

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 625.1"401.4"-047.58

І. О. БОНДАРЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, ел. пошта irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ ПРИ ДЕФОРМАТИВНІЙ РОБОТІ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Мета. Наукова робота має за мету визначення основних закономірностей процесу розповсюдження коливань від збуджень рухомого складу в системі конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії для дослідження розвитку процесів деформативності як основи створення нормативної бази роботи колії за умов забезпечення надійності залізниць. **Методика.** Для досягнення мети використано засади теорій пружності та розповсюдження хвильового процесу при описі взаємодії колії та рухомого складу. **Результати.** Встановлено, які види коливань та яку систему необхідно використовувати при розгляді процесу коливань при деформативній роботі залізничної колії. Визначено загальний вид функції переміщень. **Наукова новизна.** Обґрунтовано теоретичні положення та принципи розгляду коливань системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії, що збуджуються рухомим складом. Це дозволить дослідити процес деформативної роботи зазначеної системи, при якому відбуваються зміни її станів протягом деякого напрацювання, що, в свою чергу, дозволить визначити параметри функціональної надійності руху поїздів як складової безпеки пропуску рухомого складу по ділянці колії із урахуванням її технічного стану. **Практична значимість.** Зазвичай для безпечного пропуску рухомого складу визначаються параметри процесу коливань системи «екіпаж – колія». Існуючі моделі або дуже ретельно розглядають коливання рухомого складу при узагальнених характеристиках системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії, або розглядають квазідинамічні коливання рейок при загальних характеристиках підрейкової основи. Такий розгляд процесу коливань, що збуджуються рухомим складом та передаються на всі елементи систем конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії, не дає можливості визначення ані параметрів надійності елементів систем конструкцій колії, ані параметрів функціональної надійності руху поїздів (як складової безпеки пропуску рухомого складу по ділянці колії із урахуванням її технічного стану). Тому для розглядання питань із надійної роботи елементів системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії запропоновано основні засади розглядання процесу її деформативної роботи. Це дасть можливість розглядати безпосередньо динамічний процес, локалізований як у часі, так і в просторі.

Ключові слова: моделювання; тверде тіло; суцільне середовище; деформативна робота; вимушені коливання; вільні коливання; хвильове розповсюдження; частота коливань; надійність колії; дисипативність

Вступ

Колівальним рухом або просто коливаннями називають будь-який рух або зміну стану, що характеризується повторюваністю в часі значень фізичних величин, які визначають цей рух або стан.

Оскільки тіла є не «абсолютно твердими», то будь-який вплив на них передається не миттєво в усі точки, а за законами фізики з певною швидкістю, тобто відповідно певному процесу розповсюдження коливань.

Деформативна робота елементів конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

є роботою, виконаною при коливанні системи тіл, складених з середовищ із певними характеристиками.

Питання вивчення динаміки системи тіл зводиться до питання вивчення розповсюдження коливань в певних контактуючих обмежених середовищах.

З процесом розповсюдження коливань зустрічаються при вивченні дуже різних явищ: звук, світло, змінний струм, хитання маятника, сейсмічні хвилі та інші. Всі перелічені явища різні, але існує спільність закономірностей цих явищ та математичних методів їх дослідження [9, 12, 13].

При вивченні коливань системи «екіпаж-колія» сформовано два напрями досліджень: вивчення коливань рухомого складу та вивчення коливань колії. Обидва напрями вивчають коливання дослідного об'єкту за умови, що партнер по взаємодії задається певним збуджуючим коливанням. Обидва напрями не враховують відклик партнера від взаємодії.

Дослідження коливань з конструкцій верхньої та нижньої будови колії зводяться до вивчення коливань рейки при певних впливах рухомого складу та певних характеристиках підрейкової, а іноді підшпальної, основи. Результатами таких досліджень є напружено-деформований стан, що характеризує міцність та витривалість.

Колівання рухомого складу вивчаються ширше. Але при їх дослідженні коливання системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії представляють як набір збуджуючих коливань. Функції, що описують ці коливання, навіть не мають чіткої залежності від характеристик елементів системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії.

