

УДК 625.03

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.121584

Багатофакторний аналіз проходження вагоном рейкового транспорту стикової нерівності с урахуванням фаз руху

В. П. Шпачук, О. О. Чупринін, Т. О. Супрун, А. О. Гарбуз

Проведено дослідження особливостей взаємодії чотиривісного вагона та рейкової колії з урахуванням чотирьох фаз руху через стикову нерівність шляху і жорсткості баластового шару. Побудовано механічні моделі транспортного комплексу «вагон – рейкова колія» для кожної фази руху. Чисельним аналізом методом початкових параметрів для кожної фази руху визначено прогини віддаючої та приймаючої рейок шляху на кінці, а також встановлено висоту стику, що виникає між рейками, в залежності від фаз руху й завантаження вагона

Ключові слова: рухомий склад, чотиривісний вагон, рейкова колія, баластовий шар, стикова нерівність, віддаюча та приймаюча рейки шляху

1. Вступ

У даний час в умовах швидкого розвитку транспортних технологій, все гостріше постає питання економічної доцільності і надійності різних транспортних засобів.

Довговічність експлуатації рухомого складу і верхньої будови рейкового шляху залежить від особливостей взаємодії елементів, на яку впливають механічні, конструктивні і геометричні характеристики. Функції роботи рейкової колії під рухомим складом залежать від типу і виду кріплення рейок, характеристик жорсткості складових верхньої будови колії, умов обслуговування і експлуатації. Зниження параметрів взаємовпливу вагона і колії, особливо в зоні стиків, забезпечує перехід до довговічного, високонадійного й швидкісного рейкового транспорту. На практиці це сприяє також упровадженню ресурсозберігаючих технологій.

Аналіз досліджень, присвячених питанням механічної взаємодії чотиривісного вагона та рейкової колії, показує [1], що найбільш слабкою ланкою розглянутої системи є ізольовані зони стиків колії. Окрім того, підкреслюється доцільність врахування фаз руху вагона через стикову нерівність, а також характеристик жорсткості баластового шару шляху [2].

Також актуалізовано питання спільної роботи рухомого складу та рейкового шляху, що визначає особливості їх статичної і динамічної взаємодії [3] під час проходження стиків вагоном.

Найбільш інформативним показником механічної взаємодії в системі «колесо вагона – рейка» є осадка баластового шару під шпалами шляху в стикових зонах рейок [4]. В таких місцях рейка, як правило, випробує найбільші ударні навантаження. Це призводить до уgonу і просядок рейок, появі сліпих і розтягнутих стиків.

На практиці навантаження агрегатів, вузлів і деталей вагона і верхньої будови колії визначають параметри довговічності в експлуатації [5], міцності і жорсткості [6], а у підсумку – й узагальнений технічний ресурс та термін служби. Від терміну служби взаємодіючих рухомого складу і рейок залежить також періодичність заміни, тобто фінансові витрати на придбання.

Слід зазначити, що в процесі експлуатації рейкового шляху виникає нестаціонарність геометричних параметрів нерівностей рейкової колії. Обумовлено вказане кліматичними факторами, а також механічними ударними навантаженнями, що виникають в зоні стику і повторюються у часі.

Це також призводить до істотного впливу геометричних та механічних параметрів на процеси взаємодії вагона і рейкової колії в місцях стиків, опис яких викликає необхідність застосування багатфакторної моделі.

Тому дослідження, присвячені удосконаленню існуючих моделей взаємодії вагона і верхньої будови колії, є сучасними і актуальними.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Досвід експлуатації рейкового транспорту показує [1], що у механічному комплексі «вагон – рейкова колія» показники надійності й довговічності суттєво залежать від особливостей процесів взаємодії колії і рухомого складу та умов експлуатації розглянутої системи. Крім того, ця взаємодія впливає на здатність системи протистояти руйнуючій дії виникаючих ударних і вібраційних навантажень [7], які мають циклічно повторюваний характер [8].

Найбільший рівень осадження баластового шару виникає під першою шпалою приймаючої рейки [4]. Це пов'язано з тим, що у цих місцях рейка, зазвичай, зазнає найбільшу силову взаємодію між рухомим складом і верхньою будовою колії.

Для аналізу взаємодії рухомого складу і верхньої будови колії виявляється необхідність вирішення кількох, пов'язаних між собою задач. Зокрема статичної, динамічної і контактної. Останнім часом цим питанням приділяється велика увага і з'являється достатня кількість нових досліджень у цій області.

Зокрема, в [6] представлена схема реалізації виброударної системи з плоскою пружиною і локально зосередженою масою. Розглянуто способи здійснення несиметричною кусково-лінійною пружною характеристикою у вигляді двох проміжних циліндричних опор. Враховується параметрична залежність контактної жорсткості між циліндричною опорою і плоскої пружини. Однак стосовно до стандартних рейок на 22 проміжних опорах ці дослідження потребують суттєвого доопрацювання. Тут також розглядалися контактні напруження, які враховують асиметрію зміни пружної характеристики. Контактна жорсткість враховується через зміну власної частоти коливань пружини. Чисельно розв'язана динамічна задача та отримані співвідношення кінематичних характеристик і параметрів напруженого стану, зокрема контактні напруження, які нелінійно залежать від переміщень. Спільний вплив асиметричних і контактних напружень враховується введенням еквівалентного силового коефіцієнта.

