

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

В. П. ШПАЧУК
Т. О. СУПРУН
О. О. ЧУПРИНІН

МЕХАНІКА ПРОГИНІВ ТРАМВАЙНОЇ КОЛІЇ

МОНОГРАФІЯ

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2024

УДК 625.03:629.45
Ш83

Автори:

Шпачук Володимир Петрович, доктор технічних наук;
Супрун Тетяна Олександрівна, кандидат технічних наук;
Чупринін Олександр Олексійович, кандидат технічних наук

Рецензенти:

Самуся Володимир Ілліч, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Гірнича механіка» Національного гірничого університету (м. Дніпро);
Галкін Андрій Сергійович, доктор технічних наук, професор кафедри Транспортних систем і логістики Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано до друку Вченою радою ХНУМГ ім. О. М. Бекетова,
протокол № 1 від 31.08.2023*

Шпачук В. П.

Ш83 **Механіка прогинів трамвайної колії** : монографія / В. П. Шпачук, Т. О. Супрун, О. О. Чупринін ; [за заг. ред. В. П. Шпачука] ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 130 с.

ISBN 978-966-695-615-9

У монографії наведено дослідження особливостей взаємодії трамвайного вагона та рейкової колії з урахуванням чотирьох фаз руху через стикову нерівність шляху. Побудовано статичні, ударні і динамічні моделі транспортного комплексу «вагон – рейкова колія» для кожної фази руху з урахуванням завантаження вагона, геометричних і механічних характеристик рейки, стикових накладок, шпал і баластового шару.

Призначено для фахівців і науковців, викладачів, аспірантів і студентів, які спеціалізуються в галузі механічної взаємодії вагона і рейкової колії, динаміки рейкових транспортних засобів.

УДК 625.03:629.45

ISBN 978-966-695-615-9

© В. П. Шпачук, Т. О. Супрун,
О. О. Чупринін, 2024
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ У СФЕРІ МЕХАНІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ВАГОНА ТРАМВАЯ З ВЕРХНЬОЮ БУДОВОЮ КОЛІЇ НА ДІЛЯНКАХ З ІЗОЛЬОВАНИМИ СТИКОВИМИ НЕРІВНОСТЯМИ	7
1.1 Аналіз методів дослідження статичної, ударної і динамічної взаємодії з верхньою будовою колії в місцях з ізольованими стиковими з'єднаннями	7
1.2 Засоби виміру висоти сходинки рейкових стиків, їхня ефективність використання	10
1.3 Постановка завдання дослідження	14
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СТАТИЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТРАМВАЙНОГО ВАГОНА З РЕЙКОВОЮ КОЛІЄЮ З УРАХУВАННЯМ ЗАВАНТАЖЕННЯ, ФАЗ РУХУ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ	16
2.1 Перша фаза руху трамвайного вагона через стикову нерівність	17
2.2 Взаємодія трамвайного вагона з колією на другій фазі руху	26
2.3 Статична взаємодія трамвайного вагона з колією на третій фазі руху	31
2.4 Рівні статичної взаємодії трамвайного вагона з колією на четвертій фазі руху	36
2.5 Аналіз результатів дослідження статичної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією і висновки за розділом 2	41
РОЗДІЛ 3 УДАРНИЙ ІМПУЛЬС ТА ПІСЛЯУДАРНА ШВИДКІСТЬ ПРИЙМАЛЬНОЇ РЕЙКИ	46
3.1 Дослідження процесів ударної взаємодії в механічній системі «трамвайний вагон – рейкова колія»	46

3.2 Ударно-динамічна взаємодія транспортного засобу з рейковою колією в зоні стикової нерівності	52
3.3 Аналіз результатів дослідження ударної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією і висновки за розділом 3	59
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ПРОГИНІВ ПРИЙМАЛЬНОЇ РЕЙКИ ПІД ПЕРШОЮ ШПАЛОЮ В ЗОНІ СТИКОВОЇ НЕРІВНОСТІ ...	63
4.1 Дослідження динамічних прогинів приймальної рейки на першій фазі руху трамвайного вагона	64
4.2 Динамічна взаємодія трамвайного вагона з колією на другій фазі руху	76
4.3 Динамічні прогини приймальної рейки на третій фазі руху трамвайного вагона	82
4.4 Динамічні прогини приймальної рейки на четвертій фазі руху трамвайного вагона	88
4.5 Метод послідовного статично-ударно-динамічного розрахунку параметрів механічної взаємодії трамвайного вагона і рейкової колії в зоні стику	95
4.6 Аналіз результатів дослідження динамічної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією і висновки за розділом 4	98
РОЗДІЛ 5 СТВОРЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРУ ВИСОТИ РЕЙКОВИХ СТИКІВ, ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХНІХ ПРИНЦИПІВ ДІЇ.....	104
5.1 Пристрій для виміру висоти рейкових стиків електромеханічного принципу дії	105
5.2 Спосіб технічної реалізації пристрою для виміру висоти рейкових стиків колії з урахуванням фаз руху вагона	112
5.3 Висновки за розділом 5	117
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	119
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	122

ВСТУП

У сучасних умовах експлуатації рейкового транспорту особлива увага приділяється удосконаленню його конструкції, а також підвищенню показників надійності та експлуатаційних властивостей рухомого складу. Саме тому на електричному транспорті до особливо важливих на сучасному етапі розвитку відносяться науково-технічні роботи та дослідження, пов'язані з вирішенням завдань, що присвячені проблемі забезпечення надійності комплексу трамвайний вагон – рейка, тобто проблемі механічної взаємодії в системі «трамвайний вагон – рейкова колія».

Під час руху трамвайного вагона його вузли та агрегати піддаються впливу динамічних сил взаємодії, що виникають між вагонами та візками, колісними парами візків та верхньою будовою колії. Вони змінюються як за часом, так і за напрямом та мають ударний характер. Практика показує, що однією з істотних технічних причин коливань трамвайного вагона та прогинів зв'язаних із ним в єдину механічну систему рейкової колії, є нерівності рейки, що утворюються через змінну жорсткість по довжині верхньої будови колії та нерівномірного накопичування в ній залишкових деформацій. Вирішення завдань, пов'язаних із дослідженням практичного застосування науки про механічну взаємодію рухомого складу та рейкового шляху істотно впливає на розвиток електричного транспорту, безпеку руху трамвайних вагонів, величину допустимої швидкості руху, а також на пропускну та провізну здатність станцій, на економіку утримання рухомого складу та рейкового шляху, умови габаритної прохідності рухомого складу та інше.

Найслабшою частиною рейкового шляху є ізольовані стикові нерівності, що відносяться до рейкових стиків. При цьому деформаційні характеристики баластового шару під опорами рейок (параметри пружної і залишкової осадки) регламентують зрештою технічний ресурс та тривалість його експлуатації.

Тому особливу актуальність набувають дослідження процесів механічної взаємодії в системі «трамвайний вагон – рейкова колія», встановлення на базі аналізу отриманих результатів нових закономірностей, що враховують особливості їхньої статичної, ударної і динамічної взаємодії з урахуванням експлуатаційних, конструктивних і механічних параметрів трамвайного вагона та верхньої будови шляху, а також фази руху трамвайного вагона через зону стику. Це визначило тему дослідження, її мету і завдання.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ У СФЕРІ МЕХАНІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ВАГОНА ТРАМВАЯ З ВЕРХНЬОЮ БУДОВОЮ КОЛІЇ НА ДІЛЯНКАХ З ІЗОЛЬОВАНИМИ СТИКОВИМИ НЕРІВНОСТЯМИ

1.1 Аналіз методів дослідження статичної, ударної і динамічної взаємодії з верхньою будовою колії в місцях з ізольованими стиковими з'єднаннями

Світовий досвід показує, що у механічному комплексі «вагон трамвая – рейкова колія» вказані в роботах [3–20] показники надійності й довговічності залежать від особливостей спільної роботи рухомого складу та колії, типу рухомого складу, типу рейок та шпал, умов експлуатації механічної системи, що розглядається. Також від здатності протистояти руйнуючій дії виникаючих ударних і вібраційних навантажень [21, 22], які мають циклічно повторювальний характер.

Відомо також, що найбільший рівень осадження баластового шару виникає під першою шпалою приймальної рейки. Це пов'язано з тим [20, 22, 60], що у цих місцях перша шпала під приймальною рейкою зазвичай зазнає найбільшу силову взаємодію між трамвайним вагоном і верхньою будовою колії, завдяки їхньому ударному впливу. Таким чином, прогин приймальної рейки під першою особистою шпалою виявляється істотним показником, що відповідає особливостям механічної взаємодії приймальної рейки колії під час дослідження статичної, ударної і динамічної взаємодії з верхньою будовою колії в місцях з ізольованими стиковими з'єднаннями шляху.

На сьогодні питанню про взаємодію верхньої будови колії та вагона транспортного засобу присвячена велика кількість робіт вітчизняних [15–19, 23] та закордонних [3–12, 24–30] вчених.

Однак, наприклад, у роботах [15–19, 33] розглядаються процеси механічної взаємодії в системі «вагон – рейкова колія» лише з урахуванням

руху транспортного засобу на безстикових ділянках шляху, тобто без урахування існуючих небезпечних зон зі стиковими нерівностями.

У роботах [18–19, 22] також не враховуються граничні умови для приймальної рейки, що залежать від пружних характеристик віддавальної рейки й стикових накладок. Це на практиці не відповідає умовам реального механічного навантаження трамвайного вагона, ділянок віддавальної і приймальної рейок, які розташовані в зонах стиків шляху, а також начіпних агрегатів. Тому величини швидкості трамвайного вагона, що визначаються в дослідженнях, виявляються віртуальними, й не можуть бути прийнятими як достовірні.

У роботах відомих вчених [34] розглядається присутність стикової нерівності у відповідній зоні шляху. Тут також розрахунок динамічного поведження рейок виконується за допомогою поняття «зведена маса рейки». При цьому параметр «зведена маса» визначається залежно від типу рейки. Однак, у зазначених роботах не враховуються параметри динамічного процесу [22, 35–41], що виникають під час ударної взаємодії колеса трамвайного вагона з торцем приймальної рейки у конструктивному комплексі «віддавальна рейка – торцева накладка – приймальна рейка», тому що приймається змінність параметрів жорсткості рейки шляху без урахування реального процесу згину віддавальної і приймальної рейок, які з'єднані рейковими накладками, що деформуються. Також відсутні дослідження залежності параметрів ударного імпульсу та післяударної швидкості колеса візка, що проїжджає стикову нерівність шляху від таких факторів: висоти стику типу «зазор – ступінь вгору»; завантаження трамвайного вагона; конструктивних й експлуатаційних параметрів транспортного засобу [22, 40, 41].

У цій роботі розглядається стик типу «зазор – ступінь вгору», координата ударного імпульсу від колеса трамвая до приймальної рейки приймається на рівні $l^* = 0$ (див. розділ 2 роботи), що відповідає реальному навантаженню стику колії при працюючих стикових накладках. Також приймається, що при ударі колеса об ребро приймальної рейки не відбувається його відрив, а також

ковзання відносно рейки. Базовим, суттєвим і відмінним в науковому плані є розглядання вагона трамвая в зоні стикової нерівності як багатовимірної дискретно-континуальної системи на двадцяти чотирьох (23 шпали і стикова накладка) пружних опорах.

Для аналізу взаємодії рухомого складу і верхньої будови колії виявляється необхідність вирішення кількох, пов'язаних між собою завдань. Зокрема статичного, ударного і динамічного. Останнім часом цим питанням приділяється велика увага і з'являється достатня кількість нових досліджень у цій сфері [42].

Крім того, контактне завдання та напружений стан при контакті коліс екіпажу з рейкою шляху, а також механічна модель, що відповідає цим процесам, не можуть бути використані під час розгляду контакту зосередженої маси та багатопролітної балки. Це дає підставу для розвитку подальших досліджень у сфері моделювання контакту трамваю і колії.

Зараз значні кошти вкладаються в транспортну інфраструктуру багатьох країн світу. Зокрема і рейковий шлях. 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 проєктування і експлуатації, наприклад, втоми, руйнування баласту, комфорту їзди, шуму або вібрації. Для забезпечення комплексного підходу повинен бути розроблений один інструмент, або декілька обчислювальних інструментів, які інтегровано розглядають окремі аспекти конструкції. Такий засіб може бути використано для оцінки поведінки залізничних шляхів комплексно [6]. Традиційно під час проєктування рейкового шляху використовуються консервативні передумови, і, отже, у проєкти вносяться лише невеликі зміни. У той же час деякі методи розрахунку й аналізу були розроблені, щоб описати модель і прогнозувати поведінку структури. Зокрема, аналіз моделі виконується методом скінчених

елементів з використанням комерційних програмних комплексів [39], що вимагає істотних фінансових витрат під час проєктування.

Метод скінчених елементів використовується також для моделі баластного шару, який є важливим елементом конструкції шляху. Рейка передає навантаження від колеса трамвая на ґрунт, на якому споруджений шлях. Отже, у деяких країнах зараз використовуються залізобетонні дорожні шляхи [25], вартість будівництва яких вище порівняно зі стандартною баластовою конструкцією шляху. Однак, витрати на обслуговування плити шляху значно менше тих, у яких використовується баластовий шар. Іншим шляхом є збільшення товщини баластового шару, що призводить до зменшення прогину під навантаженням і викликає менші напруження в ґрунтовій основі. Водночас підвищується продуктивність і тривалість експлуатації шляху. Це зумовлює подальші пошуки адекватної моделі рейкового шляху як сукупності різних елементів. Зокрема, рейок, шпал та баластового шару.

1.2 Засоби виміру висоти сходинки рейкових стиків, їхня ефективність використання

У цьому розділі розглянуто й проаналізовано способи технічної реалізації, а також схемні рішення відомих пристроїв, встановлено їхні недоліки, що обмежують сферу застосування вимірювачів.

Відомий пристрій для виміру рейкових стиків – стиковимірник, що містить двохосьовий шляховий візок, на якому встановлені джерела випромінювання, імпульсні фотоелектричні перетворювачі, фотоприймачі, а також мультиплікатор, розташований на осі вимірювальної колісної пари і з'єднаний вхідним валом із ходовими дисками лівого і правого перетворювачів, пристрій зчитування і реєстратор. Джерела випромінювання і фотоелектричні перетворювачі розміщені паралельно бічним граням голівки лівої і правої рейки на рівні стикових накладок.

Недоліком цього пристрою є низька ефективність завдяки обмеженій сфери застосування тільки на відособлених залізничних і трамвайних коліях, що не розташовані в границях проїзної частини вулиць. Крім того, цей стиковимірник не забезпечує вимір перепаду висот між поверхнями катання сусідніх торців стику, тобто висоти стикової нерівності.

Вказаними недоліками характеризується також пристрій, який описано у патенті [24]. Разом із тим він включає шляховий візок, на платформі якого змонтовано лазерний вимірювач та контролер для фіксації отриманих даних ширини стику рейкової колії.

У пристрої для виміру і контролю геометричних параметрів рейкових стиків, що містить змонтовані на рамі транспортного засобу вимірник пройденого шляху, датчик клемно-болтового з'єднання стику, ідентичні правий і лівий канали виміру геометричних параметрів стику, виходи яких через граничний пристрій з'єднані з блоком реєстрації. Тут кожен канал виміру містить послідовно з'єднані датчик рейкового стику, що включає П-подібне осердя із закріпленими на ньому котушкою збудження, вимірювальною котушкою і діодним мостом. Водночас виходи вимірника пройденого шляху, а також датчика клемно-болтового з'єднання стику з'єднані з входами блока реєстрації.

До недоліків цього пристрою потрібно віднести низьку ефективність, тому що не забезпечується вимір і контроль геометричних параметрів стику, тобто його висоти і ширини, а функціональні можливості його обмежені тільки реєстрацією наявності стикової нерівності на встановленій довжині шляху, визначенням при повторному проїзді по різниці відстані між стиком і найближчим клемно-болтовим з'єднанням ступеня зсуву рейки в подовжньому напрямку.

Відомий також пристрій [43] для виміру висоти рейкових стиків залізничної і трамвайної колій, що містить двовісний шляховий візок, на платформі якого змонтовані вимірник пройденого візком шляху, лівий і правий канали виміру геометричних параметрів стику, виходи яких через

обчислювальний пристрій з'єднані з блоком реєстрації, причому кожен канал виміру містить послідовно з'єднані датчик механічного контакту колеса з рейкою, вимірювальний перетворювач, нуль-орган, лічильник часу і керувальний ключ, вхід якого з'єднаний з виходом нуль-органа. Тут датчик механічного контакту встановлено на колесі вимірювальної колісної пари шляхового візка. Він виконаний безпроводним, а кожне колесо вимірювальної колісної пари виконано електромагнітно ізолюваним від шляхового візка.

Недоліком відомого пристрою є низька ефективність через обмежену сферу застосування тільки виміром висоти стику типу «зазор – ступінь вниз», коли в зоні стику поверхня катання віддавальної рейки розташовується винятково вище поверхні катання приймальної рейки, що і забезпечує особливий балістичний рух колеса вимірювальної колісної пари шляхового візка при переїзді стикової нерівності.

У пристрої для контролю нерівностей на поверхні катання рейок, що містить встановлені на вагоні-шляховимірнику вимірник пройденого шляху, правий і лівий канали виміру геометричних параметрів стику, виходи яких з'єднані з блоком реєстрації. Кожен канал виміру містить послідовно з'єднані датчик вертикального прискорення, встановлений на буксі колісної пари, підсилювач, фільтр у вигляді блока інтегрування, релейний перемикач, суматор, обчислювальний блок, що містить послідовно з'єднані випрямляч і фільтр, перший і другий ключ, перший і другий портовий елемент. Керувальні входи першого і другого ключів з'єднані з виходом датчика стику рейок відповідно безпосередньо і через інвертор, а релейного перемикача – з виходом дешифратора, з'єданого входом з виходом вимірювача швидкості вагона.

Недоліком цього пристрою є низька ефективність, тому що не забезпечується вимір висоти стику, а функціональні можливості його обмежені тільки реєстрацією наявності стикової нерівності на встановленій довжині шляху.

Також відомий пристрій для вимірювання висоти рейкових стиків залізничної і трамвайної колій [44], що містить двохосьовий візок, на платформі якого змонтовані блок реєстрації, вимірник шляху, правий і лівий канали

виміру, кожен з яких містить датчик рейкового стику, П-подібне осердя з котушкою збудження і вимірювальною котушкою.

Недоліком цього пристрою є низька ефективність, тому що не забезпечується вимір висоти стику, яка є найбільшою серед тих, що виникли під час проходження вагоном-шляховимірником стикової нерівності, враховуючи залежність висоти стику від номера колісної пари, до якої належить колесо, що проходить крізь стик, а саме від кількості коліс, які розташовуються в момент проходження вагоном-шляховимірником стику на віддавальній та приймальній рейках стику, а функціональні можливості його обмежені виміром і реєстрацією на встановленій довжині шляху висоти стикової нерівності тільки в момент проходження стику колесом першої колісної пари вагона-шляховимірника.

Відомі також спосіб й засіб вимірювання нерівностей залізничного шляху, який використовується для нерівностей рейок за рівнем. Відповідно до патенту спосіб використовує сигнали лазерного гороскопу, що розміщено або на візку, або на самому вагоні.

Недоліком цього способу, а також пристрою, що реалізовано, є обмеженість функціональних можливостей для стиків і коротких нерівностей, враховуючи, що перший вимірник розміщено на буксі колісної пари, а другий на візку. Також використання гіроскопів для виміру кута нерівності шляху знижує достовірність результатів, тому, що вони не враховують поточні коливання дискретно-континуальної системи «вагон – візок – букса – колесо – рейка».

У відомому способі дистанційного акустичного контролю рейкового рухомого складу під час руху [45] визначають параметри взаємодії вагона та верхньої будови колії за допомогою хвиль звукового діапазону по каналу GPS/GSM/GPRS.

Разом із тим, що є недоліком, спостерігається функціональна обмеженість засобу лише ідентифікацією наявності нерівностей типу: повзун, навар, а також щербина. Крім того, розміщення сенсора засобу на корпусі вагона призводить

до неоднозначності параметрів контролю через просторові коливання останнього як твердого тіла.

Відомі також спосіб та пристрій вимірювання дефектів рейкової нитки залізничного шляху [4], які засновані на використанні ультразвукових хвиль.

Тут пристрій включає вагон-шляховимірник, шляховий візок, виконаний у вигляді платформи з встановленими основними приладами, які генерують і випромінюють високочастотні хвилі, та додатковими вузлами, що забезпечують контакт датчика ультразвукових коливань з головою рейки завдяки його одночасним вертикальним та поперечним переміщенням.

До недоліків вказаних способу та пристрою потрібно віднести залежність точності, а й відповідно і достовірності виміру параметрів стикової нерівності від реально існуючих вертикальних і горизонтальних коливань датчика перетворювача при сумісному просторовому русі вагона і візка.

Аналіз функціональних можливостей й ефективності розглянутих у огляді методів та засобів виміру стикових нерівностей рейкового шляху також показує, що не забезпечується вимір та реєстрація висоти стику, яка є найбільшою серед виниклих під час проходження вагоном-шляховимірником стикової нерівності, враховуючи залежність висоти стику від номера колісної пари, до якої належить колесо, що проходить крізь стик [34–40, 46].

Тому завдання створення пристроїв виміру висоти сходинки рейкових стиків колії потрібно віднести до інноваційного типу, а розробку їхніх сучасних способів технічної реалізації визнати актуальною.

1.3 Постановка завдання дослідження

Проведений аналіз стану питання показав, що зараз постановка завдання дослідження впливу експлуатаційних, конструктивних і механічних параметрів трамвайного вагона та верхньої будови шляху на статичні і динамічні прогини колії під першою шпалою приймальної рейки з урахуванням фаз руху в зоні

стикової нерівності, а також удосконалення способів технічної реалізації засобів контролю висоти стику, є актуальною.

Загальна постановка завдання, вирішуваного в цій монографії, сформульована у такий спосіб:

- на базі методів системного підходу, теоретичної й аналітичної механіки, опору матеріалів, теорії моделювання та перетворень Лапласа – Карсона виконати розрахунки статичного й динамічного прогинів рейок шляху. Використати при цьому метод Рунге – Кутта, а також математичний пакет Maple. Графічне подання результатів здійснити за допомогою пакетів Maple, MathCad і у програмному середовищі Delphy;

- створити метод послідовного статично-ударно-динамічного розрахунку механічної взаємодії у дискретно-континуальних системах. Метод повинен забезпечувати визначення прогинів приймальної рейки шляху під першою шпалою на фазі його зростання, а також враховувати фази руху трамвайного вагона відносно стикової нерівності;

- дослідити вплив фаз руху трамвайного вагона на висоту стику за варіювання експлуатаційних, конструктивних і механічних параметрів трамвайного вагона та верхньої будови шляху;

- встановити залежності висоти стикової нерівності від фаз руху трамвайного вагона, які враховують поточні кількісні характеристики розташування колісних пар відповідно на віддавальній та приймальній рейках шляху;

- удосконалити динамічну модель прогинів приймальної рейки під першою шпалою на фазі зростання, що враховує характеристики жорсткості і демпфірування пружної підвіски трамвайного вагона, баластового шару, а також кількісні параметри зведених мас коліс, які відповідають фазі руху трамвайного вагона;

- проаналізувати особливості впливу експлуатаційних, конструктивних і механічних параметрів трамвайного вагона та верхньої будови шляху на прогини приймальної рейки під першою шпалою на фазі зростання;

- розробити інноваційні способи технічної реалізації пристроїв для виміру висоти рейкових стиків й дослідити їх принципи дії.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СТАТИЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТРАМВАЙНОГО ВАГОНА З РЕЙКОВОЮ КОЛІЄЮ З УРАХУВАННЯМ ЗАВАНТАЖЕННЯ, ФАЗ РУХУ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ

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

Для досягнення зазначеної мети дослідження були поставлені такі завдання.

1. Створити метод розрахунку параметрів взаємодії чотиривісного трамвайного вагона і рейкової колії на базі комплексного підходу та загальних співвідношень механіки з урахуванням фаз руху вагона через стикову нерівність. Він повинен визначати особливості процесів механічної взаємодії за одночасного врахування конструктивних та експлуатаційних факторів: параметрів жорсткості баластового шару шляху та стикових накладок, а також умов закріплення віддавальної та приймальної рейок на кінці.

2. Методами чисельного аналізу встановити і проаналізувати стосовно транспортного системного дискретно-континуального механічного комплексу «трамвайний вагон – рейкова колія, у місці стикового з'єднання» характеристики статичної взаємодії. При цьому враховувати експлуатаційні, механічні і геометричні параметри транспортного засобу, рейки, стикових накладок, шпали і баластового шару, а поточну висоту стику шляху визначити з урахуванням пружних ліній рейок, завантаження яких відповідає власній фазі руху трамвайного вагона.

3. Визначити нові закономірності взаємодії трамвайного вагона й рейкової колії під час проходження стикової нерівності. Це дозволяє здійснити

вдосконалення експлуатаційних характеристик трамвайного вагона і верхньої будови колії шляхом раціонального вибору.

Розглядається узагальнена механічна схема трамвайного вагона. Під час моделювання враховуються конструктивні параметри і завантаження транспортного засобу, умови з'єднання віддавальної і приймальної рейок між собою через стикову рейкову накладку, а також жорсткість баластового шару шляху. Враховуючи узагальненість механічної схеми дискретно-континуальної системи «трамвайний вагон – рейкова колія, на ділянці з ізольованою стиковою нерівністю» у цій роботі дослідження виконано на базі трамвайного вагона ТЗ. Отримані результати є універсальними й поширюються на вагони будь-якого призначення. Розглянуто проходження трамвайним вагоном стикової нерівності шляху на чотирьох фазах руху. На першій фазі всі колісні пари трамвайного вагона розташовуються на віддавальній рейці, на другій фазі – на ній залишається три, на третій – дві і на четвертій лише одна.

2.1 Перша фаза руху трамвайного вагона через стикову нерівність

Особливість першої фази руху трамвайного вагона через стик рейкової колії: на віддавальній рейці знаходяться всі колеса транспортного засобу.

Схема проходження рейкового стику першою колісною парою трамвайного вагона зображена на рисунку 2.1. Тут: 1 – вагон транспортного засобу, 2–5 – відповідне колесо колісної пари; 6–7 – центральна підвіска вагона; 8 – приймальна рейка; 9 – віддавальна рейка; 10 – пружні елементи баластового шару під шпалами; 11 – пружний елемент, який моделює жорсткість віддавальної рейки на кінці. Це відповідає розрахунковій схемі багатопролітної балки на пружних опорах [35, 41].

Під час статичного розрахунку прогинів рейки використовується модель багатопролітної балки на 24-х пружних опорах (23 шпали і далі – спирає на сусідню рейку через працюючу двоголову накладку [41]. Для розрахунку жорсткості рейки (c_p) визначається її прогин на кінці δ_p під дією одиничної

сили, тоді: $c_p = \frac{1}{\delta_p}$. Враховуючи з'єднання працюючої накладкою з жорсткістю c_n віддавальної і приймальної рейок, отримаємо жорсткість рейки на кінці:

$$c_{p.к.} = \frac{c_p \cdot c_n}{c_p + c_n}. \quad (2.1)$$

Це дозволяє розрахувати характеристики пружних опор, на які спирається рейка з урахуванням особливості з'єднання рейок між собою.

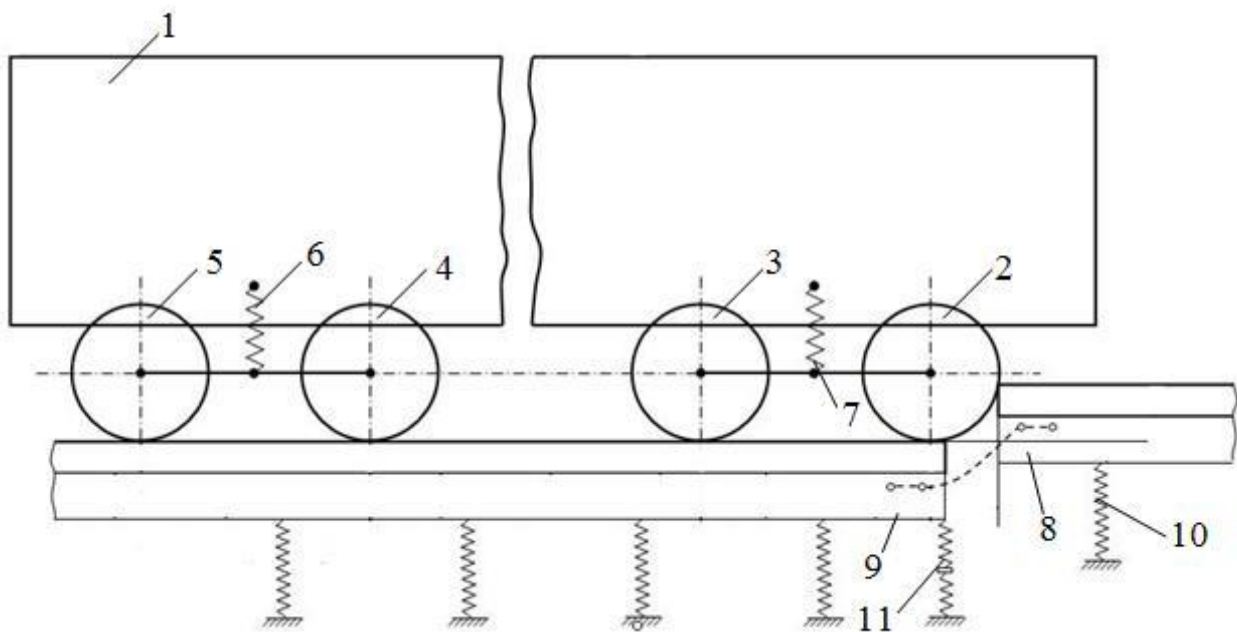


Рисунок 2.1 – Механічна схема першої фази руху трамвайного вагона

Далі розглядаються прогини рейки на 24-х пружних опорах. На віддавальній рейці задаються чотири зосереджені сили, що відповідає кількості коліс трамвайного вагона на ній.

Розглянемо постановку статично невизначуваної задачі деформування багатопролітної (нерозрізної) балки на пружних опорах [22, 46].

У розрахунковій схемі «пружна» модель передбачає основу, яка симетрично пручається навантаженням (як стиску так і розтягуванню), що не відповідає реальній основі, яка не може утримати балку від відриву. Однак, при гравітаційній дії зосереджених сил, відповідній фазі трамвайного вагона, що припадає на колеса, у балці відрив не здійснюється [33, 41].

Головними силовими факторами, що визначають статичний прогин приймальної рейки під першою пружною опорою є постійні за величиною зовнішні сили P_0 . Вони відповідають поточній кількості колісних пар на рейках, прикладених до віддавальної рейки (рис. 2.2), та мають координати X_{Bj} , де $j = 1, 2, 3, 4$ – номер колісної пари вагона.

На рисунку 2.2:

$l_i (i = 1 \div 24)$, $l_{24} = l_{p.k.}$ – геометричні координати пружних опор;

$P_0 = \frac{P}{8}$ – навантаження збоку трамвайного вагона, що припадає на одне

колесо;

P_0 – вага трамвайного вагона з урахуванням його завантаження;

$F_{np1\phi} = h_{B1\phi} \cdot c_{p.k.}$ – сила пружності, що прикладається на першій фазі руху

трамвайного вагона до кінця приймальної рейки з боку віддавальної рейки на кінці за $x = l_{p.k.} = 12,5$ м;

$h_{B1\phi}$ – прогин віддавальної рейки на кінці на першій фазі руху трамвайного вагона;

Q_0, M_0 – поперечна сила і згинальний момент на початку координат;

c – жорсткість баластового шару під шпалою верхньої будови шляху. Тут

$X_{B4} = 4,2$ м; $X_{B3} = 6,1$ м; $X_{B2} = 10,6$ м; $X_{B1} = 12,5$ м; $l_1 = 0,21$ м; $l_2 = 0,759$ м;
 $l_3 = 1,308$ м; $l_4 = 1,857$ м; $l_5 = 2,406$ м; $l_6 = 2,955$ м; $l_7 = 3,504$ м; $l_8 = 4,053$ м;
 $l_9 = 4,602$ м; $l_{10} = 5,151$ м; $l_{11} = 5,7$ м; $l_{12} = 6,249$ м; $l_{13} = 6,798$ м; $l_{14} = 7,347$ м;
 $l_{15} = 7,896$ м; $l_{16} = 8,445$ м; $l_{17} = 8,994$ м; $l_{18} = 9,543$ м; $l_{19} = 10,092$ м; $l_{20} = 10,641$ м;
 $l_{21} = 11,19$ м; $l_{22} = 11,739$ м; $l_{23} = 12,288$ м; $l_{p.k.} = 12,5$ м.