Експериментальні дослідження зводяться до визначення станів рухомого складу та колії в конкретних перетинах [10] та відповідності цих станів нормативам. Вивчення взаємодії рухомого складу та колії за допомогою тензометричних пар не набуло розвитку з причин необхідності розробки нових підходів, методів і параметрів оцінки цього процесу та відсутності задач, що спонукають для розробки нових впроваджень. У той же час сучасні методи зйомки просторової геометрії колії [14] дозволяють отримувати всі дані стосовно розташуван-

ня колії, але вони не використовуються для наукових досліджень.

У всіх виданнях, що присвячені коливанням системи «екіпаж-колія», зазначено, що коливання рухомого складу приносять багато збитків. Вони призводять до розладів колії, порушують плавність ходу, іноді можуть призвести до сходу екіпажу з рейок. Коливання екіпажу зумовлюються багатьма причинами: нерівностями колії; нерівнопружністю рейкових опор; режимом тяги та її силою; нерівностями на колесах рухомого складу.

Види та розмах коливань рухомого складу, їх наростання або згасання залежать як від конструктивних особливостей рухомого складу, так і систем конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії. При цьому досі досліджуються нерівності рейок, як першопричини цих коливань, але з точки зору появи нерівностей як абразивного, так і адгезивного зносу рейок.

Вважається, що резонансні явища в рейці між суміжними колесами візків при динамічній взаємодії ходових частин з верхньою будовою колії виникають завжди, але вони є лише необхідною, але не достатньою умовою утворення та подальшого розвитку хвилеподібних нерівностей при експлуатації. Достатньою умовою для утворення хвилеподібних нерівностей рейок є експлуатація на ділянці колії однотипного рухомого складу у вузькому діапазоні швидкостей руху, що включає резонансні швидкості руху [1]. Навіть методи боротьби з цим явищем пропонують за рахунок застосування розрахункових інтервалів оптимальних швидкостей руху, при яких відсутні резонансні швидкості. Оскільки вважається, що наявність резонансних швидкостей руху є основною умовою утворення хвилеподібних нерівностей при динамічній взаємодії рухомого складу і колії [1]. При цьому не дається обґрунтування, чому такі заходи по зміні експлуатаційних умов системи конструкції верхньої та нижньої будов залізничної колії не призведуть до зміни характеристик у зазначеній системі і до тих же проблем, з якими проводилась боротьба.

Тому необхідно провести дослідження процесу розповсюдження коливань при деформативній роботі систем конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії. Існує декілька основних теоретичних моделей для досліджен-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ня зазначених проблем: балка на півпросторі, балка на двошаровій основі, конструкція колії за канонами методу кінцевих або граничних елементів. Але ці методи не дозволяють отримати дані щодо експлуатаційної надійності колії, тому пропонується інший підхід при дослідженні роботи колії.

Мета

Метою дослідження є визначення основних закономірностей процесу розповсюдження коливань від збуджень рухомого складу у системі конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії для дослідження розвитку процесів деформативності як основи створення нормативної бази роботи колії за умов забезпечення надійності залізниць.

Методика

В теоретичній механіці розглядають механічні коливання, які дуже різноманітні за своєю природою. Розрізняють вільні, вимушені, параметричні коливання, автоколивання та різні випадки змішаних коливань.

Коливання, що виникають в системі, не підданій дії змінних зовнішніх сил, в результаті будь-якого початкового відхилення цієї системи від стану стійкої рівноваги, називають вільними. Вільні коливання зумовлені дією сил відновлення: пружних сил, що пропорційні зміщенню та направлені до положення рівноваги. Енергію в таку систему було вкладено один раз, під час тимчасового зовнішнього збурення.

Вимушені коливання, коливання, що виникають в будь-якій системі під дією змінної зовнішньої сили. Енергія в систему поступає через зовнішню силу.

Параметричні коливання – це особливий тип вимушених коливань, відрізняється тим, що зовнішня сила періодично замінює який-небудь фізичний параметр системи (наприклад, масу маятника, довжину його підвісу, таке інше). Енергія поступає до системи через зовнішню силу, але залежно від фазових співвідношень зовнішня сила або виконує додатну роботу, тоді амплітуда коливань зростає, або від’ємну – тоді амплітуда зменшується.

