як у реальних умовах спостерігається падіння коефіцієнта зчеплення. Проаналізовано можливість застосування різних моделей зчеплення для моделювання динаміки руху складу в режимах вибігу та тяги, порівняння моделей проводилося для нових профілів колеса та рейки при нульовому бічному віднесенні колісної пари. Отримані під час використання довідкових таблиць результати, сформовані за допомогою програми VDEUNU CONTACT, порівнювалися з результатами, отриманими під час використання алгоритму FASTSIM, свідчать про те, що незважаючи на незначні кількісні відмінності, можна говорити, що якісно отримані результати збігаються. Також у роботі розглядався рух локомотива в режимі тяги на прямій ділянці шляху довжиною 1200 м з різним фрикційним станом рейок (сухі і вологі). По результатам моделювання видно, що за відсутності обурень з боку траєкторії руху колісної пари при моделюванні за допомогою алгоритму FASTSIM практично збігаються за різних фрикційних умов, і спостерігається стійкий рух ло-

комотива. У той же час при моделюванні за допомогою програми VDEUNU CONTACT рух є нестійким і характер взаємодії колісної пари зі шляхом суттєво відрізняється при сухих та вологих рейках.

**Ключові слова:** залізничний транспорт, контакт «колесо-рейка», коефіцієнт зчеплення, ковзання, тяга, динаміка.

**Актуальність дослідження.** У переважній більшості робіт, присвячених дослідженню контакту «колесо-рейка» коефіцієнт тертя ковзання вважається константою і змінюється у широкому діапазоні. Таким чином, результати моделювання безпосередньо залежать від обраного дослідником значення. Проте згідно з сучасними дослідженнями в області трибології коефіцієнт тертя залежить від багатьох факторів фрикційної взаємодії. Найбільш значимими з них є вертикальне навантаження і температура в області контакту. На даний момент у трибології немає адекватної теоретичної моделі, що описує залежність коефіцієнта тертя від наведених вище факторів.

#### Теоретичний аналіз дослідження.

Важливим елементом комп'ютерного моделювання динамічних характеристик залізничних транспортних засобів є модель взаємодія у системі «колесо-рейка». Розроблено велику кількість моделей зчеплення, огляд яких можна знайти у роботі [1].

**Мета статті.** Стаття присвячена огляду основних моделей, що застосовуються у сучасних програмних комплексах моделювання динаміки рейкових екіпажів (PE).

#### Основна частина.

Насправді обчислення дотичних сил у контакті «колесо-рейка» при моделюванні динаміки рейкових екіпажів може здійснюватися трьома способами (рис.1).



Рис. 1. Способи обчислення тангенціальних сил у контактi «колесо-рейка»

*«Швидкі» алгоритми.* В цьому випадку тангенціальні сили у контактi «колесо - рейка» обчислюються на кожному етапі інтегрування для всіх контактiв. Це має сенс при використанні алгоритмiв, що мають високу обчислювальну швидкість. Такі алгоритми отримали назву «швидких» [2, 4, 5, 6, 7 та ін.].

Найбільшого поширення набув чисельний алгоритм та комп'ютерна програма FASTSIM, розроблені Калкером (J. J. Kalker) [2] на основі спрощеної теорії [3]. В даний час FASTSIM є фактичним стандартом моделі фрикційної взаємодії тіла, що котиться (колеса) з основою (рейкою). Враховуючи велику популярність, сама спрощена теорія та програма FASTSIM зазнавали численних модифікацій з метою: прискорення роботи [4]; уточнення закону тертя [5]; забезпечення можливості дослідження нееліптичного контакту [6].

О.Полах (O.Polach) розробив інше рішення задачі визначення сили зчеплення [7] та його програмну реалізацію ADH. На прикладі моделювання руху чотиривісного локомотива в програмному комплексі ADAMS/Rail, автор [7] провів порівняння результатiв, отриманих під час використання підпрограми ADH з результатами, отриманими з використанням алгоритму FASTSIM. Показано, що ADH значно перевищує FASTSIM за швидкодією, що не дивно, оскільки ADH реалізує аналітичне рішення, а FASTSIM – чисельне.

Моделі [2, 4, 5, 6, 7] дозволяють моделювати тільки висхідну гілку характеристики зчеплення, що обмежує сферу її застосування. Зокрема, не можна моделювати рух рухомого складу в режимі тяги чи гальмування.