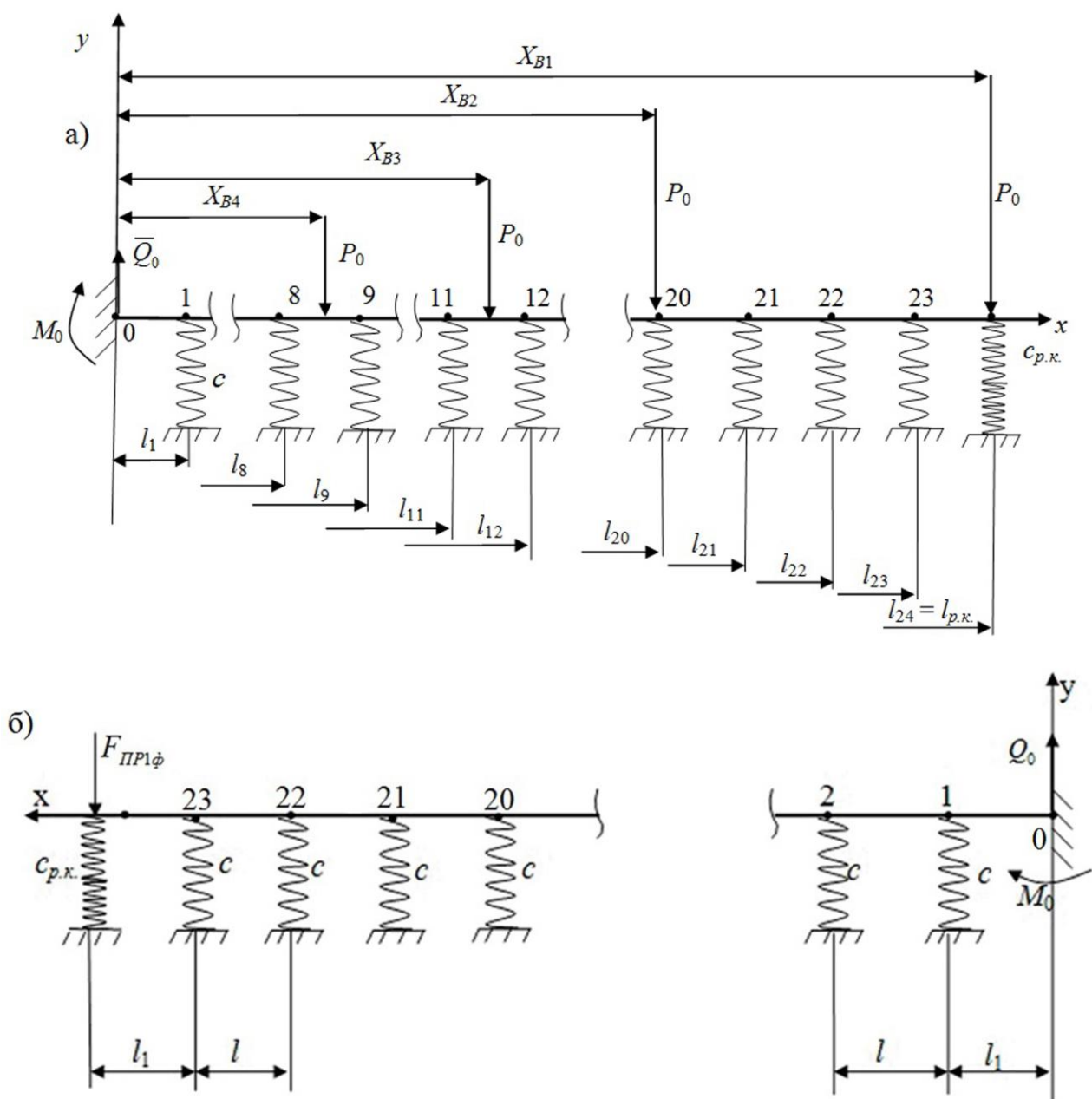


Рисунок 2.2 – Механічна схема розрахунку прогинів на першій фазі руху трамвайного вагона для віддавальної (а) та приймальної (б) рейок

Рівняння вигнутої осі рейок на першій фазі руху запишемо, використовуючи метод початкових параметрів [47], з урахуванням умов їх закріплення ($y_0 = y'_0 = 0$):

віддавальна рейка:

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - \sum_{j=1}^4 P_0 \frac{(x - x_{Bj})^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} c y_i \frac{(x - l_i)^3}{6} + c_{p.k.} h_B \frac{(x - L)^3}{6} \right]; \quad (2.2)$$

приймальна рейка:

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - F_{np1\phi} \frac{(x-L)^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} cy_i \frac{(x-l_i)^3}{6} + c_{p.k.} h_{II} \frac{(x-L)^3}{6} \right], \quad (2.3)$$

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

Пружні лінії віддавальної і приймальної рейок на першій фазі руху наведено на рисунку 2.3, де y_{B1} , y_{B2} , y_{B3} , y_{B4} , y_{23} , $h_{II\phi}$ – прогини рейок відповідно під колесами трамвайного вагона віддавальної рейки, першою шпалою і кінці приймальної рейки.

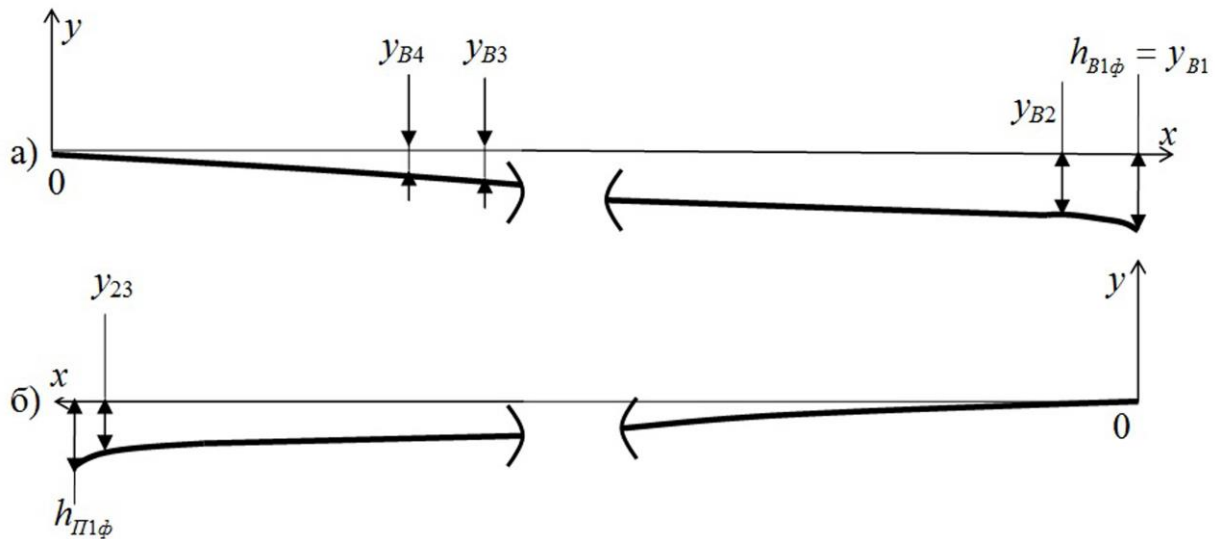


Рисунок 2.3 – Пружні лінії на першій фазі руху трамвайного вагона:

а – віддавальна рейка; б – приймальна рейка

З визначених пружних ліній віддавальної і приймальної рейок розраховується поточна величина висоти стикової нерівності на першій фазі руху трамвайного вагона

$$h_{1\phi} = h_{II\phi} - h_{B1\phi}, \quad (2.4)$$

де $h_{II\phi}$, $h_{B1\phi}$ – прогини приймальної і віддавальної рейок на кінцях, відповідно за $x = 12,5$ м, тобто $h_{B1\phi} = y_B(l_{p.k.})$, $h_{II\phi} = y_{II}(l_{p.k.})$.

З урахуванням того, що вирази (2.2) і (2.3) містять в правій частині доданки, які також залежать від прогинів, розв'язання цих рівнянь виконано чисельно.

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

На першому етапі за виразом (2.1) розраховується жорсткість $c_{p.к.}$ рейки на кінці за $c_n = 3,2 \cdot 10^6$ Н/м, де $c_p = \frac{1}{\delta_p}$, а δ_p – прогин рейки на кінці від одиничної сили $\bar{F} = 1$ без врахування стикових накладок, тобто при $c_n = 0$.

Відповідно до формули (2.2) прогин δ_p визначається як:

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - \bar{F} \frac{(x-l_{p.к.})^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} c y_i \frac{(x-l_i)^3}{6} + c_{p.к.} y_{24} \frac{(x-l_{p.к.})^3}{6} \right]. \quad (2.5)$$

Блок-схему розрахунку прогину рейки на кінці на першій фазі руху трамвайного вагона, відповідно до розрахункової механічної схеми на рисунку 2.2, а, показано на рисунку 2.4. Тут блок 2 – блок введення механічних, геометричних і граничних параметрів. 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. 2.2, а) із умов її статичної рівноваги:

$$Q_{01} = \bar{F}; \quad M_{01} = -\bar{F}l_{p.к.}. \quad (2.6)$$

Далі за виразом (2.5) розраховуються прогини $y_i(1, 24)$ рейки під відповідними пружними опорами на рисунку 2.2, 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} :

$$Q_{02} = \bar{F} - \sum_{i=1}^{23} cy_i - c_{p.k.} y_{24}; \quad M_{02} = -\bar{F} l_{p.k.} + \sum_{i=1}^{23} cy_i l_i + c_{p.k.} y_{24} l_{p.k.}, \quad (2.7)$$

де cy_i , $c_{p.k.} y_{24}$ – сили пружності відповідної опори рейки.

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



Рисунок 2.4 – Блок-схема розрахунку прогину рейки

Якщо похибка $\Delta = \max |y_{ij} - y_{i,j-1}|$, ($i=1, 24$) виявляється більшою за задане значення ε , тоді відбувається наступний цикл по j . У роботі 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 $c_p = \frac{1}{\delta_p}$ та $c_{p.k.}$ за виразом (2.1).

На другому етапі за алгоритмом етапу 1 розраховується величина прогину $h_{B1\phi}$ віддавальної рейки на кінці. При цьому блок 1 алгоритму матиме вигляд

Введення: статичного навантаження P_0 ; геометричних координат $l_i (i=1, 23)$; $l_{24} = l_{p.k.}$; $X_{Bj} (1, 4)$; механічних характеристик рейки E, J ; припустимого прогину ε ; жорсткості $c_{p.k.}$

Рівняння рівноваги (2.6) і (2.7) матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} Q_{01} &= 4P_0; \quad M_{01} = -\sum_{k=1}^4 P_0 X_{Bk}; \\ Q_{02} &= 4P_0 - \sum_{i=1}^{23} c y_i - c_{p.k.} y_{24}; \quad M_{02} = -\sum_{j=1}^4 P_0 X_{Bj} + \sum_{i=1}^{23} c y_i l_i + c_{p.k.} y_{24} l_{p.k.}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Прогин віддавальної рейки на кінці визначається за виразом (2.2) як $h_{B1\phi} = y_B(l_{p.k.})$ за досягнення умови $\Delta \leq \varepsilon$.

На етапі 3 під час розрахунку $h_{П1\phi}$ приймальної рейки на кінці блок 1 алгоритму має вигляд

Введення: статичного навантаження P_0 , геометричних координат $l_i (i=2, 23)$; $l_{24} = l_{p.k.}$; механічних характеристик рейки E, J ; припустимого прогину ε ; жорсткості $c_{p.k.}$

У цьому випадку рівняння рівноваги (2.6) і (2.7) будуть:

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

$$Q_{02} = -\sum_{i=1}^{23} c y_i - c_{p.k.} y_{24} + F_{np1\phi}; \quad M_{02} = \sum_{i=1}^{23} c y_i l_i + c_{p.k.} y_{24} l_{p.k.} - F_{np1\phi} l_{p.k.}. \quad (2.9)$$

Далі за формулою (2.3) визначається прогин приймальної рейки на кінці: $h_{п1\phi} = y_{п}(l_{p.k.})$. При цьому виконуватиметься умова $\Delta \leq \varepsilon$.

На етапі 4 методики за виразом (2.4) розраховується висота $h_{1\phi} = h_{п1\phi} - h_{в1\phi}$ стикової нерівності на першій фазі руху трамвайного вагона.

При цьому метод дослідження параметрів статичної механічної взаємодії трамвайного вагона і рейкової колії включає три етапи. По-перше, це етап побудови схеми проходження рейкового стику колісною парою з урахуванням фази руху трамвайного вагона. Другий етап – створення розрахункових схем пружних ліній віддавальної та приймальної рейок шляху й рівнянь визначення, що враховують фази руху. Останній етап – розробка блок-схеми визначення висоти стику, що виникає між рейками залежно від фаз руху й завантаження трамвайного вагона.

У таблиці 2.1 наведено залежність величини висоти стикової нерівності $h_{1\phi}$ на першій фазі руху трамвайного вагона від зведеної маси m вагона.

Таблиця 2.1 – Висота сходинок стиків рейкової колії на першій фазі руху трамвайного вагона

m , кг	2 125	2 294	2 463	2 632	2 800	3 138	3 307	3 476	3 645	3 814
$h_{1\phi}$, мм	2,60	2,68	2,77	2,88	3,03	3,21	3,39	3,55	3,72	3,89

Розрахунки виконано відповідно до механічної схеми трамвайного вагона і рейкової колії, яка наведена на рисунку 2.1, а також геометричних і механічних характеристик рейки Р-65 і трамвая Т-3 [41]: $E = 2,6 \cdot 10^{11}$ Н/м² – модуль пружності матеріалу рейки; $J = 3573$ см⁴ – момент інерції перерізу рейки відносно нейтральної осі; $c = 0,5 \cdot 10^8$ Н/м – жорсткість баластового шару

шляху. Зведена до одного колеса маса трамвайного вагона (порожнього) $m = 2125$ кг, а максимально (при 193 пасажирів) завантаженого – $m = 3814$ кг.

Встановлені значення величини сходинок $h_{1\phi}$ стику на першій фазі руху трамвайного вагона, які дозволяють з урахуванням його маси, завантаження і зведеної маси колеса визначити величину після ударної швидкості приймальної рейки на кінці (розділ 3 роботи) при розв'язанні задачі її динамічних прогинів в зоні розташування першої шпали (розділ 4 роботи).

2.2 Взаємодія трамвайного вагона з колією на другій фазі руху

Особливістю другої фази руху трамвайного вагона через стик рейкової колії є те, що на віддавальній рейці залишається три колісні пари, на приймальній – розташовується одна.

Схема проходження рейкового стику другою колісною парою трамвайного вагона зображена на рисунку 2.5, позначення відповідають механічній схемі на рисунку 2.1.

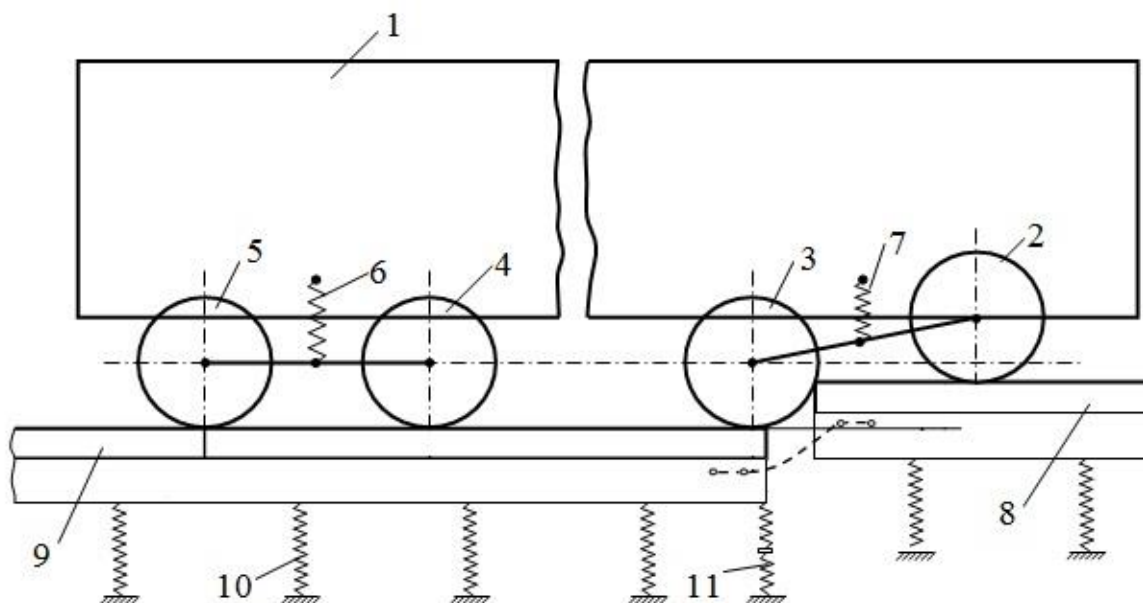


Рисунок 2.5 – Механічна схема на другій фазі руху трамвайного вагона

Силовими факторами, що визначають статичний прогин приймальної і віддавальної рейок, а також висоту стику, що відповідає другій фазі руху трамвайного вагона, є постійні за величиною зовнішні сили P_0 . Вони відповідають поточній кількості колісних пар на рейках і мають координати: для віддавальної рейки (рис. 2.6, а) X_{Bj} , де $j=2,3,4$ – номер колісної пари трамвайного вагона; для приймальної рейки (рис. 2.6, б) $X_{П1}$.

Позначення на рисунку 2.6 відповідають схемі (рис. 2.2) проходження трамвайним вагоном рейкового стику на першій фазі руху трамвайного вагона. Однак у цьому випадку: $F_{np2\phi} = h_{B2\phi} \cdot c_{p.к.}$ – сила пружності, що прикладається на другій фазі руху трамвайного вагона до кінця приймальної рейки з боку віддавальної рейки на кінці за $x = l_{p.к.} = 12,5$ м; $h_{B2\phi}$ – прогин віддавальної рейки на кінці на другій фазі руху трамвайного вагона; $X_{B4} = 6,1$ м; $X_{B3} = 8$ м; $X_{B2} = 12,5$ м; $X_{П1} = 1,9$ м.

Рівняння вигнутої осі рейок на другій фазі руху запишемо, використовуючи метод початкових параметрів з урахуванням умов їхнього закріплення ($y_0 = y'_0 = 0$):

віддавальна рейка:

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - \sum_{j=2}^4 P_0 \frac{(x - x_{Bj})^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} cy_i \frac{(x - l_i)^3}{6} + c_{p.к.} h_B \frac{(x - L)^3}{6} \right]; \quad (2.10)$$

приймальна рейка:

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - F_{np2\phi} \frac{(x - L)^3}{6} - P_0 \frac{(x - X_{П1})^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} cy_i \frac{(x - l_i)^3}{6} + c_{p.к.} h_{П} \frac{(x - L)^3}{6} \right]. \quad (2.11)$$

Пружні лінії віддавальної і приймальної рейок на другій фазі руху наведено на рисунку 2.7, де $y_{B2}, y_{B3}, y_{B4}, y_{П1}, y_{23}, y_{П2\phi}$ – прогини рейок відповідно

під колесами трамвайного вагона, першою шпалою приймальної рейки і кінці приймальної рейки.

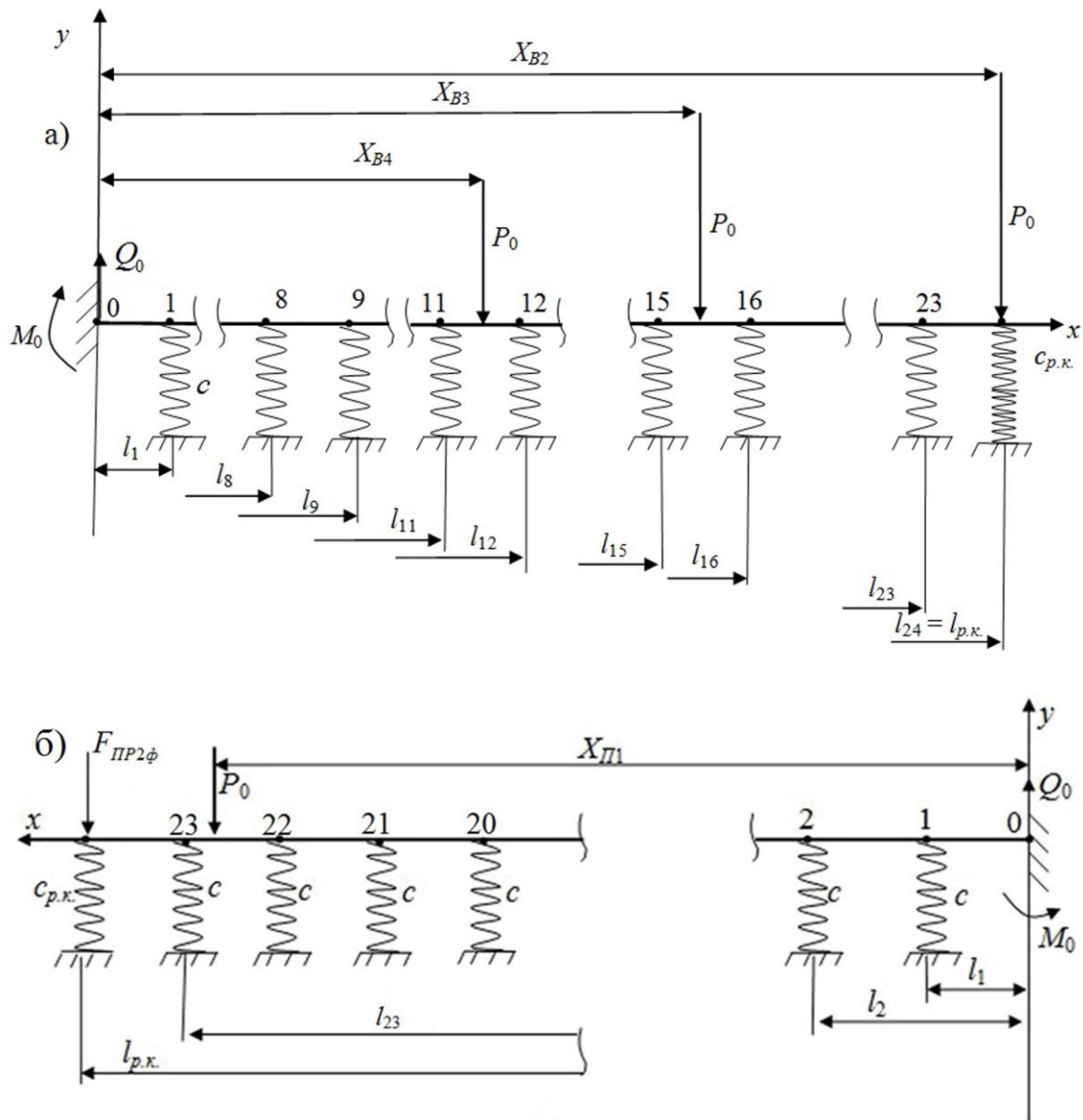


Рисунок 2.6 – Механічна схема розрахунку прогинів на другій фазі руху трамвайного вагона для віддавальної (а) та приймальної (б) рейок

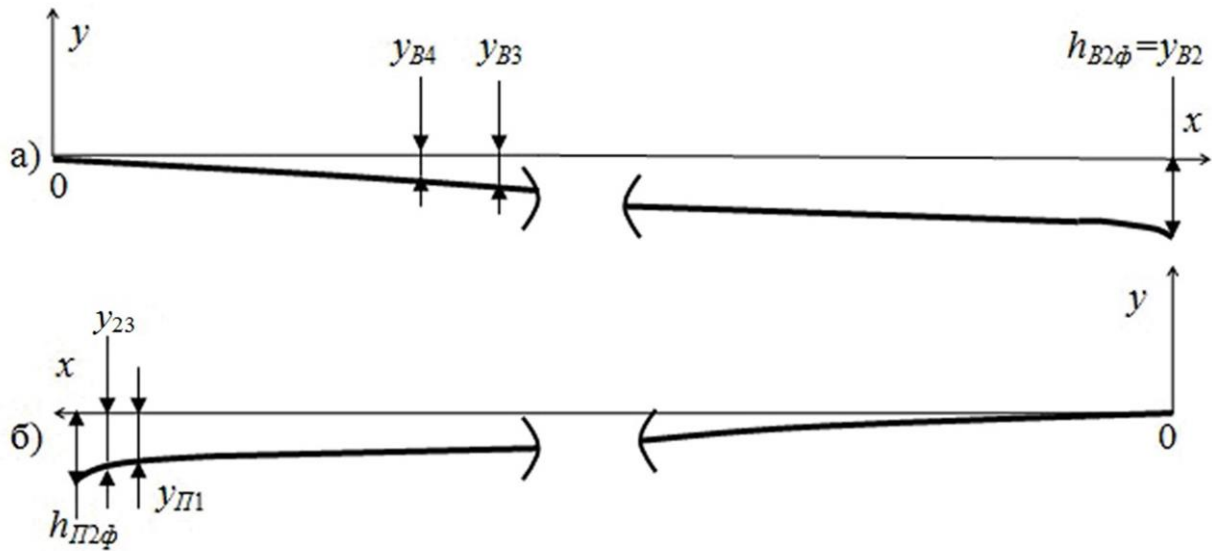


Рисунок 2.7 – Пружні лінії віддавальної (а) та приймальної (б) рейок на другій фазі руху трамвайного вагона

Далі розраховується поточна висота стикової нерівності

$$h_{2\phi} = h_{\Pi2\phi} - h_{B2\phi}, \quad (2.12)$$

де $h_{\Pi2\phi}$, $h_{B2\phi}$ – прогини приймальної і віддавальної рейок на кінцях, відповідно за $x = 12,5$ м, тобто $h_{\Pi2\phi} = y_{\Pi}(l_{p.k.})$, $h_{B2\phi} = y_B(l_{p.k.})$.

З урахуванням того, що вирази (2.10) і (2.11) містять в правій частині доданки, які також залежать від прогинів, розв'язання цих рівнянь виконано чисельно.

Далі за алгоритмом фази 1 (рис. 2.4) розраховується величина прогину $h_{B2\phi}$ віддавальної рейки на кінці. При цьому блок 1 алгоритму матиме вигляд

Введення: статичного навантаження P_0 ; геометричних координат $l_i (i=1,23)$; $l_{24} = l_{p.k.}$; $X_{Bj} (j=2,3,4)$; механічних характеристик рейки E , J ; припустимого прогину ε ; жорсткості $c_{p.k.}$

Рівняння рівноваги (2.8) на другій фазі руху трамвайного вагона матимуть вигляд:

$$Q_{01} = 3P_0; \quad M_{01} = -\sum_{j=2}^4 P_0 X_{Bj};$$

$$Q_{02} = 3P_0 - \sum_{i=1}^{23} cy_i - c_{p.k.} y_{24}; \quad M_{02} = -\sum_{j=2}^4 P_0 X_{Bj} + \sum_{i=1}^{23} cy_i l_i + c_{p.k.} y_{24} l_{p.k.}.$$

Прогин віддавальної рейки на кінці визначається за виразом (2.10) як $h_{B2\phi} = y_B(l_{p.k.})$ за досягнення умови $\Delta \leq \varepsilon$.

Під час розрахунку $h_{П2\phi}$ приймальної рейки на кінці блок 1 алгоритму матиме вид:

Введення: статичного навантаження P_0 , геометричних координат $l_i (i=1, 23)$; $l_{24} = l_{p.k.}$; $X_{П1}$; механічних характеристик рейки E, J ; припустимого прогину ε ; жорсткості $c_{p.k.}$

У цьому випадку рівняння рівноваги (2.6) і (2.7) будуть:

$$Q_{01} = P_0 + F_{np2\phi}; \quad M_{01} = -P_0 X_{П1} - F_{np2\phi} l_{p.k.};$$

$$Q_{02} = P_0 - \sum_{i=1}^{23} cy_i - c_{p.k.} y_{24} + F_{np2\phi}; \quad M_{02} = \sum_{i=1}^{23} cy_i l_i + c_{p.k.} y_{24} l_{p.k.} - F_{np2\phi} l_{p.k.} - P_0 X_{П1}.$$

Далі за формулою (2.11) визначається прогин приймальної рейки на кінці: $h_{П2\phi} = y_{П}(l_{p.k.})$. При цьому виконуватиметься умова $\Delta \leq \varepsilon$.

На етапі 4 методики розділу 2.1 за виразом (2.12) розраховується висота $h_{2\phi} = h_{П2\phi} - h_{B2\phi}$ стикової нерівності на другій фазі руху трамвайного вагона.

У таблиці 2.2 наведено величини висоти стикової нерівності на другій фазі руху трамвайного вагона.

Розрахунки виконано відповідно до механічної схеми трамвайного вагона і рейкової колії, яка наведена на рисунку 2.5, а також геометричних і механічних характеристик системи «трамвайний вагон – рейкова колія на

ділянці з ізольованою стиковою нерівністю», що відповідають аналогічним першої фази руху трамвайного вагона.

Таблиця 2.2 – Висота сходинок стиків рейкової колії на другій фазі руху трамвайного вагона

m , кг	2 125	2 294	2 463	2 632	2 800	3 138	3 307	3 476	3 645	3 814
$h_{2ф}$, мм	0,67	0,69	0,71	0,75	0,78	0,83	0,88	0,92	0,96	1,01

Встановлені значення величини сходинки $h_{2ф}$ стику на другій фазі руху трамвайного вагона дозволяють з урахуванням його маси, завантаження і зведеної маси колеса визначити величину після ударної швидкості приймальної рейки на кінці (розділ 3 роботи) при розв’язанні задачі її динамічних прогинів в зоні розташування першої шпали.

2.3 Статична взаємодія трамвайного вагона з колією на третій фазі руху

Особливістю третьої фази руху трамвайного вагона через стик рейкової колії є те, що на віддавальній рейці залишається дві колісні пари, а перша і друга колісні пари розташовуються вже на приймальній рейці.

Схема проходження рейкового стику третьою колісною парою трамвайного вагона зображена на рисунку 2.8, позначення відповідають механічній схемі на рисунку 2.1.

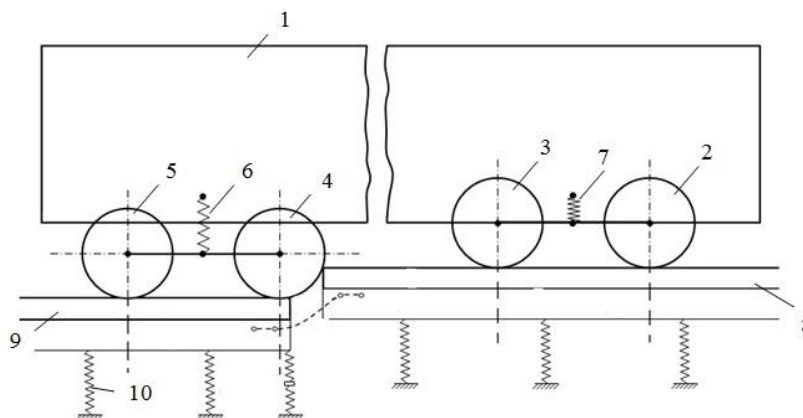


Рисунок 2.8 – Схема проходження стикової нерівності на третій фазі руху трамвайного вагона

Силowymi факторами, що визначають у кінцевому випадку статичний прогин приймальної і віддавальної рейок, а також висоту стику, що відповідає третій фазі руху трамвайного вагона, є постійні за величиною зусилля P_0 . Вони відповідають поточній кількості колісних пар на рейках і мають координати: для віддавальної рейки (рис. 2.9, а) X_{Bj} , де $j=3,4$ – номер колісної пари трамвайного вагона; для віддавальної рейки (рис. 2.9, б) $X_{Пj}$ ($j=1,2$).