Автоколивання – це нелінійний квазіперіодичний рух, що виникає у системі внаслідок самозбудження, за умов відсутності зовнішньої

сили. Характер автоколивання визначається структурою коливальної системи та побудовою внутрішнього джерела та системи зворотного зв’язку. Ці коливання не загасають з часом, хоч у системі є суттєві втрати енергії, які компенсуються тим, що до системи порціями надходить енергія від внутрішнього джерела, яке є частиною системи. Автоколивання самі регулюють періодичність надходження та кількість енергії, яка компенсує втрати через дисипативні процеси.

Якщо при коливаннях не відбувається розсіювання енергії, то система має назву консервативна та коливання мають незгасаючий характер. Якщо ж при коливаннях відбувається розсіювання енергії, то система неконсервативна. Неконсервативні системи поділяються на дисипативні системи, в яких повна енергія з часом зменшується, та автоколивальні системи, в яких енергія надходить до системи від внутрішнього джерела. Для розгляду реальних фізичних систем застосовують неконсервативні системи. Якщо розглядати коливання системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії, то необхідно розглядати неконсервативну дисипативну систему, де мають місце вільні та вимушені коливання.

Результати

В зоні контакту колеса з рейкою виникають сили F , що передаються як рухомому складу, так і системі конструкцій верхньої та нижньої будов колії. За третім законом Ньютона значення їх однакові, але напрям протилежний. Таким чином, якщо обидва учасники контакту (рухомий склад і система з конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної безстиківної колії) були б ідеальними та твердими, то не було б коливань ані рухомого складу, ані самої системи. Тільки наявність сил інерції (що виникають внаслідок недосконалості системи з конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії, коліс та коливання необресорених мас) є джерелом коливань і рухомого складу, і системи з конструкцій. Це відбувається внаслідок зміни контактуючих сил, що стають залежними від сил інерції та через це мають змінні значення. У зв’язку з цим пружні прогини системи з конструкцій s від впливу коліс рухомого складу є змінними. Таким чином іс-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

нують швидкість та прискорення переміщень системи з конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії.

Зазвичай в практичних розрахунках вважають, що сила інерції пов'язана з коливаннями необресореної маси колеса m_k та коливань маси системи з конструкцій $m_{зк}$, які пропорційні між собою та сконцентровані в точці контакту:

$$m_{зк} = \alpha_{зк} m_k.$$

Значення коефіцієнта пропорційності $\alpha_{зк}$ рекомендують приймати для колії з дерев'яними шпалами $\alpha_{зк} = 1,31$, для колії з залізобетонними шпалами – $\alpha_{зк} = 1,48$ [4]. Значення мас колії з дерев'яними шпалами $m_{зк} = 1,52$ кНс²/м [5].

Виникаючу силу інерції визначають як:

$$P_{ин} = (1 + \alpha_{зк}) m_k \ddot{s}.$$

Крім вказаних сил інерції, в системі конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії діють сили опору. Вони в свою чергу поділяються на пружні, що мають назву сили відновлення

$$F_T = ks,$$

де k – жорсткість; а дисипативні, до яких відносяться:

– сили тертя, що залежать тільки від характеристик контактуючих поверхонь

$$F_{TP} = fV,$$

де f – коефіцієнт тертя; $V = ds/dt$ – швидкість переміщення;

– сили в'язкого тертя

$$F_{TP} = bV$$

де b – коефіцієнт опору середовища.

Загальне рівняння руху має вигляд:

$$F - ks - b \frac{ds}{dt} - f \frac{ds}{dt} = m \frac{d^2s}{dt^2} \quad (1)$$

$$F = F_A \sin \omega t,$$

де F_A – максимальне значення сили при дії рухомого складу на колію, тобто її амплітуда;

ωt – коливається від 0 до π , та за цей час t , що залежить від швидкості руху, контактна площа взаємодії колеса та рейки передає весь цикл впливу на колію: тиск з'являється, поступово збільшується до максимального та згасає.

Основною перевагою застосування теорії розповсюдження коливань порівняно з існуючими теоріями є наявність чіткого значення мас m , що задіяні в процесі деформування на кожний момент часу.

Під час розв'язання рівняння (1) застосовано метод спеціальної правої частини та метод невизначених коефіцієнтів, за якими отримано залежність прогинів:

$$s = Ae^{-\frac{bt}{2m}} \sin \left(t \sqrt{\omega_0^2 - \frac{b}{2m}} + \alpha \right) + B \sin(\omega t + \beta), \quad (2)$$

де ω_0 – власна частота системи конструкцій верхньої та нижньої будов, на певний момент часу; A , B – амплітуди внутрішніх власних та вимушених коливань відповідно; α , β – фази відповідності зовнішніх та внутрішніх власних та вимушених коливань відповідно.