*Апроксимація аналітичних рішень, чисельних експериментів чи експериментальних даних.* Деякими авторами [8, 10, 11, 12] були побудовані апроксимуючі вирази для розрахунку сили зчеплення. Значення сил зчеплення у даних розрахунках може залежати від кількох змінних, головними з яких є ковзання, лінійна швидкість руху та вертикальне навантаження.

У 1926 р. Картер розглянув плоску задачу кочення нескінченного циліндра по товстій пластині. В основі його теорії лежить припущення про те, що поздовжні та поперечні тангенційні сили пропорційні відносним швидкостям ковзання. В результаті Картер отримав вираз для коефіцієнта зчеплення в залежності від значення ковзання, пружних власти-

востей матеріалу, коефіцієнта тертя та максимального контактного тиску. Так званий метод Мюллера [8] є апроксимацією аналітичного рішення Картера.

На основі експериментальної залежності між ковзанням та силою зчеплення колісних пар, отриманої в експлуатаційних умовах [9], Міновим [10] побудовано її аналітичну апроксимацію. Характеристика зчеплення ділилася на три ділянки [8]: пружного пропорційного ковзання ( $0 \leq \varepsilon \leq 0.0014$ ), пружного ковзання  $0.0014 < \varepsilon < 0.025$  і ділянка буксування або юза ( $\varepsilon > 0.025$ ) (термінологія по [8]). Для кожної ділянки знайдено свою апроксимуючу залежність.

Для надання можливості моделювання тяги О.Полах у роботі [11] запропонував поєднати модель [7] з моделлю, яка описує залежність коефіцієнта тертя ковзання від швидкості ковзання. На думку О.Полаха, комбінація залежності коефіцієнта тертя ковзання від швидкості ковзання між колесом і рейкою і зменшення коефіцієнтів Калкера  $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{23}$ , що використовуються в моделі [7], дозволяє побудувати всю характеристику зчеплення як залежність коефіцієнта зчеплення від відносного ковзання, вираженого у відсотках. При цьому забезпечується задовільний збіг з експериментально отриманими залежностями.

У роботі [12] проведено чисельний експеримент, за результатами якого отримано вираз для сили зчеплення, яка залежить від фрикційного стану поверхонь, ковзання, вертикального навантаження, швидкості руху, поперечного зміщення колеса щодо рейки та кута набігання колісної пари.

Перевагами таких моделей є простота та швидкість обчислень. До недоліків можна віднести той факт, що вони не дають можливості отримати розподіл параметрів (нормальних та дотичних напруг, роботи сили тертя тощо) по плямі контакту. Тому область застосування моделей обмежена дослідженнями динамічної поведінки рухомого складу без можливості дослідження міцності, формозміни (зносу) коліс і рейок. Крім того, при даному підході розрахунок тангенціальних зусиль можливий тільки при одноточковому контактi колеса з рейкою, у разі двоточкового контакту слід припускати, що в зоні контакту на гребені відбувається чисте ковзання.

*Використання розрахованих наперед довідкових таблиць.* Враховуючи циклічний характер руху колісної пари, можна розрахувати із заданою дис-

кретністю тангенціальні сили в контактi «колесо – рейка» один раз перед початком моделювання та зберегти довідкові таблиці. Далі під час розрахунку динаміки дані вилучаються з таблиць та за необхідності проводиться їх інтерполяція. Таким чином, швидкість рішення залежатиме лише від розміру таблиць. Вхідними параметрами для складання довідкових таблиць, як правило, є положення колісної пари в колії, вертикальне навантаження на колесо, лінійна та кутова швидкість руху.

У роботі [13] Калкер запропонував використання при складанні довідкових таблиць програму CONTACT, засновану на точній теорії (exact theory) [14] вирішення тривимірної задачі кочення із ковзанням для еліптичного контакту та різних варіантів подання закону тертя. Табличні дані обробляються за допомогою програми USETAB, яка працює у 8 разів швидше за алгоритм FASTSIM і дає більш точні результати. Вона складається з власне довідкової таблиці з 115 000 записів, і підпрограм для зчитування та інтерполяції даних з таблиці.

Авторами [15] розроблено напівемпіричну модель контакту колеса з рейкою. Вона побудована без «традиційного» поділу контактної задачі на нормальну та тангенціальну. Це дозволяє врахувати взаємний вплив нормальних та тангенціальних напруг, що важливо у разі контакту поверхонь колеса та рейки, які мають узгоджену форму (наприклад, контакт у зоні реборди або контакт зношених профілів). Ще однією особливістю моделі зчеплення [15] є використання емпіричних залежностей коефіцієнта тертя при коченні з прослизанням від температури в контактi за різних фрикційних умов. Приклад таких залежностей можна знайти у роботі [16]. Цей підхід дозволяє моделювати контактну взаємодію при різних фрикційних станах колеса та рейки та великих значеннях їх відносного прослизання.