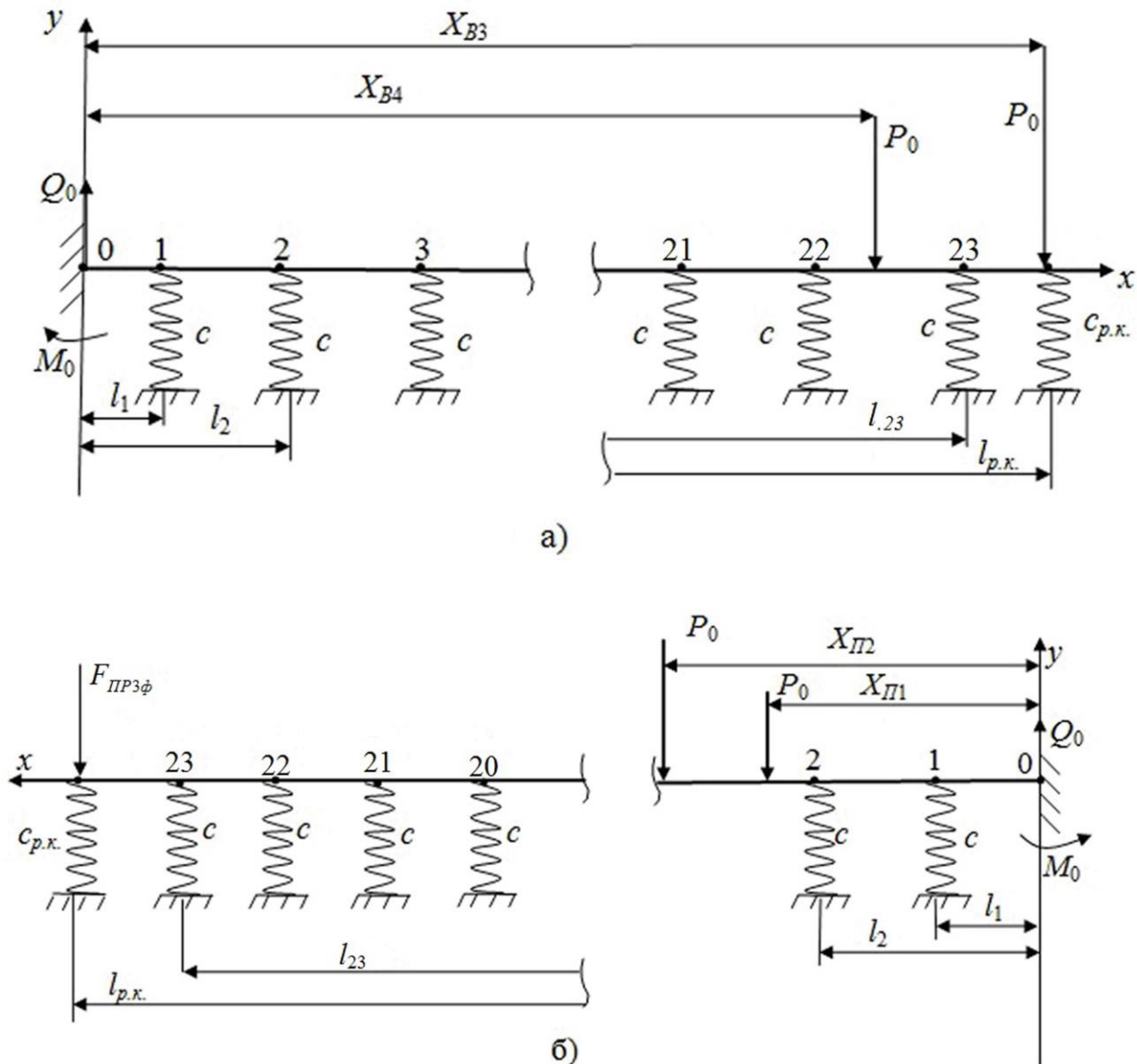


Рисунок 2.9 – Механічна схема розрахунку прогинів на третій фазі руху трамвайного вагона для віддавальної (а) та приймальної (б) рейок

Позначення на рисунку 2.9 відповідають схемі (рис. 2.2) проходження трамвайним вагоном рейкового стику на перший фазі руху трамвайного вагона.

Однак у цьому випадку: $F_{np3\phi} = h_{B3\phi} \cdot c_{p.k.}$ – сила пружності, що прикладається на третій фазі руху трамвайного вагона до кінця приймальної рейки з боку віддавальної рейки за $x = l_{p.k.} = 12,5$ м; $h_{B3\phi}$ – прогин віддавальної рейки на кінці на третій фазі руху трамвайного вагона; $X_{B4} = 10,6$ м; $X_{B3} = 12,5$ м; $X_{П2} = 4,5$ м; $X_{П1} = 6,4$ м.

Рівняння вигнутої осі рейок на другій фазі руху запишемо, використовуючи метод початкових параметрів з урахуванням умов їхнього закріплення ($y_0 = y'_0 = 0$):

віддавальна рейка:

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - \sum_{j=3}^4 P_0 \frac{(x - x_{Bj})^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} cy_i \frac{(x - l_i)^3}{6} + c_{p.k.} h_B \frac{(x - L)^3}{6} \right]; \quad (2.13)$$

приймальна рейка:

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - F_{np3\phi} \frac{(x - L)^3}{6} - \sum_{k=1}^2 P_0 \frac{(x - X_{Пk})^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} cy_i \frac{(x - l_i)^3}{6} + c_{p.k.} h_{П} \frac{(x - L)^3}{6} \right]. \quad (2.14)$$

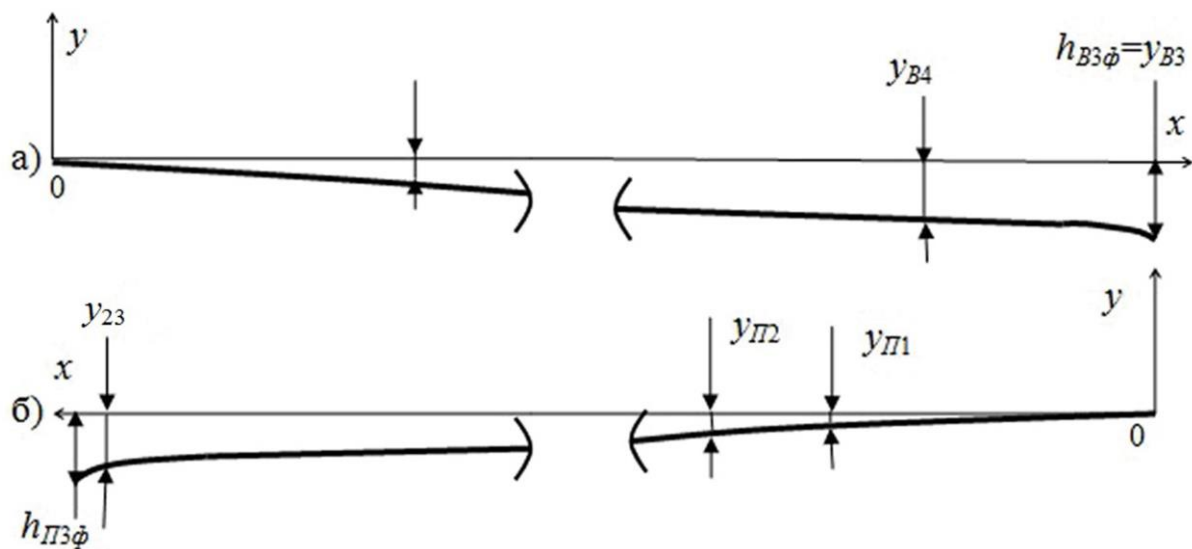


Рисунок 2.10 – Пружні лінії віддавальної (а) та приймальної (б) рейок на третій фазі руху трамвайного вагона

Пружні лінії віддавальної і приймальної рейок на третій фазі руху наведено на рисунку 2.10, де $y_{B3}, y_{B4}, y_{П1}, y_{П2}, y_{23}$ – прогини рейок відповідно під колесами трамвайного вагона і першою шпалою приймальної рейки.

Поточна висота стикової нерівності на третій фазі руху трамвайного вагона розраховується за виразом

$$h_{3\phi} = h_{П3\phi} - h_{B3\phi}, \quad (2.15)$$

де $h_{П3\phi}, h_{B3\phi}$ – прогини приймальної і віддавальної рейок на кінцях, відповідно за $x = 12,5$ м, тобто $h_{П3\phi} = y_{П}(l_{p.k.})$, $h_{B3\phi} = y_{B}(l_{p.k.})$.

З урахуванням того, що вирази (2.13) і (2.14) містять в правій частині доданки, які також залежать від прогинів, розв’язання цих рівнянь виконано чисельно.

Далі за алгоритмом фази 1 (рис. 2.4) розраховується величина прогину $h_{B3\phi}$ віддавальної рейки на кінці. При цьому блок 1 алгоритму матиме вигляд

Введення: статичного навантаження P_0 ; геометричних координат $l_i (i=1,23)$; $l_{24} = l_{p.k.}$; $X_{Bj} (j=3,4)$; механічних характеристик рейки E, J ; припустимого прогину ε ; жорсткості $c_{p.k.}$.

Рівняння рівноваги (2.8) на третій фазі руху трамвайного вагона матимуть вигляд:

$$Q_{01} = 2P_0; \quad M_{01} = -\sum_{j=3}^4 P_0 X_{Bj};$$

$$Q_{02} = 2P_0 - \sum_{i=1}^{23} c y_i - c_{p.k.} y_{24}; \quad M_{02} = -\sum_{j=3}^4 P_0 X_{Bj} + \sum_{i=1}^{23} c y_i l_i + c_{p.k.} y_{24} l_{p.k.}.$$

Прогин віддавальної рейки на кінці визначається за виразом (2.13) як $h_{B3\phi} = y_B(l_{p.k.})$ за досягнення умови $\Delta \leq \varepsilon$.

Під час розрахунку $h_{\Pi 3\phi}$ приймальної рейки на кінці блок 1 алгоритму матиме вигляд

Введення: статичного навантаження P_0 , геометричних координат $l_i (i=1,23)$; $l_{24}=l_{p.k.}$; $X_{\Pi j} (j=1,2)$; механічних характеристик рейки E, J ; припустимого прогину ε ; жорсткості $c_{p.k.}$

У цьому випадку рівняння рівноваги (2.6) і (2.7) будуть:

$$Q_{01} = 2P_0 + F_{np3\phi}; \quad M_{01} = -F_{np3\phi}l_{p.k.} - \sum_{j=1}^2 P_0 X_{\Pi j};$$

$$Q_{02} = 2P_0 - \sum_{i=1}^{23} cy_i - c_{p.k.}y_{24} + F_{np3\phi};$$

$$M_{02} = \sum_{i=1}^{23} cy_i l_i + c_{p.k.}y_{24}l_{p.k.} - F_{np3\phi}l_{p.k.} - \sum_{j=1}^2 P_0 X_{\Pi j}.$$

Далі за формулою (2.14) визначається прогин приймальної рейки на кінці: $h_{\Pi 3\phi} = y_{\Pi}(l_{p.k.})$. При цьому виконуватиметься умова $\Delta \leq \varepsilon$.

На етапі 4 методики розділу 2.1 за виразом (2.15) розраховується висота $h_{3\phi} = h_{\Pi 3\phi} - h_{B3\phi}$ стикової нерівності на третій фазі руху трамвайного вагона.

У таблиці 2.3 наведено величини висоти стикової нерівності на третій фазі руху трамвайного вагона.

Розрахунки виконано відповідно до механічної схеми трамвайного вагона і рейкової колії, яка наведена на рисунку 2.8, а також геометричних і механічних характеристик системи «трамвайний вагон – рейкова колія на ділянці з ізольованою стиковою нерівністю», що відповідають аналогічним першої фази руху трамвайного вагона.

Таблиця 2.3 – Висота сходинок стиків рейкової колії на третій фазі руху трамвайного вагона

m , кг	2 125	2 294	2 463	2 632	2 800	3 138	3 307	3 476	3 645	3 814
$h_{зф}$, мм	1,30	1,34	1,39	1,44	1,52	1,61	1,70	1,78	1,86	1,95

Встановлені значення величини ступені $h_{зф}$ стику на третій фазі руху трамвайного вагона дозволяють з урахуванням його маси, завантаження і зведеної маси колеса визначити величину після ударної швидкості приймальної рейки на кінці (розділ 3 роботи) під час розв’язання задачі її динамічних прогинів у зоні розташування першої шпали.

2.4 Рівні статичної взаємодії трамвайного вагона з колією на четвертій фазі руху

Особливістю четвертої фази руху трамвайного вагона через стик рейкової колії є те, що на віддавальній рейці залишається одна колісна пара, а перша, друга і третя колісні пари розташовуються вже на приймальній рейці.

Схема проходження рейкового стику четвертою колісною парою трамвайного вагона зображена на рисунку 2.11, позначення відповідають механічній схемі на рисунку 2.1.

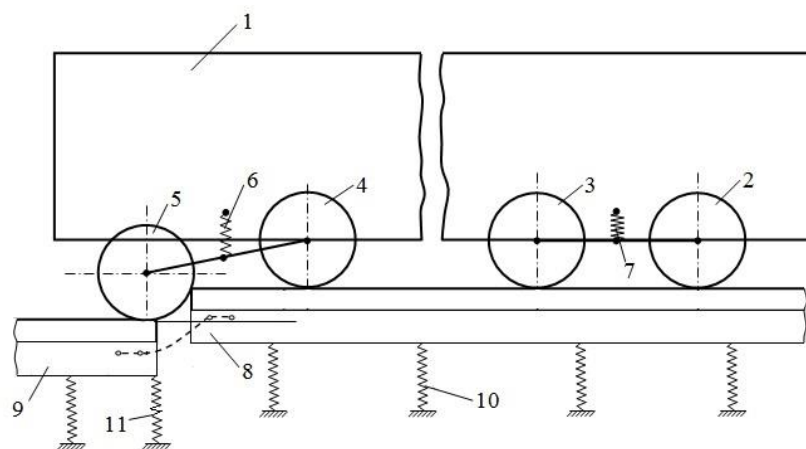


Рисунок 2.11 – Схема проходження стикової нерівності на четвертій фазі руху трамвайного вагона

Силowymi факторами, що визначають у кінцевому випадку статичний прогин приймальної і віддавальної рейок, а також висоту стику, що відповідає четвертій фазі руху трамвайного вагона, є постійні за величиною зусилля P_0 . Вони відповідають поточній кількості колісних пар на рейках і мають координати: для віддавальної рейки (рис. 2.12, а) X_{B4} ; для приймальної рейки (рис. 2.12, б) $X_{Пj} (j=1,2,3)$.

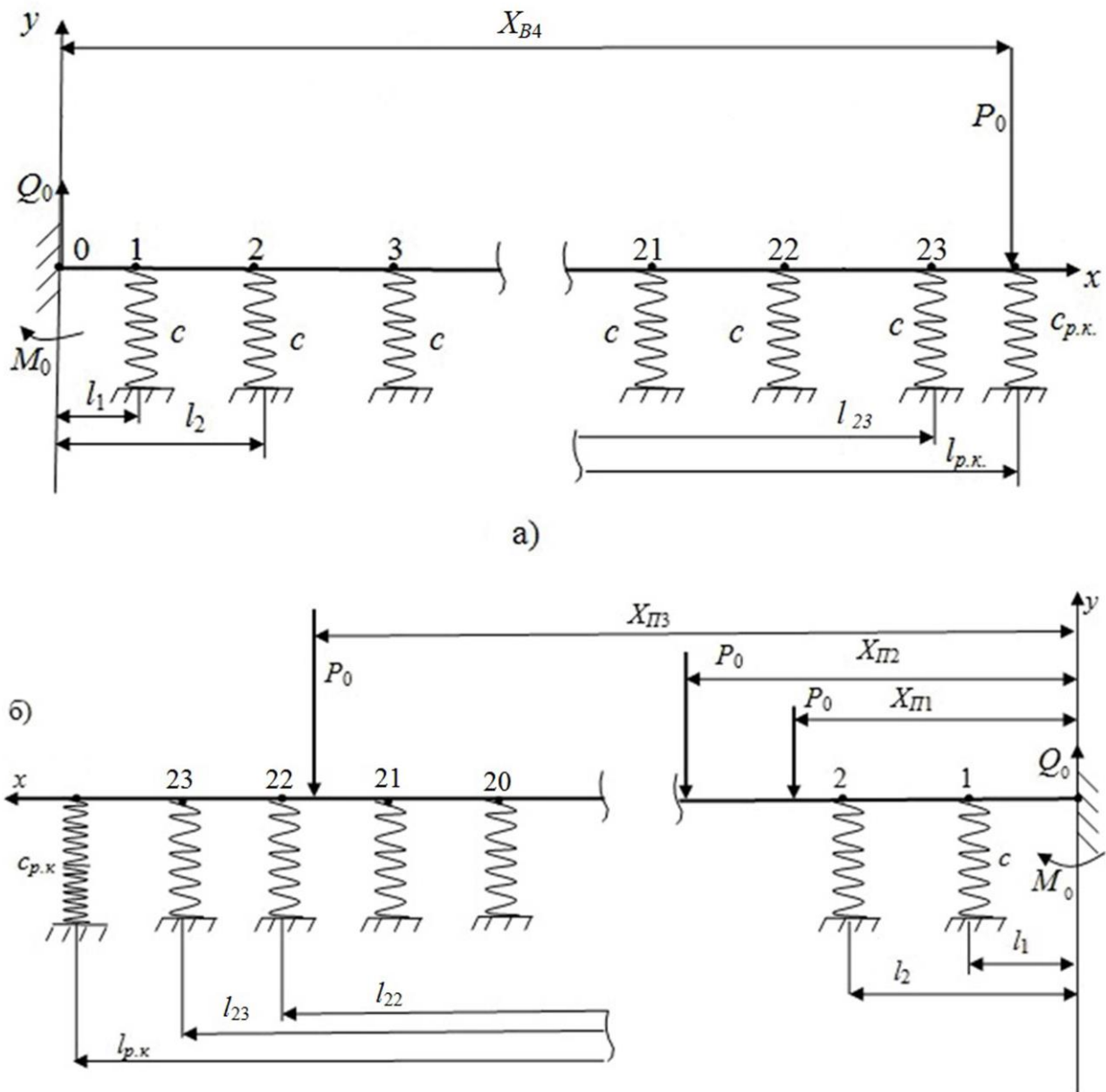


Рисунок 2.12 – Механічна схема розрахунку прогинів на четвертій фазі руху трамвайного вагона для віддавальної (а) та приймальної (б) рейок

На рисунку 2.12 позначення відповідають схемі (рис. 2.1) проходження трамвайним вагоном рейкового стику на першій фазі руху трамвайного вагона. Однак у цьому випадку:

$F_{np4\phi} = h_{B4\phi} \cdot c_{p.k.}$ – сила пружності, що прикладається на четвертій фазі руху трамвайного вагона до кінця приймальної рейки з боку віддавальної рейки за $x = l_{p.k.} = 12,5$ м;

$h_{B4\phi}$ – прогин віддавальної рейки на кінці на четвертій фазі руху трамвайного вагона; $X_{B4} = 12,5$ м; $X_{II1} = 1,9$ м, $X_{II2} = 6,4$ м, $X_{II3} = 8,3$ м.

Рівняння вигнутої осі рейок на четвертій фазі руху запишемо, використовуючи метод початкових параметрів з урахуванням умов їхнього закріплення ($y_0 = y'_0 = 0$):

віддавальна рейка:

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - P_0 \frac{(x - X_{B4})^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} cy_i \frac{(x - l_i)^3}{6} + c_{p.k.} h_B \frac{(x - L)^3}{6} \right]; \quad (2.16)$$

приймальна рейка:

$$y(x) = \frac{1}{EJ} \times \left[Q_0 \frac{x^3}{6} + M_0 \frac{x^2}{2} - F_{np4\phi} \frac{(x - L)^3}{6} - \sum_{k=1}^3 P_0 \frac{(x - X_{IIk})^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} cy_i \frac{(x - l_i)^3}{6} + c_{p.k.} h_{II} \frac{(x - L)^3}{6} \right]. \quad (2.17)$$

Пружні лінії віддавальної і приймальної рейок на четвертій фазі руху наведено на рисунку 2.13, де y_{B3} , y_{B4} , y_{II1} , y_{II2} , y_{23} – прогини рейок відповідно під колесами трамвайного вагона і першою шпалою приймальної рейки.

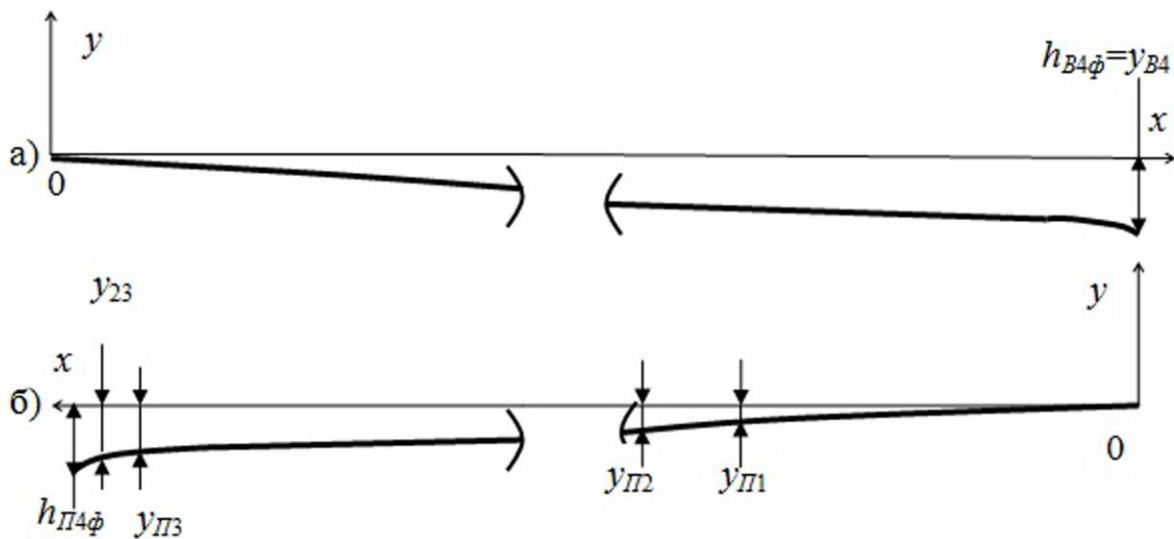


Рисунок 2.13 – Пружні лінії віддавальної (а) та приймальної (б) рейок на четвертій фазі руху трамвайного вагона

Поточна висота стикової нерівності на четвертій фазі руху трамвайного вагона розраховується за виразом

$$h_{4\phi} = h_{П4\phi} - h_{B4\phi}, \quad (2.18)$$

де $h_{П4\phi}$, $h_{B4\phi}$ – прогини приймальної і віддавальної рейок на кінці, відповідно за $x=12,5$ м, тобто $h_{П4\phi} = y_{П}(l_{p.к.})$, $h_{B4\phi} = y_{B}(l_{p.к.})$.

З урахуванням того, що вирази (2.16) і (2.17) містять в правій частині доданки, які також залежать від прогинів, розв'язання цих рівнянь виконано чисельно.

Далі за алгоритмом фази 1 (рис. 2.4) розраховується величина прогину $h_{B4\phi}$ віддавальної рейки на кінці. При цьому блок 1 алгоритму матиме вигляд

Введення: статичного навантаження P_0 ; геометричних координат l_i ($i=1, 23$); $l_{24}=l_{p.к.}$; X_{B4} ; механічних характеристик рейки E , J ; припустимого прогину ε ; жорсткості $c_{p.к.}$.

Рівняння рівноваги (2.8) на четвертій фазі руху трамвайного вагона матимуть вигляд:

$$Q_{01} = P_0; \quad M_{01} = -P_0 X_{B4};$$

$$Q_{02} = P_0 - \sum_{i=1}^{23} c y_i - c_{p.k.} y_{24}; \quad M_{02} = -P_0 x_{B4} + \sum_{i=1}^{23} c y_i l_i + c_{p.k.} y_{24} l_{p.k.}.$$

Прогин віддавальної рейки на кінці визначається за виразом (2.16) як $h_{B4\phi} = y_B(l_{p.k.})$ за досягнення умови $\Delta \leq \varepsilon$.

Під час розрахунку $h_{П4\phi}$ приймальної рейки на кінці блок 1 алгоритму матиме вигляд

Введення: статичного навантаження P_0 , геометричних координат l_i ($i=1, 23$); $l_{24} = l_{p.k.}$; $X_{Пj}$ ($j=1, 2, 3$); механічних характеристик рейки E, J ; припустимого прогину ε ; жорсткості $c_{p.k.}$

У цьому випадку рівняння рівноваги (2.6) і (2.7) будуть:

$$Q_{01} = 3P_0 + F_{np4\phi}; \quad M_{01} = -F_{np4\phi} l_{p.k.} - \sum_{j=1}^3 P_0 X_{Пj};$$

$$Q_{02} = 3P_0 - \sum_{i=1}^{23} c y_i - c_{p.k.} y_{24} + F_{np4\phi};$$

$$M_{02} = \sum_{i=1}^{23} c y_i l_i + c_{p.k.} y_{24} l_{p.k.} - F_{np4\phi} l_{p.k.} - \sum_{j=1}^3 P_0 X_{Пj}.$$

Далі за формулою (2.17) визначається прогин приймальної рейки на кінці: $h_{П4\phi} = y_{П}(l_{p.k.})$. При цьому виконуватиметься умова $\Delta \leq \varepsilon$.

На етапі 4 методики розділу 2.4 за виразом (2.18) розраховується висота $h_{4\phi} = h_{П4\phi} - h_{B4\phi}$ стикової нерівності на четвертій фазі руху трамвайного вагона.

У таблиці 2.4 наведено величини висоти стикової нерівності на четвертій фазі руху трамвайного вагона.

Розрахунки виконано відповідно до механічної схеми трамвайного вагона і рейкової колії, яка наведена на рисунку 2.11, а також геометричних і механічних характеристик системи «трамвайний вагон – рейкова колія на ділянці з ізолюваною стиковою нерівністю», що відповідають аналогічним першої фази руху трамвайного вагона.

Таблиця 2.4 – Висота сходинок стиків рейкової колії на четвертій фазі руху трамвайного вагона

m , кг	2 125	2 294	2 463	2 632	2 800	3 138	3 307	3 476	3 645	3 814
$h_{4\phi}$, мм	0,45	0,46	0,48	0,50	0,52	0,55	0,59	0,61	0,64	0,67

Встановлені значення величини сходинок $h_{4\phi}(m)$ стику на четвертій фазі руху трамвайного вагона дозволяють з урахуванням його маси, завантаження і зведеної маси колеса визначити величину після ударної швидкості приймальної рейки на кінці (розділ 3 роботи) при розв’язанні задачі її динамічних прогинів у зоні розташування першої шпали.

2.5 Аналіз результатів дослідження статичної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією і висновки за розділом 2

Згідно з запропонованою моделлю, виконано чисельний аналіз параметрів статичної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією в місці ізолюваної стикової нерівності типу «зазор». Розрахунки здійсненні на базі варіювання механічних та експлуатаційних факторів: завантаження трамвайного вагона, жорсткості баластового шару. Методом чисельного експерименту отримано залежності механічної взаємодії в системі «трамвайний вагон – рейкова колія в місці стикового з’єднання», що враховують граничні умови закріплення віддавальної і приймальної рейок, геометричні і механічні характеристики рейок та стикових накладок, шпал і баластового шару. У таблицях 2.1–2.4 подано висоту стиків рейкової колії (тут номер індексу при h

відповідає номеру фази руху трамвайного вагона) під час проходження трамвайним вагоном зони стикової нерівності, які розраховані за формулами (2.4), (2.12)–(2.18).

Дані розрахунків наведено на рисунку 2.14 у вигляді графічних залежностей h (мм), які інтегровано відображають процес статичної взаємодії під час проходження стикової нерівності транспортним засобом різного завантаження. Вони дозволяють надати отриманим даним стосовно висоти h здатність якісного порівняльного, а також візуального аналізу.

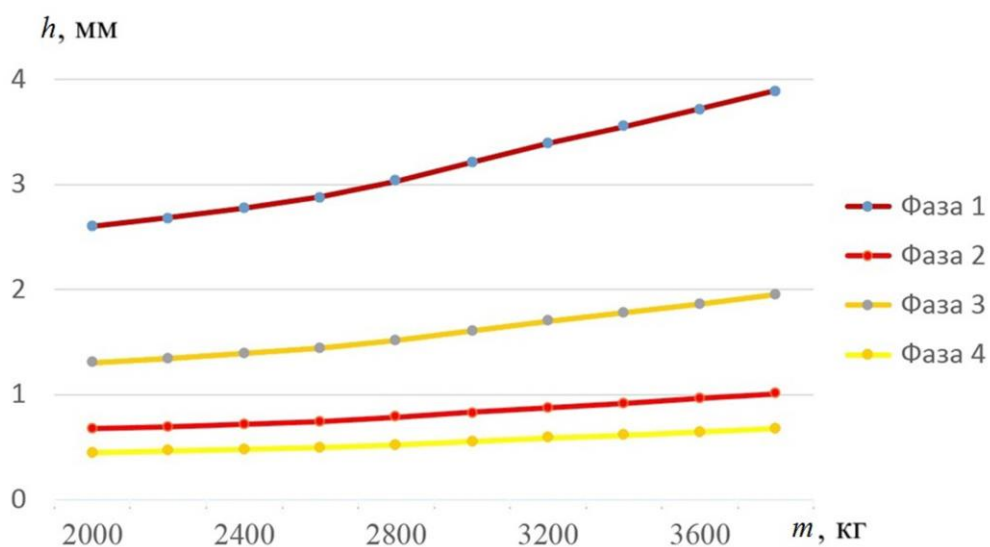


Рисунок 2.14 – Залежність висоти стику від завантаження трамвайного вагона

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

Згідно з графіками, наведеними на рисунку 2.14, маємо монотонне зростання висоти стику при збільшенні завантаження трамвайного вагона на всіх фазах руху. Можна визначити, що після зміни завантаження від порожнього до максимально заповненого трамвайного вагона ($m = [2125 \div 3814]$ кг на колесо), висота стику зростає в 1,49 рази на першій фазі руху, у 1,51 рази на другій фазі, та в 1,5 і 1,48 на третій та четвертій відповідно.

Також незалежно від завантаження трамвайного вагона найменше значення висоти стику матимемо на четвертій фазі руху трамвайного вагона, далі за зростанням йдуть друга, потім третя фази, а найбільше значення висоти стику буде на першій фазі. Однак для порожнього трамвайного 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 четвертої фазами) складає 5,8 разів. Варто констатувати, що вона практично не залежить від завантаження трамвайного вагона.

Парадигму досліджень особливостей взаємодії трамвайного вагона та рейкової колії побудовано на базі багатofакторного 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 розв'язання задачі механічної взаємодії трамвайного 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 «трамвайний 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 віддавальної і приймальної рейок шляху.

Проте, варто зауважити, що розглянута послідовність етапів методу розрахунку, а також його складових орієнтована на стандартні рейки довжиною 12,5 м на 23 шпалах. Тому його адаптація для інших типів рейок потребує доопрацювання. Це стосується механічної схеми дискретно-континуальної системи на рисунку 2.14, а також блок-схеми розрахунку прогинів на рисунку 2.4.

У результаті проведених досліджень встановлено характер впливу завантаження трамвайного вагона на висоту стикової нерівності під час проходження стику. Доведено, що вона збільшується після зміни завантаження, зростаючи за позитивною динамікою, а залежності $h(m)$, що наведені на рисунку 2.14, носять параболічний характер. Аналіз графіків на рисунку 2.14 показав також, що ігнорування багатфакторності впливу на прогини рейкової колії призводить до помилкових висновків, враховуючи послідовність кривих.

Результати, що отримано, можуть використовуватися на практиці задля вдосконалення експлуатаційних характеристик рухомого складу і рейкової колії, шляхом раціонального вибору.

Встановлені значення сходинки стикової нерівності дозволяють також визначити величину після ударної швидкості приймальної рейки під час розв'язання задачі динамічних прогинів у зоні розташування першої шпали.

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

За результатами проведених у розділі 2 досліджень можна зробити такі висновки.

1. Запропоновано метод дослідження параметрів механічної взаємодії трамвайного вагона і рейкової колії, що побудовано на базі схеми багатопролітної (нерозрізної) балки на 24-х пружних опорах, наведеної на рисунку 2.2. При цьому розрахунок прогинів виконано за допомогою рівнянь (2.2), (2.3), (2.10), (2.11), (2.13), (2.14), (2.16), (2.17), згідно блок-схеми, наведеної на рисунку 2.4.

2. Представлено результати чисельних розрахунків параметрів статичної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією у місці стикового з'єднання з урахуванням експлуатаційних, механічних і геометричних факторів з використанням наведених моделей.

3. Встановлено нові закономірності взаємодії трамвайного вагона й рейкової колії під час проходження транспортним засобом стикової нерівності. Це дозволяє здійснити удосконалення експлуатаційних характеристик трамвайного вагона і верхньої будови колії шляхом раціонального вибору. У цій роботі отримані результати використовуються під час дослідження параметрів ударного імпульсу й після ударної швидкості залежно від фаз руху.

РОЗДІЛ 3

УДАРНИЙ ІМПУЛЬС ТА ПІСЛЯУДАРНА ШВИДКІСТЬ ПРИЙМАЛЬНОЇ РЕЙКИ

У цьому розділі роботи розглянуто залежність параметрів ударного імпульсу та післяударної швидкості колеса візка, що проїжджає стикову нерівність шляху від таких факторів: висоти стику типу «зазор – ступінь вгору»; завантаження трамвайного вагона; конструктивних й експлуатаційних параметрів транспортного засобу. При цьому трамвайний вагон подано у вигляді підресореної зведеної маси на візку, й прийнято припущення, що при ударі колеса по ребру приймальної рейки не відбувається його відрив, а також його ковзання відносно рейки, що не суперечить результатам робіт [38–40, 41, 47, 49].

3.1 Дослідження процесів ударної взаємодії в механічній системі «трамвайний вагон – рейкова колія»

Розглянемо ударну взаємодію колеса першої колісної пари трамвайного вагона та приймальної рейки шляху з урахуванням теореми про зміну моменту кількості руху механічної системи [41, 50, 51] відповідно до схеми на рисунку 3.1.