Але відома механічна модель контактної взаємодії не може бути використана для дослідження напруженого стану в системі «колесо-рейка», враховуючі

його залежність від фаз руху вагона через стикову нерівність. Це дає підставу для розвитку подальших досліджень в області моделювання контакту рухомого складу і колії як взаємодії дискретної та континуальної систем.

В даний час значні фінансові ресурси вкладаються в транспортну інфраструктуру багатьох країн світу. Особливо це стосується екологічно чистого електричного транспорту. Підвищення якості та потенціалу існуючих сервісів та розробка нової інфраструктури необхідні для задоволення зростаючого попиту на якісну і надійну логістику товарів та людей. Тут ефективність та надійність конструкції шляху має вирішальне значення для успішної експлуатації. Багато сучасних досліджень рейкового шляху фокусується на окремих аспектах проектування і експлуатації, наприклад, втоми [1], руйнування баласту [3], комфорту їзди [2], шуму або вібрації [6]. Для забезпечення комплексного підходу повинен бути розроблений узагальнений інструмент, або декілька обчислювальних інструментів, які інтегровано розглядають окремі аспекти конструкції. Такий засіб може бути використано для оцінки поведінки залізничних шляхів комплексно [9]. Традиційно при проектуванні рейкового шляху використовуються консервативні передумови, і, таким чином, проекти вносяться лише невеликі зміни. У той же час, деякі методи розрахунку і аналізу були розроблені, щоб описати модель і прогнозувати поведінку структури. Зокрема, аналіз моделі виконується методом скінчених елементів з використанням комерційних програмних комплексів [10], що вимагає істотних фінансових витрат при проектуванні.

Метод скінчених елементів використовується також для моделі баластного шару [11], який є важливим елементом конструкції шляху. Рейка передає навантаження від колеса на ґрунт, на якому споруджений шлях [12].

Отже, в деяких країнах в даний час використовуються залізобетонні дорожні шляхи [13], але вартість їх будівництва виявляється суттєво вищою в порівнянні зі стандартною баластовою конструкцією шляху.

Іншим шляхом є збільшення товщини баластового шару, що призводить до зменшення прогину під навантаженням і викликає менші напруження в ґрунтовій основі. При цьому підвищується продуктивність і тривалість служби шляху [14].

Це потребує і зумовлює подальші пошуки адекватної моделі рейкового шляху як сукупності різних елементів шляху – рейок, шпал та баластового шару.

Таким чином, доведено багатопараметричну залежність механічної взаємодії вагона та рейкового шляху в зоні стику, від завантаження вагона, конструктивних й механічних характеристик вагона, рейок і баластового шару. Взаємозв'язок розглянутих елементів потребує створення адекватної моделі, яка розглядає вагон рейкового транспорту у вигляді багатовимірної дискретної системи, а верхню будову колії – як континуальну систему.

Наведений аналіз відомих результатів досліджень показує, що сучасним напрямком розвитку теорії механічної взаємодії чотиривісного вагона та рейкової колії є використання багатofакторного системного аналізу, який враховує фази руху вагона через стикову нерівність шляху і характеристики жорсткості

баластового шару. Таким чином, можна констатувати, що існує потреба в розробці адекватної і зручної у використанні моделі взаємодії рухомого складу і рейкової колії, та відповідної методики аналізу їх силової взаємодії.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження механічної взаємодії вагона і верхньої будови колії задля вдосконалення параметрів дискретно-континуальної системи шляхом раціонального вибору і оптимізації параметрів її складових. Це забезпечить додатковий вплив на характеристики експлуатаційної надійності через складові, які залежать від параметрів механічної взаємодії в транспортному механічному комплексі "вагон – рейкова колія на ділянці з ізольованою стиковою нерівністю".

Для досягнення зазначеної мети дослідження були поставлені наступні задачі.

– створити комплексний метод розрахунку параметрів взаємодії чотиривісного вагона і рейкової колії на базі комплексного підходу та загальних співвідношень механіки з урахуванням фаз руху вагона через стикову нерівність;

– методами чисельного аналізу встановити і проаналізувати взаємодію елементів транспортного системного дискретно-континуального механічного комплексу «вагон – рейкова колія, в місці стикового з'єднання» з урахуванням експлуатаційних параметрів.

– визначити нові закономірності механічної взаємодії чотиривісного вагона й рейкової колії шляху при проходженні чотиривісним вагоном стикової нерівності з урахуванням фаз руху.

4. Матеріали та методи дослідження взаємодії вагона та рейкової колії в момент проходження стикової нерівності

Сутність статичної взаємодії вагона та рейкової колії передбачає визначення висоти стикової нерівності методом кінцевих параметрів на базі пружних ліній віддаючої та приймаючої рейок, завантаження яких відповідає чотирьом фазам руху вагона і включає наступне.