На основі моделі [15] авторами було розроблено програму VDEUNU CONTACT (скор. від Volodymir Dahl East Ukrainian National University Contact Model) [17, 18, 19]. Оскільки обчислення у програмі є досить трудомісткими, програма VDEUNU CONTACT використовується для упорядкування довідкових таблиць.

Вхідними параметрами програми VDEUNU CONTACT є:

- геометричні характеристики рейкової колії та колісної пари;
- їхня взаємна орієнтація;
- вертикальне та бічне навантаження на вісь;
- параметри руху колісної пари;
- фрикційний стан.

Програма VDEUNU CONTACT обчислює:

- кут бічної хитаючи;
- точки початкового дотику;
- форму плями контакту;
- радіуси кіл кочення;
- кути нахилу;

- розподіл за плямою контакту нормальних та тангенціальних напруг, температури та роботи сили тертя;
- проекції сили зчеплення.

В таблиці 1 наведено методи розв'язання тангенціальної задачі у сучасних програмних комплексах моделювання динаміки РЕ.

Таблиця 1

**Методи вирішення тангенціальної задачі у сучасних програмних комплексах моделювання динаміки РЕ**

Програма	Країна розробника	Метод вирішення тангенціальної задачі
ADAMS/RAIL	Великобританія	Програми FASTSIM, ADH
CONPOL	Італія	Програма FASTSIM
CONTACT PC92	Китай	Модифікація програми CONTACT
DYNARAIL	США	Програма USETAB
GENSYS	Швеція	Програма FASTSIM
LaGer	Словачія	Програма CONTACT
OCREC	Франція	Модифікація програми FASTSIM
NUCARS	США	Довідкові таблиці розраховані за допомогою програми DUVOROL
SIMPACK	Німеччина	Програми FASTSIM, ADH
TDS CONTACT	Італія	Програма FASTSIM
VAMPIRE	США	Нелінійний, що базується на заздалегідь розрахованих довідкових таблицях Калкера
VOCOLIN	Франція	Модифікація програми FASTSIM Калкера
Універсальний механізм	Росія	Модифікація програми FASTSIM Калкера, моделі Мюллера, Мінова

Проаналізуємо можливість застосування різних моделей зчеплення для моделювання динаміки рухомого складу в режимах вибігу та тяги.

Порівняння моделей проводилося для нових профілів колеса (ДМет1) та рейки (Р65) при нульовому бічному віднесенні колісної пари. Коефіцієнт тертя в моделях прийнятий рівним 0.38. Швидкість руху дорівнює 20 м/с, вертикальне навантаження на колесо – 50 кН.

На рис. 2 наведені криві зчеплення, розраховані за допомогою різних методик для одних і тих самих умов контактування.