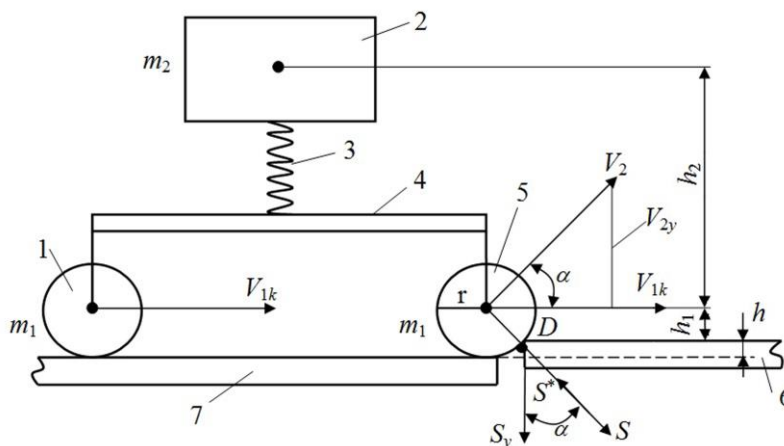


Рисунок 3.1 – Схема ударної взаємодії

Тут: 1 – колесо другої колісної пари візка трамвайного вагона; 2 – конструктивний елемент, що моделює зведену масу трамвайного вагона; 3 – пружна підвіска трамвайного вагона; 4 – рама візка трамвайного вагона; 5 – колесо першої колісної пари візка; 6, 7 – приймальна та віддавальна рейки шляху; h – висота стику; h_1, h_2 – геометричні координати центрів мас коліс 1,5 та зведеної маси 2 трамвайного вагона; V_{1k}, V_2 – доударна та післяударна швидкості руху колеса 5; S, S_y – ударні імпульси, що випробує приймальна рейка при її ударній взаємодії з колесом 5 першої колісної пари візка; α – кутова координата центра мас колеса 5; m_1, m_2 – зведені маси трамвайного вагона і колеса; r – радіус колеса. Тут ударний імпульс S^* за величиною дорівнює імпульсу S .

Відповідно до робіт [51, 52] отримаємо:

$$K_2 - K_1 = M_D(S^*), \quad (3.1)$$

де K_1, K_2 – доударний і післяударний моменти кількості руху системи відносно осі, що проходить уздовж ребра D приймальної рейки 6; S^* – зовнішній ударний імпульс, що прикладається до колеса 5 з боку приймальної рейки; $M_D(S^*)$ – момент ударного імпульсу відносно ребра D .

Рівняння (3.1), враховуючи, що ударний імпульс S^* перетинає центр мас колеса 5, а швидкості колеса 1 і зведеної маси 2 трамвайного вагона дорівнюють V_{1k} і не змінюють свого напрямку за час удару, прийме вигляд:

$$m_1 V_2 r + \frac{m_1 r^2}{2} \cdot \frac{V_2}{r} + m_2 V_{1k} h_2 + m_1 V_{1k} h_1 - m_1 V_{1k} h_1 - \frac{m_1 r^2}{2} \cdot \frac{V_{1k}}{r} - m_2 V_{1k} h_2 - m_1 V_{1k} h_1 = 0$$

відкіля отримаємо

$$V_2 = \frac{V_{1k} \left(\frac{2h_1}{r} + 1 \right)}{3}.$$

Ударний імпульс взаємодії механічної схеми на рисунку 3.1 з торцем приймальної рейки в проекціях на вертикальну вісь y визначимо, відповідно до теореми про зміну кількості руху системи, як

$$m_1 V_{2y} - m_1 V_{1ky} = S_y^*, \quad (3.2)$$

тому при $V_{1ky} = 0$ буде

$$S_y^* = m_1 V_{1k} \frac{2h_1 + r}{3r^2} (r^2 - h_1^2)^{0.5}, \quad (3.3)$$

де $h_1 = r - h$.

Під дією ударного імпульсу S_y торець рейки 6 при $x = L$, враховуючи, що при ударі приймальна рейка згинається по тій самій кривій, що й при дії статичного зосередженого навантаження [22, 41, 46], отримає, відповідно до формули (2.3) розділу 2, вертикальне переміщення

$$y(x) = \frac{y_a(L)}{y_{\bar{F}}(L) EJ} \cdot [Q_0 \cdot \frac{x^3}{6} + M_0 \cdot \frac{x^2}{2} - \bar{F} \cdot \frac{x^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} c y_i \cdot \frac{(x - l_i)^3}{6} + c_{p.k.} h_{i\phi} \cdot \frac{(x - L)^3}{6}],$$

де $y_a(L)$ – амплітудне значення прогину; $y_{\bar{F}}(L)$ – прогин торця рейки при дії одиничної сили $\bar{F} = 1\text{Н}$ за $x = L$; $h_{i\phi}$ – висота стику на i -й фазі руху трамвайного вагона. Тут враховано, що відповідно до результатів, отриманих у розділі 2, висота стику рейкової колії є функцією фази руху трамвайного вагона, див. в таблиці 2.1–2.4.

Тому швидкість руху перерізу рейки з координатою x буде, відповідно до метода Фур'є поділу змінних:

$$V(t, x) = \frac{d y_a(t, L)}{d t} \cdot \frac{1}{y_{\bar{F}}(L) EJ} \cdot [Q_0 \cdot \frac{x^3}{6} + M_0 \cdot \frac{x^2}{2} - \bar{F} \cdot \frac{x^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} c y_i \cdot \frac{(x - l_i)^3}{6} + c_{p.k.} h_{i\phi} \cdot \frac{(x - L)^3}{6}], \quad (3.4)$$

де $\frac{d y_a(t, L)}{d t}$ – швидкість зміни за часом амплітуди $y_a(t, L)$, тобто вертикальна швидкість перерізу приймальної рейки.

Кількість руху Q_p приймальної рейки 6 в проєкції на вісь y післяударної взаємодії з колесом 5 визначимо як

$$Q_{py} = \frac{\rho F V_1}{y_F(L) E J} \cdot \int_0^L \left[Q_0 \cdot \frac{x^3}{6} + M_0 \cdot \frac{x^2}{2} - P_0 \cdot \frac{x^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} c y_i \cdot \frac{(x-l_i)^3}{6} + c_{p.k.} h_{i\phi} \cdot \frac{(x-L)^3}{6} \right] dx, \quad (3.5)$$

$$\text{де } V_1 = \frac{d y_a(t, L)}{d t}.$$

У цьому випадку зміна кількості руху рейки буде дорівнювати, враховуючи (3.2), (3.3), ударному імпульсу S_y , тому отримаємо

$$Q_{py} = S_y^* = m_1 V_{1k} \frac{2h_1 + r}{3r^2} (r^2 - h_1^2)^{0.5}. \quad (3.6)$$

На фазі після удару вертикальну швидкість рейки визначимо за допомогою рівнянь (3.5), (3.6):

$$V_1 = \frac{S_y^* y_F(L) E J}{\rho F \int_0^L \left[Q_0 \cdot \frac{x^3}{6} + M_0 \cdot \frac{x^2}{2} - P_0 \cdot \frac{x^3}{6} + \sum_{i=1}^{23} c y_i \cdot \frac{(x-l_i)^3}{6} + c_{p.k.} h_{i\phi} \cdot \frac{(x-L)^3}{6} \right] dx}. \quad (3.7)$$

У таблицях 3.1–3.4 наведено дані розрахунків величин післяударної швидкості V_1 приймальної рейки за виразом (3.7) за $x = L$ залежно від його завантаження і фаз руху трамвайного вагона через стик шляху. У розрахунках варіювалась швидкість руху $V_{1k} = [5 \div 15]$ м/с та маса $m = m_1 + m_2$ трамвайного вагона з урахуванням його завантаження, що припадає на одне колесо. Тут $m = [2125 \div 3814]$ кг, яка відповідає умовам експлуатації.

Розрахунки виконано відповідно до механічної схеми трамвайного вагона і рейкової колії, які наведені на рисунках 2.1, 2.5, 2.8, 2.11, 3.1, а також геометричних і механічних характеристик транспортного комплексу «трамвайний вагон – рейкова колія на ділянці з ізолюваною стиковою нерівністю», що відповідають аналогічним у розділі 2.

Таблиця 3.1 – Післяударна швидкість перерізу приймальної рейки на першій фазі руху трамвайного вагона

V_{1k} м/с	m , кг									
	2 125	2 294	2 463	2 632	2 800	3 138	3 307	3 476	3 645	3 814
5	1,545	1,700	1,869	2,056	2,262	2,488	2,737	3,011	3,312	3,643
6	1,854	2,039	2,243	2,468	2,714	2,986	3,284	3,613	3,974	4,372
7	2,163	2,379	2,617	2,879	3,167	3,484	3,832	4,215	4,637	5,100
8	2,472	2,719	2,991	3,290	3,619	3,981	4,379	4,817	5,299	5,829
9	2,781	3,059	3,365	3,702	4,072	4,479	4,927	5,419	5,961	6,557
10	3,090	3,399	3,739	4,113	4,524	4,976	5,474	6,022	6,624	7,286
11	3,399	3,739	4,113	4,524	4,976	5,474	6,022	6,624	7,286	8,015
12	3,708	4,079	4,487	4,935	5,429	5,972	6,569	7,226	7,948	8,743
13	4,017	4,419	4,861	5,347	5,881	6,469	7,116	7,828	8,611	9,472
14	4,326	4,759	5,234	5,758	6,334	6,967	7,664	8,430	9,273	10,20
15	4,635	5,099	5,608	6,169	6,786	7,465	8,211	9,032	9,936	10,93

Таблиця 3.2 – Післяударна швидкість перерізу приймальної рейки на другій фазі руху трамвайного вагона

V_{1k} м/с	m , кг									
	2 125	2 294	2 463	2 632	2 800	3 138	3 307	3 476	3 645	3 814
5	0,785	0,848	0,916	0,989	1,068	1,153	1,246	1,345	1,453	1,569
6	0,942	1,017	1,099	1,187	1,282	1,384	1,495	1,614	1,744	1,883
7	1,099	1,187	1,282	1,384	1,495	1,615	1,744	1,883	2,034	2,197
8	1,256	1,356	1,465	1,582	1,709	1,845	1,993	2,153	2,325	2,511
9	1,413	1,526	1,648	1,780	1,922	2,076	2,242	2,422	2,615	2,825
10	1,570	1,696	1,831	1,978	2,136	2,307	2,491	2,691	2,906	3,138
11	1,727	1,865	2,014	2,176	2,350	2,538	2,741	2,960	3,197	3,452
12	1,884	2,035	2,197	2,373	2,563	2,768	2,990	3,229	3,487	3,766
13	2,041	2,204	2,381	2,571	2,777	2,999	3,239	3,498	3,778	4,080
14	2,198	2,374	2,564	2,769	2,990	3,230	3,488	3,767	4,068	4,394
15	2,355	2,543	2,747	2,967	3,204	3,460	3,737	4,036	4,359	4,708

Таблиця 3.3 – Післяударна швидкість перерізу приймальної рейки на третій фазі руху трамвайного вагона

V_{1k} м/с	m , кг									
	2 125	2 294	2 463	2 632	2 800	3 138	3 307	3 476	3 645	3 814
5	1,243	1,357	1,482	1,619	1,768	1,930	2,108	2,302	2,513	2,745
6	1,492	1,629	1,779	1,942	2,121	2,316	2,529	2,762	3,016	3,293
7	1,740	1,900	2,075	2,266	2,475	2,702	2,951	3,222	3,519	3,842
8	1,989	2,172	2,372	2,590	2,828	3,088	3,372	3,683	4,021	4,391
9	2,237	2,443	2,668	2,913	3,182	3,474	3,794	4,143	4,524	4,940
10	2,486	2,715	2,964	3,237	3,535	3,860	4,215	4,603	5,027	5,489
11	2,735	2,986	3,261	3,561	3,889	4,246	4,637	5,064	5,529	6,038
12	2,983	3,258	3,557	3,885	4,242	4,632	5,058	5,524	6,032	6,587
13	3,232	3,529	3,854	4,208	4,596	5,018	5,480	5,984	6,535	7,136
14	3,480	3,801	4,150	4,532	4,949	5,404	5,902	6,444	7,037	7,685
15	3,729	4,072	4,447	4,856	5,303	5,790	6,323	6,905	7,540	8,234

Таблиця 3.4 – Післяударна швидкість перерізу приймальної рейки на четвертій фазі руху трамвайного вагона

V_{1k} м/с	m , кг									
	2 125	2 294	2 463	2 632	2 800	3 138	3 307	3 476	3 645	3 814
5	0,456	0,490	0,527	0,566	0,609	0,655	0,704	0,757	0,813	0,874
6	0,547	0,588	0,632	0,680	0,731	0,786	0,844	0,908	0,976	1,049
7	0,638	0,686	0,738	0,793	0,853	0,917	0,985	1,059	1,139	1,224
8	0,730	0,784	0,843	0,906	0,974	1,047	1,126	1,210	1,301	1,399
9	0,821	0,882	0,949	1,020	1,096	1,178	1,267	1,362	1,464	1,574
10	0,912	0,980	1,054	1,133	1,218	1,309	1,407	1,513	1,627	1,749
11	1,003	1,078	1,159	1,246	1,340	1,440	1,548	1,664	1,789	1,923
12	1,094	1,176	1,265	1,360	1,462	1,571	1,689	1,816	1,952	2,098
13	1,186	1,275	1,370	1,473	1,583	1,702	1,830	1,967	2,114	2,273
14	1,277	1,373	1,476	1,586	1,705	1,833	1,970	2,118	2,277	2,448
15	1,368	1,471	1,581	1,699	1,827	1,964	2,111	2,270	2,440	2,623

Отримані значення післяударної швидкості приймальної рейки на кінці використовуються в подальшому в роботі в розділі 4 при розв’язанні задачі її динамічних прогинів у зоні розташування першої шпали.

3.2 Ударно-динамічна взаємодія транспортного засобу з рейковою колією в зоні стикової нерівності

У цьому розділі роботи розглянуто взаємодію вагона трамвая з рейковою колією в зоні стикової нерівності типу «зазор» з урахуванням завантаження та швидкості руху [38–40, 47–49, 52]. Визначені параметри, за яких відбувається відрив колеса від рейкової колії. Досліджена фаза балістичного польоту колеса трамвайного вагона до удару об рейкову колію.

Розрахункову схему трамвайного вагона вибираємо у вигляді системи двох твердих тіл: колеса і трамвайного вагона, з’єднаних пружно-в’язким елементом. Механічна і силова схеми, що моделюють взаємодію, наведені на рисунку 3.2. Взаємодія колеса трамвайного вагона з рейковою колією у місці ізолюваної стикової нерівності типу «зазор» складається за часом з таких етапів руху.

Етап 1 – прогин рейкового шляху в зоні стику та перетворення стику типу «зазор» у стик «зазор – ступінь вгору». Чисельний аналіз параметрів статичної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією в місці ізолюваної стикової нерівності типу «зазор» виконано в розділі 2 цієї роботи. При цьому чисельні дані та графічні залежності $h(m)$, які інтегровано відображають залежність висоти стику від завантаження трамвайного вагона і фази руху через стикову нерівність шляху, наведено в таблицях 2.1–2.4 і на рисунку 2.14.

Етап 2 – ударна взаємодія колеса з приймальною рейкою в точці D . При цьому рух колеса миттєво змінюється з плоско-паралельного на обертальний навколо ребра D приймальної рейки. Прийняті допущення, що удар колеса відбувається без його відриву, також не відбувається його ковзання щодо рейки, що забезпечується абсолютною шорсткістю контактувальних поверхонь

колеса і рейки. Залежність ударного імпульсу від експлуатаційних, геометричних і механічних характеристик транспортного засобу досліджена в роботі [41, 49].

Етап 3 – динамічна взаємодія колеса з приймальною рейкою, коли колесо піднімається на головку (поверхню катання) рейки.

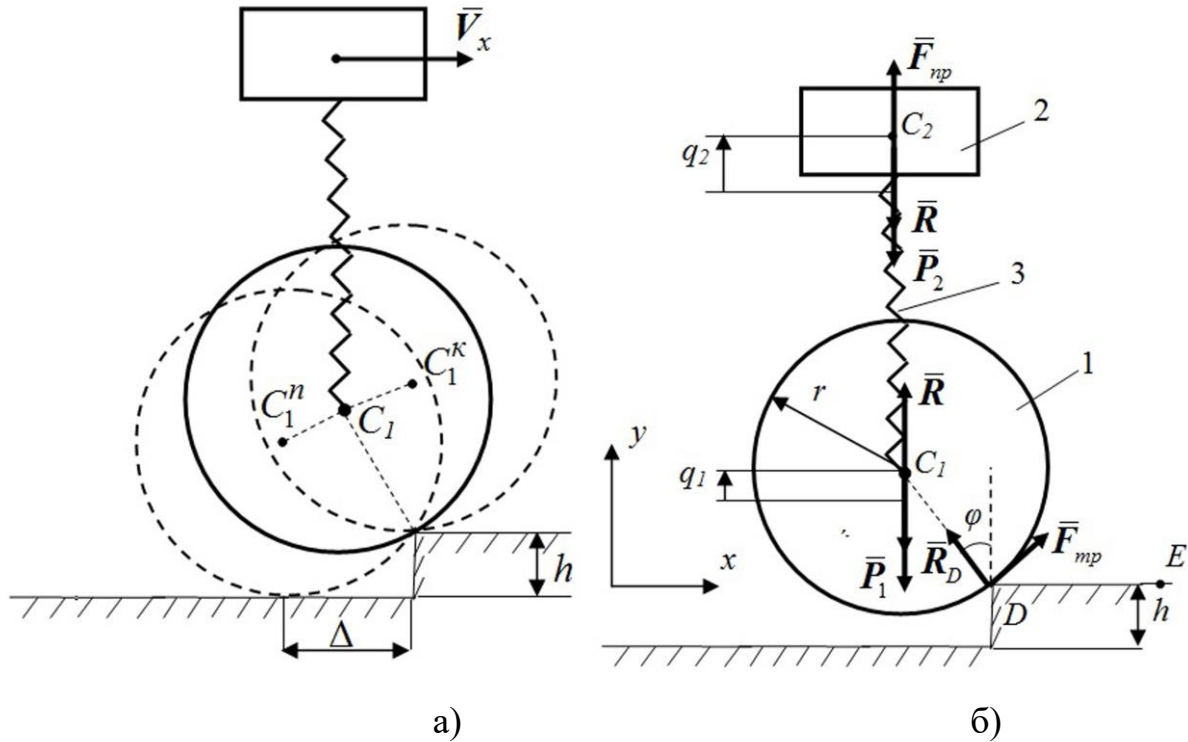


Рисунок 3.2 – Механічна (а) і силова (б) схеми динамічної взаємодії

Основним параметром, що характеризує динамічну взаємодію колеса з приймальною рейкою, є реакція опори в точці D. Для її визначення складемо диференціальні рівняння руху колеса 1, застосовуючи теорему про рух центра мас у проєкціях на осі декартової системи координат xu (рис. 3.2, б):

$$0 = F_{mp} \cdot \cos \varphi - R_D \cdot \sin \varphi, \quad (3.8)$$

$$m_1 \ddot{q}_1 = -P_1 - F_{np} + R + R_D \cdot \cos \varphi + F_{mp} \cdot \sin \varphi, \quad (3.9)$$

і пружно приєднаної маси 2 елементом 3, розглядаючи її коливальний рух при кінематичному збуренні шляхом переміщення точки C_1 по траєкторії $C_1^n C_1^k$:

$$m_2 \ddot{q}_2 = F_{np} - P_2 - R, \quad (3.10)$$

де q_1, q_2 – координати, що визначають положення центрів мас C_1 і C_2 колеса і трамвайного вагона відповідно; $m_1(P_1), m_2(P_2)$ – зведені маси (сили ваги) колеса і трамвайного вагона; $F_{np} = c \cdot (\delta_{cm2} - q_2 + q_1)$ – сила пружності; $R = b \cdot (\dot{q}_2 - \dot{q}_1)$ – сила опору; R_D, F_{mp} – нормальна реакція і сила тертя, що діють на колесо в точці D; c, b – коефіцієнти жорсткості й опору.

У цих дослідженнях зроблене припущення, що центр мас колеса C_1 рухається по дузі $C_1^n C_1^k$ (рис. 3.2, а), яка є чвертю хвилі синусоїди з періодом $4\Delta / V_x$, де V_x – стала горизонтальна швидкість трамвайного вагона. Тому координата q_1 змінюється за законом $q_1 = h \cdot \sin(\omega_B t)$, де $\omega_B = (V_x \cdot \pi) / (2 \cdot \Delta)$ – колова частота. При цьому припущенні розв'язанням рівняння (3.10) буде

$$q_2 = e^{-nt} \cdot [C_1 \cdot \cos(\omega_0^* t) + C_2 \cdot \sin(\omega_0^* t)] + H_{B1} \cdot \sin(\omega_B t - \varepsilon) + H_{B2} \cdot \cos(\omega_B t - \varepsilon), \quad (3.11)$$

де $C_1 = q_{02} + H_{B1} \cdot \sin \varepsilon - H_{B2} \cdot \cos \varepsilon$,

$$C_2 = [\dot{q}_{02} + nq_{02} + H_{B1} \cdot (n \sin \varepsilon - \omega_B \cos \varepsilon) - H_{B2} \cdot (n \cos \varepsilon + \omega_B \sin \varepsilon)] / \omega_0^*,$$

$$H_{B1} = \frac{h_{B1}}{\sqrt{(\omega_{02}^2 - \omega_B^2)^2 + 4n^2 \omega_B^2}}, \quad H_{B2} = \frac{h_{B2}}{\sqrt{(\omega_{02}^2 - \omega_B^2)^2 + 4n^2 \omega_B^2}},$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{2n\omega_B}{\omega_{02}^2 - \omega_B^2}, \quad \omega_0^* = \sqrt{\omega_{02}^2 - n^2}, \quad \omega_{02} = \sqrt{\frac{c}{m_2}}, \quad n = \frac{b}{2m_2}, \quad h_{B1} = \frac{ch}{m_2},$$

$$h_{B2} = \frac{bh\omega_B}{m_2}, \quad q_{02} = 0, \quad \dot{q}_{02} = 0.$$

Розв'язуючи рівняння (3.8) і (3.9), для вертикальної складової реакції опори R_{Dy} отримаємо вираз:

$$R_{Dy} = R_D \cdot \cos \varphi + F_{mp} \cdot \sin \varphi = P_1 + P_2 + c(q_1 - q_2) + b(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + m_1 \ddot{q}_1. \quad (3.12)$$

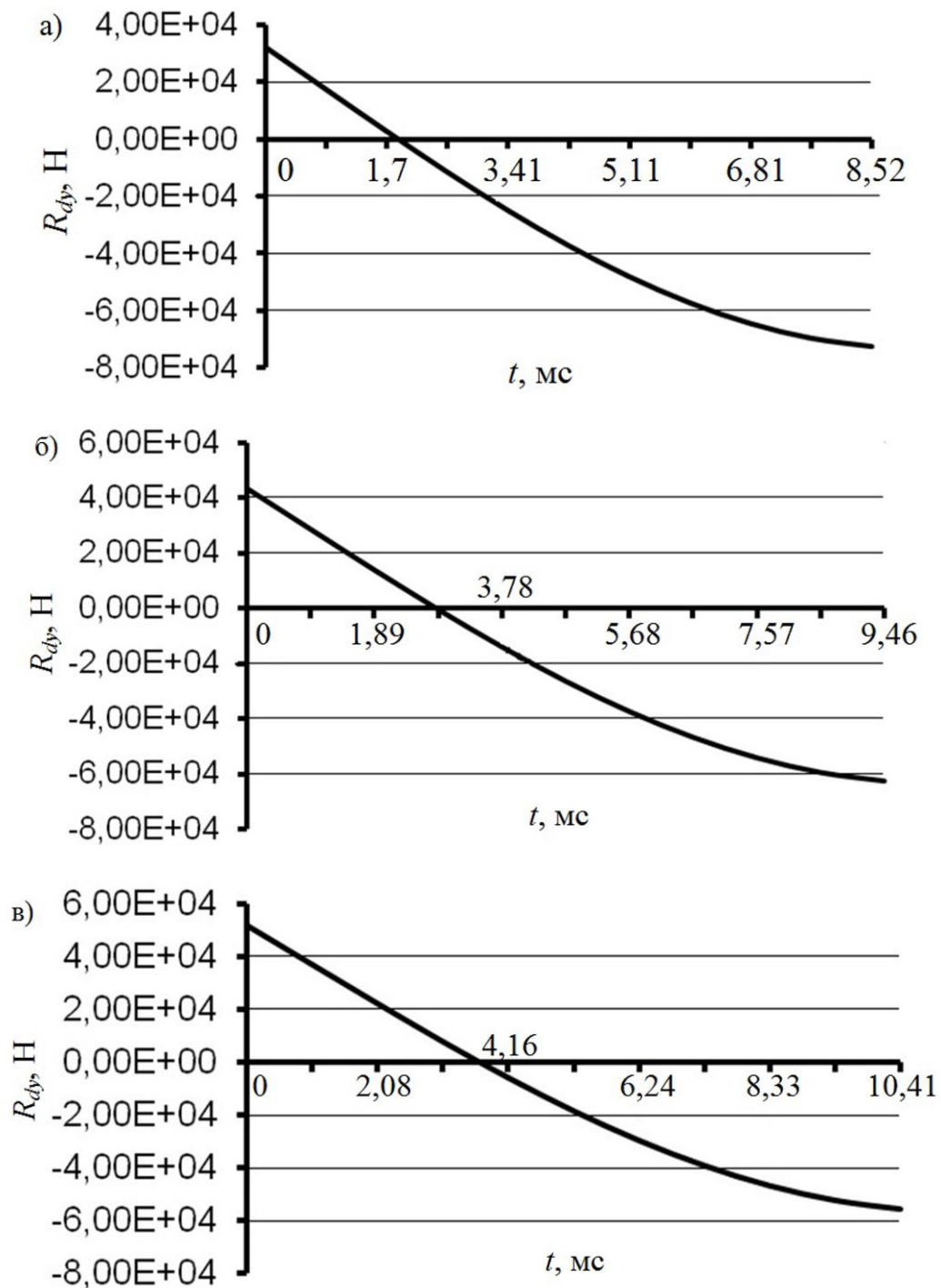


Рисунок 3.3 – Залежність вертикальної складової реакції
опори D від часу

Графік залежності вертикальної складової реакції опори D від часу $R_{Dy}(t)$, що відповідає руху центра мас колеса 1 по дузі $C_1''C_1^K$, наведений на рисунку 3.3. При цьому прийнято [41]: $V_x = 5$ м/с, $m_1 = 1100$ кг,

$m_2 = 1025, 2038, 2714 \text{ кг}$, $h = 2,6; 3,21; 3,89 \text{ мм}$ (перша фаза руху трамвайного вагона, дані відповідають таблиці 2.1), $r = 0,35 \text{ м}$, коефіцієнти жорсткості і опору $c = 8,45 \cdot 10^5 \text{ кг/с}^2$, $b = 24 \cdot 10^3 \text{ кг/с}$.

Аналіз залежностей $R_{Dy}(t, m_2)$ на рисунку 3.3, а), б), в) показує таке.

Наприклад, на першій фазі руху трамвайного вагона після зміни завантаження в діапазоні $m_2 = (1025 \div 2714) \text{ кг}$ вертикальна складова реакції приймальної рейки набуває значення $R_{Dy}(t, m_2) = (3,24 \div 5,15) \cdot 10^4 \text{ Н}$, тобто збільшується в 1,59 разів.

З отриманих результатів також витікає, що в деякий момент часу при заданих параметрах системи і руху реакція $R_{Dy}(t)$ може стати від'ємною. Це означає, що колесо відривається від рейки і далі відбувається балістичний рух системи з подальшим ударом о поверхню рейкової колії поза межами ступені.

На рисунку 3.4 наведені графіки, що показують границі областей параметрів швидкості руху V_x трамвайного вагона і висоти сходинки h стику, за яких відбувається безвідривний рух колеса від приймальної рейки. Криві 1, 2, 3 відповідають випадкам порожнього, середнього і максимального завантаження трамвайного вагона ($m_2 = 1025 \text{ кг}$, $m_2 = 2038 \text{ кг}$ і $m_2 = 2714 \text{ кг}$ відповідно).

З графіків випливає, що залежно від фаз руху трамвайного вагона через стикову нерівність: наприклад, при максимальному завантаженні вагона на першій, другій, третій і четвертій фазах руху відбувається відрив колеса від поверхні катання приймальної рейки відповідно за швидкостей $V_x = 3,22; 3,13; 3,16; 3,12 \text{ м/с}$.

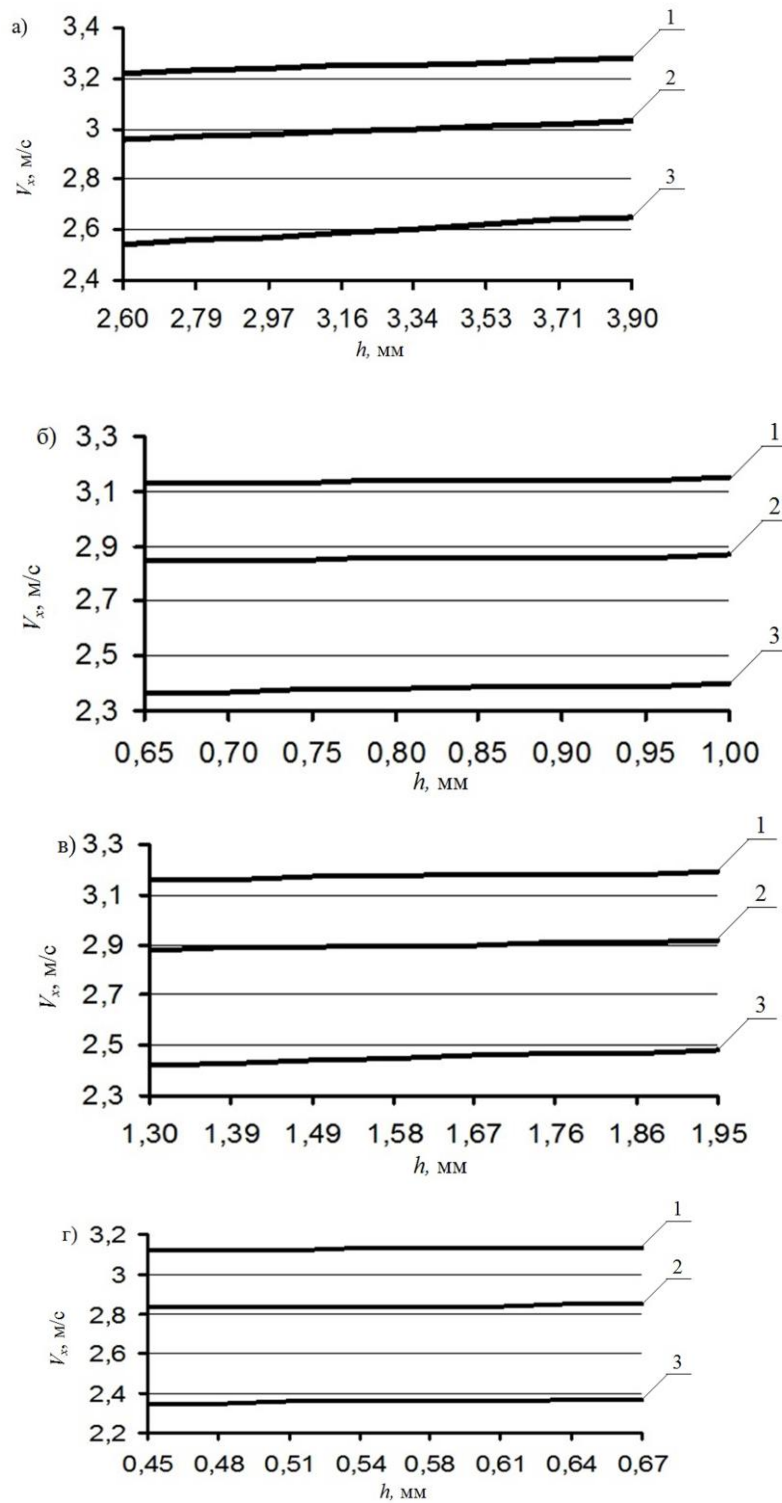


Рисунок 3.4 – Параметри безвідривного руху колеса
залежно від фази руху трамвайного вагона

Дослідимо далі задачу балістичного руху системи, розв'язуючи систему диференціальних рівнянь (3.9) і (3.10) за умови відсутності реакції опори D ($R_D = F_{mp} = 0$). Ці рівняння матимуть вигляд [51, 52]:

$$m_1 \ddot{q}_1 + b(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + c(q_1 - q_2) = -P_1 - P_2, \quad (3.13)$$

$$m_2 \ddot{q}_2 + b(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) + c(q_2 - q_1) = 0. \quad (3.14)$$

Розв'язками системи рівнянь (3.13), (3.14) будуть такі вирази:

$$q_1 = e^{-ht} \cdot [C_3 \cdot \cos(\omega_0^* t) + C_4 \cdot \sin(\omega_0^* t)] - \frac{gt^2}{2} + \frac{m_2}{m_1 + m_2} C_5 t + \frac{m_2}{m_1 + m_2} C_6 - \frac{m_2^2}{m_1 + m_2} \frac{g}{c}, \quad (3.15)$$

$$q_2 = -\frac{m_1}{m_2} e^{-ht} \cdot [C_3 \cdot \cos(\omega_0^* t) + C_4 \cdot \sin(\omega_0^* t)] - \frac{gt^2}{2} + \frac{m_2}{m_1 + m_2} C_5 t + \frac{m_2}{m_1 + m_2} C_6 + \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \frac{g}{c}, \quad (3.16)$$

$$\text{де } C_3 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} (q_{01} - q_{02}) + \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \frac{g}{c}, \quad C_5 = \frac{m_1}{m_2} \dot{q}_{01} + \dot{q}_{02},$$

$$C_4 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \frac{(\dot{q}_{01} - \dot{q}_{02})}{\omega_0^*} + \frac{h}{\omega_0^*} C_3, \quad C_6 = \frac{m_1}{m_2} q_{01} + q_{02},$$

$$h = \frac{b}{2} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}, \quad \omega_0^2 = c \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}, \quad \omega_0^* = \sqrt{\omega_0^2 - h^2}.$$

Час τ_2 балістичного руху системи до удару визначимо за умови

$$q_1|_{t=\tau_2} = h. \quad (3.17)$$

Тоді відстань від сходинок D до точки E удару колеса о рейкову колію (рис. 3.2, б) визначиться із співвідношення:

$$DE = V_x(\tau_1 + \tau_2) - \Delta, \quad (3.18)$$

де час τ_1 безвіддривного руху колеса при підйомі на сходинок визначається за умови рівності нулю вертикальної складової реакції опори D (рівняння (3.12)).