Розглядається узагальнена механічна схема чотиривісного вагона, яким можуть бути: вагон трамвая або пасажирський чи вантажний вагон залізничного транспорту. При моделюванні враховуються конструктивні параметри і завантаження транспортного засобу, умови з'єднання віддаючої і приймаючої рейок між собою через стикову рейкову накладку, а також жорсткість баластового шару шляху. Враховуючи узагальненість механічної схеми дискретно-континуальної системи "вагон – рейкова колія на ділянці з ізольованою стиковою нерівністю" в даній роботі дослідження виконано на базі трамвайного вагона. Отримані результати є універсальними й поширюються на вагони будь-якого призначення. Розглянуто проходження чотирьохвісним вагоном стикової нерівності шляху на чотирьох фазах руху. На першій фазі всі колісні пари вагона розташовуються на віддаючій рейці, на другій фазі – на ній залишається три, на третій – дві і на четвертій лише одна.

Механічна схема, методика дослідження, рівняння вигнутої осі рейок, блок-схема чисельного розрахунку прогинів рейок шляху наведено в даній роботі на прикладі першої фази руху. Але результати досліджень, що стосуються інших фаз руху, наведено в роботі через присутні графічні залежності і прикінцевий аналіз.

Схема проходження рейкового стику першою колісною парою вагона зображена на рис. 1. Тут: 1 – вагон транспортного засобу, 2–5 – відповідне колесо колісної пари; 6–7 – центральна підвіска вагона; 8 – приймаюча рейка; 9 – віддаюча рейка; 10 – пружні елементи баластового слою під шпалами; 11 – пружний елемент, який моделює жорсткість віддаючої рейки на кінці.

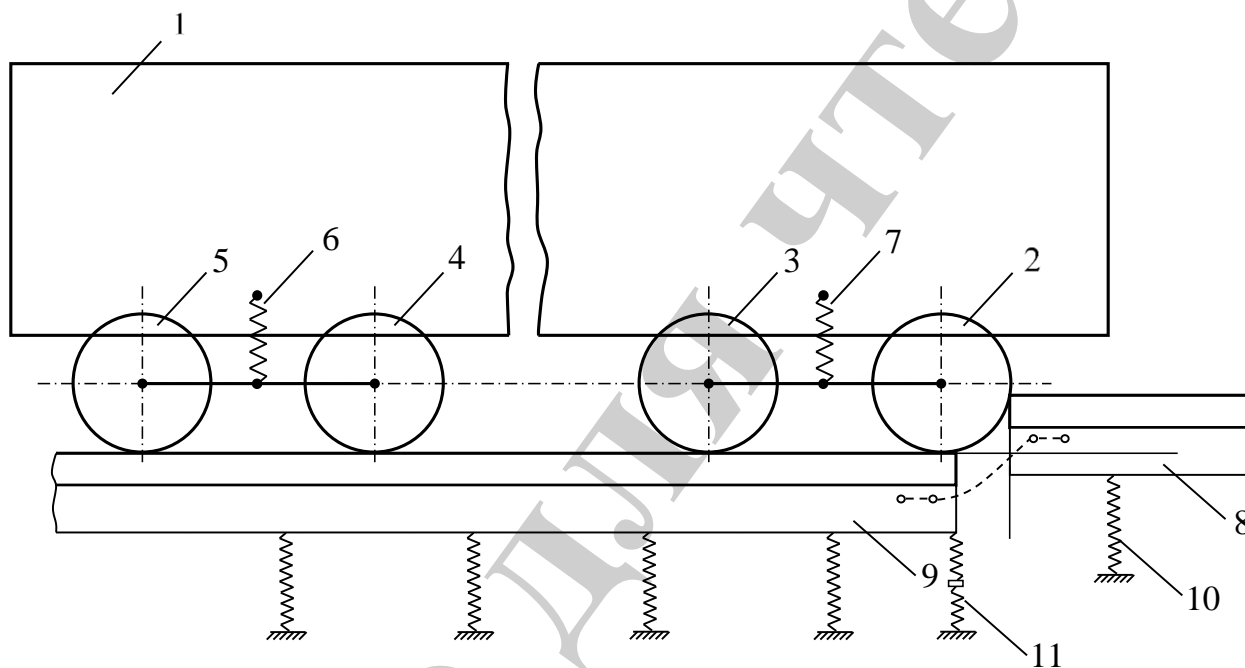


Рис. 1. Схема проходження стикової нерівності

При статичному розрахунку прогинів рейки використовується модель багатопротітної балки на 23 пружних опорах (22 шпали та опора, яка моделює з'єднання з сусідньою рейкою через працюючу накладку). Для розрахунку значення жорсткості рейки (c_p) визначається її прогин на кінці δ_p під дією одиничної сили, тоді: $c_p = 1/\delta_p$. Враховуючи з'єднання працюючою накладкою з жорсткістю c_n віддаючої і приймаючої рейок отримуємо жорсткість рейки на кінці:

$$c_{p,k} = \frac{c_p \cdot c_n}{c_p + c_n} \quad (1)$$

Це дозволяє розрахувати характеристику пружної опори, на які спирається рейка з урахуванням особливості з'єднання рейок між собою. Потім розглядаються деформування рейки на 23-х пружних опорах. На віддаючій рейці задаються чотири зосереджені сили, що відповідає кількості коліс вагона на ній.