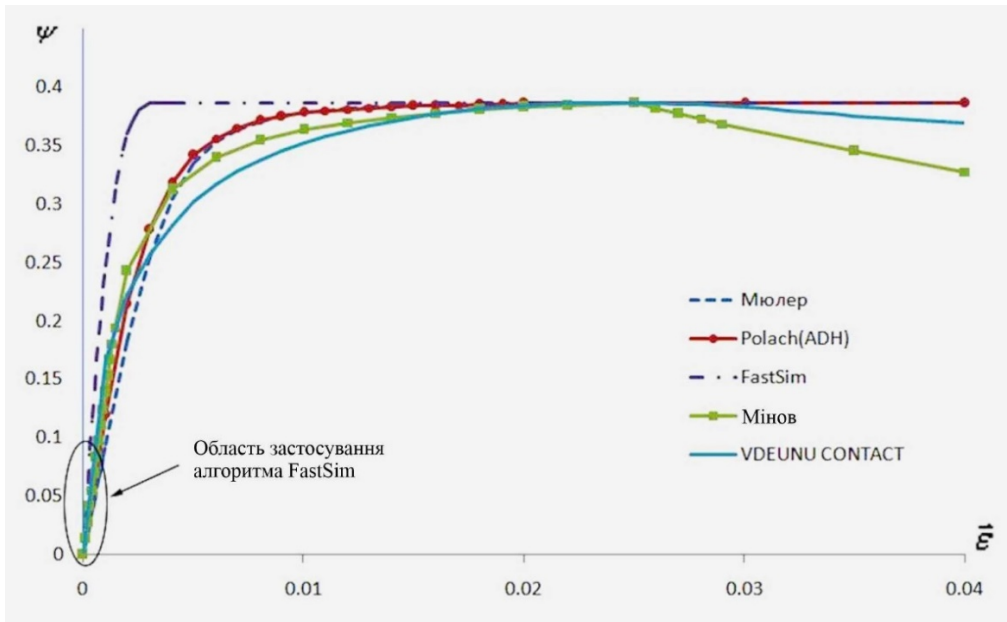


Рис. 2. Криві зчеплення для різних моделей контакту «колесо-рейка»

Значення критичного ковзання, отриманого з допомогою програм FASTSIM, дорівнює приблизно 0.03%, тоді як експериментально отримане значення становить близько 2.5 %. Після зриву в буксування коефіцієнт зчеплення у всіх теоріях, крім Мінова і VDEUNU CONTACT вважається константою, тоді як у реальних умовах спостерігається падіння коефіцієнта зчеплення. З іншого боку, у роботі [20] показано, що з погіршенням фрикційних умов значення критичного ковзання збільшується, тоді як в теоріях Калкера, навпаки, зменшується. Також на рис. 2 позначено область коректності застосування алгоритму FastSim, порівняно з кривими зчеплення, заснованими на експериментальних даних.

Для оцінки впливу вибору моделі зчеплення на динамічну поведінку вагонів у режимі вибігу програма VDEUNU CONTACT була інтегрована як підмодель зчеплення до програмного комплексу «Універсальний механізм 7.0». Дослідження проводилося для умов манчестерських тестів динаміки [21], визнаних «еталонними» для верифікації програмних пакетів, що моделюють динаміку РЕ. У тестах розглядаються рухи двох моделей транспортного засобу (ТЗ) - пасажирський вагон з двома візками (ТМ1) та двовісний вантажний вагон (ТЗ2) – за чотирма моделями колії. Більш детальний опис тесту можна знайти у роботі [21].

Результати, отримані під час використання довідкових таблиць, сформованих з допомогою програми VDEUNU CONTACT, порівнювалися з результатами, отриманими під час використання алгоритму FASTSIM. На рис. 3 лінією без маркера позначені результати, отримані за допомогою FASTSIM, а лінією з маркером – за допомогою VDEUNU CONTACT. Незважаючи на незначні кількісні відмінності, можна говорити, що якісно отримані результати збігаються.

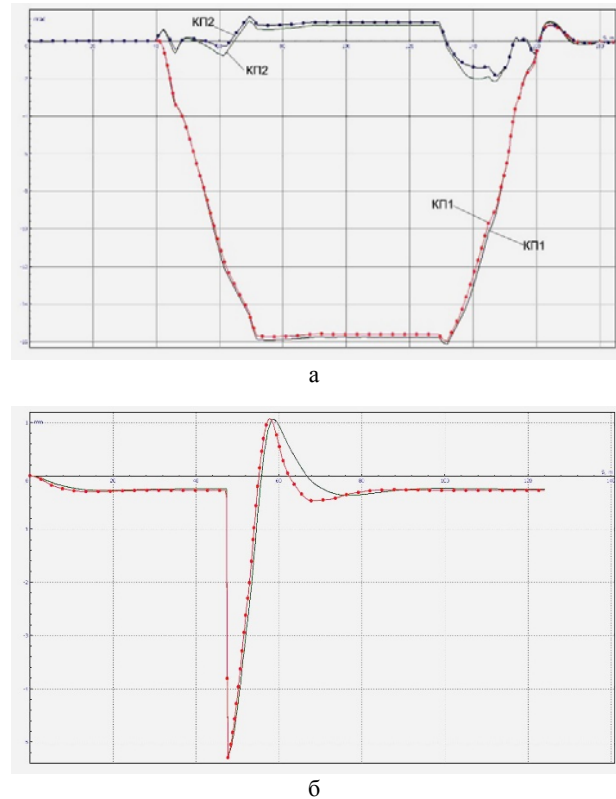


Рис. 3. Результати Манчестерського тесту динаміки:  
а – бічне віднесення першої та другої колісної пари (TC1, модель шляху 1);  
б – поперечний зсув кузова (TC2, модель шляху 2)

Для оцінки впливу вибору моделі зчеплення на динамічну поведінку локомотива в режимі тяги програма VDEUNU CONTACT та алгоритм FASTSIM були інтегровані як підмодель зчеплення у модель руху шестивісного локомотива TE – 116 [22], розроблену на кафедрі залізничного транспорту ЧНУ ім. В. Даля.