За формулою (3.18) з урахуванням співвідношень (3.15) і (3.17) були виконані розрахунки відстані DE для $V_x = 5$ м/с, $m_1 = 1100$ кг, завантаженні трамвайного вагона $m_2 = 1025, 2038, 2714$ кг, висоті сходинок стику на першій фазі руху трамвайного вагона (табл. 2.1) $h = 2,6; 3,21; 3,89$ мм, $r = 0,35$ м,

$c = 8,45 \cdot 10^5$ кг/с², $b = 24 \cdot 10^3$ кг/с. Значення відстані DE при зазначених параметрах дорівнює відповідно: 14,16; 8,43; 6,47 см.

Отримані результати в подальшому використовуються для розрахунків параметрів динамічної взаємодії трамвайного вагона і рейкової колії поза межами стикової нерівності, а також визначенні швидкості трамвайного вагона.

3.3 Аналіз результатів дослідження ударної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією і висновки за розділом 3

Згідно з запропонованою моделлю (див. рис. 3.1), виразом (3.7), а також даних таблиць 3.1–3.4 побудовано залежності післяударної швидкості перерізу приймальної рейки на кінці $V_1 = V_i(V_{1k}, m)$ ($i = 1-4$) від фази руху трамвайного вагона через стик шляху, швидкості трамвайного вагона і зведеної до одного колеса маси трамвайного вагона, які наведені на рисунках 3.5–3.8.

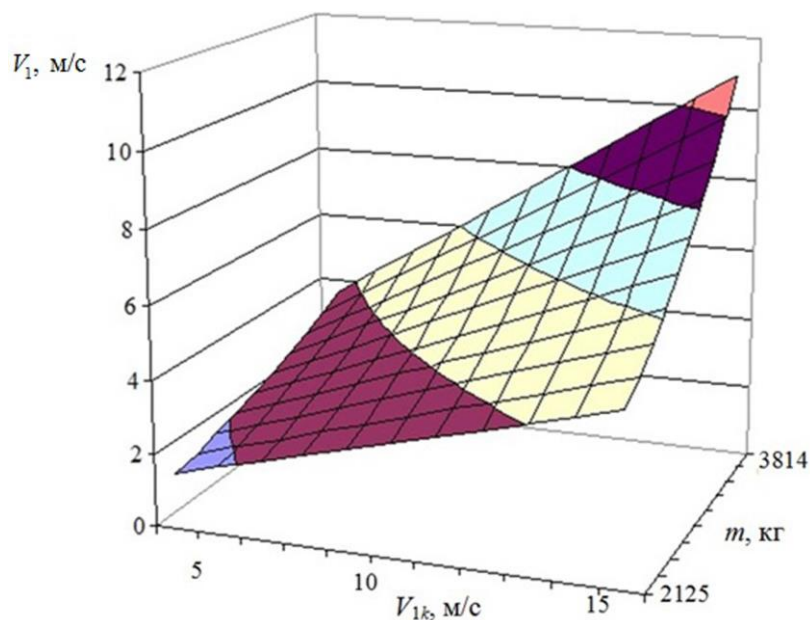


Рисунок 3.5 – Залежність післяударної швидкості перерізу приймальної рейки від експлуатаційних факторів на першій фазі руху трамвайного вагона

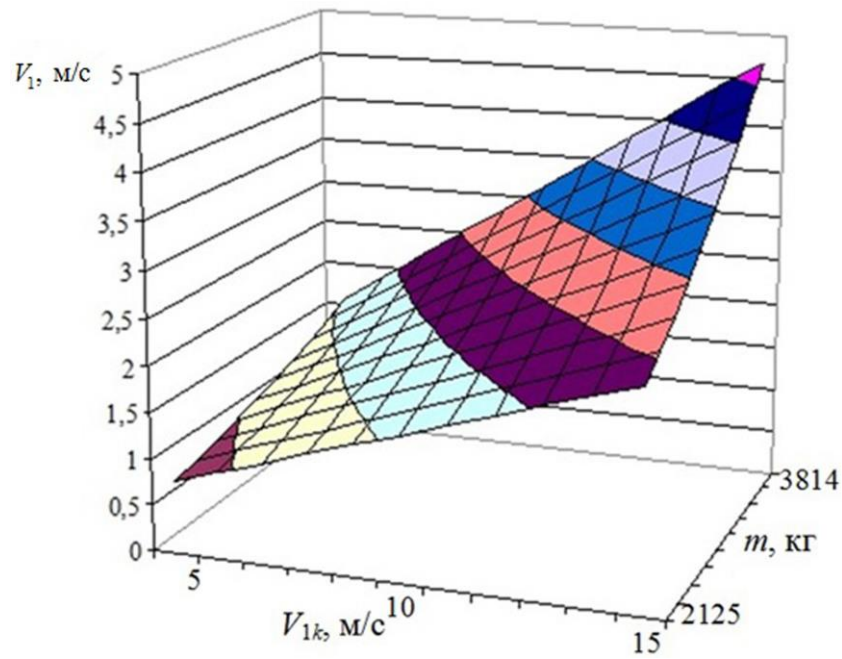


Рисунок 3.6 – Залежність післяударної швидкості перерізу приймальної рейки від експлуатаційних факторів на другій фазі руху трамвайного вагона

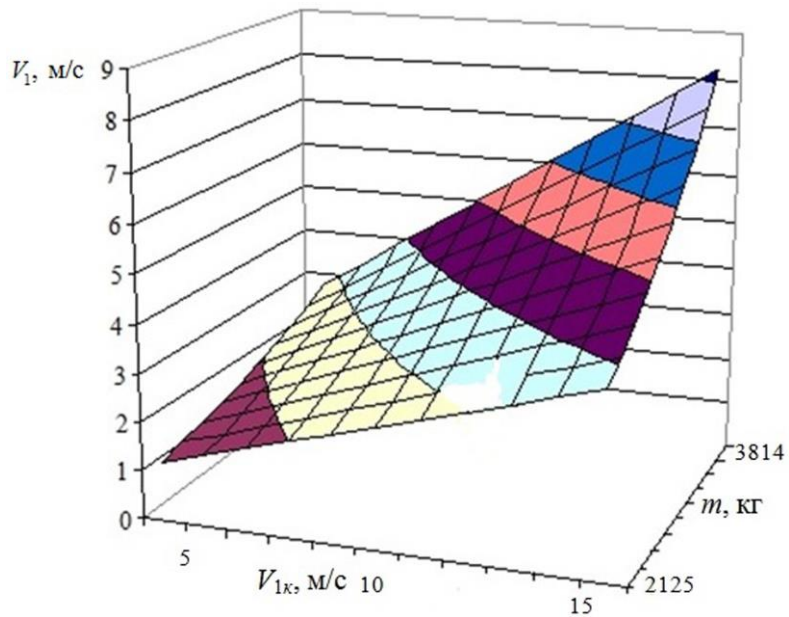


Рисунок 3.7 – Залежність післяударної швидкості перерізу приймальної рейки від експлуатаційних факторів на третій фазі руху трамвайного вагона

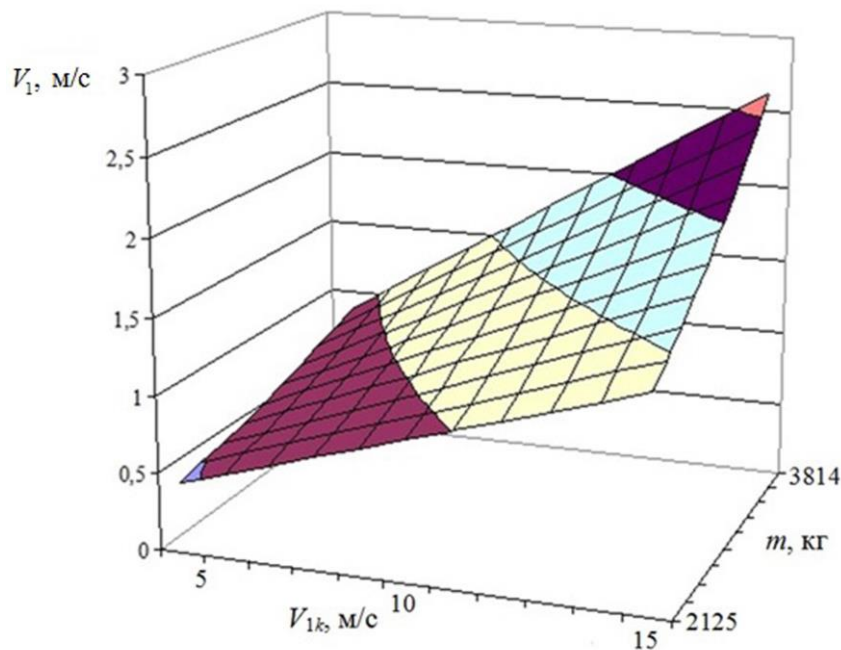


Рисунок 3.8 – Залежність післяударної швидкості перерізу пприймальної рейки від експлуатаційних факторів на четвертій фазі руху трамвайного вагона

Аналіз графіків показує таке:

1. Зміна зведеної до одного колеса маси трамвайного вагона в діапазоні $m = [2125 \div 3814]$ кг, наприклад, при швидкості руху $V_{1k} = 15$ м/с призводить до зміни післяударної швидкості залежно від фаз руху трамвайного вагона відповідно в діапазонах $V_1 = [4,635 \div 10,93]$ м/с, $V_1 = [2,355 \div 4,708]$ м/с, $V_1 = [3,729 \div 8,234]$ м/с, $V_1 = [1,368 \div 2,623]$ м/с, тобто до її зростання в 2,36; 1,99; 2,2; 1,92 разів.

2. Встановлено також, що збільшення швидкості руху трамвайного вагона в діапазоні $V_{1k} = [1 \div 15]$ м/с при завантаженні трамвайного вагона, що відповідає зведених до одного колеса масі трамвайного вагона $m = 3814$ кг, призводить до зміни післяударної швидкості залежно від фаз руху трамвайного вагона відповідно в діапазонах $V_1 = [3,643 \div 10,93]$ м/с, $V_1 = [1,569 \div 4,708]$ м/с, $V_1 = [2,745 \div 8,234]$ м/с, $V_1 = [0,874 \div 2,623]$ м/с, тобто до її зростання в 3,0; 3,0;

2,99; 3,0 раз. Виявляється закономірність, що ця зміна практично не залежить від фаз руху трамвайного вагона.

Отримані результати в теоретичному аспекті мають суттєве значення при встановленні закономірностей впливу експлуатаційних факторів, а на практиці – використовуються під час розроблення технічних рішень із удосконалення стику рейкової колії, при визначенні режимів експлуатації трамвайних вагонів, з урахуванням граничних значень ударних імпульсів взаємодії, а також при створенні експериментально-теоретичного комплексу для дослідження, розрахунків та вдосконалення параметрів трамвайного вагона і верхньої будови колії.

На базі залежностей $V_1 = V_i(V_{1k}, h_{i\phi})$ ($i=1-4$) встановлено і досліджено нові закономірності взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією в умовах проходження транспортним засобом стикової нерівності при варіюванні його швидкості і висоти стику колії, а також залежно від фази руху. У роботі в подальшому отримані результати використані як початкові дані для розрахунків прогинів приймальної рейки шляху під першою шпалою на фазі його зростання.

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ПРОГИНІВ ПРИЙМАЛЬНОЇ РЕЙКИ ПІД ПЕРШОЮ ШПАЛОЮ В ЗОНІ СТИКОВОЇ НЕРІВНОСТІ

У цьому розділі роботи розглянуто динамічну взаємодію трамвайного вагона з рейковою колією в зоні стику з урахуванням таких факторів: висоти стику, яка відповідає параметрам статичної взаємодії руху трамвайного вагона, а також його завантаженню, що встановлено в розділі 2 роботи; конструктивних та експлуатаційних факторів механічної системи «трамвайний вагон – рейкова колія». При цьому динамічні характеристики післяударної взаємодії на фазі зростання прогинів континуальної системи під першою опорою визначаються з урахуванням методів планування експерименту, а також параметрів реального об'єкта у вигляді трамвайного вагона та рейкового шляху в зоні ізольованої стикової нерівності типу «зазор – ступінь вгору».

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання: методами моделювання механічну систему, що розглядається, подано у вигляді багатопролітної балки на пружних опорах. Стикову накладку – еквівалентним пружним елементом на кінці приймальної або віддавальної рейки, коефіцієнт жорсткості якої визначено з урахуванням її плоского напруженого стану. Також, враховуючи ударну взаємодію колеса першої колісної пари з торцем приймальної рейки, трамвайний вагон, що взаємодіє з приймальною рейкою, розглянуто у вигляді підресореної зведеної маси. При цьому поточна висота сходинки визначається з урахуванням статичної взаємодії трамвая з рейковою колією, що відповідає фазі руху трамвайного вагона через нерівність стику.

Під час аналізу процесів динамічної взаємодії в системі «двовимірна дискретна пружно-дисипативна система – континуальна система у вигляді нерозрізної багатопролітної балки на 24-х пружних опорах» прийняті такі припущення, що не суперечать результатам робіт [20, 38–41, 47–49, 57]: при ударі колеса в торець приймальної рейки не відбувається його відрив, а також його ковзання відносно рейки; коливання колісної пари та головки рейки

відбуваються в безвідривному режимі (оскільки $m_2 \gg m_1$, припущення є прийнятним); прогини рейки реалізуються без порушення цілісності баластового шару (оскільки розглядаються деформаційні характеристики баластового шару під першою шпалою на фазі зростання прогинів приймальної рейки тільки вниз, припущення також є прийнятним).

4.1 Дослідження динамічних прогинів приймальної рейки на першій фазі руху трамвайного вагона

Досліджено динамічну взаємодію трамвайного вагона з рейковою колією в зоні стику на першій фазі руху, з урахуванням його завантаження та швидкості, що встановлено в розділах 2, 3 роботи. Схема стадії проходження першою колісною парою рейкового стику зображена на рисунку 2.1.

Розрахункова механічна схема динамічної взаємодії приймальної рейки на першій фазі руху трамвайного вагона показана на рисунку 4.1, де c_1, b_1 – жорсткість та коефіцієнт демпфірування підвіски трамвайного вагона; c_2, b_2 – жорсткість та коефіцієнт опору баластового шару під рейкою; m_1, m_2 – зведені маси колеса і трамвайного вагона з урахуванням завантаження; y_1, y_2 – переміщення зведеної маси колеса і трамвайного вагона; w – прогин рейки.

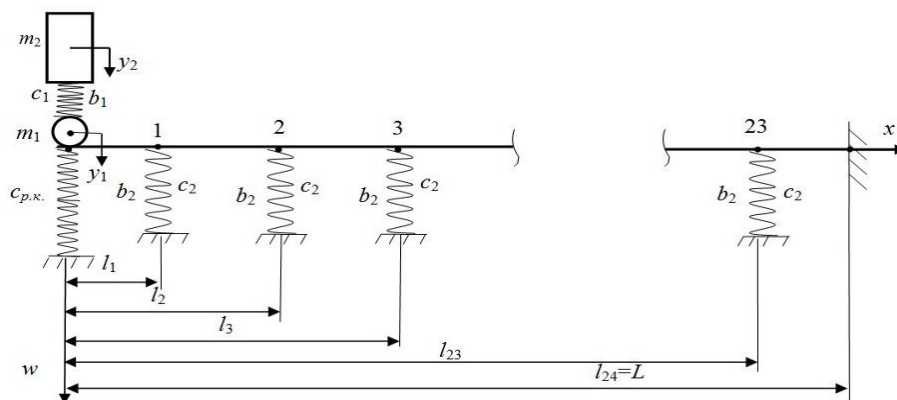


Рисунок 4.1 – Розрахункова механічна схема динамічної взаємодії приймальної рейки на першій фазі руху трамвайного вагона

На рисунку 4.2. наведено схему післяударної взаємодії колеса з приймальною рейкою. Тут умовні позначення і геометричні координати приймальної рейки та коліс відповідають аналогічним на рисунку 2.2.

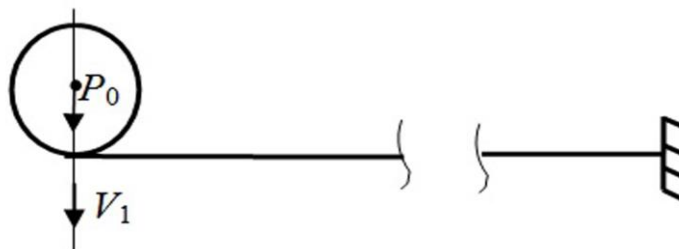


Рисунок 4.2 – Схема післяударної взаємодії колеса з приймальною рейкою

З огляду на [20, 35–40, 47, 57]: для запропонованої моделі диференціальні рівняння коливань мають такий вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial^4 w(t, x)}{\partial x^4} + \frac{\rho F}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, x)}{\partial t^2} = \frac{c_1(y_2 - 0,5w(t, 0))\delta(0)}{EJ} - \frac{c_{p.k.} w(t, 0)\delta(0)}{EJ} - \\ & - \sum_{i=1}^{23} \frac{c_2 w(t, l_i)\delta(x - l_i)}{EJ} - \frac{m_1}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, 0)\delta(0)}{\partial t^2} + \frac{P_0\delta(0)}{EJ} - \\ & - \sum_{i=1}^{23} \frac{b_2}{EJ} \cdot \frac{\partial w(t, l_i)}{\partial t} \cdot \delta(x - l_i) + \frac{b_1}{EJ} \cdot \left(\frac{\partial y_2}{\partial t} - 0,5 \frac{\partial w(t, 0)}{\partial t} \right) \cdot \delta(0); \\ & m_2 \cdot \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_1(y_2 - 0,5w(t, 0)) + b_1 \cdot \left(\frac{\partial y_2}{\partial t} - 0,5 \frac{\partial w(t, 0)}{\partial t} \right) = 0, \end{aligned} \right. \quad (4.1)$$

де $w(t, x)$ – прогин рейки; $\delta(x)$ – імпульсна функція; F, ρ – площа перерізу і щільність матеріалу рейки. Тут при $t=0$ на першій фазі руху матимемо $w(0, x) = 0, \dot{w}(0, 0) = V_{1,1\phi}$.

Розв’язання отриманої системи рівнянь виконується із застосуванням методу Фур’є поділу змінних, а також методів теорії операційного числення Лапласа – Карсона [20, 35–40] за Методом, який створено у цій роботі. Він побудований на принципі суперпозиції дії сил стосовно лінійних систем, що деформуються. Структурно Метод складається з таких блоків.

Блок 1. Розглядається задача про вільні коливання механічної системи «трамвайний вагон – рейкова колія», що зводиться до суперпозиції власних

форм. При цьому не враховуються складові, пов'язані з явищами дисипації, а також впливом статичного навантаження збоку трамвайного вагона на приймальну рейку. В узагальненому вигляді для всіх фаз руху трамвайного вагона прогини приймальної рейки з урахуванням геометричних координат і підресореної маси трамвайного вагона визначатимемо виразами

$$w(t, x) = \sum_{s=1}^5 z^s(x) (D_s \sin \omega_s t + M_s \cos \omega_s t),$$

$$y_1(t, l^*) = w(t, x = l^*) = \sum_{s=1}^5 z^s(l^*) (D_s \sin \omega_s t + M_s \cos \omega_s t) = \sum_{s=1}^5 (\lambda_1^s D_s \sin \omega_s t + \lambda_1^s M_s \cos \omega_s t)$$

$$y_2(t) = \sum_{s=1}^5 (\lambda_2^s D_s \sin \omega_s t + \lambda_2^s M_s \cos \omega_s t), \quad (4.2)$$

де D_s, M_s – коефіцієнти, що знаходиться із умов ортогональності форм коливань [35–40] з урахуванням доударної швидкості колеса першої колісної пари (див. розділ 3) і післяударної швидкості рейки сумісно з колесом; $z^s(x), \omega_s$ – власні форми та частоти коливань приймальної рейки як системи з розподіленими параметрами; l^* – лінійна координата маси m_1 .

Блок 2. Тут на розв'язок за виразом (4.2) накладається експоненціальна складова:

$$w_{Em2}(t, x) = \sum_{s=1}^5 z^s(x) e^{-h_s t} (D_s \sin \omega_s t + M_s \cos \omega_s t), \quad (4.3)$$

де h_s – коефіцієнт демпфірування відповідної форми коливань.

При цьому коефіцієнт дисипації визначається, враховуючи [51, 52], за виразом

$$h_s = b_s / 2m_{36.p.},$$

де b_s – коефіцієнт опору стосовно відповідної форми коливань; $m_{36.p.}$ – зведена маса рейки. У розрахунках, відповідно до [25, 27], прийнято $m_{36.p.} = 150$ кг, $b_s = 0,6 \cdot 10^5$ Н·с/м (незалежно від s).

Блок 3. На пружну лінію $y(x)$ приймальної рейки, що визначена для першої фази руху в розділі 2, за принципом суперпозиції накладається методом

додавання прогин приймальної рейки, який розраховано на етапі 2 за формулою (4.3), дивись також схему на рисунку 4.3:

$$w(t, x) = y(x) + w_{Em2}(t, x)$$

$$\text{або} \quad w(t, x) = y(x) + \sum_{s=1}^5 z^s(x) e^{-h_s t} (D_s \sin \omega_s t + M_s \cos \omega_s t).$$

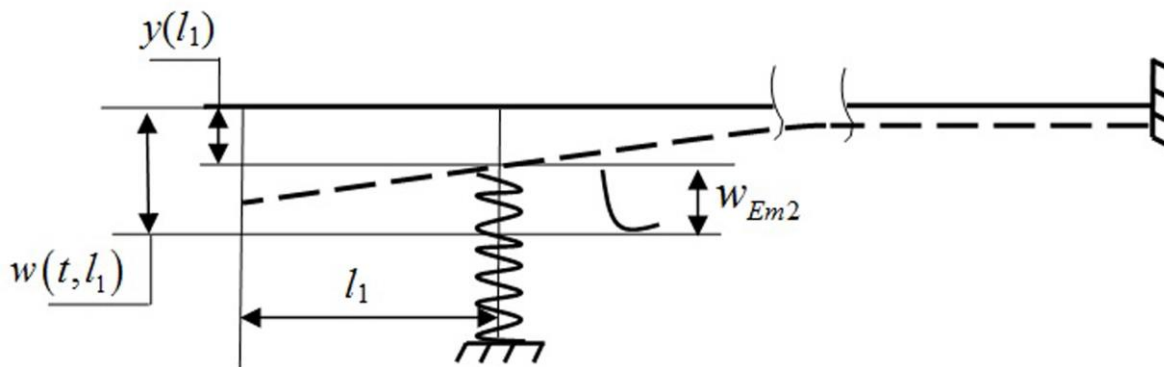


Рисунок 4.3 – Схема прогину приймальної рейки під першою шпалою на першій фазі руху трамвайного вагона

Зазначений Метод забезпечує визначення прогину під першою шпалою приймальної рейки у динаміці залежно від фази руху трамвайного вагона через стикову нерівність, конструктивних і механічних характеристик трамвайного вагона й рейкового шляху.

Розв'язання задачі за Блоком 1

Диференціальні рівняння руху механічної системи, з огляду на (4.1), матимуть вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial^4 w(t, x)}{\partial x^4} + \frac{\rho F}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, x)}{\partial t^2} = \frac{c_1(y_2 - 0,5w(t, 0))\delta(0)}{EJ} - \frac{c_{p.k.}w(t, 0)\delta(0)}{EJ} - \\ - \sum_{i=1}^{23} \frac{c_2 w(t, l_i)\delta(x - l_i)}{EJ} - \frac{m_1}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, 0)\delta(0)}{\partial t^2} = 0; \\ m_2 \cdot \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_1(y_2 - 0,5w(t, 0)) = 0, \end{cases} \quad (4.4)$$

Для власних форм, враховуючи систему рівнянь (4.4), а також [20, 35, 40], отримаємо

$$\begin{cases} z^{s^{IV}}(x) - k_1^{s^4} z^s(x) - [k_2^{s^4} z^s(0) + \frac{c_1}{EJ} (\lambda_2^s - 0,5\lambda_1^s)] \delta(0) + \frac{c_2}{EJ} \sum_{i=1}^{23} z^s(l_i) \delta(x-l_i) + \\ + \frac{c_{p.k.} z^s(0) \delta(0)}{EJ} = 0, \\ -m_2 \lambda_2^s \omega_s^2 + c_1 (\lambda_2^s - 0,5\lambda_1^s) = 0, \end{cases} \quad (4.5)$$

де $k_1^{s^4} = \frac{\rho F}{EI} \omega_s^2$; $k_2^{s^4} = \frac{m_1}{EJ} \omega_s^2$; $\lambda_1^s = z(l^*)$; λ_2^s – власна форма для координати y_2 на рисунку 4.1.

Диференціальні рівняння (4.5) відносно форм коливань приймальної рейки розв'яжемо методами теорії операційного числення Лапласа – Карсона [35]:

$$\begin{aligned} \eta(p) = & \frac{p^4}{p^4 - \kappa_1^4} z(0) + \frac{p^3}{p^4 - \kappa_1^4} \frac{\kappa_1}{\kappa_1} z'(0) + \frac{p^2}{p^4 - \kappa_1^4} \frac{\kappa_1^2}{\kappa_1^2} z''(0) + \frac{p}{p^4 - \kappa_1^4} \frac{\kappa_1^3}{\kappa_1^3} z'''(0) + \\ & + \kappa_2^4 z(l^*) \frac{pe^{-pl^*}}{p^4 - \kappa_1^4} + \frac{c_1}{EJ} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \frac{pe^{-pl^*}}{p^4 - \kappa_1^4} - \frac{c_2}{EJ} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \frac{pe^{-pl_i}}{p^4 - \kappa_1^4} - \frac{c_{p.k.} z(l^*)}{EJ} \frac{pe^{-pl^*}}{p^4 - \kappa_1^4}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

де $\eta(p)$ – зображення функції $z(x)$.

Враховуючи вираз (4.6), перейдемо за допомогою функцій $\rho, \varphi, \psi, \gamma$ Крилова до оригіналу:

$$\begin{aligned} z(x) = & \rho(\kappa_1 x) z(0) + \frac{\varphi(\kappa_1 x)}{\kappa_1} z'(0) + \frac{\psi(\kappa_1 x)}{\kappa_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(\kappa_1 x)}{\kappa_1^3} z'''(0) + \\ & + \frac{\kappa_2^4 z(l^*)}{\kappa_1^3} \gamma[\kappa_1(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*} + \frac{c_1}{EJ \kappa_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[\kappa_1(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*} - \\ & - \frac{c_2}{EJ \kappa_1^3} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \gamma[\kappa_1(x-l_i)] \Big|_{x \geq l_i} - \frac{c_{p.k.}}{EJ \kappa_1^3} z(l^*) \gamma[\kappa_1(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*}. \end{aligned}$$

Відповідно до ділянок на рисунку 4.1 отримаємо:

на першій ділянці $0 \leq x \leq l_1$

$$\begin{aligned} z_1(x) = & \rho(\kappa_1 x) z(0) + \frac{\varphi(\kappa_1 x)}{\kappa_1} z'(0) + \frac{\psi(\kappa_1 x)}{\kappa_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(\kappa_1 x)}{\kappa_1^3} z'''(0) + \\ & + \frac{\kappa_2^4 z(l^*)}{\kappa_1^3} \gamma[\kappa_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*} + \frac{c_1}{EJ\kappa_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[\kappa_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*} - \\ & - \frac{c_{p.\kappa.}}{EJ\kappa_1^3} z(l^*) \gamma[\kappa_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*}; \end{aligned}$$

на ділянках $l_i \leq x \leq l_{i+1}$ ($1 \leq i \leq 23$)

$$\begin{aligned} z(x) = & \rho(\kappa_1 x) z(0) + \frac{\varphi(\kappa_1 x)}{\kappa_1} z'(0) + \frac{\psi(\kappa_1 x)}{\kappa_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(\kappa_1 x)}{\kappa_1^3} z'''(0) + \\ & + \frac{\kappa_2^4 z(l^*)}{\kappa_1^3} \gamma[\kappa_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*} + \frac{c_1}{EJ\kappa_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[\kappa_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*} - \\ & - \frac{c_2}{EJ\kappa_1^3} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \gamma[\kappa_1(x - l_i)] \Big|_{x \geq l_i} - \frac{c_{p.\kappa.}}{EJ\kappa_1^3} z(l^*) \gamma[\kappa_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*}. \end{aligned}$$

Зазначена система рівнянь, з урахуванням (4.5), має 29 невідомих: $z(0)$, $z'(0)$, $z''(0)$, $z'''(0)$, $z_1(x)$, $z_i(x)$ ($i = 2 \div 23$), $\lambda_1 = z_1(l^*)$, λ_2 .

З урахуванням граничних умов отримаємо таку систему алгебраїчних рівнянь:

$$z_1''(0) = 0;$$

$$z_1'''(0) = \frac{c_{p.\kappa.}}{EJ} z(0);$$

$$z_{23}(L) = 0;$$

$$z'_{23}(L) = 0;$$

$$\begin{aligned} z_1(x) = & \rho(\kappa_1 x) z(0) + \frac{\varphi(\kappa_1 x)}{\kappa_1} z'(0) + \frac{\psi(\kappa_1 x)}{\kappa_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(\kappa_1 x)}{\kappa_1^3} z'''(0) + \\ & + \frac{\kappa_2^4 z(l^*)}{\kappa_1^3} \gamma[\kappa_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*} + \frac{c_1}{EJ\kappa_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[\kappa_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*} - \\ & - \frac{c_{p.\kappa.}}{EJ\kappa_1^3} z(l^*) \gamma[\kappa_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
z_i(x) = & \rho(\kappa_1 x) z(0) + \frac{\varphi(\kappa_1 x)}{\kappa_1} z'(0) + \frac{\psi(\kappa_1 x)}{\kappa_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(\kappa_1 x)}{\kappa_1^3} z'''(0) + \\
& + \frac{\kappa_2^4 z(l^*)}{\kappa_1^3} \gamma[\kappa_1(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*} + \frac{c_1}{EJ\kappa_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[\kappa_1(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*} - \\
& - \frac{c_2}{EJ\kappa_1^3} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \gamma[\kappa_1(x-l_i)] \Big|_{x \geq l_i} - \frac{c_{p.k.}}{EJ\kappa_1^3} z(l^*) \gamma[\kappa_1(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*}. \\
& -m_2 \lambda_2 \omega^2 + c_1 (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) = 0, \\
& \lambda_1 = z_1(l^*).
\end{aligned}$$

За матричним рівнянням

$$[A] \cdot [x]' = 0, \quad (4.7)$$

де $x = [z(0), z'(0), z''(0), z'''(0), z_1(x), z_i(x) (i = 2 \div 23), \lambda_1 = z_1(l^*), \lambda_2]^T$, а ненульові складові матриці $[A]$ визначаються відповідно до результатів роботи [41], визначимо власні частоти ω_s дискретно-континуальної механічної системи на рисунку 4.1.