Розглянемо постановку статично невизначуваної задачі деформування багатопролітної (нерозрізної) балки на пружних опорах [15].

Головними силовими факторами, що визначають статичний прогин приймаючої рейки під першою пружною опорою є постійні за величиною зовнішні сили P_0 . Вони відповідають поточній кількості колісних пар на рейках, прикладених до віддаючої рейки (рис. 2), та мають координати X_{Bj} , де $j=1, 2, 3, 4$ – номер колісної пари вагона.

На рис. 2: l_i ($i=1-22$); $l_{p.к.}$ – геометричні координати пружних опор; $P_0=P/8$ – навантаження збоку вагона, що припадає на одне колесо; P – вага вагона з урахуванням його завантаження; $F_{np}=h_B \cdot c_{p.к.}$ – сила пружності, що прикладається до кінця приймаючої рейки з боку віддаючої рейки на кінці при $x=l_{p.к.}=12,5$ м; Q_0, M_0 – поперечна сила і згинальний момент на початку координат; c – жорсткість баластного шару під шпалою верхньої будови шляху. Тут $X_{B4}=1,9$ м; $X_{B3}=3,8$ м; $X_{B2}=10,6$ м; $X_{B1}=12,5$ м; $l_1=0,28$ м; $l_2=0,85$ м; $l_3=1,42$ м; $l_4=1,99$ м; $l_5=2,56$ м; $l_6=3,13$ м; $l_7=3,69$ м; $l_8=4,26$ м; $l_9=4,83$ м; $l_{10}=5,40$ м; $l_{11}=5,97$ м; $l_{12}=6,53$ м; $l_{13}=7,10$ м; $l_{14}=7,67$ м; $l_{15}=8,24$ м; $l_{16}=8,81$ м; $l_{17}=9,38$ м; $l_{18}=9,94$ м; $l_{19}=10,51$ м; $l_{20}=11,08$ м; $l_{21}=11,65$ м; $l_{22}=12,22$ м; $l_{p.к.}=12,5$ м.

Рівняння вигнутої осі рейок на першій фазі руху запишемо, використовуючи метод початкових параметрів, з урахуванням умов закріплення ($y_0=y_0'=0$).

Для віддаючої рейки отримаємо

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - \sum_{j=1}^4 P_0 \frac{(x-x_{Bj})^3}{6} + \sum_{i=0}^{22} cy_i \frac{(x-l_i)^3}{6} + c_{p.к.} h_B \frac{(x-L)^3}{6} \right]. \quad (2)$$

Для приймаючої рейки

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - F_{np} \frac{(x-L)^3}{6} + \sum_{i=0}^{22} cy_i \frac{(x-l_i)^3}{6} + c_{p.к.} h_{II} \frac{(x-L)^3}{6} \right]. \quad (3)$$

Тут J – момент інерції перерізу рейки відносно нейтральної осі; E – модуль пружності матеріалу рейки; $L=l_{p.к.}$ – довжина рейки.

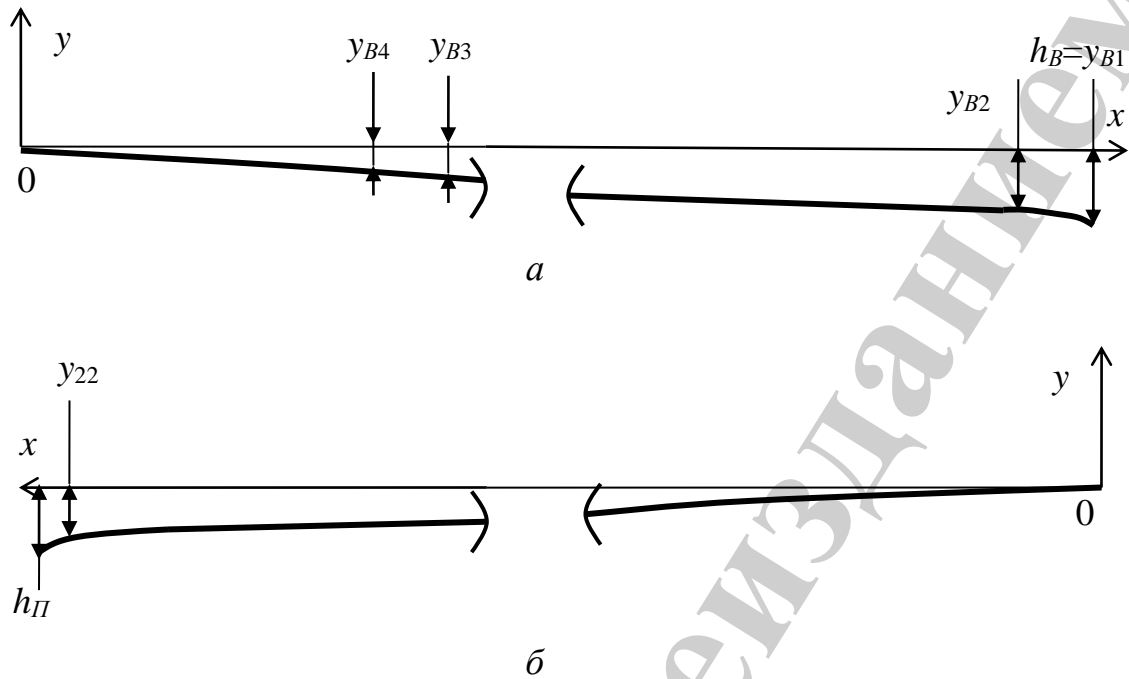


Рис. 3. Пружні лінії на першій фазі руху:
a – віддаюча рейка; *б* – приймаюча рейка