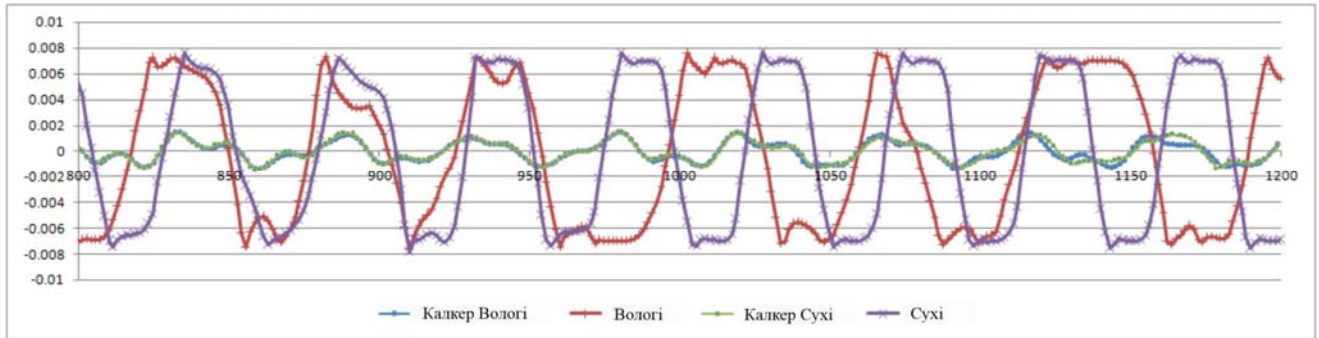


Рис. 4. Траєкторія руху першої колісної пари для різних фрикційних умов

Розглядався рух локомотива в режимі тяги на прямій ділянці шляху довжиною 1200 м з різним фрикційним станом рейок (сухі і вологі). Швидкість руху дорівнює 30 м/с, зазор у колії становить  $\pm 7$  мм, рейка вважається гладкою (вертикальні та горизонтальні нерівності відсутні).

Результати моделювання наведено на рис. 4. Як видно з рисунка, за відсутності обурень з боку траєкторії руху колісної пари при моделюванні за допомогою алгоритму FASTSIM практично збігаються за різних фрикційних умов, і спостерігається стійкий рух локомотива. У той же час при моделюванні за допомогою програми VDEUNU CONTACT рух є нестійким і характер взаємодії колісної пари зі шляхом суттєво відрізняється при сухих та вологих рейках.

### Висновки.

Аналіз отриманих результатів показав, що:

1. При моделюванні динаміки вагонів, а також локомотивів у режимі вибігу вибір моделі зчеплення практично не впливає на динамічну поведінку транспортного засобу.

2. Використання поширеного алгоритму FASTSIM під час моделювання руху локомотива в режимі тяги (гальмування) є некоректним.

3. В алгоритмі FASTSIM з погіршенням фрикційних умов значення критичного ковзання зменшується, тоді як згідно з експериментальними даними воно має збільшуватися.