Таким чином, власні коливання є затухаючими. А коливання, що встановилися, є синусоїдальні. І як зазначено у [2, 3], вони є сферичними хвилями.

Враховуючи особливості контакту колеса з рейкою, а саме нерівномірність розташування напружень, для формування коректних умов навантаження [2, 3], що адекватно описують реальні умови, було вивчено діючі стандарти та сучасні дослідження [6–8, 11, 15]. Тому площа контакту розбивається спочатку на полоси, які в свою чергу розділено на ділянки. На кожному ділянці прикладається сила, що адекватно описує зміну напружень за час контакту. Таким чином, на поверхні катання рейки задаються навантаження від рухомого складу в кожний момент часу. Та за рівнянням (1) із застосуванням залежності переміщень (2) та принципу суперпозиції визначаються параметри деформативності. Площі контактів та навантаження на них для інших елементів формуються процесом розповсюдження хвиль, але підхід опису розповсюдження залишається таким же. Крім опису вільних та вимушених збуджуючих коливань, процес розповсюдження включає той же підхід для опису відображених коливань.

Наукова новизна та практична значимість

Обґрунтовано теоретичні положення і принципи для розгляду коливань системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії, що збуджуються рухомим складом, які дозволять дослідити процес деформативної роботи зазначеної системи, при якому відбуваються зміни її станів протягом деякого напрацювання, що в свою чергу дозволить визначити параметри функціональної надійності руху поїздів, як складової безпеки пропуску рухомого складу по ділянці колії з урахуванням її технічного стану.

Зазвичай для безпечного пропуску рухомого складу визначаються параметри процесу коливань системи «екіпаж – колія». Існуючі моделі або дуже ретельно розглядають коливання рухомого складу при узагальнених характеристиках системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії, або розглядають квазідинамічні коливання рейок при загальних характеристиках підрейкової основи. Такий розгляд процесу коливань, що збуджується рухомим складом та передається на всі елементи систем конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії, не є можливості визначення ані параметрів надійності елементів системи конструкцій колії, ані параметрів функціональної надійності руху поїздів, як складової безпеки пропуску рухомого складу по ділянці колії з урахуванням її технічного складу. Тому для розгляду питань з надійної роботи елементів системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії запропоновано основні засади розглядання процесу її деформативної роботи, що дають можливість розглядати безпосередньо динамічний процес локалізований як в часі, так і в просторі.

Висновки

Обізнаність в процесах взаємодії колії та рухомого складу призводить до розглядання нових задач. Одним з нових аспектів цього процесу є розв'язання задач надійності колії. Складовою надійності колії є функціональна безпека колії. Таким чином, напрямок досліджень є актуальним, але таким, що потребує нового підходу при вирішенні поставленої проблеми і не може застосовувати існуючі моделі для її вирішення.

При дослідженні процесу деформативності в елементах системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії необхідне точне визначення цього процесу як в часі, так і в просторі. Таким чином необхідне правильно описати процес розповсюдження збуджень від рухомого складу, що протікає в зазначених елементах. Основні теоретичні положення і принципи щодо опису особливостей деформативної роботи елементів системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії полягають у такому:

- питання вивчення динаміки суцільних тіл – це питання вивчення розповсюдження коливань в певних контактуючих обмежених середовищах;
- деформативна робота елементів системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії є роботою, що виконується при коливанні суцільної системи;
- елементи системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії є системою суцільних тіл, що володіють властивістю дисипації;
- передача збуджень рухомого складу елементам системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії передається за рахунок розповсюдження вільних та вимушених коливань;
- при будь-яких початкових умовах рух точки протягом часу буде складатись тільки з вимушених коливань. Початкові умови виводяться разом з вільними коливаннями, які поступово затухають;
- не звертаючи уваги на наявність опору руху, вимушені коливання є гармонічними та відбуваються з частотою вимушених коливань, тобто частотою зовнішньої сили.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алижан, А. Влияние динамических процессов в системе колесо-рельс на образование волнообразных неровностей на поверхности катания рельсов : автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.22.07 / Алижан Алмас ; Мос. гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2010. – 24 с.
2. Бондаренко, І. О. Особливості дослідження процесу деформативної роботи елементів залізничної колії / І. О. Бондаренко // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- залізн. трансп. – 2015. – № 4 (58). – С. 87–98. doi: 10.15802/stp2015/49212.
3. Бондаренко, І. О. Стосовно питань моделювання життєвого циклу деформативної роботи елементів залізничної колії / І. О. Бондаренко // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 1 (55). – С. 78–89. doi: 10.15802/stp2015/38247.
 4. Вериго, М. Ф. Общие положения для корректировки правил расчетов железнодорожного пути на прочность и предложения по изменению этих правил / М. Ф. Вериго, С. С. Крепкогорский // Тр. ЦНИИ МПС. – Москва, 1972. – Вып. 97. – С. 4–50.
 5. Гасанов, А. М. О приведенной массе пути / А. М. Гасанов // Вестн. ЦНИИ МПС. – 1968. – № 6. – С. 52–54.
 6. Исследование напряжений в контакте колесо-рельс // Ж.-д. мира. – 2011. – № 1. – С. 54–58.
 7. Конечно-элементное моделирование и исследование эволюции контактных напряжений при страгивании железнодорожного колеса / И. Д. Арсеньев, А. И. Боровков, Д. Ю. Сараев, Д. В. Шевченко // Вестн. Перм. нац. исслед. политех. ун-та. Механика. – Пермь, 2011. – Вып. 2. – С. 5–13.
 8. Соотношения между сопротивлениями качению и скольжению при движении локомотива по кривым и при извилистом движении колесной пары / Н. П. Довбня, Л. М. Бондаренко, Д. В. Бобырь, Р. А. Коренюк // Проблемы трибологии. – 2013. – № 1. – С. 43–46.
 9. Advancements in Noise and Vibration Abatement to Support the Noise Reduction Strategy of Deutsche Bahn / B. Schulte-Werning, B. Assmus, W. Behr [et al.] // Proc. of the 10th Intern. Workshop on Railway Noise. – Nagahama, Japan, 2010. – P. 9–16.
 10. Field monitoring on the train-induced vibration response of track structure in the Beiluhe permafrost region along Qinghai–Tibet railway in China / X.-Zh. Ling, Sh.-J. Chen, Zh.-Y. Zhu [et al.] // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – Vol. 60. – Iss. 1. – P. 75–83. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.08.005.
 11. Kik, W. A fast Approximate Method to Calculate Normal Load at Contact between Wheel and Rail and Creep Forces During Rolling / W. Kik, J. Piotrowski // Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems : Proc. of 2nd Mini Conf. (29.07–31.07.1996) / Techn. Univ. of Budapest. – Budapest, 1996. – P. 52–61.
 12. Lakušić, S. Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas / S. Lakušić, M. Ahac // Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette. – 2012. – № 19 (2). – P. 427–435.
 13. Planning and Controlling Railway Noise in a Metropolis: Our Practical Experience / B. Lee, W. Chau, J. Lam, M. Yeung // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. – 2012. – Vol. 118. – P. 17–23. doi: 10.1007/978-4-431-53927-8_3.
 14. Rail and Contact Line Inspection Technology for Safe and Reliable Railway Traffic / T. Hisa, M. Kanaya, M. Sakai, K. Hamaoka // Hitachi Review. – 2012. – Vol. 61, № 7. – P. 325–330.
 15. Srolarski, T. A. Rolling contacts / T. A. Srolarski, S. Tobe. – London : John Wiley & Sons, Ltd, 2000. – 445 p. doi: 10.1002/9781118903001.

И. А. БОНДАРЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-30

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ДЕФОРМАТИВНОЙ РАБОТЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Цель. Научная работа своей целью имеет определение основных закономерностей процесса распространения колебаний от возбуждений подвижного состава в системе конструкций верхнего и нижнего строений железнодорожных путей для исследования развития процессов деформативности как основы создания нормативной базы работы пути в условиях обеспечения надежности железных дорог. **Методика.** Для достижения цели использованы принципы теории упругости и распространения волнового процесса при описании взаимодействия пути и подвижного состава. **Результаты** Установлено, какие виды колебаний и какую систему необходимо использовать при рассмотрении процесса колебаний при деформационной работе железнодорожного пути. Определен общий вид функции перемещений. **Научная новизна.** Обоснованы теоретические положения и принципы рассмотрения колебаний системы конструкций верхнего и нижнего строений пути, возбуждаемых подвижным составом. Это позволит исследовать процесс деформативной работы

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

указанной системы, при котором происходят изменения ее состояний в течение некоторой наработки, что, в свою очередь, позволит определить параметры функциональной надежности движения поездов как составляющей безопасности пропуска подвижного состава по участку пути с учетом его технического состояния.