З визначених пружних ліній віддаючої і приймаючої рейок розраховується поточна величина висоти стикової нерівності

$$h = h_B - h_{П}, \quad (4)$$

де h_B , $h_{П}$ – прогини віддаючої і приймаючої рейок на кінцях, відповідно при $x=12,5$ м, тобто $h_B=y_{B(l_{p.k.})}$, $h_{П}=y_{П(l_{p.k.})}$.

З урахуванням того, що вирази (2) і (3) містять в правій частині доданки, які в свою чергу залежать від прогинів, розв'язання цих рівнянь виконано чисельно.

Методика розрахунку прогинів рейки на кінці від одиничної сили $\bar{F}=1$ Н, віддаючої та приймаючої рейки на кінці, а також поточної висоти стику h складається з 4 етапів.

На першому етапі за виразом (1) розраховується жорсткість $c_{p.k.}$ рейки на кінці [1] при $c_H=3,2 \cdot 10^6$ Н/м, де $c_p=1/\delta_p$, а δ_p – прогин рейки на кінці від одиничної сили $\bar{F}=1$ без врахування стикових накладок, тобто при $c_H=0$.

Відповідно до формули (2), прогин δ_p визначається як:

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - \bar{F} \frac{(x-l_{p.k.})^3}{6} + \sum_{i=1}^{22} c y_i \frac{(x-l_i)^3}{6} + c_{p.k.} y_{23} \frac{(x-l_{p.k.})^3}{6} \right]. \quad (5)$$

Блок-схему розрахунку прогину віддаючої рейки на кінці на першій фазі руху вагона, відповідно до розрахункової механічної схеми на рис. 2, а, наведено на рис. 4.



Рис. 4. Блок-схема розрахунку прогину рейки

Тут блок 2 – блок введення механічних, геометричних і граничних параметрів системи. У блоці 3 на першому кроці (при $j=1$) розраховуються початкові параметри Q_{01} і M_{01} при навантаженні рейки тільки зусиллям $\bar{F}=1$ та відсутності всіх пружних опор (на рис. 2, а) із умов статичної рівноваги:

$$Q_{01} = \bar{F}; \quad M_{01} = -\bar{F}l_{p.k.} \quad (6)$$

Далі за виразом (5) розраховуються прогини y_i ($i=1, 23$) рейки під відповідними пружними опорами на рис. 2, а, яка навантажена силою \bar{F} і визначеними реакціями Q_{01} і M_{01} .

На другому кроці ($j=2$) з урахуванням навантаження \bar{F} визначаються нові значення початкових параметрів Q_{02} і M_{02} :

$$Q_{02} = \bar{F} - \sum_{i=1}^{22} cy_i - c_{p.k.} y_{23}; \quad M_{02} = -\bar{F} l_{p.k.} + \sum_{i=1}^{22} cy_i l_i + c_{p.k.} y_{23} l_{p.k.}, \quad (7)$$

де cy_i , $c_{p.k.} y_{23}$ – сили пружності відповідної опори рейки.

Ці початкові параметри є вихідними даними для циклу при $j=2$.

Якщо похибка $\Delta = \max |y_{i,j} - y_{i,j-1}|$ ($i=(1, 23)$) виявляється більшою за задане значення ε , тоді відбувається наступний цикл по j . Прийнято $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-6}$ м.

Після досягнення умови $\varepsilon \leq \Delta$ розрахунок за циклом j припиняється, визначається кінцеве значення прогину $y(l_{p.k.}) = \delta_p$ рейки на кінці, яке використовується при розрахунку відповідно $c_p = 1/\delta_p$ та $c_{p.k.}$ за виразом (1).

На другому етапі за алгоритмом етапу 1 розраховується величина прогину h_B віддаючої рейки на кінці. При цьому блок 1 алгоритму матиме наступний вигляд: введення статичного навантаження P_0 ; геометричних координат l_i ($i=1, 22$), $l_{23}=l_{p.k.}$, XBJ ($j=1,4$); механічних характеристик рейки E, J ; припустимого прогину ε ; жорсткості $c_{p.k.}$.

Тоді рівняння рівноваги (6) і (7) матимуть вигляд:

$$Q_{01} = 4P_0; \quad M_{01} = -\sum_{k=1}^4 P_0 x_{Bk};$$

$$Q_{02} = 4P_0 - \sum_{i=1}^{22} cy_i - c_{p.k.} y_{23};$$

$$M_{02} = -\sum_{j=1}^4 P_0 x_{Bj} + \sum_{i=1}^{22} cy_i l_i + c_{p.k.} y_{23} l_{p.k.}$$

Прогин віддаючої рейки на кінці визначається за виразом (2) як $h_B = y_B(l_{p.k.})$, при досягненні умови $\varepsilon \leq \Delta$.