### Література

1. Костюкевич А.И. Обзор моделей фрикционного взаимодействия колес с рельсами [электронный ресурс] / А.И. Костюкевич, И.А. Цыгановский // Наукові вісті Даліського університету: зб. наук. праць. – Луганськ, 2012. – № 8. – Режим доступу до журн. [http://archive.nbu.gov.ua/e-journals/Nvdu/2012\\_8/z12kaiksr.htm](http://archive.nbu.gov.ua/e-journals/Nvdu/2012_8/z12kaiksr.htm)
2. Kalker J.J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact (FASTSIM program) / J.J. Kalker // Vehicle Systems Dynamics, 1982. – Vol. 11. – P. 1-13.
3. Kalker J.J. Simplified Theory of Rolling Contact / Kalker J.J. // Delft Progress Report. University of Technology. The Netherlands. – Vol. 1. 1973. – P. 1-10.
4. Погорелов Д.Ю. Модификация алгоритма FastSim решения задачи контакта колеса и рельса / Д.Ю. Погорелов, В.Н. Языков // Брянск, Вестник БГТУ, №2 (2). 2004. – С. 103-109.
5. Piotrowski J. Kalker's algorithm FastSim solves tangential contact problems with slip-dependent friction and friction anisotropy / J. Piotrowski // Vehicle System Dynamics, 48:7. 2010. – P. 869-889.
6. Piotrowski J. A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations / J. Piotrowski, W. Kik // Vehicle System Dynamics, 46: 1-2, 2008. – P. 27-48.
7. Polach O. A fast wheel-rail forces calculation computer code / O. Polach // Vehicle Syst. Dyn. Suppl. 33. 1999. – P. 728-739.
8. Моделирование динамики ж/д экипажей. Руководство пользователя ПО Универсальный механизм [электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: [http://www.universalmechanism.com/download/70/rus/08\\_um\\_loco.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/70/rus/08_um_loco.pdf)
9. Меншутин Н.Н. Исследование скольжения колесной пары электровоза при реализации силы тяги в эксплуатационных условиях / Н.Н. Меншутин // Тр. ВНИИЖТ, 1960, вып. 188. – С. 113-132.
10. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей / Д.К. Минов // М.: Транспорт, 1965. – 268 с.
11. Polach O. Influence of locomotive tractive effort on the forces between wheel and rail / O. Polach // Vehicle System Dynamics Supplement, 35. 2001. – P. 7-22.
12. Кашура А.Л. Оценка тягово-сцепных качеств локомотивов на стадии проектирования и модернизации с учетом динамических особенностей их движения по рельсовому пути: дисс. ... канд. техн. наук :05.22.07 / Кашура А.Л. – Луганск, 1995. – 207 с
13. Kalker J.J. Three Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact / J.J. Kalker //Dordrecht. London.: Kluwer Academic Publishers, 1990. – 314 p.
14. Kalker J.J. The Principle of Virtual Work and Its Dual for Contact Problems / J.J. Kalker //Ingenieur-Archiv 56, 1986. – P. 453-467.
15. Голубенко А.Л. Модель фрикционного контакта «колесо-рельс» / А.Л. Голубенко, А.И. Костюкевич, И.А. Цыгановский // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2012. – № 5 (176). – С. 7-12.
16. Костюкевич А.И. Экспериментальное исследование характеристик сцепления в контакте «колесо-рельс» при наличии промежуточной среды / А.И. Костюкевич, И.А. Таран, М.В. Ковтанец, В.С. Ноженко // «Автомобіле та тракторобудування». Вісник НТУ «ХП», 56, 2011. – С. 56-62.
17. Свідчення про реєстрацію авторського права на твір № 49477 від 03.06.2013 (заявка № 49798 від 01.04.2013) «Комп'ютерна програма VDEUNU CONTACT» / Го-

- лубенко О.Л., Горбунов М.І., Костюкевич О.І., Цигановський І.О., Ноженко О.С., Просвірова О.В.
18. Горбунов Н.И. Энергетическое воздействие двухфазного потока на зону контакта движущего колеса с рельсом – метод управления сцепными характеристиками локомотива: Монография. / Н.И. Горбунов, М.В. Ковтанец, Т.Н. Ковтанец – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2019. – 181 с.
  19. Горбунов М.І. Обґрунтування концепції вдосконалення об'єктів залізничної техніки на підставі теорії прийняття рішень: Монографія. / М.І. Горбунов, М.В. Ковтанець, О.В. Сергієнко, Т.М. Ковтанець – Одеса: КУПРИЄНКО СВ, 2020. – 98 с.
  20. Костюкевич А.И. Численная и экспериментальная идентификация процесса сцепления колес локомотива с рельсами: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Костюкевич А.И. – Луганск, 1991. – 230 с.
  21. Iwnicki S. Manchester Benchmarks for Rail Vehicle Simulation / S. Iwnicki // Vehicle System Dynamics, 30:3-4, 1998. – P. 295-313.
  22. Горбунов Н.И. Прогнозирование тяговых и динамических качеств локомотивов методом имитационного моделирования [Текст]: монография / Н.И. Горбунов, А.Л. Голубенко, А.И. Костюкевич, А.Л. Кашура; Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля. – Луганск, 2002. – 103 с.