Практическая значимость. Обычно для безопасного пропуска подвижного состава определяются параметры процесса колебаний системы «экипаж – путь». Существующие модели или очень тщательно рассматривают колебания подвижного состава при обобщенных характеристиках системы конструкций верхнего и нижнего строений железнодорожных путей, или рассматривают квазидинамические колебания рельсов при общих характеристиках подрельсовой основы. Такое рассмотрение процесса колебаний, возбуждаемых подвижным составом и передающимся на все элементы систем конструкций верхнего и нижнего строений железнодорожных путей, не дает возможности определения ни параметров надежности элементов систем конструкций пути, ни параметров функциональной надежности движения поездов (как составляющей безопасности пропуска подвижного состава по участку пути с учетом его технического состояния). Поэтому для рассмотрения вопросов надежной работы элементов систем конструкций верхнего и нижнего строений железнодорожных путей предложены основные принципы рассмотрения процесса ее деформативной работы. Это дает возможность рассматривать непосредственно динамический процесс, локализованный как во времени, так и в пространстве.

Ключевые слова: моделирование; твердое тело; сплошная среда; деформативная работа; вынужденные колебания; свободные колебания; волновое распространение; частота колебаний; надежность пути; диссипативность

I. O. BONDARENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 373 15 42, e-mail irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-30

PROCESS FEATURES OF FLUCTUATIONS PROPAGATION AT STRESS-STRAIN WORK OF THE RAILWAY TRACK

Purpose. Scientific work aims at the determination the basic laws of fluctuations propagation process from excitation of rolling stock in the design system of permanent way and substructures of the railway lines for studying the deformation processes as the basis for a regulatory framework of the track operation in the conditions of ensuring the reliability of railways. **Methodology.** To achieve the aim the principles of elasticity theories and wave propagation process in describing the interaction track and rolling stock were applied. **Findings.** The kinds of fluctuations and system which should be used when considering the fluctuations in the deformation process of rail track were established. The general view of the displacement function was determined. **Originality.** The theoretical concepts and principles to consider fluctuations of a structures system of permanent way and substructures of the railway track, energised by rolling stock were grounded. This will allow studying the process of deformation work of the mentioned system, which changes its state. That in turn will allow us to determine the parameters of the trains functional reliability, as part of the security passes of rolling stock on the track section with regard to its technical condition. **Practical value.** Usually for safe crossing of rolling stock parameters of fluctuation process in the system «vehicle-track» are determined. Existing models or carefully consider fluctuations of rolling stock in generalized characteristics of the structures of permanent way and substructures of the railway tracks or view of quasi-dynamic fluctuations rails with general characteristics of under rail base. This review process of oscillations, energised by rolling stock and delivered to all the elements of the permanent way and substructures of the railway track do not allow determining both the reliability parameters of elements in the system of track construction and parameters of functional reliability of trains as part of security checkpoints in the area of rolling stock gauge because of its technical state. Therefore, for examining issues of reliable performance elements of the permanent way and substructures of the railway track are proposed its stress-strain work. It gives the possibility to consider a dynamic process, localized both in time and space.

Keywords: modeling; solid; solid medium stress-strain work; forced fluctuations; free fluctuations; wave propagation; fluctuations frequency; reliability of a track; dissipativity