На етапі 3 при розрахунку h_{II} приймаючої рейки на кінці блок 1 алгоритму має наступний вид: введення статичного навантаження P_0 ; геометричних координат l_i ($i=1, 22$), $l_{23}=l_{p.k.}$; механічних характеристик рейки E, J ; припустимого прогину ε ; жорсткості $c_{p.k.}$.

В даному випадку рівняння рівноваги (6) і (7) будуть:

$$Q_{01} = 0; \quad M_{01} = 0;$$

$$Q_{02} = \sum_{i=1}^{22} cy_i - c_{p.k.} y_{23};$$

$$M_{02} = \sum_{i=1}^{22} cy_i l_i + c_{p,k} y_{23} l_{p,k}.$$

Далі за формулою (3) визначається прогин приймаючої рейки на кінці: $h_{\Pi} = y_{\Pi}(l_{p,k})$ при виконанні умови $\Delta \leq \epsilon$.

На етапі 4 методики за виразом (4) розраховується висота $h = h_{\Pi} - h_B$ ступені в гору на першій фазі руху вагона.

Механічні схеми, методики дослідження, рівняння прогинів рейок та блок-схеми їх чисельного розрахунку висоти стику h для інших фаз відповідають аналогічним складовим першої фази руху.

При цьому метод дослідження параметрів механічної взаємодії чотирирівнісного вагона і рейкової колії включає декілька етапів. По-перше, це етап побудови схеми проходження рейкового стику колісною парою з урахуванням фази руху вагона. Другий етап – створення розрахункових схем пружних ліній віддаючої та приймаючої рейок шляху й рівнянь визначення, що враховують фази руху. Останній етап – розробка блок-схеми визначення висоти стику, що виникає між рейками в залежності від фаз руху й завантаження вагона.

5. Результати досліджень статичної взаємодії вагона з рейковою колією

Згідно з запропонованою моделлю, виконано числений аналіз параметрів статичної взаємодії чотирирівнісного вагона з рейковою колією в місці ізолюваної стикової нерівності типу «зазор» [1]. Розрахунки здійсненні на базі варіювання механічних та експлуатаційних факторів: завантаження вагона, жорсткості баластового шару. Методом чисельного експерименту отримано залежності механічної взаємодії в системі «вагон – рейкова колія в місці стикового з'єднання». При цьому враховуються граничні умови закріплення віддаючої і приймаючої рейок, геометричні і механічні характеристики рійок та стикових накладок, шпал і баластового шару.

Аналіз здійснено згідно зі блок-схемою розрахунку прогинів віддаючої і приймаючої рейок на кінці, яку наведено на рис. 4. Це дозволило визначити висоту стикової нерівності відповідно до співвідношень (2), (4).

Розрахунки виконано відповідно до механічної схеми вагона і рейкової колії, яка наведена на рис. 1, а також геометричних і механічних характеристик рейки Р-65 трамваю Т-3 [15]. Модуль пружності матеріалу рейки – $E = 2,6 \cdot 10^{11}$ Н/м²; момент інерції перерізу рейки відносно нейтральної осі – $J = 3573$ см⁴; жорсткість баластного шару шляху – $c = 0,5 \cdot 10^8$ Н/м; величина зазору між рійками $\Delta = 19$ мм. Зведена до одного колеса маса порожнього вагона $m = 2125$ кг, а максимальна (при 193 пасажирів) завантаженого – $m = 3814$ кг.

Наведені данні відповідають результатам аналізу досліджень конструктивних характеристик рухомого складу, рейкового шляху та накладок стиків реальних об'єктів. Також враховується стан проблеми [1], стосовно транспортного механічного комплексу "чотирирівнісний вагон – рейкова колія на ділянці з ізолюваною стиковою нерівністю".

В табл. 1 представлено висоту стиків рейкової колії (тут номер індексу при h відповідає номеру фази руху вагона) при проходженні чотирьохвісним вагоном зони стикової нерівності, які розраховані за формулою (4). Встановлено, що для кожного завантаження, висота стику має залежність від фази руху. Крім того, результати свідчать, що при збільшенні завантаження вагона спостерігається зростання величини висоти стикової нерівності. При цьому найбільше значення висоти має місце на першій фазі руху вагона.

Таблиця 1
Висота стиків рейкової колії

m , кг	2125	2294	2463	2632	2800	3138	3307	3476	3645	3814
h_1 , мм	2,60	2,68	2,77	2,88	3,03	3,21	3,39	3,55	3,72	3,89
h_2 , мм	0,67	0,69	0,71	0,75	0,78	0,83	0,88	0,92	0,96	1,01
h_3 , мм	1,30	1,34	1,39	1,44	1,52	1,61	1,70	1,78	1,86	1,95
h_4 , мм	0,45	0,46	0,48	0,50	0,52	0,55	0,59	0,61	0,64	0,67

Дані розрахунків наведено на рис. 5 у вигляді графічних залежностей h (мм), які інтегровано відображають процес статичної взаємодії при проходженні стикової нерівності транспортним засобом різного завантаження. Вони дозволяють надати отриманим даним стосовно висоти h здатність якісного порівняльного, а також візуального аналізу.