У результаті одержимо

$$\begin{aligned}
z^s(x) = & \rho(\kappa_1^s x) z^s(0) + \frac{\varphi(\kappa_1^s x)}{\kappa_1^s} z^{s'}(0) + \frac{\psi(\kappa_1^s x)}{\kappa_1^{s2}} z^{s''}(0) + \frac{\gamma(\kappa_1^s x)}{\kappa_1^{s3}} z^{s'''}(0) + \\
& + \frac{\kappa_2^{s4} z^s(l^*)}{\kappa_1^{s3}} \gamma[\kappa_1^s(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*} + \frac{c_1}{EJ\kappa_1^{s3}} (\lambda_2^s - \lambda_1^s) \gamma[\kappa_1^s(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*} - \\
& - \frac{c_2}{EJ\kappa_1^{s3}} \sum_{i=1}^{23} z^s(l_i) \gamma[\kappa_1^s(x-l_i)] \Big|_{x \geq l_i} - \frac{c_{p.k.}}{EJ\kappa_1^{s3}} z^s(l^*) \gamma[\kappa_1^s(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*},
\end{aligned}$$

де k_1^s, k_2^s – константи, що відповідають формі коливань.

Для кожної власної частоти ω_s умовою розв'язання системи (4.1.2) є умова ортогональності власних форм коливань.

Перетворивши за парадигмою робіт [41, 57] перше і друге рівняння системи (4.5), їх спочатку склавши, а потім віднявши, отримаємо такий вираз, що визначає умови ортогональності форм коливань:

$$\rho F \int_0^L z^s(x) z^j(x) dx + m_1 \lambda_1^s \lambda_1^j + m_2 \lambda_2^j \lambda_2^s = \delta^{js} \left(\rho F \int_0^L z^{s2}(x) dx + m_1 \lambda_1^{s2} + m_2 \lambda_2^{s2} \right),$$

де $\delta^{js} = 0 |_{j \neq s}, \delta^{js} = 1 |_{j=s}$.

Далі, враховуючи форми розв'язків системи (4.4) у вигляді (4.2), визначимо початкові умови механічної системи, що розглядається:

$$w(0, x) = \Phi_1(x) = \sum_{j=1}^5 z^j(x) M_j; \left| \cdot \rho F z^s(x) \right|_0^L;$$

$$y_1(0, 0) = \Phi_1(0) = \sum_{j=1}^5 M_j \lambda_1^j; \left| \cdot m_1 \lambda_1^s \right|;$$

$$\dot{w}(0, x) = \Phi_2(x) = \sum_{j=1}^5 z^j(x) D_j \omega_j; \left| \cdot \rho F z^s(x) \right|_0^L;$$

$$\dot{y}_1(0, 0) = \Phi_2(0) = \dot{y}_{10} = \sum_{j=1}^5 D_j \omega_j \lambda_1^j; \left| \cdot m_1 \lambda_1^s \right|;$$

$$y_2(0) = y_{20} = \sum_{j=1}^5 M_j \lambda_2^j; \left| \cdot m_2 \lambda_2^s \right|;$$

$$\dot{y}_2(0) = \dot{y}_{20} = \sum_{j=1}^5 D_j \omega_j \lambda_2^j; \left| \cdot m_2 \lambda_2^s \right|;$$

$$\Phi_2(0) = V_1 \delta(0);$$

$$\dot{y}_{10} = V_{1,1\phi}; \quad y_{20} = 0; \quad \dot{y}_{20} = V_{20} = 0.$$

Тут післяударна швидкість V_1 визначається відповідно до розділу 3 цієї роботи.

У результаті, якщо $x \neq 0$ і $j = s$, отримаємо:

$$M_s \left[\rho F \int_0^L z^{s^2}(x) dx + m_1 \lambda_1^{s^2} + m_2 \lambda_2^{s^2} \right] = 0; \quad (4.7)$$

$$D_s \omega_s \left[\rho F \int_0^L z^{s^2}(x) dx + m_1 \lambda_1^{s^2} + m_2 \lambda_2^{s^2} \right] = m_1 \lambda_1^s V_{1,1\phi} + m_2 \lambda_2^s V_{20} = m_1 \lambda_1^s V_{1,1\phi}. \quad (4.8)$$

$j = s$ виконується

$$D_s \omega_s \left[\rho F \int_0^L z^{s^2}(x) dx + m_1 \lambda_1^{s^2} + m_2 \lambda_2^{s^2} \right] = \rho F \int_0^L \Phi_2(0) z^s(0) dx + m_1 \lambda_1^s V_{1,1\phi}. \quad (4.9)$$

З (4.7)–(4.9) після перетворення буде:

при $x \neq 0$ і $j = s$

$$M_j = 0,$$

$$D_j = \frac{m_1 \lambda_1^j V_{1,1\phi}}{\omega_j \left[\rho F \int_0^L z^{j^2}(x) dx + m_1 \lambda_1^{j^2} + m_2 \lambda_2^{j^2} \right]}; \quad (4.10)$$

при $x = 0$ і $j = s$, а $\Phi_2(0) = V_{1,1\phi} \cdot \delta(0)$

$$M_j = 0,$$

$$D_j = \frac{\rho F V_{1,1\phi} z^j(0) + m_1 \lambda_1^j V_{1,1\phi}}{\omega_j \left[\rho F \int_0^L z^{j^2}(0) dx + m_1 \lambda_1^{j^2} + m_2 \lambda_2^{j^2} \right]}. \quad (4.11)$$

Тому прогин приймальної рейки з урахуванням підресореної маси трамвайного вагона і ненульових початкових умов, а також виразів (4.10), (4.11) визначиться виразом

$$w(t, x) = \sum_{j=1}^5 z^j(x) D_j \sin \omega_j t. \quad (4.12)$$

Розв'язання задачі за Блоком 2

Відповідно до визначених власних частот ω_s прогин приймальної рейки визначимо як

$$w_{Em2}(t, x) = \sum_{s=1}^5 z^s(x) e^{-h_s t} (D_s \sin \omega_s t + M_s \cos \omega_s t), \quad (4.13)$$

де $h_s = b_s / 2m_{36.p.}$, а $m_{36.p.} = 150$, $b_s = 0,6 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$.

Тому вихідною величиною розрахунків на другому етапі є значення прогину приймальної рейки під першою шпалою шляху при $x = l_1$.

Розв'язання задачі за Блоком 3

Тут до значення $y(x=l_1)$ статичного прогину приймальної рейки під першою шпалою з розділу 3, який відповідає координаті $x=l_1$, додається динамічний прогин $w_{Em2}(t, x=l_1) = \max$, розрахований на етапі 2 на фазі зростання.

У результаті отримаємо величину прогину приймальної рейки під першою шпалою на першій фазі руху трамвайного вагона на фазі його зростання, який враховує механічні і конструктивні характеристики вагона й рейкового шляху у вигляді

$$w(t, x=l_1)_{\max, \phi 1} = y(x=l_1) + w_{Em2}(t, x=l_1)_{\max}. \quad (4.14)$$

Блок-схему розрахунку динамічних прогинів приймальної рейки під першою шпалою наведено на рисунку 4.4.

Тут у блоці 1 задаються механічні $(m_{зв.р.}, m_1, m_2, b_s, b_1, c_1, c_{p.к.})$, конструктивні та геометричні $(l_i (i=1, 24))$ параметри системи «трамвайний вагон – рейкова колія». Також – статичний прогин $y(x=l_1)$ приймальної рейки під першою шпалою з розділу 2 і післяударна швидкість $V_{1,1\phi}$, яка визначена у розділі 3 й прикладається до торця приймальної рейки з координатою $x=0$. Для розрахунку в блоці 4 величини $\det[A(\omega^s)]$ за виразом (4.7) задаються граничні $(z(0), z'(0), z''(0), z'''(0))$ і початкові умови $(w(0, x), y_1(0, 0), \dot{w}(0, x), \dot{y}_1(0, 0), \dot{y}_{10} = V_{1,1\phi}, y_{20}, \dot{y}_{20} = V_{20})$.

Прогини дискретно-континуальної системи розглядаються як суперпозиція п'яти власних форм коливань (блоки 2–7). Розрахунок починається з розгляду першої форми коливань ($s=1$, блок 2).

У блоці 8 з урахуванням початкових умов визначаються вагові коефіцієнти кожної форми D_s . Далі (блок 9) визначається функція $w(t, x)$ за формулою (4.12) і коефіцієнт дисипації h_s у блоці 10. У блоці 11

розраховується прогин $w_{Em2}(t, x)$ відповідно до виразу (4.13). Під час знаходження максимального прогину під першою шпалою $w_{Em2}(t, x = l_1)_{\max}$ приймальної рейки (блок 12) варіювання параметра t припиняється, коли виконуватиметься умова $w_{Em2}(t + \Delta t, l_1) \geq w_{Em2}(t, l_1)$. У результаті залежність $w_{Em2}(t, l_1)$ буде відповідати часу свого зростання, а $w_{Em2}(t, l_1) = w_{Em2}(t, l_1)_{\max}$.

Остаточне значення прогину приймальної рейки під першою шпалою на першій фазі руху трамвайного вагона $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 1}$ визначається з урахуванням статичного прогину $y(x = l_1)$ у блоці 13 за виразом (4.14). Далі він обліковується блоком 14 задля врахування в таблицях й при побудові графічних залежностей в задачах дослідження динаміки процесу.

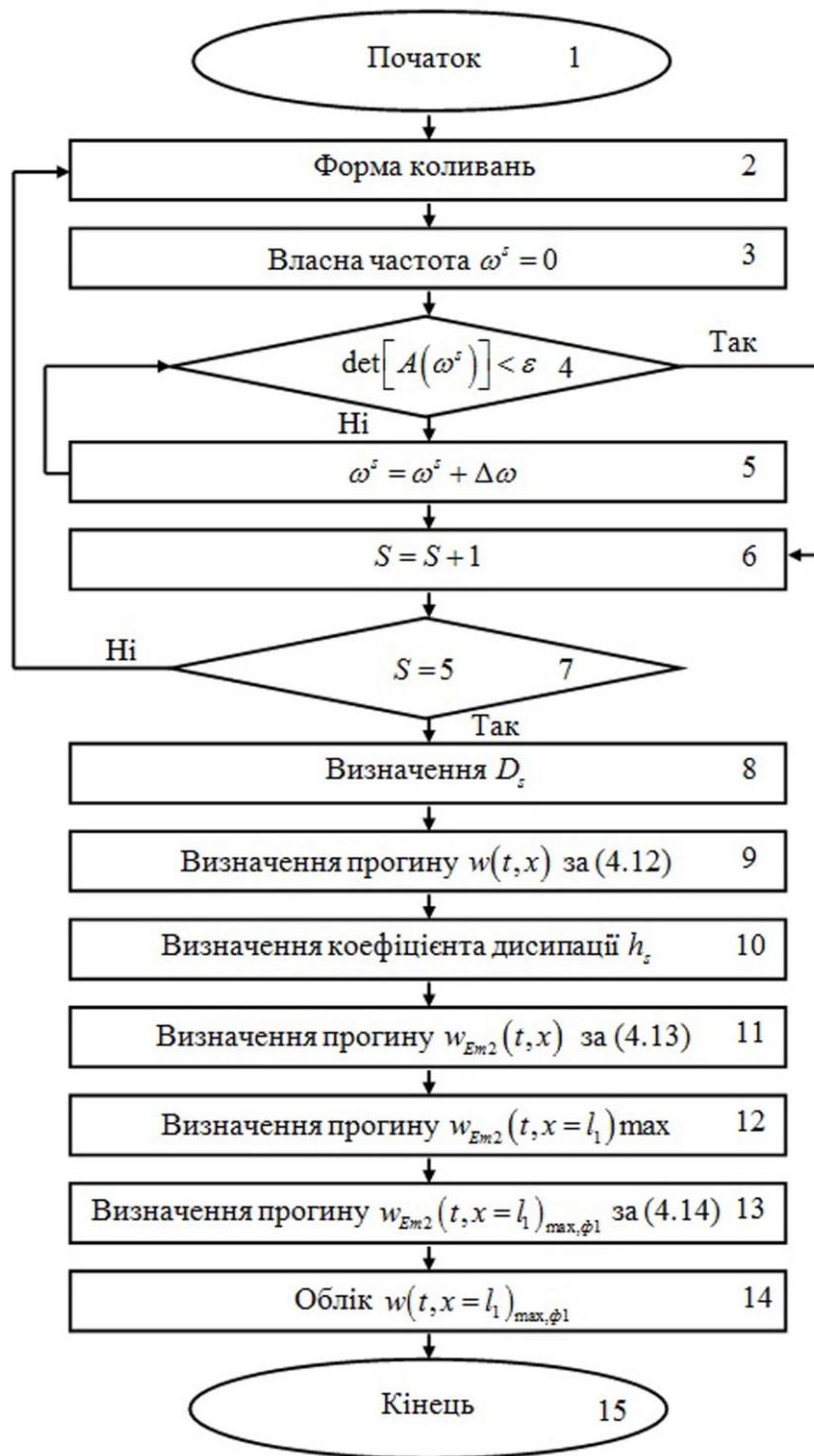


Рисунок 4.4 – Блок-схема розрахунку динамічних прогинів приймальної рейки

У таблиці 4.1 наведено величини прогинів приймальної рейки під першою шпалою на першій фазі руху трамвайного вагона.

Розрахунки виконано відповідно до механічної схеми трамвайного вагона і рейкової колії, яка наведена на рисунку 4.1, а також геометричних і

механічних характеристик системи «трамвайний вагон – рейкова колія», що відповідають першій фазі руху трамвайного вагона. Тут $V_{1k} = [5 \div 15]$ м/с – швидкість руху вагона, $m = m_1 + m_2 = [2125 \div 3814]$ кг – зведена до одного колеса маса трамвайного вагона.

Таблиця 4.1 – Прогини приймальної рейки під першою шпалою на першій фазі руху трамвайного вагона в мм

V_1 , м/с	m , кг									
	2 125	2 294	2 463	2 632	2 800	3 138	3 307	3 476	3 645	3 814
15	4,428	4,665	4,923	5,232	5,588	5,993	6,45	6,964	7,542	8,184
14	4,125	4,337	4,586	4,875	5,205	5,583	6,009	6,488	7,026	7,624
13	3,847	4,045	4,278	4,547	4,855	5,208	5,606	6,052	6,553	7,112
12	3,596	3,78	3,998	4,249	4,538	4,867	5,238	5,655	6,124	6,646
11	3,369	3,542	3,746	3,982	4,525	4,56	4,908	5,3	5,739	6,228
10	3,168	3,331	3,523	3,744	3,999	4,289	4,616	4,984	5,397	5,857
9	2,993	3,147	3,328	3,537	3,777	4,051	4,36	4,708	5,098	5,533
8	2,843	2,989	3,161	3,36	3,588	3,848	4,142	4,472	4,843	5,256
7	2,719	2,859	3,023	3,213	3,431	3,68	3,961	4,277	4,631	5,026
6	2,62	2,755	2,913	3,097	3,307	3,546	3,817	4,121	4,463	4,843
5	2,547	2,678	2,832	3,01	3,214	3,447	3,71	4,006	4,338	4,708

Встановлені параметри прогинів $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 1}$ використовуються на практиці для вдосконалення експлуатаційних режимів транспортного засобу, а також верхньої будови колії.

4.2 Динамічна взаємодія трамвайного вагона з колією на другій фазі руху

Питання статичних прогинів та доударної швидкості колеса після проходження ним стикової накладки на другій фазі руху трамвайного вагона, що розглянуті з урахуванням його завантаження в розділах 2, 3 та 4.1 роботи, є початковими даними під час дослідження динамічних прогинів приймальної рейки під першою шпалою.

Механічна схема стадії проходження другою колісною парою рейкового стику зображена на рисунку 2.4.

Розрахункова механічна схема динамічної взаємодії приймальної рейки на другій фазі руху трамвайного вагона показана на рисунку 4.5. Тут умовні позначення і геометричні координати приймальної рейки та коліс відповідають аналогічним на рисунках 2.14 та 4.1.

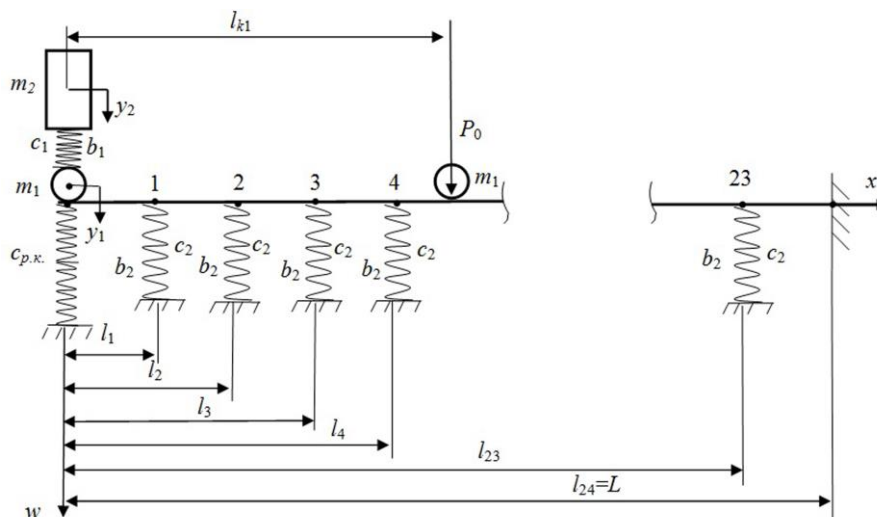


Рисунок 4.5 – Розрахункова механічна схема динамічної взаємодії приймальної рейки на другій фазі руху трамвайного вагона

Для запропонованої моделі, враховуючи розділ 4.1, диференціальні рівняння коливань при $w(0,0) = 0$, $\dot{w}(0,0) = V_{1,2\phi}$ матимуть вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial^4 w(t,x)}{\partial x^4} + \frac{\rho F}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t,x)}{\partial t^2} = \frac{c_1(y_2 - 0,5w(t,0))\delta(0)}{EJ} - \frac{c_{п.к.}w(t,0)\delta(0)}{EJ} - \\ & - \sum_{i=1}^{23} \frac{c_2 w(t,l_i)\delta(x-l_i)}{EJ} - \sum_{i=1}^2 \frac{m_1}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t,l_{ki})\delta(x-l_{ki})}{\partial t^2} + \sum_{i=1}^2 \frac{P_0\delta(x-l_{ki})}{EJ} - \\ & - \sum_{i=1}^{23} \frac{b_2}{EJ} \cdot \frac{\partial w(t,l_i)}{\partial t} \cdot \delta(x-l_i) + \frac{b_1}{EJ} \cdot \left(\frac{\partial y_2}{\partial t} - 0,5 \frac{\partial w(t,l_{k2})}{\partial t} \right) \cdot \delta(x-l_{k2}); \\ & m_2 \cdot \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_1(y_2 - 0,5w(t,l_{k2})) + b_1 \cdot \left(\frac{\partial y_2}{\partial t} - 0,5 \frac{\partial w(t,l_{k2})}{\partial t} \right) = 0, \end{aligned} \right. \quad (4.15)$$

де $l_{k1} = 1,9 \text{ м}$; $l_{k2} = 0$.

Для розв'язання системи рівнянь (4.15) використаємо Метод розділу 4.1.

Разом із тим на етапі 1 диференціальні рівняння руху механічної системи матимуть вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial^4 w(t, x)}{\partial x^4} + \frac{\rho F}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, x)}{\partial t^2} = \frac{c_1(y_2 - 0,5w(t, 0))\delta(0)}{EJ} - \frac{c_{p.к.} w(t, 0)\delta(0)}{EJ} - \\ & - \sum_{i=1}^{23} \frac{c_2 w(t, l_i)\delta(x - l_i)}{EJ} - \sum_{i=1}^2 \frac{m_1}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, l_{ki})\delta(x - l_{ki})}{\partial t^2}; \\ & m_2 \cdot \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_1(y_2 - 0,5w(t, 0)) = 0. \end{aligned} \right. \quad (4.16)$$

Рівняння (4.16) для власних форм приводяться до вигляду

$$\left\{ \begin{aligned} & z^{sIV}(x) - k_1^s z^s(x) - k_2^s [z^s(l_{k1})\delta(x - l_{k1}) + z^s(l_{k2})\delta(x - l_{k2})] + \\ & + \frac{c_{p.к.} z^s(l_{k1})\delta(x - l_{k2})}{EJ} + \frac{c_2}{EJ} \sum_{i=1}^{23} z^s(l_i)\delta(x - l_i) - \frac{c_1}{EJ} (\lambda_2^s - 0,5\lambda_1^s)\delta(x - l_{k2}) = 0, \\ & -m_2 \lambda_2^s \omega_s^2 + c_1 (\lambda_2^s - 0,5\lambda_1^s) = 0. \end{aligned} \right. \quad (4.17)$$

Позначення у виразах (4.17) і (4.5) співпадають.

В області зображень перше рівняння цієї системи буде:

$$\begin{aligned} \eta(p) = & \frac{p^4}{p^4 - k_1^4} z(0) + \frac{p^3}{p^4 - k_1^4} \frac{k_1}{k_1} z'(0) + \frac{p^2}{p^4 - k_1^4} \frac{k_1^2}{k_1^2} z''(0) + \frac{p}{p^4 - k_1^4} \frac{k_1^3}{k_1^3} z'''(0) + \\ & + k_2^4 (z(l_{k1}) \frac{pe^{-pl_{k1}}}{p^4 - k_1^4} + z(l_{k2}) \frac{pe^{-pl_{k2}}}{p^4 - k_1^4}) + \frac{c_1}{EJ} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \frac{pe^{-pl^*}}{p^4 - k_1^4} - \\ & - \frac{c_2}{EJ} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \frac{pe^{-pl_i}}{p^4 - k_1^4} - \frac{c_{p.к.} z(l^*)}{EJ} \frac{pe^{-pl^*}}{p^4 - k_1^4}. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Перейдемо в (4.18) до оригіналу, використавши функції Крилова:

$$\begin{aligned} z(x) = & \rho(k_1 x) z(0) + \frac{\varphi(k_1 x)}{k_1} z'(0) + \frac{\psi(k_1 x)}{k_1^2} z''(0) + \\ & + \frac{\gamma(k_1 x)}{k_1^3} z'''(0) + \frac{k_2^4}{k_1^3} (z(l_{k1}) \gamma[k_1(x - l_{k1})] \Big|_{x \geq l_{k1}} + z(l_{k2}) \gamma[k_1(x - l_{k2})] \Big|_{x \geq l_{k2}}) + \\ & + \frac{c_1}{EJk_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[k_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*} - \\ & - \frac{c_2}{EJk_1^3} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \gamma[k_1(x - l_i)] \Big|_{x \geq l_i} - \frac{c_{p.к.} z(l^*)}{EJk_1^3} \gamma[k_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*}. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Рівняння (4.19) розбивається, враховуючи схему ділянок на рисунку 4.6, на 25 рівнянь.

Для зазначених ділянок схеми на рисунку 4.6 отримаємо:

на ділянці $0 \leq x \leq l_1$

$$z_1(x) = \rho(k_1 x) z(0) + \frac{\varphi(k_1 x)}{k_1} z'(0) + \frac{\psi(k_1 x)}{k_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(k_1 x)}{k_1^3} z'''(0) + \\ + \frac{k_2^4}{k_1^3} z(l_{k2}) \gamma[k_1(x - l_{k2})]_{x \geq l_{k2}} + \frac{c_1}{EJk_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[k_1(x - l^*)]_{x \geq l^*} - \\ - \frac{c_{p.k.}}{EJk_1^3} z(l^*) \gamma[k_1(x - l^*)]_{x \geq l^*};$$

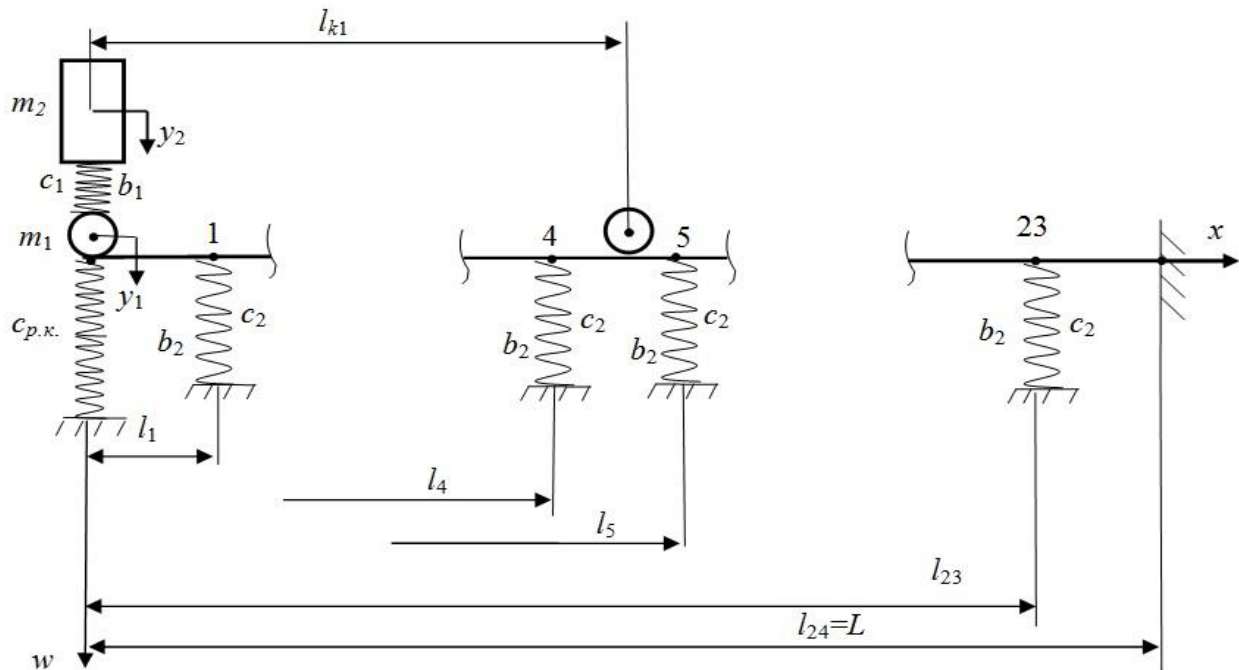


Рисунок 4.6 – Схема ділянок рейки

на ділянках $l_i \leq x \leq l_{i+1}$ ($1 \leq i \geq 3$) і $l_4 \leq x \leq l_{k1}$

$$z_1(x) = \rho(k_1 x) z(0) + \frac{\varphi(k_1 x)}{k_1} z'(0) + \frac{\psi(k_1 x)}{k_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(k_1 x)}{k_1^3} z'''(0) + \\ + \frac{k_2^4}{k_1^3} z(l_{k2}) \gamma[k_1(x - l_{k2})]_{x \geq l_{k2}} + \frac{c_1}{EJk_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[k_1(x - l^*)]_{x \geq l^*} - \\ - \frac{c_2}{EJk_1^3} \sum_{i=1}^4 z(l_i) \gamma[k_1(x - l_i)]_{x \geq l_i} - \frac{c_{p.k.}}{EJk_1^3} z(l^*) \gamma[k_1(x - l^*)]_{x \geq l^*};$$

на ділянках $l_{k1} \leq x \leq l_5$ і $l_i \leq x \leq l_{i+1}$ ($5 \leq i \leq 23$)

$$\begin{aligned} z_1(x) = & \rho(k_1 x) z(0) + \frac{\varphi(k_1 x)}{k_1} z'(0) + \frac{\psi(k_1 x)}{k_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(k_1 x)}{k_1^3} z'''(0) + \\ & + \frac{k_2^4}{k_1^3} \left(z(l_{k1}) \gamma[k_1(x - l_{k1})] \right) \Big|_{x \geq l_{k1}} + z(l_{k2}) \gamma[k_1(x - l_{k2})] \Big|_{x \geq l_{k2}} + \\ & + \frac{c_1}{E J k_1^3} (\lambda_2 - 0,5 \lambda_1) \gamma[k_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*} - \frac{c_2}{E J k_1^3} \sum_{i=1}^4 z(l_i) \gamma[k_1(x - l_i)] \Big|_{x \geq l_i} - \\ & - \frac{c_{p.k.}}{E J k_1^3} z(l^*) \gamma[k_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*}. \end{aligned}$$

Тут маємо 30 невідомих: $z(0)$, $z'(0)$, $z''(0)$, $z'''(0)$, $z_i(x)$ ($i=1 \div 23$), $z(l_{k1})$, $\lambda_1 = z_1(l^*)$, λ_2 .

Далі за Методом розділу 4.1 визначимо власні частоти ω_s стосовно розв'язків (4.2) і початкові умови механічної системи на рисунку 4.5, у які додатково включимо рівності:

$$w(0, l_k) = \Phi_1(l_k) = \sum_{j=1}^5 M_j \lambda_1^j; \quad m_1 \lambda_1^s;$$

$$\dot{w}(0, l_k) = \Phi_2(l_k) = \sum_{j=1}^5 D_j \omega_j z(l_{k1})^j; \quad m_1 z(l_{k1})^s.$$

Тому умови ортогональності системи набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} & \rho F \int_0^L z^s(x) z^j(x) dx + m_1 (\lambda_1^s \lambda_1^j + z^s(l_{k1}) z^j(l_{k1})) + m_2 \lambda_2^j \lambda_2^s = \\ & = \delta^{js} \left(\rho F \int_0^L z^{s^2}(x) dx + m_1 (\lambda_1^{s^2} + z^{s^2}(l_{k1})) + m_2 \lambda_2^{s^2} \right). \end{aligned}$$

У результаті отримаємо такі вирази для визначення констант M_s , D_s розв'язків (4.2):

при $x \neq 0$ і $j = s$

$$M_j = 0,$$

$$D_j = \frac{m_1 \lambda_1^j V_{1,2\phi}}{\omega_j \left[\rho F \int_0^L z^{j^2}(x) dx + m_1 (\lambda_1^{j^2} + z^{j^2}(l_{k1})) + m_2 \lambda_2^{j^2} \right]}; \quad (4.20)$$

при $x=0$ і $j=s$, а $\Phi_2(0) = V_{1,2\phi} \cdot \delta(0)$

$$M_j = 0,$$

$$D_j = \frac{\rho F V_{1,2\phi} z^j(0) + m_1 \lambda_1^j V_{1,2\phi}}{\omega_j \left[\rho F \int_0^L z^{j^2}(0) dx + m_1 (\lambda_1^{j^2} + z^{j^2}(l_{k1})) + m_2 \lambda_2^{j^2} \right]}. \quad (4.21)$$

У результаті прогин приймальної рейки на другій фазі руху трамвайного вагона визначиться виразом

$$w(t, x) = \sum_{j=1}^5 z^j(x) D_j \sin \omega_j t. \quad (4.22)$$

На етапі 2 вирази й сутність формул і позначень відповідають першій фазі руху, що визначено у розділі 4.1. Однак тут додатково враховується дія статичного P_0 і інерційного m_1 навантажень з координатою l_{k1} .

На етапі 3 прогин приймальної рейки під першою шпалою на другій фазі руху трамвайного вагона визначиться формулою

$$w(t, x = l_1)_{\max, \phi 2} = y(x = l_1) + w_{Em3}(t, x = l_1)_{\max}. \quad (4.23)$$

Тут $y(x = l_1)$ визначається даними розділу 3.

Далі за блок-схемою, що наведена на рисунку 4.4, визначаються динамічні прогини приймальної рейки під першою шпалою на другій фазі руху трамвайного вагона. Результати розрахунків наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Прогин приймальної рейки під першою шпалою на другій фазі руху трамвайного вагона

V ₁ , м/с	m, кг									
	2 125	2 294	2 463	2 632	2 800	3 138	3 307	3 476	3 645	3 814
15	4,791	5,047	5,349	5,699	6,102	6,563	7,087	7,678	8,346	9,092
14	4,426	4,663	4,942	5,265	5,638	6,065	6,548	7,095	7,712	8,402
13	4,097	4,316	4,574	4,874	5,219	5,614	6,062	6,568	7,14	7,779
12	3,802	4,005	4,245	4,523	4,843	5,21	5,626	6,096	6,627	7,22
11	3,54	3,73	3,953	4,212	4,51	4,852	5,239	5,677	6,171	6,724
10	3,311	3,487	3,696	3,939	4,217	4,537	4,899	5,309	5,771	6,288
9	3,112	3,278	3,475	3,702	3,965	4,265	4,606	4,991	5,425	5,912
8	2,943	3,101	3,287	3,502	3,75	4,035	4,357	4,721	5,132	5,593
7	2,805	2,955	3,132	3,337	3,574	3,845	4,152	4,499	4,891	5,33
6	2,695	2,839	3,009	3,207	3,434	3,695	3,99	4,323	4,7	5,122
5	2,614	2,754	2,919	3,111	3,331	3,584	3,87	4,194	4,559	4,968

Надалі дані прогинів $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 2}$ таблиці 4.2 використовуються в задачах аналізу й оптимізації режимів роботи системи «трамвайний вагон – рейкова колія – баластовий шар шляху».

4.3 Динамічні прогини приймальної рейки на третій фазі руху трамвайного вагона

Розділ роботи присвячено дослідженню динамічної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією в зоні стику на третій фазі його руху через стикову нерівність з урахуванням його конструктивних, механічних і експлуатаційних параметрів.