REFERENCES

1. Alizhan A. *Vliyaniye dinamicheskikh protsessov v sisteme koleso-rels na obrazovaniye volnoobraznykh nerovnostey na poverkhnosti kataniya relsov*. Avtoreferat Diss. [Influence of dynamic processes in the wheel-rail system to formation of undulations on the surface of riding the rails. Author's abstract]. Moscow, 2010. 24 p.
2. Bondarenko I.O. Osoblyvosti doslidzhennia protsesu deformatyvnoi roboty elementiv zaliznychnoi kolii [Features of the research work elements deformability of railway track]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 4 (58), pp. 87-98. doi: 10.15802/stp2015/49212.
3. Bondarenko I.O. Stosovno pytan modeliuvannia zhyttievoho tsykladu deformatyvnoi roboty elementiv zaliznychnoi kolii [To the modeling issues of life cycle of deformation work of the railway track elements]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 1 (55), pp. 78-89. doi: 10.15802/stp2015/38247.
4. Verigo M.F., Krepkogorskiy S.S. Obschchiye polozheniya dlya korrektyrovki pravil raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost i predlozheniya po izmeneniyu etikh pravil [General provisions for adjusting the rules for calculating the strength of the railway track and proposals to change the rules]. *Trudy Tsentralnogo nauchno issledovatel'skogo instituta tochnogo mashinostroeniya. Ministerstvo putey i soobshcheniya* [Proc. of the Central Scientific Research Institute of Precision Engineering. The Ministry of Transport and Communications], 1972, issue 97, pp. 4-50.
5. Gasanov A.M. O privedennoy masse puti [About the reduced mass of the way]. *Vestnik Tsentralnogo nauchno issledovatel'skogo instituta tochnogo mashinostroyeniya. Ministerstvo putey i soobshcheniya* [Bulletin of the Central Scientific Research Institute of Precision Engineering. The Ministry of Transport and Communications], 1968, no. 6, pp. 52-54.
6. Issledovaniye napryazheniy v kontakte koleso-rels [The study of stresses in the contact wheel-rail]. *Zheleznyye dorogi mira – Railways of the World*, 2011, no. 1, pp. 54-58.
7. Arsenev I.D., Borovkov A.I., Sarayev D.Yu., Shevchenko D.V. Konechno-elementnoye modelirovaniye i issledovaniye evolyutsii kontaknykh napryazheniy pri stragivanii zheleznodorozhnogo kolesa [Finite element modeling and study of the evolution of the contact stresses in the breakaway railway wheel]. *Vestnik Permskogo natsionalno issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics], 2011, issue 2, pp. 5-13.
8. Dovbnya N.P., Bondarenko L.M., Bobyr D.V., Korenyuk R.A. Sootnosheniya mezhdru soprotivleniyami kacheniyu i skolzheniyu pri dvizhenii lokomotiva po krivym i pri izvilistom dvizhenii kolesnoy pary [The ratio between the rolling resistance and slip during motion of the locomotive on curves and twisting motion of the wheelset]. *Problemy trybolohii – Problems of Tribology*, 2013, no. 1, pp. 43-46.
9. Schulte-Werning B., Asmussen B., Behr W., Degen K.G., Garburg R. Advancements in Noise and Vibration Abatement to Support the Noise Reduction Strategy of Deutsche Bahn. Proc. of the 10th Intern. Workshop on Railway Noise, Nagahama, Japan, 2010, pp. 9-16.
10. Ling X.Zh., Chen S.-J., Zhu Zh.-Y., Zhang F. Field monitoring on the train-induced vibration response of track structure in the Beiluhe permafrost region along Qinghai–Tibet railway in China. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, vol. 60, issue 1, pp. 75-83. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.08.005.
11. Kik W., Piotrowski J. A Fast Approximate Method to Calculate Normal Load at Contact between Wheel and Rail and Creep Forces During Rolling. Proc. of 2nd Mini Conf. Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (29.07–31.07.1996). Budapest, 1996, pp. 52-61.
12. Lakušić S., Ahac M. Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 2012, no. 19 (2), pp. 427-435.
13. Lee B., Chau W., Lam J., Yeung M. Planning and Controlling Railway Noise in a Metropolis: Our Practical Experience. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 2012, vol. 118, pp. 17-23. doi: 10.1007/978-4-431-53927-8_3.
14. Hisa T., Kanaya M., Sakai M., Hamaoka K. Rail and Contact Line Inspection Technology for Safe and Reliable Railway Traffic. *Hitachi Review*, 2012, vol. 61, no. 7, pp. 325-330.
15. Srolarski T.A., Tobe S. Rolling contacts. London, John Wiley & Sons, Ltd. Publ., 2000. 445 p. doi: 10.1002/9781118903001.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренком (Україна), д.т.н., проф.
Д. В. Лаухіним (Україна)*

Поступила в редколлегию 13.08.2015

Принята к печати 01.10. 2015