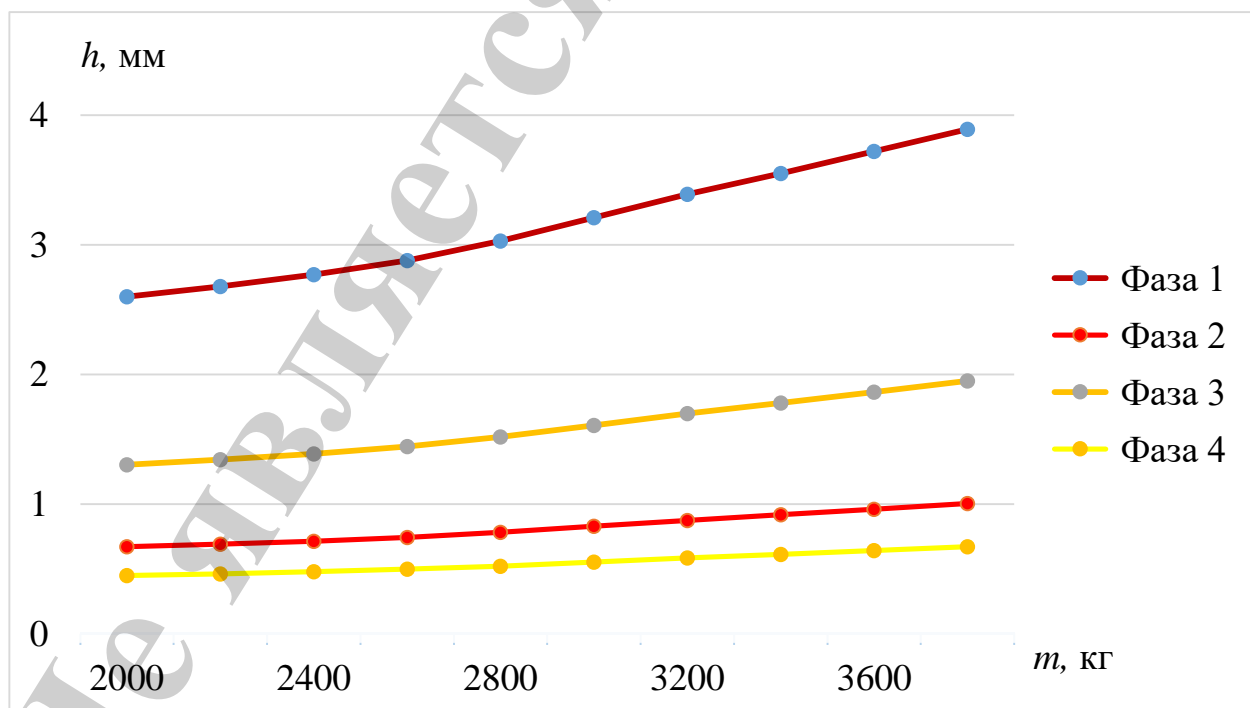


Рис. 5. Залежність висоти стику від завантаження вагона

Згідно графіків, наведених на рис. 5, маємо монотонне зростання висоти стику при збільшенні завантаження вагона на всіх фаз руху. Можна визначити, що при зміні завантаження від порожнього до максимально заповненого вагона ($m=[2125\div 3814]$ кг на колесо), висота стику зростає в 1,49 рази на першій фазі руху, в 1,51 рази на другій фазі, та в 1,5 і 1,48 на третій та четвертій відповідно. Також незалежно від завантаження вагона найменше значення висоти стику матимемо на четвертій фазі рух вагона, далі за зростанням йдуть друга, потім третя фази, а найбільше значення висота стику буде на першій фазі. Однак для порожнього вагона різниця між найменшим значенням висоти стику (на четвертій фазі руху) й найбільшим (на першій фазі руху) складає 5,77 разів. При максимальному завантаженні – ця різниця (між першою та четвертою фазами) складає 5,8 разів. Тобто слід констатувати, що вона практично не залежить від завантаження вагона.

6. Обговорення результатів дослідження взаємодії при проходженні стикової нерівності

Парадигму досліджень особливостей взаємодії чотиривісного вагона та рейкової колії побудовано на базі багатофакторного аналізу. Це дозволило встановити невідомі закономірності процесів стикової взаємодії рухомого складу та рейкового шляху в зоні стикової нерівності з урахуванням фаз руху. Створено також новий підхід до вирішення задачі механічної взаємодії вагона рейкового транспорту і колії в місці стикового з'єднання. Це дозволяє розглядати різноманітні типи стиків рейкової колії з урахуванням конструктивних і експлуатаційних особливостей транспортного засобу.

Використання запропонованого методу дослідження показує, що розроблено ефективний спосіб визначення параметрів механічної взаємодії в транспортному системному комплексі «вагон – рейкова колія в зоні стикової нерівності». При цьому враховуються експлуатаційні, механічні й геометричні параметри транспортного засобу, рейки, стикових накладок, шпал і баластового шару, а також граничні умови закріплення і прогини віддаючої і приймаючої рейок шляху.