### References

1. Kostyukevich A.I. Obzor modelej frikcionnogo vzaimodejstviya koles s relsami [elektronnyj resurs] / A.I. Kostyukevich, I.A. Cyganovskij // Naukovi visti Dalivskogo universitetu: zb. nauk. prac. – Lugansk, 2012. – № 8. – Rezhim dostupu do zhurn. [http://archive.nbuv.gov.ua/e-journals/Nvdu/2012\\_8/z12kaiksr.htm](http://archive.nbuv.gov.ua/e-journals/Nvdu/2012_8/z12kaiksr.htm)
2. Kalker J.J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact (FASTSIM program) / J.J. Kalker // Vehicle Systems Dynamics, 1982. – Vol. 11. – P. 1-13.
3. Kalker J.J. Simplified Theory of Rolling Contact / Kalker J.J. // Delft Progress Report. University of Technology. The Netherlands. – Vol. 1. 1973. – P. 1-10.
4. Pogorelov D.Yu. Modifikaciya algoritma FastSim resheniya zadachi kontakta kolesa i relsa / D.Yu. Pogorelov, V.N. Yazykov // Bryansk, Vestnik BGTU, №2 (2). 2004. – S. 103-109.
5. Piotrowski J. Kalker's algorithm Fastsim solves tangential contact problems with slip-dependent friction and friction anisotropy / J. Piotrowski // Vehicle System Dynamics, 48:7. 2010. – P. 869-889.
6. Piotrowski J. A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations / J. Piotrowski, W. Kik // Vehicle System Dynamics, 46: 1-2, 2008. – P. 27-48.
7. Polach O. A fast wheel–rail forces calculation computer code / O. Polach // Vehicle Syst. Dyn. Suppl. 33. 1999. – P. 728-739.
8. Modelirovanie dinamiki zh/d ekipazhej. Rukovodstvo polzovatelya PO Universalnyj mehanizm [elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: URL: [http://www.universalmechanism.com/download/70/rus/08\\_um\\_loco.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/70/rus/08_um_loco.pdf)
9. Menshutina N.N. Issledovanie skolzheniya kolesnoj pary elektrovoza pri realizacii sily tyagi v ekspluatacionnyh usloviyah / N.N. Menshutina // Tr. VNIIZhT, 1960, vyp. 188. – S. 113-132.
10. Minov D.K. Povyshenie tyagovyh svojstv elektrovozov i teplovozov s elektricheskoj peredachej / D.K. Minov // M.: Transport, 1965. – 268 s.
11. Polach O. Influence of locomotive tractive effort on the forces between wheel and rail / O. Polach // Vehicle System Dynamics Supplement, 35. 2001. – P. 7-22.
12. Kashura A.L. Ocenka tyagovo-scepnnyh kachestv lokomotivov na stadii proektirovaniya i modernizacii s uchetom dinamicheskikh osobennostej ih dvizheniya po re-lsovomomu puti: diss. ... kand. tehn. nauk :05.22.07 / Ka-shura A.L. – Lugansk, 1995. – 207 s
13. Kalker J.J. Three Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact / J.J. Kalker //Dordrecht. London.: Kluwer Academic Publishers, 1990. – 314 p.
14. Kalker J.J. The Principle of Virtual Work and Its Dual for Contact Problems / J.J. Kalker //Ingenieur-Archiv 56, 1986. – R. 453-467.
15. Golubenko A.L. Model frikcionnogo kontakta «kole-sorels» / A.L. Golubenko, A.I. Kostyukevich, I.A. Cyganovskij // Visnik Shidnoukrayinskogo nacionalnogo universitetu im. V. Dalya. – 2012. – № 5 (176). – S. 7-12.
16. Kostyukevich A.I. Eksperimentalnoe issledovanie harakteristik scepneniya v kontakte «koleso-rels» pri nalichii promezhutochnoj sredy / A.I. Kostyukevich, I.A. Taran, M.V. Kovtanec, V.S. Nozhenko // «Avtomobile ta traktorobudovannya». Visnik NTU «HPI», 56, 2011. – S. 56-62.
17. Svidoctvo pro reyestraciju avtorskogo prava na tvir № 49477 vid 03.06.2013 (zayavka № 49798 vid 01.04.2013) «Komp'yuterna programa VDEUNU CONTACT» / Golubenko O.L., Gorbunov M.I., Kostyukevich O.I., Ciganovskij I.O., Nozhenko O.S., Prosvirova O.V.
18. Gorbunov N.I. Energeticheskoe vozdejstvie dvuhfaznogo potoka na zonu kontakta dvizhushego kolesa s relsom – metod upravleniya scepnyimi harakteristikami lokomotiva: Monografiya. / N.I. Gorbunov, M.V. Kov-tanec, T.N. Kovtanec – Odessa: KUPRIENKO SV, 2019. – 181 s.
19. Gorbunov M.I. Obgruntuvannya koncepciji vdoskonalennya ob'ektiv zaliznichnoyi tehniki na pidstavi teorii priinyattya rishen: Monografiya. / M.I. Gorbunov, M.V. Kovtanec, O.V. Sergiyenko, T.M. Kovtanec – Odessa: KUPRIYENKO SV, 2020. – 98 s.
20. Kostyukevich A.I. Chislennaya i eksperimentalnaya identifikaciya processa scepneniya koles lokomotiva s relsami: diss. ... kand. tehn. nauk: 05.22.07 / Kostyukevich A.I. – Lugansk, 1991. – 230 s.
21. Iwnicki S. Manchester Benchmarks for Rail Vehicle Simulation / S. Iwnicki // Vehicle System Dynamics, 30:3-4, 1998. – P. 295-313.
22. Gorbunov N.I. Prognozirovanie tyagovyh i dinamicheskikh kachestv lokomotivov metodom imitacionnogo modelirovaniya [Tekst]: monografiya / N.I. Gorbunov, A.L. Golubenko, A.I. Kostyukevich, A.L. Kashura; Vostochnoukr. nac. un-t im. V. Dalya. – Lugansk, 2002. – 103 s.