Узагальнена механічна схема стадії проходження третьою колісною парою рейкового стику зображена на рисунку 2.8.

Розрахункова механічна схема приймальної рейки на цій фазі руху трамвайного вагона показана на рисунку 4.7, де геометричні координати рейок та коліс відповідають аналогічним на рисунках 2.8 та 4.1.

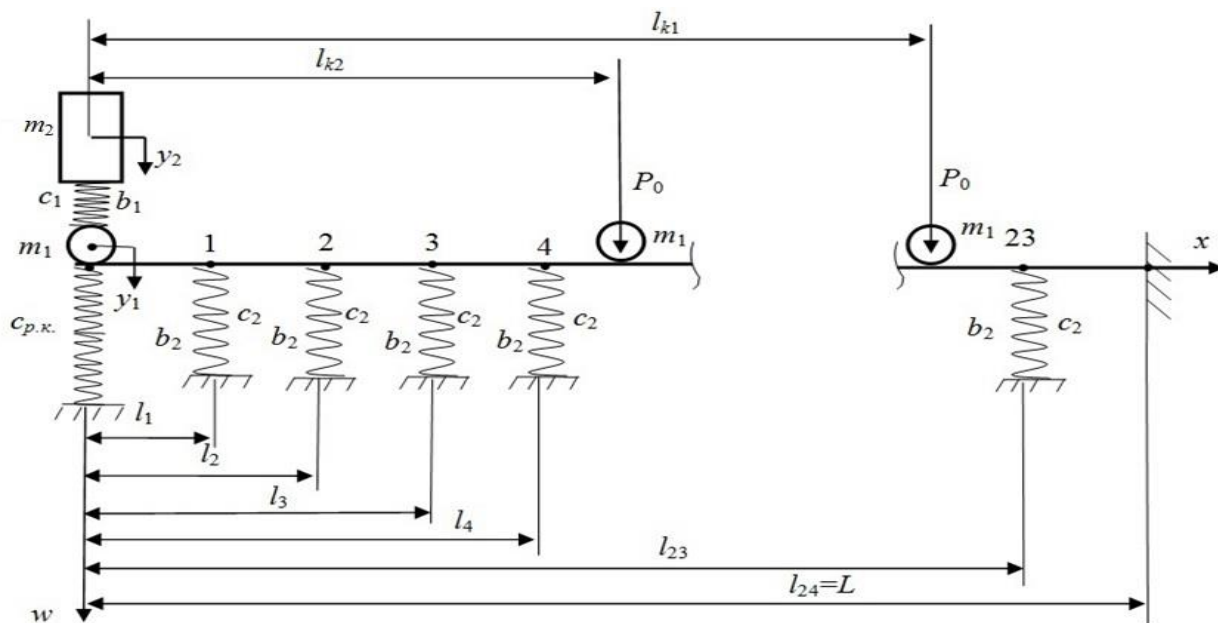


Рисунок 4.7 – Розрахункова механічна схема приймальної рейки на третій фазі руху трамвайного вагона

Для фази руху, що розглядається, враховуючи розділи 4.1 та 4.2, диференціальні рівняння коливань при $w(0,0) = 0$, $\dot{w}(0,0) = V_{1,3\phi}$ матимуть вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial^4 w(t, x)}{\partial x^4} + \frac{\rho F}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, x)}{\partial t^2} = \frac{c_1(y_2 - 0,5w(t, 0))\delta(0)}{EJ} - \frac{c_{p.к.} w(t, 0)\delta(0)}{EJ} - \\ & - \sum_{i=1}^{23} \frac{c_2 w(t, l_i) \delta(x - l_i)}{EJ} - \sum_{i=1}^3 \frac{m_1}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, l_{ki}) \delta(x - l_{ki})}{\partial t^2} + \sum_{i=1}^2 \frac{P_0 \delta(x - l_{ki})}{EJ} - \\ & - \sum_{i=1}^{23} \frac{b_2}{EJ} \cdot \frac{\partial w(t, l_i)}{\partial t} \cdot \delta(x - l_i) + \frac{b_1}{EJ} \cdot \left(\frac{\partial y_2}{\partial t} - 0,5 \frac{\partial w(t, l_{k3})}{\partial t} \right) \cdot \delta(x - l_{k3}); \\ & m_2 \cdot \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_1(y_2 - 0,5w(t, l_{k3})) + b_1 \cdot \left(\frac{\partial y_2}{\partial t} - 0,5 \frac{\partial w(t, l_{k3})}{\partial t} \right) = 0, \end{aligned} \right. \quad (4.24)$$

де $l_{k1} = 6,4$ м; $l_{k2} = 4,5$ м, $l_{k3} = 0$.

Розв'язок системи рівнянь (4.24) побудуємо на базі трьохетапного методу розділу 4.1.

Тоді на етапі 1 диференціальні рівняння руху механічної системи матимуть вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial^4 w(t, x)}{\partial x^4} + \frac{\rho F}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, x)}{\partial t^2} = \frac{c_1(y_2 - 0,5w(t, 0))\delta(0)}{EJ} - \frac{c_{p.к.} w(t, 0)\delta(0)}{EJ} - \\ & - \sum_{i=1}^{23} \frac{c_2 w(t, l_i)\delta(x - l_i)}{EJ} - \sum_{i=1}^3 \frac{m_1}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, l_{ki})\delta(x - l_{ki})}{\partial t^2}; \\ & m_2 \cdot \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_1(y_2 - 0,5w(t, 0)) = 0. \end{aligned} \right. \quad (4.25)$$

Рівняння (4.25) для власних форм зведеться до такого вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} & z^{sIV}(x) - k_1^s z^s(x) - k_2^s \sum_{i=1}^3 z^s(l_{ki})\delta(x - l_{ki}) + \frac{c_{p.к.} z^s(l_{k3})\delta(x - l_{k3})}{EJ} + \\ & + \frac{c_2}{EJ} \sum_{i=1}^{23} z^s(l_i)\delta(x - l_i) - \frac{c_1}{EJ} (\lambda_2^s - 0,5\lambda_1^s)\delta(x - l_{k3}) = 0, \\ & -m_2 \lambda_2^s \omega_s^2 + c_1 (\lambda_2^s - 0,5\lambda_1^s) = 0. \end{aligned} \right. \quad (4.26)$$

Позначення у виразах (4.26) і (4.5) співпадають.

Розв'язання першого рівняння системи (4.25) виконаємо скориставшись перетворенням Лапласа – Карсона:

$$\begin{aligned} \eta(p) = & \frac{p^4}{p^4 - k_1^4} z(0) + \frac{p^3}{p^4 - k_1^4} \frac{k_1}{k_1} z'(0) + \frac{p^2}{p^4 - k_1^4} \frac{k_1^2}{k_1^2} z''(0) + \frac{p}{p^4 - k_1^4} \frac{k_1^3}{k_1^3} z'''(0) + \\ & + k_2^4 \sum_{i=1}^3 z(l_{ki}) \frac{pe^{-pl_{ki}}}{p^4 - k_1^4} + \frac{c_1}{EJ} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \frac{pe^{-pl^*}}{p^4 - k_1^4} - \\ & - \frac{c_2}{EJ} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \frac{pe^{-pl_i}}{p^4 - k_1^4} - \frac{c_{p.к.} z(l^*)}{EJ} \frac{pe^{-pl^*}}{p^4 - k_1^4}. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Перейдемо далі в (4.27) до оригіналу за допомогою функцій Крилова:

$$\begin{aligned} z(x) = & \rho(k_1 x) z(0) + \frac{\varphi(k_1 x)}{k_1} z'(0) + \frac{\psi(k_1 x)}{k_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(k_1 x)}{k_1^3} z'''(0) + \\ & + \frac{k_2^4}{k_1^3} \sum_{i=1}^3 z(l_{ki}) \gamma[k_1(x - l_{ki})] \Big|_{x \geq l_{ki}} + \frac{c_1}{EJk_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[k_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*} - \\ & - \frac{c_2}{EJk_1^3} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \gamma[k_1(x - l_i)] \Big|_{x \geq l_i} - \frac{c_{p.к.}}{EJk_1^3} z(l^*) \gamma[k_1(x - l^*)] \Big|_{x \geq l^*}. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Схема ділянок відповідно до структури приймальної рейки зображена на рисунку 4.8.

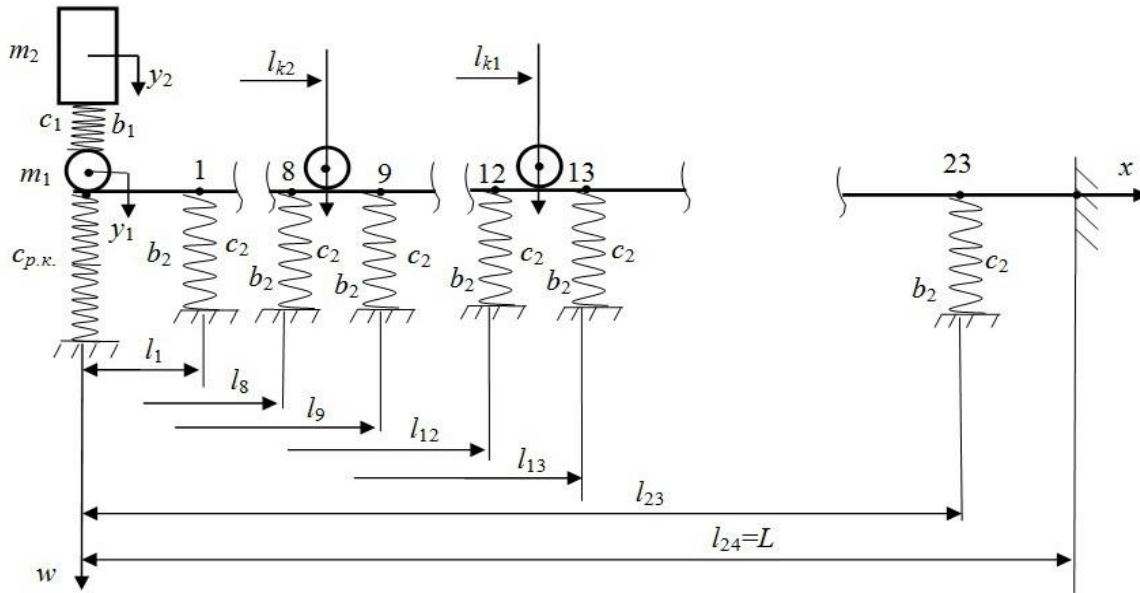


Рисунок 4.8 – Схема ділянок рейки на третій фазі руху

Враховуючи рівняння (4.26), (4.28), а також схему на рисунку 4.8, отримаємо:

на ділянці $0 \leq x \leq l_1$

вираз для переміщення $z_1(x)$ відповідає формулі (4.20);

на ділянках $l_i \leq x \leq l_{i+1}$ ($1 \leq i \leq 8$) і $l_8 \leq x \leq l_{k2}$

вираз для переміщення $z_i(x)$ відповідає формулі (4.21);

на ділянках $l_{k2} \leq x \leq l_i$ ($9 \leq i \leq 12$) і $l_{12} \leq x \leq l_{k1}$

$$\begin{aligned}
 z_i(x) = & \rho(k_1 x) z(0) + \frac{\varphi(k_1 x)}{k_1} z'(0) + \frac{\psi(k_1 x)}{k_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(k_1 x)}{k_1^3} z'''(0) + \\
 & + \frac{k_2^4}{k_1^3} (z(l_{k2}) \gamma[k_1(x - l_{k2})]|_{x \geq l_{k2}} + z(l_{k3}) \gamma[k_1(x - l_{k3})]|_{x \geq l_{k3}}) + \\
 & + \frac{c_1}{E J k_1^3} (\lambda_2 - 0,5 \lambda_1) \gamma[k_1(x - l^*)]|_{x \geq l^*} - \frac{c_2}{E J k_1^3} \sum_{i=1}^{12} z(l_i) \gamma[k_1(x - l_i)]|_{x \geq l_i} - \\
 & - \frac{c_{п.к.}}{E J k_1^3} z(l^*) \gamma[k_1(x - l^*)]|_{x \geq l^*}.
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

на ділянках $l_{k1} \leq x \leq l_{13}$ і $l_i \leq x \leq l_{i+1}$ ($13 \leq i \leq 23$)

$$\begin{aligned}
z_i(x) = & \rho(k_1 x) z(0) + \frac{\varphi(k_1 x)}{k_1} z'(0) + \frac{\psi(k_1 x)}{k_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(k_1 x)}{k_1^3} z'''(0) + \\
& + \frac{k_2^4}{k_1^3} \sum_{i=1}^3 z(l_{ki}) \gamma[k_1(x-l_{ki})] \Big|_{x \geq l_{ki}} + \frac{c_1}{EJk_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[k_1(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*} - \\
& - \frac{c_2}{EJk_1^3} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \gamma[k_1(x-l_i)] \Big|_{x \geq l_i} - \frac{c_{p.k.}}{EJk_1^3} z(l^*) \gamma[k_1(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*}.
\end{aligned} \tag{4.30}$$

У цьому випадку матимемо 31 невідому: $z(0)$, $z'(0)$, $z''(0)$, $z'''(0)$, $z_i(x)$ ($i=1 \div 23$), $z(l_{k1})$, $z(l_{k2})$, $\lambda_1 = z_1(l^*)$, λ_2 .

Далі визначимо за Методом розділу 4.1 власні частоти ω_s стосовно розв'язків (4.2) і початкові умови механічної системи на рисунку 4.7, у які додатково включимо рівності:

$$\begin{aligned}
w(0, l_{k1}) &= \Phi_1(l_{k1}) = \sum_{j=1}^5 M_j z^j(l_{k1}); \Big| \cdot m_1 z^s(l_{k1}); \\
w(0, l_{k2}) &= \Phi_1(l_{k2}) = \sum_{j=1}^5 M_j z^j(l_{k2}); \Big| \cdot m_1 z^j(l_{k2}); \\
\dot{w}(0, l_{k1}) &= \Phi_2(l_{k1}) = \sum_{j=1}^5 D_j \omega_j z^j(l_{k1}); \Big| \cdot m_1 z^s(l_{k1}); \\
\dot{w}(0, l_{k2}) &= \Phi_2(l_{k2}) = \sum_{j=1}^5 D_j \omega_j z^j(l_{k2}); \Big| \cdot m_1 z^s(l_{k2}).
\end{aligned}$$

Умови ортогональності системи на третій фазі руху набудуть вигляду:

$$\begin{aligned}
& \rho F \int_0^L z^s(x) z^j(x) dx + m_1 (\lambda_1^s \lambda_1^j + z^s(l_{k1}) z^j(l_{k1}) + z^s(l_{k2}) z^j(l_{k2})) + m_2 \lambda_2^j \lambda_2^s = \\
& = \delta^{js} \left(\rho F \int_0^L z^{s2}(x) dx + m_1 (\lambda_1^{s2} + z^{s2}(l_{k1}) + z^{s2}(l_{k2})) + m_2 \lambda_2^{s2} \right).
\end{aligned} \tag{4.31}$$

У результаті отримаємо такі вирази для визначення констант M_s , D_s рівнянь руху:

при $x \neq 0$ і $j = s$

$$M_j = 0,$$

$$D_j = \frac{m_1 \lambda_1^j V_{1,3\phi}}{\omega_j \left[\rho F \int_0^L z^{j^2}(x) dx + m_1 (\lambda_1^{j^2} + z^{j^2}(l_{k1}) + z^{j^2}(l_{k2})) + m_2 \lambda_2^{j^2} \right]}; \quad (4.32)$$

при $x = 0$ і $j = s$, а $\Phi_2(0) = V_{1,3\phi} \cdot \delta(0)$ $M_j = 0$,

$$D_j = \frac{\rho F V_{1,3\phi} z^j(0) + m_1 \lambda_1^j V_{1,3\phi}}{\omega_j \left[\rho F \int_0^L z^{j^2}(0) dx + m_1 (\lambda_1^{j^2} + z^{j^2}(l_{k1}) + z^{j^2}(l_{k2})) + m_2 \lambda_2^{j^2} \right]}. \quad (4.33)$$

Остаточно прогин приймальної рейки на третій фазі руху трамвайного вагона визначиться виразом

$$w(t, x) = \sum_{j=1}^5 z^j(x) D_j \sin \omega_j t. \quad (4.34)$$

На етапі 2 Методу вирази й сутність формул і позначень відповідають першій і другій фазі руху, що визначені у розділах 4.1 та 4.2. На цьому етапі додатково враховуються дія статичного P_0 і інерційного m_1 навантажень з координатами l_{k1} , l_{k2} .

На етапі 3 Методу прогин приймальної рейки під першою шпалою на третій фазі руху трамвайного вагона визначиться формулою

$$w(t, x = l_1)_{\max, \phi 3} = y(x = l_1) + w_{Em3}(t, x = l_1)_{\max}. \quad (4.35)$$

Тут $y(x = l_1)$ визначається даними розділу 3, а результати розрахунків $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 3}$ наведено в таблиці 4.3

Отримані результати встановлюють залежність прогинів $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 3}$ від завантаження трамвайного вагона, його швидкості і визначають закономірності взаємного впливу.

Таблиця 4.3 – Прогин приймальної рейки під першою шпалою на третій фазі руху трамвайного вагона

V_1 , м/с	m , кг									
	2 125	2 294	2 463	2 632	2 800	3 138	3 307	3 476	3 645	3 814
15	4,84	5,099	4,406	5,761	6,171	6,64	7,172	7,774	8,453	9,214
14	4,453	4,692	4,974	5,301	5,678	6,11	6,6	7,154	7,78	8,481
13	4,105	4,326	4,586	4,888	5,236	5,635	6,087	6,598	7,175	7,822
12	3,796	4	4,241	4,52	4,842	5,211	5,629	6,102	6,637	7,235
11	3,523	3,712	3,936	4,195	4,494	4,837	5,225	5,664	6,161	6,717
10	3,285	3,461	3,67	3,911	4,19	4,51	4,872	5,282	5,745	6,263
9	3,079	3,245	3,44	3,667	3,929	4,228	4,568	4,953	5,387	5,873
8	2,906	3,062	3,247	3,461	3,708	3,991	4,312	4,675	5,085	5,544
7	2,764	2,913	3,088	3,292	3,527	3,796	4,101	4,446	4,837	5,274
6	2,652	2,794	2,963	3,159	3,384	3,642	3,935	4,267	4,641	5,061
5	2,569	2,707	2,871	3,06	3,279	3,529	3,813	4,134	4,497	4,904

4.4 Динамічні прогини приймальної рейки на четвертій фазі руху трамвайного вагона

У цьому розділі досліджено динамічну взаємодію трамвайного вагона з рейковою колією в зоні стику на четвертій фазі руху трамвайного вагона, з урахуванням зведених мас m_1 , m_2 коліс і трамвайного вагона, розташованих на приймальній рейці, завантаження та післяударної швидкості в зоні стику останнього.

Схема стадії проходження четвертою колісною парою рейкового стику зображена на рисунку 4.9.

Розрахункова механічна схема приймальної рейки на четвертій фазі руху трамвайного вагона показана на рисунку 4.9, де геометричні координати рейок та коліс відповідають аналогічним на рисунках 2.1 та 4.1.

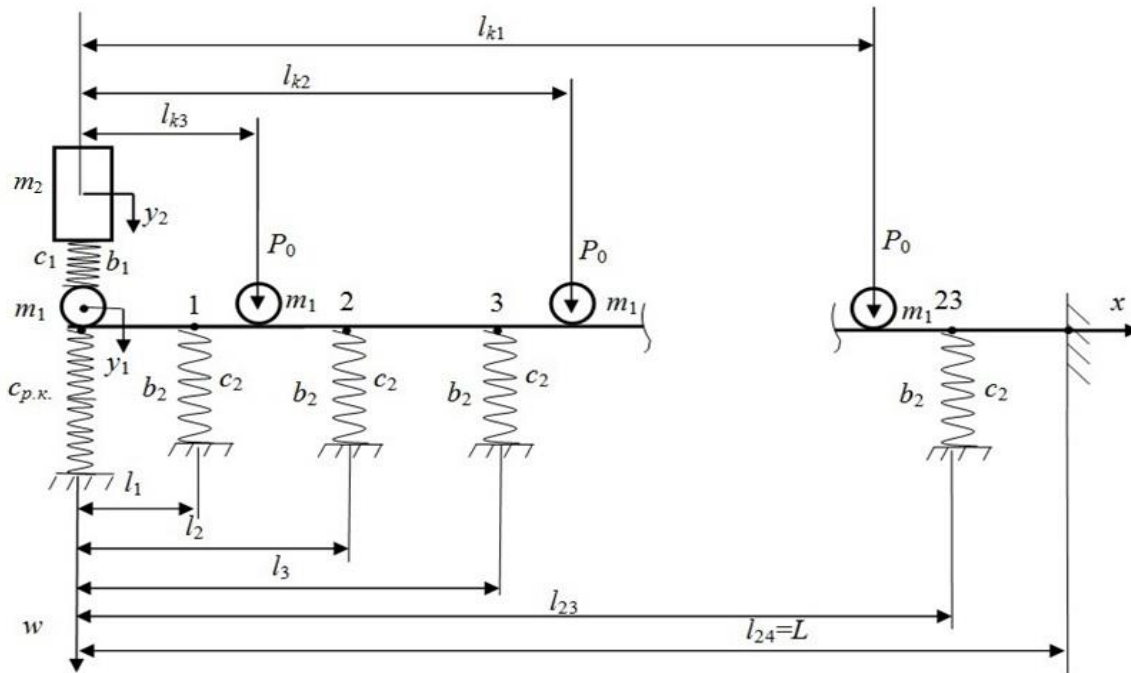


Рисунок 4.9 – Розрахункова механічна схема приймальної рейки на четвертій фазі руху трамвайного вагона

З огляду на результати розділів 4.1 – 4.3 для механічної схеми, що розглядається, диференціальні рівняння коливань при $w(0) = 0$, $\dot{w}(0) = V_{1,4\phi}$ мають такий вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial^4 w(t, x)}{\partial x^4} + \frac{\rho F}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, x)}{\partial t^2} = \frac{c_1(y_2 - 0,5w(t, 0))\delta(0)}{EJ} - \frac{c_{p.k.}w(t, 0)\delta(0)}{EJ} - \\ & - \sum_{i=1}^{23} \frac{c_2 w(t, l_i)\delta(x - l_i)}{EJ} - \sum_{i=1}^4 \frac{m_1}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, l_{ki})\delta(x - l_{ki})}{\partial t^2} + \sum_{i=1}^3 \frac{P_0\delta(x - l_{ki})}{EJ} - \\ & - \sum_{i=1}^{23} \frac{b_2}{EJ} \cdot \frac{\partial w(t, l_i)}{\partial t} \cdot \delta(x - l_i) + \frac{b_1}{EJ} \cdot \left(\frac{\partial y_2}{\partial t} - 0,5 \frac{\partial w(t, l_{k4})}{\partial t} \right) \cdot \delta(x - l_{k4}); \\ & m_2 \cdot \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_1(y_2 - 0,5w(t, l_{k4})) + b_1 \cdot \left(\frac{\partial y_2}{\partial t} - 0,5 \frac{\partial w(t, l_{k4})}{\partial t} \right) = 0, \end{aligned} \right. \quad (4.36)$$

де $l_{k1} = 8,3$ м; $l_{k2} = 6,4$ м, $l_{k3} = 1,9$ м, $l_{k4} = 0$.

Далі використаємо методику побудови розв'язку системи рівнянь (4.36), що наведена в розділі 4.1 стосовно системи (4.1).

На етапі 1 Методу отримаємо систему

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial^4 w(t, x)}{\partial x^4} + \frac{\rho F}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, x)}{\partial t^2} = \frac{c_1(y_2 - 0,5w(t, 0))\delta(0)}{EJ} - \frac{c_{p.k.} w(t, 0)\delta(0)}{EJ} - \\ & - \sum_{i=1}^{23} \frac{c_2 w(t, l_i)\delta(x - l_i)}{EJ} - \sum_{i=1}^4 \frac{m_1}{EJ} \cdot \frac{\partial^2 w(t, l_{ki})\delta(x - l_{ki})}{\partial t^2}, \\ & m_2 \cdot \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_1(y_2 - 0,5w(t, 0)) = 0. \end{aligned} \right. \quad (4.37)$$

Для власних форм рівняння (4.37) матиме вигляд

$$\left\{ \begin{aligned} & z^{s^{IV}}(x) - k_1^{s^4} z^s(x) - k_2^{s^4} \sum_{i=1}^4 z^s(l_{ki})\delta(x - l_{ki}) + \frac{c_{p.k.} z^s(l_{k4})\delta(x - l_{k4})}{EJ} + \\ & + \frac{c_2}{EJ} \sum_{i=1}^{23} z^s(l_i)\delta(x - l_i) - \frac{c_1}{EJ} (\lambda_2^s - 0,5\lambda_1^s)\delta(x - l_{k4}) = 0, \\ & -m_2 \lambda_2^s \omega_s^2 + c_1 (\lambda_2^s - 0,5\lambda_1^s) = 0. \end{aligned} \right. \quad (4.38)$$

У виразах (4.38) і (4.5) позначення співпадають.

Для розв'язання першого рівняння системи (4.37) скористаємось перетворенням Лапласа – Карсона:

$$\begin{aligned} \eta(p) = & \frac{p^4}{p^4 - k_1^4} z(0) + \frac{p^3}{p^4 - k_1^4} \frac{k_1}{k_1} z'(0) + \frac{p^2}{p^4 - k_1^4} \frac{k_1^2}{k_1^2} z''(0) + \frac{p}{p^4 - k_1^4} \frac{k_1^3}{k_1^3} z'''(0) + \\ & + k_2^4 \sum_{i=1}^4 z(l_{ki}) \frac{p e^{-pl_{ki}}}{p^4 - k_1^4} + \frac{c_1}{EJ} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \frac{p e^{-pl^*}}{p^4 - k_1^4} - \\ & - \frac{c_2}{EJ} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \frac{p e^{-pl_i}}{p^4 - k_1^4} - \frac{c_{p.k.} z(l^*)}{EJ} \frac{p e^{-pl^*}}{p^4 - k_1^4}. \end{aligned} \quad (4.39)$$

Після переходу в (4.39) до оригіналу за допомогою функцій Крилова отримаємо:

$$\begin{aligned}
 z(x) = & \rho(k_1 x) z(0) + \frac{\varphi(k_1 x)}{k_1} z'(0) + \frac{\psi(k_1 x)}{k_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(k_1 x)}{k_1^3} z'''(0) + \\
 & + \frac{k_2^4}{k_1^3} \sum_{i=1}^4 z(l_{ki}) \gamma[k_1(x-l_{ki})] \Big|_{x \geq l_{ki}} + \frac{c_1}{EJk_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[k_1(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*} - \\
 & - \frac{c_2}{EJk_1^3} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \gamma[k_1(x-l_i)] \Big|_{x \geq l_i} - \frac{c_{p.k.}}{EJk_1^3} z(l^*) \gamma[k_1(x-l^*)] \Big|_{x \geq l^*}. \quad (4.40)
 \end{aligned}$$

Схема ділянок приймальної рейки на четвертій фазі руху трамвайного вагона зображена рисунку 4.10.

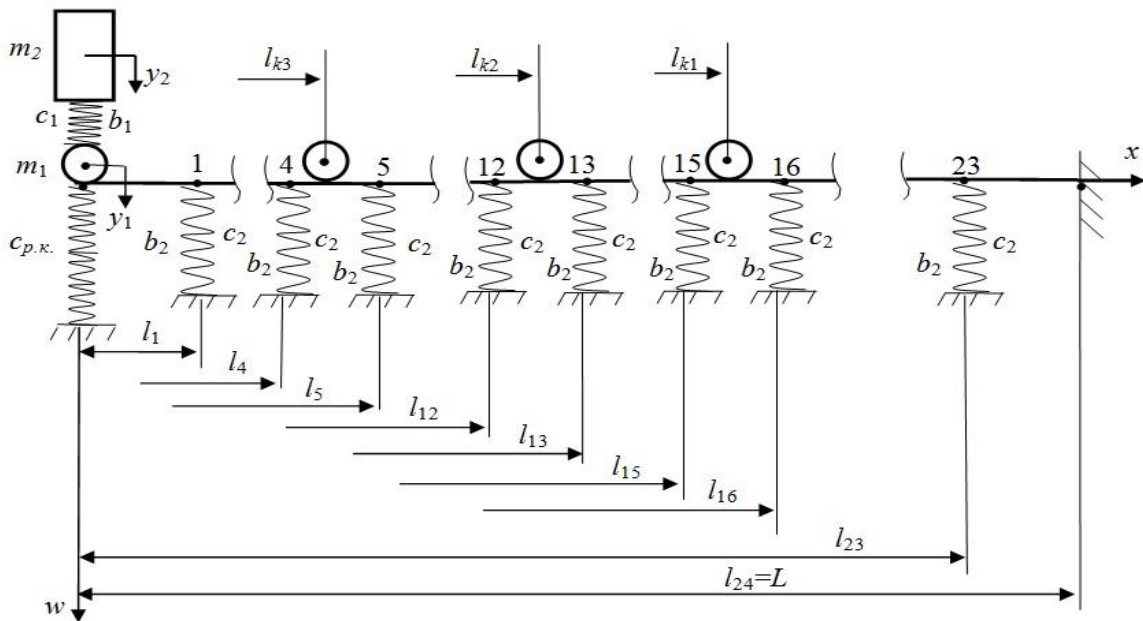


Рисунок 4.10 – Схема ділянок рейки на четвертій фазі руху трамвайного вагона

Для зазначених на рисунку 4.10 ділянок отримаємо:

на ділянці $0 \leq x \leq l_1$

вираз для переміщення $z_1(x)$ відповідає формулі (4.20);

на ділянках $l_i \leq x \leq l_{i+1}$ ($1 \leq i \leq 4$) і $l^4 \leq x \leq l_{k3}$

вираз для переміщення $z_i(x)$ відповідає формулі (4.21);

на ділянках $l_{k3} \leq x \leq l_i$ ($5 \leq i \leq 12$) і $l_{12} \leq x \leq l_{k2}$

$$\begin{aligned}
z_i(x) = & \rho(k_1 x) z(0) + \frac{\varphi(k_1 x)}{k_1} z'(0) + \frac{\psi(k_1 x)}{k_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(k_1 x)}{k_1^3} z'''(0) + \\
& + \frac{k_2^4}{k_1^3} (z(l_{k3}) \gamma[k_1(x - l_{k3})]|_{x \geq l_{k3}} + z(l_{k4}) \gamma[k_1(x - l_{k4})]|_{x \geq l_{k4}}) + \\
& + \frac{c_1}{EJk_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[k_1(x - l^*)]|_{x \geq l^*} - \frac{c_2}{EJk_1^3} \sum_{i=1}^{12} z(l_i) \gamma[k_1(x - l_i)]|_{x \geq l_i} - \\
& - \frac{c_{p.k.}}{EJk_1^3} z(l^*) \gamma[k_1(x - l^*)]|_{x \geq l^*};
\end{aligned} \tag{4.41}$$

на ділянках $l_{k2} \leq x \leq l_{13}$ і $l_i \leq x \leq l_{i+1}$ $13 \leq i \leq 15$

$$\begin{aligned}
z_i(x) = & \rho(k_1 x) z(0) + \frac{\varphi(k_1 x)}{k_1} z'(0) + \frac{\psi(k_1 x)}{k_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(k_1 x)}{k_1^3} z'''(0) + \\
& + \frac{k_2^4}{k_1^3} \sum_{i=1}^3 z(l_{ki}) \gamma[k_1(x - l_{ki})]|_{x \geq l_{ki}} + \frac{c_1}{EJk_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[k_1(x - l^*)]|_{x \geq l^*} - \\
& - \frac{c_2}{EJk_1^3} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \gamma[k_1(x - l_i)]|_{x \geq l_i} - \frac{c_{p.k.}}{EJk_1^3} z(l^*) \gamma[k_1(x - l^*)]|_{x \geq l^*};
\end{aligned} \tag{4.42}$$

на ділянках $l_{k1} \leq x \leq l_{16}$ і $l_i \leq x \leq l_{i+1}$ ($16 \leq i \leq 23$)

$$\begin{aligned}
z_i(x) = & \rho(k_1 x) z(0) + \frac{\varphi(k_1 x)}{k_1} z'(0) + \frac{\psi(k_1 x)}{k_1^2} z''(0) + \frac{\gamma(k_1 x)}{k_1^3} z'''(0) + \\
& + \frac{k_2^4}{k_1^3} \sum_{i=1}^4 z(l_{ki}) \gamma[k_1(x - l_{ki})]|_{x \geq l_{ki}} + \frac{c_1}{EJk_1^3} (\lambda_2 - 0,5\lambda_1) \gamma[k_1(x - l^*)]|_{x \geq l^*} - \\
& - \frac{c_2}{EJk_1^3} \sum_{i=1}^{23} z(l_i) \gamma[k_1(x - l_i)]|_{x \geq l_i} - \frac{c_{p.k.}}{EJk_1^3} z(l^*) \gamma[k_1(x - l^*)]|_{x \geq l^*}.
\end{aligned} \tag{4.43}$$

У цьому випадку матимемо 32 невідомих: $z(0)$, $z'(0)$, $z''(0)$, $z'''(0)$, $z_i(x)$ ($i=1 \div 23$), $z(l_{k1})$, $z(l_{k2})$, $z(l_{k3})$, $\lambda_1 = z_1(l^*)$, λ_2 .