Однак, слід зауважити, що розглянута послідовність етапів методу розрахунку, а також його складових орієнтована на стандартні рейки довжиною 12,5 м на 22 шпалах. Тому його адаптація для інших типів рейок потребує доопрацювання. Це стосується механічної схеми дискретно-континуальної системи на рис. 1, а також блок-схеми розрахунку прогинів на рис. 4.

В результаті проведених досліджень встановлено характер впливу завантаження вагона на висоту стикової нерівності при проходженні стику. Доведено, що вона збільшується при зміні завантаження, зростаючи за позитивною динамікою, а залежності $h(m)$, що наведені на рис. 5, носять параболічний характер. Аналіз графіків на рис. 5 показав також, що ігнорування багатофакторності впливу на прогини рейкової колії призводить до помилкових висновків, враховуючи послідовність кривих.

Результати, що отримано, можуть використовуватися на практиці при вдосконаленні експлуатаційних характеристик рухомого складу і рейкової колії,

шляхом раціонального вибору і оптимізації.

Встановлені значення ступені стикової нерівності дозволяють також визначити величину післяударної швидкості приймаючої рейки при розв'язанні задачі динамічних прогинів в зоні розташування першої шпали.

Подальші комплексні дослідження ударних і динамічних процесів на всіх фазах проходження вагоном стику дозволять створити замкнену модель цього підходу.

7. Висновки

1. Запропоновано новий метод дослідження параметрів механічної взаємодії чотиривісного вагона і рейкової колії, що побудовано на базі схеми багатопролітної (нерозрізної) балки на 23-х пружних опорах. Він дозволяє визначити висоту стику шляху з урахуванням фаз руху вагона, а також конструктивних і експлуатаційних особливостей транспортного засобу і колії.

2. Представлено табличні й графічні результати чисельних розрахунків параметрів статичної взаємодії чотиривісного вагона з рейковою колією у місці стикового з'єднання в залежності від завантаження на всіх фазах проходження стикової нерівності.

3. Методом порівняльного аналізу встановлено характер впливу фаз руху і завантаження вагона на висоту стикової нерівності. Це дозволяє імплементувати створений метод дослідження і моделі багатопролітної рейки у задачі удосконалення експлуатаційних параметрів вагона і верхньої будови колії при їх створенні.

Література

1. Шпачук В. П., Далека В. Х., Коваленко А. В. Сتيكoвa динаміка трамвая. Харків: ХНАМГ, 2005. 150 с.
2. Веригo М. Ф., Кoгaн A. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 559 с.
3. Лазарян В. А. Динамика вагонов. Устойчивость движения и колебания. М.: Транспорт, 1964. 255 с.
4. Шпачук В. П., Чупринін О. О., Супрун Т. О. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на статичні і динамічні прогини рейкової колії в зоні стикової нерівності // Вібрації в техніці та технологіях. 2014. № 4 (76). С. 100–108.
5. Виноградов Б. В. Эквивалентное число циклов напряжений при расчете на выносливость открытых зубчатых передач барабанных мельниц // Науковий вісник НГУ. 2015. № 1. С. 72–76.
6. Gursky V., Kuzio I. Strength and durability analysis of a flat spring at vibro-impact loadings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 5, Issue 7 (83). P. 4–10. doi: 10.15587/1729-4061.2016.79910
7. Pukach P. Ya., Kuzio I. V. Resonance phenomena in quasi-zero stiffness vibration isolation systems // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2015. Issue 3. P. 62–67.

8. Vinogradov B. V., Fedin D. O. The stress state of heavy loaded open gearing with incomplete tooth contact // Scientific Bulletin of National Mining University. 2016. Issue 3. P. 35–40.
9. A holistic approach for the design and assessment of railway tracks / Kostovasilis D., Ntotsios E., Hussein M. F. M., Thompson D. J., Squicciarini G. // Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROLYN 2014. Porto, 2014. P. 855–861.
10. Srihari P., Azad D., Sreeramulu D. Optimization of rail inserts using finite element analysis // International Journal of Engineering, Science and Technology. 2014. Vol. 6, Issue 2. P. 65. doi: 10.4314/ijest.v6i2.5
11. Numerical modeling of railway track supporting system using finite-infinite and thin layer elements / Noorzaei J., Thanoon W. A. M., Yeat W. F., Pour P. M., Jaafar M. S. // IJE Transactions A: Basics. 2009. Vol. 22, Issue 2. P. 131–144.
12. Rose J. G., Teixeira P. F., Ridgway N. E. Utilisation of Asphalt/Bituminous Layers and Coatings in Railway trackbeds // A Compendium of International Applications. Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference. Urbana, Illinois, 2010.
13. A Drivable Slab Track Cover System For Railway Tunnels / Andreatta A., Theiner Y., Hofstetter G., Feix J. // Advances in Civil and Environmental Engineering. 2013. Vol. 01, Issue 02. P. 84–98.
14. Allan J. Soil Mechanics of High Speed Rail Tracks // In Proc. 1st Civil and Environmental Engineering Student. Imperial College London, 2012. P. 206–212.
15. Рівні статичної взаємодії трамвая з рейковою колією на четвертій фазі проходження вагоном стикової нерівності / Шпачук В. П., Чупринін О. О., Гарбуз А. О., Супрун Т. О. // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2016. № 162. С. 11–20.