### **Kovtanets M. V., Tsyganovskiy I.O., Sergienko O.V. Nozhenko V.S., Kovtanets T.M. Choice of a coupling model for simulating the dynamic behavior of locomotives**

*The article reviews the main models used in modern software complexes for modeling the dynamics of railcars. It is considered in detail that the calculation of tangential forces in the "wheel-rail" contact when simulating the dynamics of rail crews can be carried out in three ways: "fast" algorithms, approximation of analytical solutions, numerical experiments or experimental data, use of pre-calculated reference tables. The VDEUNU CONTACT program was developed by the*

authors, since the calculations in this program are quite time-consuming, the program is used to organize reference tables. Methods of solving the tangential problem in modern software complexes for modeling the dynamics of rail crews were studied and an information table was constructed. Coupling curves calculated using different techniques for the same contact conditions are constructed. The value of critical slip obtained with the help of FASTSIM programs is approximately 0.03%, while the experimentally obtained value is about 2.5%. After stalling in skidding, the coefficient of adhesion in all theories, except Minov and VDEUNU CONTACT, is considered constant, while in real conditions, a drop in the coefficient of adhesion is observed. The possibility of using different clutch models to simulate the dynamics of the rolling stock in coasting and traction modes was analyzed, the comparison of models was carried out for new wheel and rail profiles with zero lateral displacement of the wheel pair. The results obtained when using the reference tables, generated using the VDEUNU CONTACT program, were compared with the results obtained when using the FASTSIM algorithm, indicating that, despite minor quantitative differences, it can be said that the qualitatively obtained results coincide.

The work also considered the movement of the locomotive in the traction mode on a straight section of the track 1200 m long with different frictional conditions of the rails (dry and wet). According to the simulation results, it can be seen that in the absence of disturbances from the side of the trajectory of the wheel pair, when simulating with the help of the FASTSIM algorithm, they practically coincide under different friction conditions, and a steady movement of the locomotive is observed. At the same time, when modeling

using the VDEUNU CONTACT program, the movement is unstable and the nature of the interaction of the wheel pair with the road is significantly different for dry and wet rails.

**Keywords:** railway transport, «wheel-rail» contact, coupling coefficient, sliding, traction, dynamics.

**Ковтанець Максим Володимирович** – доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля; [kovtanetsm@gmail.com](mailto:kovtanetsm@gmail.com)

**Цигановський Ілля Олександрович** – молодший науковий співробітник кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля; [vaduha2011@gmail.com](mailto:vaduha2011@gmail.com)

**Сергієнко Оксана Вікторівна** – доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля; [sergienko.o.v@gmail.com](mailto:sergienko.o.v@gmail.com)

**Ноженко Володимир Сергійович** – проректор з навчальної роботи Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського; [vladymyrnozhenko@gmail.com](mailto:vladymyrnozhenko@gmail.com)

**Ковтанець Тетяна Миколаївна** – молодший науковий співробітник кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля; [kovtanect@gmail.com](mailto:kovtanect@gmail.com)

Стаття подана 20.10.2022 .