Власні частоти ω_s стосовно розв'язків (4.2) і початкові умови механічної системи на рисунку 4.9 визначимо за методикою розділу 4.1, у які додатково включимо рівності:

$$w(0, l_{k1}) = \Phi_1(l_{k1}) = \sum_{j=1}^5 M_j z^j(l_{k1}); \quad m_1 z^s(l_{k1});$$

$$w(0, l_{k2}) = \Phi_1(l_{k2}) = \sum_{j=1}^5 M_j z^j(l_{k2}); \quad m_1 z^j(l_{k2});$$

$$w(0, l_{k3}) = \Phi_1(l_{k3}) = \sum_{j=1}^5 M_j z^j(l_{k3}); \cdot m_1 z^j(l_{k3});$$

$$\dot{w}(0, l_{k1}) = \Phi_2(l_{k1}) = \sum_{j=1}^5 D_j \omega_j z^j(l_{k1}); \cdot m_1 z^s(l_{k1});$$

$$\dot{w}(0, l_{k2}) = \Phi_2(l_{k2}) = \sum_{j=1}^5 D_j \omega_j z^j(l_{k2}); \cdot m_1 z^s(l_{k2});$$

$$\dot{w}(0, l_{k3}) = \Phi_2(l_{k3}) = \sum_{j=1}^5 D_j \omega_j z^j(l_{k3}); \cdot m_1 z^s(l_{k3}).$$

На четвертій фазі руху умови ортогональності системи набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} \rho F \int_0^L z^s(x) z^j(x) dx + m_1 (\lambda_1^s \lambda_1^j + z^s(l_{k1}) z^j(l_{k1}) + z^s(l_{k2}) z^j(l_{k2})) + m_2 \lambda_2^j \lambda_2^s = \\ = \delta^{js} \left(\rho F \int_0^L z^{s^2}(x) dx + m_1 (\lambda_1^{s^2} + z^{s^2}(l_{k1}) + z^{s^2}(l_{k2})) + m_2 \lambda_2^{s^2} \right). \end{aligned} \quad (4.44)$$

Для визначення констант M_s , D_s рівнянь руху отримаємо такі вирази:

при $x \neq 0$ і $j = s$

$$M_j = 0,$$

$$D_j = \frac{m_1 \lambda_1^j V_{1,4\phi}}{\omega_j \left[\rho F \int_0^L z^{j^2}(x) dx + m_1 (\lambda_1^{j^2} + \sum_{i=1}^3 z^{j^2}(l_{ki})) + m_2 \lambda_2^{j^2} \right]}; \quad (4.45)$$

при $x = 0$ і $j = s$, а $\Phi_2(0) = V_{1,4\phi} \cdot \delta(0)$

$$M_j = 0,$$

$$D_j = \frac{\rho F V_{1,4\phi} z^j(0) + m_1 \lambda_1^j V_{1,4\phi}}{\omega_j \left[\rho F \int_0^L z^{j^2}(0) dx + m_1 (\lambda_1^{j^2} + \sum_{i=1}^3 z^{j^2}(l_{ki})) + m_2 \lambda_2^{j^2} \right]}. \quad (4.46)$$

У результаті прогин приймальної рейки на четвертій фазі руху трамвайного вагона визначиться як

$$w(t, x) = \sum_{j=1}^5 z^j(x) D_j \sin \omega_j t. \quad (4.47)$$

На етапі 2 Методу вирази й сутність формул і позначень відповідають першій, другій і третій фазам руху, що визначені у розділах 4.1, 4.2 та 4.3. У цьому випадку необхідно, однак, врахувати з координатами l_{k1} , l_{k2} , l_{k3} статичні P_0 і інерційні з масою m_1 навантаження.

На етапі 3 прогин приймальної рейки під першою шпалою на четвертій фазі руху трамвайного вагона визначиться формулою

$$w(t, x = l_1)_{\max, \phi 4} = y(x = l_1) + w_{Em3}(t, x = l_1)_{\max}. \quad (4.48)$$

Тут $y(x = l_1)$ визначається даними розділу 3, а результати розрахунків наведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Прогин приймальної рейки під першою шпалою на четвертій фазі руху трамвайного вагона

V_1 , м/с	m , кг									
	2 125	2 294	2 463	2 632	2 800	3 138	3 307	3 476	3 645	3 814
15	4,255	4,481	4,748	5,058	5,414	5,822	6,284	6,806	7,395	8,054
14	3,964	4,175	4,423	4,712	5,044	5,424	5,854	6,341	6,889	7,503
13	3,697	3,894	4,126	4,395	4,704	5,059	5,461	5,914	6,426	6,999
12	3,455	3,639	3,856	4,107	4,397	4,728	5,103	5,527	6,006	6,54
11	3,238	3,41	3,613	3,849	4,12	4,43	4,782	5,179	5,628	6,129
10	3,045	3,207	3,398	3,619	3,874	4,166	4,497	4,871	5,292	5,764
9	2,876	3,029	3,21	3,419	3,66	3,936	4,248	4,601	4,999	5,445
8	2,732	2,878	3,049	3,248	3,477	3,739	4,036	4,371	4,749	5,172
7	2,613	2,752	2,916	3,106	3,325	3,575	3,859	4,18	4,541	4,946
6	2,518	2,652	2,81	2,993	3,204	3,445	3,719	4,028	4,376	4,766
5	2,447	2,578	2,731	2,909	3,114	3,349	3,615	3,915	4,254	4,633

Визначені параметри прогинів $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 4}$ використовуються на практиці для вдосконалення режимів експлуатації транспортного засобу, а також верхньої будови колії.

4.5 Метод послідовного статично-ударно-динамічного розрахунку параметрів механічної взаємодії трамвайного вагона і рейкової колії в зоні стику

В узагальненому випадку парадигма методу послідовного статично-ударно-динамічного розрахунку (надалі – методу ПСУДР) параметрів механічної взаємодії трамвайного вагона і рейкової колії в зоні стику шляху забезпечує визначення прогинів приймальної рейки колії під її першою шпалою на фазі зростання від параметрів завантаження і швидкості руху трамвайного вагона [35].

Формулювання базових положень методу виконано в роботі [36], де розглянута третя фаза проходження трамвайним вагоном стикової нерівності.

Блок-схема методу, враховуючи результати досліджень, що подано в розділах 2, 3, 4 роботи, зображена на рисунку 4.11, де 1, 2, 3 – блоки розрахунків відповідно статичних, ударних і динамічних параметрів механічної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією;

$$X_{11} = [h_{1\phi}, h_{2\phi}, h_{3\phi}, h_{4\phi}]',$$

$$X_{12} = [c_{p.к.}, y(x=l_1)]', X_2 = [V_{1,1\phi}, V_{1,2\phi}, V_{1,3\phi}, V_{1,4\phi}]',$$

$$X_3 = [w(t, x=l_1)_{\max, \phi 1}, w(t, x=l_1)_{\max, \phi 2}, w(t, x=l_1)_{\max, \phi 3}, w(t, x=l_1)_{\max, \phi 4}]' - \text{вихідні сигнали блоків 1, 2, 3.}$$

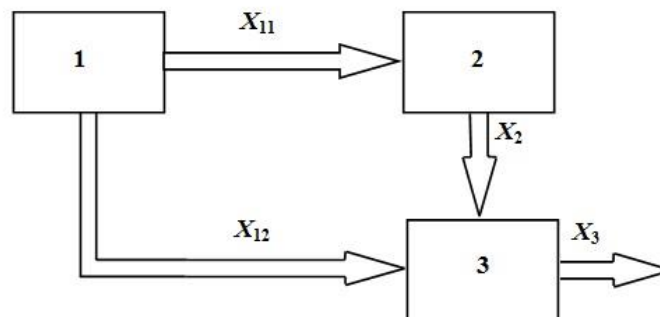


Рисунок 4.11 – Блок-схема методу ПСУДР

На рисунку 4.12, з урахуванням розділу 2 роботи, подана структура блока 1, де модуль 11 належить створенню механічних схем руху вагона з урахуванням фаз руху (див. рис. 2.1–2.11), що у вигляді вектора ξ_{11} надходить на вхід модуля 12.

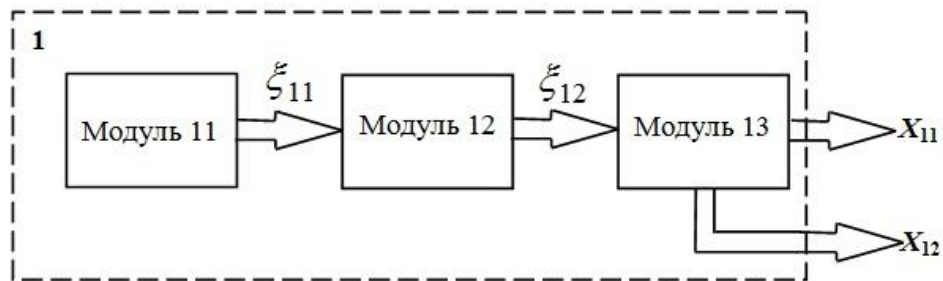


Рисунок 4.12 – Модульна структура блока 1

У модулі 12 виконується побудова механічних схем розрахунку прогинів на першій – четвертій фазах руху для віддавальної та приймальної рейок (див. рис. 2.2–2.12), рівнянь вигнутої осі рейок (див. формули (2.2), (2.3), (2.5), (2.6), (2.8), (2.9), (2.11), (2.12)) з урахуванням початкових параметрів. Дані модуля 12 у вигляді вектора ξ_{12} є вхідними для модуля 13.

На етапі модуля 13 для кожної фази руху будуються пружні лінії віддавальної та приймальної рейок (див. рис. 2.3–2.13), створюються блок-схеми розрахунку (див. рис. 2.4) і визначаються параметри жорсткості $c_{p.k.}$ рейок на кінцях, прогини приймальної і віддавальної рейок при $x=12,5$ м), поточна висота стикової нерівності з урахуванням фаз руху. Вихід модуля 13 у вигляді сигналу X_{11} спрямований на вхід блока 2 блок-схеми на рисунку 4.11.

Структура блока 2 зображена на рисунку 4.13.

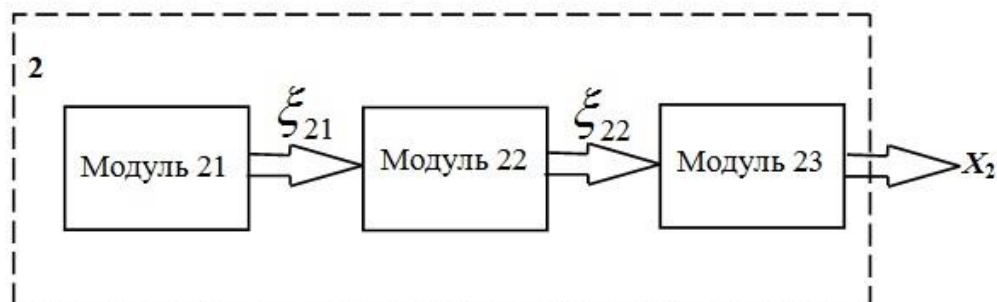


Рисунок 4.13 – Модульна структура блока 2

На етапі модуля 21, враховуючи розділ 3 роботи, за допомогою теореми [50, 51] про зміну моменту кількості руху системи (див. рис. 3.1) визначаються параметри ударного імпульсу S_y , що випробує приймальна рейка при її ударній взаємодії з колесом візка (див. формулу (3.3)). Дані модуля 21 у вигляді вектора ξ_{21} є вхідними для модуля 22.

У модулі 22 в умовах дії припущення, що під час удару приймальна рейка згинається по тій самій кривій, що й під час дії статичного зосередженого навантаження [38–40], визначається швидкість $V(t, x)$ руху перерізу рейки з координатою її контакту з колесом (див. формулу (3.4)), що у вигляді вектора ξ_{22} надходить на вхід модуля 23.

Далі на етапі модуля 23 за допомогою теореми [51] про зміну кількості руху приймальної рейки визначається післяударна швидкість перерізу приймальної рейки при $x = L$ (див. вираз (3.7)) залежно від завантаження і фаз руху трамвайного вагона через стик шляху. Вихід модуля 23 у вигляді сигналу X_2 (див. дані таблиць (3.1)–(3.4)) спрямовується на вхід блока 3 блок-схеми на рисунку. 4.11. Одночасно на інший вхід блока 3 надходить вихід блока 1 сигналом X_{12} .

На рисунку 4.14, з урахуванням розділу 3 роботи, подана структура блока 3, де модуль 31 належить створенню розрахункових механічних схем динамічної взаємодії приймальної рейки з урахуванням фаз руху трамвайного вагона (див. рис. 4.1–4.9), а також повної динамічної моделі післяударної взаємодії приймальної рейки з колесом візка (див. формули (4.1), (4.15), (4.24), (4.36)), що у вигляді вектора ξ_{31} надходить на вхід модуля 32.

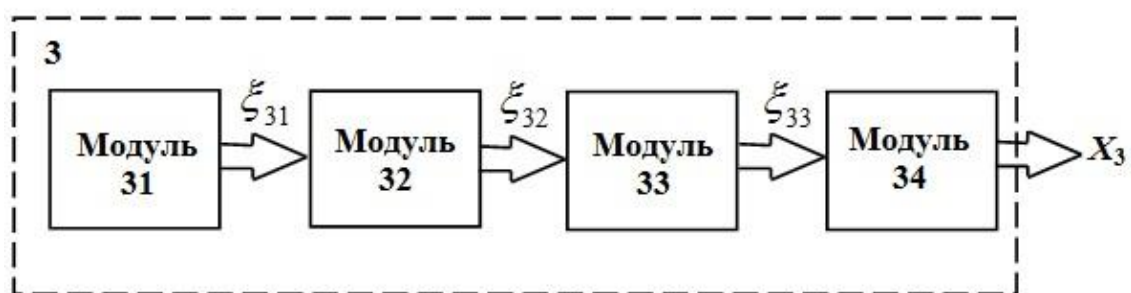


Рисунок 4.14 – Модульна структура блока 3

У модулі 32 методами Фур'є поділу змінних, теорії операційного числення Лапласа – Карсона, а також умов ортогональності форм коливань, визначаються власні частоти (див. рівняння (4.7), і постійні інтегрування D_s, M_s ($s=1-5$) розв'язків (див. рівняння (4.10), (4.11), (4.20), (4.21), (4.32), (4.33), (4.45), (4.46)) трансформованих систем вільних коливань (див. рівняння (4.4), (4.16), (4.25), (4.37)). Дані модуля 32 у вигляді вектора ξ_{32} є вхідними для модуля 33.

Далі на етапі модуля 33 розраховуються прогини $w_{Em2}(t, x)$ приймальної рейки з урахуванням експоненціальної складової (див. рівняння (4.13)) і фаз руху трамвайного вагона. Дані модуля 33 у вигляді вектора ξ_{33} надходять на вхід модуля 34.

На етапі модуля 34 для кожної фази руху трамвайного вагона визначаються шляхом додавання статичних (визначених у розділі 3 у вигляді вектора X_{12}) і динамічних прогинів $w_{Em2}(t, x=l_1) = \max$ максимальні прогини (див. рівняння (4.14), (4.23), (4.35), (4.48)) приймальної рейки під першою шпалою шляху $w(t, x=l_1)_{\max, \phi i}$ ($i=1-4$).

Вихідний сигнал X_3 модуля 34 на рисунку 4.14 і блока 3 на рисунку 4.11 є кінцевими даними методу ПСУДР – послідовного статично-ударно-динамічного розрахунку параметрів механічної взаємодії вагона трамвая і рейкової колії в зоні стику шляху з урахуванням конструктивних і механічних характеристик і параметрів завантаження і швидкості руху трамвайного вагона. Вони використовуються в науковому аспекті, мають наукову новизну в теорії під час дослідження закономірностей механічної взаємодії трамвайного вагона і рейкового шляху, а на практиці – для вдосконалення режимів експлуатації транспортного засобу, а також верхньої будови колії.

4.6 Аналіз результатів дослідження динамічної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією і висновки за розділом 4

Згідно з запропонованою моделлю (див. рис. 4.1–4.9), а також до виразів (4.14), (4.23), (4.35), (4.48), у роботі виконано чисельний аналіз параметрів динамічної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією в місці ізолюваної

стикової нерівності. Розрахунки здійсненні на базі варіювання механічних та експлуатаційних факторів: висоти стику рейкової колії трамвайного вагона, його завантаження, конструктивних та експлуатаційних параметрів механічної системи «трамвайний вагон – рейкова колія».

При цьому враховано умови експлуатації в системі «трамвайний вагон – рейкова колія в місці стикового з'єднання», що визначають граничні умови закріплення віддавальної і приймальної рейок, геометричні і механічні характеристики рейок та стикових накладок, шпал і баластового шару. Залежності прогинів $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 1}$ приймальної рейки під першою шпалою від експлуатаційних факторів (завантаження і швидкості руху трамвайного вагона) на першій фазі його руху через стикову нерівність наведено на рисунку 4.15.

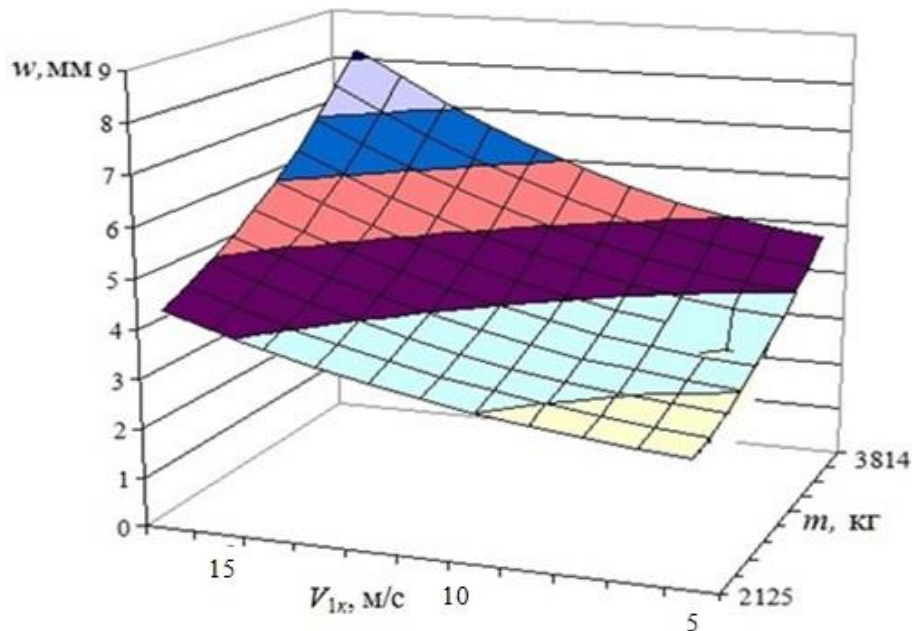


Рисунок 4.15 – Залежності прогинів приймальної рейки під першою шпалою на першій фазі руху трамвайного вагона

Аналіз графіків показує, що:

1) зміна завантаження трамвайного вагона при $m = (2125 \div 3814)$ кг, наприклад, за швидкості руху $V_{1k} = 15$ м/с призводить до зміни динамічного прогину приймальної рейки під першою шпалою в діапазоні $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 1} = [4,428 \div 8,184]$ мм, тобто до його зростання в 1,848 рази;

2) встановлено, що збільшення швидкості руху трамвайного вагона в діапазоні $V_{1k} = [5 \div 15]$ м/с при завантаженні трамвайного вагона $m = 3814$ кг приводить до зміни величини прогину в діапазоні $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 1} = [4,708 \div 8,184]$ мм, тобто до його зростання в 1,738 рази.

Залежності прогинів $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 2}$ на другій фазі його руху через стикову нерівність наведено на рисунку 4.16.

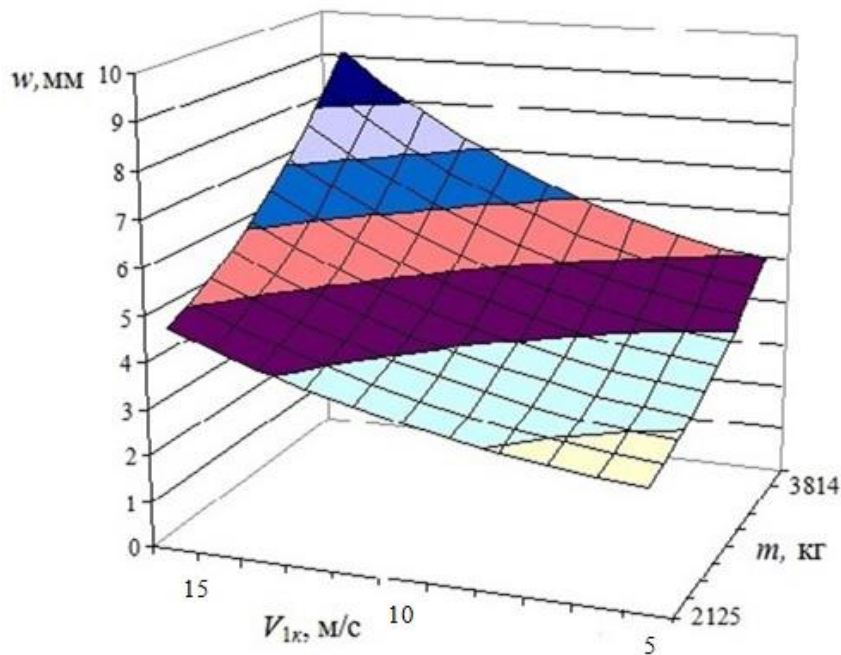


Рисунок 4.16 – Залежності прогинів приймальної рейки під першою шпалою на другій фазі руху трамвайного вагона

Аналіз отриманих результатів показує:

1) за швидкості руху $V_{1k} = 15$ м/с зміна зведеної до одного колеса маси трамвайного вагона $m = [2125 \div 3814]$ кг призводить до зміни динамічного прогину приймальної рейки під першою шпалою в діапазоні $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 2} = [4,791 \div 9,092]$ мм, тобто до його зростання в 1,897 рази;

2) також при збільшенні швидкості руху трамвайного вагона в діапазоні $V_{1k} = [5 \div 15]$ м/с при завантаженні трамвайного вагона $m = 3814$ кг призводить

до зміни величини прогину в діапазоні $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 2} = [4,968 \div 9,092]$ мм, тобто до його зростання в 1,83 рази.

На третій фазі руху залежності $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 3}$ зображено на рисунку 4.17.

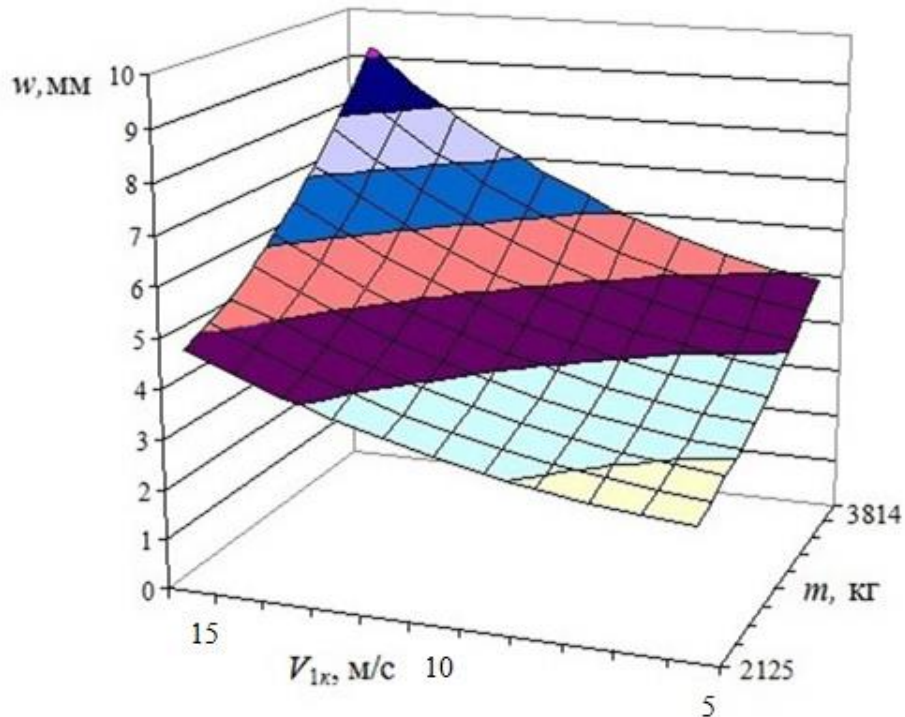


Рисунок 4.17 – Залежності прогинів приймальної рейки під першою шпалою на третій фазі руху трамвайного вагона

Аналіз залежностей показує, що:

1) зміна завантаження трамвайного вагона при $m = [2125 \div 3814]$ кг за швидкості руху $V_{1k} = 15$ м/с призводить до зміни динамічного прогину приймальної рейки під першою шпалою в діапазоні $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 3} = [4,84 \div 9,214]$ мм, тобто до його зростання в 1,9 раз;

2) встановлено, що збільшення швидкості руху трамвайного вагона в діапазоні $V_{1k} = [5 \div 15]$ м/с при завантаженні трамвайного вагона $m = 3814$ кг приводить до зміни величини прогину в діапазоні $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 3} = [4,904 \div 9,214]$ мм, тобто до його зростання в 1,89 рази.

Залежності прогинів $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 4}$ приймальної рейки під першою шпалою від експлуатаційних факторів наведено на рисунку 4.18.

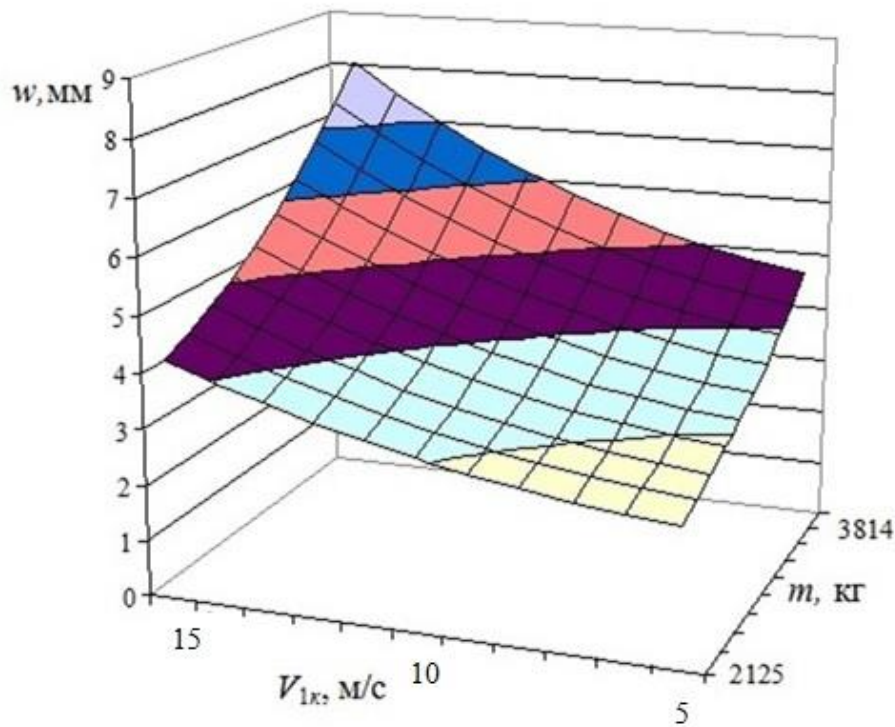


Рисунок 4.18 – Прогин приймальної рейки на четвертій фазі руху трамвайного вагона через стикову нерівність

Аналіз залежності дозволяє зробити такі висновки:

1) за швидкості руху $V_{1k} = 15$ м/с зміна зведеної до одного колеса маси трамвайного вагона $m = [2125 \div 3814]$ кг призводить до зміни динамічного прогину приймальної рейки під першою шпалою в діапазоні $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 4} = [4,255 \div 8,054]$ мм, тобто до його зростання в 1,89 рази;

2) також при збільшенні швидкості руху трамвайного вагона в діапазоні $V_{1k} = [5 \div 15]$ м/с при завантаженні вагона $m = 3814$ кг призводить до зміни величини прогину в діапазоні $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 4} = [4,633 \div 8,054]$ мм, тобто до його зростання в 1,75 рази.

Отримані результати на практиці використовуються при розробці технічних рішень із удосконалення стику рейкової колії, а також при

визначенні режимів експлуатації трамвайних вагонів, створенні експериментально-теоретичного комплексу для дослідження, розрахунків та вдосконалення параметрів трамвайного вагона і верхньої будови колії шляхом їхнього раціонального вибору.

Вірогідність математичних моделей статичної, ударної і динамічної взаємодії вагона трамвая з рейковою колією в зоні стикової нерівності, створених у розділах 2, 3, 4 роботи, підтверджується експериментальними дослідженнями. Наведені дані експериментів показують, що середні значення відносної похибки прогинів приймальної рейки під першою шпалою складають на першій, другій, третій і четвертій фазах руху: для порожнього трамвайного вагона відповідно: 8,95 %, 9,07 %, 7,7 %, 7,8 %; для завантаженого 23 пасажирями – 7,52 %, 7,9 %, 8,9 %, 8,3 %.

Чисельні дані похибок підтверджують достовірність розроблених математичних моделей та алгоритмів розрахунку статичної, ударної і динамічної взаємодії вагона трамвая з рейковою колією з урахуванням фаз руху.

У розділі 4 роботи подано результати чисельних розрахунків параметрів динамічної взаємодії вагона з рейковою колією в місці стикового з'єднання, яке враховує експлуатаційні, механічні і геометричні фактори з використанням наведених моделей. Встановлено нові закономірності взаємодії чотиривісного вагона трамвая з рейковою колією при проходженні транспортним засобом стикової нерівності.

РОЗДІЛ 5

СТВОРЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРУ ВИСОТИ РЕЙКОВИХ СТИКІВ, ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХНІХ ПРИНЦИПІВ ДІЇ

У розділах 1 і 4 монографії, а також у роботах [1, 2, 4, 8, 9, 24, 43–45, 58–64] доведено, що існуючі засоби виміру величини сходинки стику відрізняються низькою ефективністю завдяки обмеженій сфері застосування тільки виміром висоти стику типу «зазор – ступінь вниз», коли в зоні стику поверхня катання віддавальної рейки розташовується винятково вище поверхні катання приймальної рейки. Також не забезпечується вимір висоти стику, яка є найбільшою серед виникаючих під час проходження вагоном-шляховимірником стикової нерівності, враховуючи залежність висоти стику від номеру колісної пари, до якої належить колесо, що проходить крізь стик, а саме від кількості коліс, які розташовуються в момент проходження вагоном-шляховимірником стику на віддавальній та приймальній рейках. Тут функціональні можливості пристрою обмежені виміром і реєстрацією на встановленій довжині шляху висоти стикової нерівності тільки в момент проходження стику колесом першої колісної пари вагона-шляховимірника.

Від значення висоти стику, враховуючи [41], залежить величина ударного імпульсу динамічної взаємодії колеса з приймальною рейкою шляху, яка також визначає початкову швидкість їх післяударного руху при визначенні динамічних прогинів приймальної рейки під першою шпалою на фазі зростання.

Тому створення новітніх способів технічної реалізації пристроїв для виміру висоти рейкових стиків, на базі дослідження процесів механічної взаємодії в системі «трамвайний вагон – рейкова колія» з урахуванням фаз руху в зоні стикової нерівності, є актуальними.

Цим питанням і присвячений цей розділ роботи.

5.1 Пристрій для виміру висоти рейкових стиків електромеханічного принципу дії

В основу досліджень, враховуючи [1, 4, 8, 9, 24, 45, 46, 59, 60], покладено удосконалення пристрою для виміру висоти рейкових стиків, у якому застосування в кожному каналі виміру додаткових пристроїв, їхній взаємозв'язок і виконання дозволяє збільшити точність контролю стикових нерівностей рейкової колії шляхом виміру їхньої висоти. Завдяки цьому підвищується ефективність контролю геометричних параметрів стику, а також розширюються функціональні можливості пристрою.

Поставлена задача розв'язується завдяки тому, що пристрій для виміру висоти рейкових стиків колії, що містить встановлені на вагоні-шляховимірнику вимірник пройденого шляху, обчислювальний пристрій, блок реєстрації. Останній з'єднаний першим входом із виходом вимірника пройденого шляху, а другим – з виходом обчислювального пристрою. Пристрій включає ідентичні по конструкції правий і лівий канали виміру геометричних параметрів стику. Кожен із каналів містить блок виміру стикових швидкостей, причому блок виміру стикових швидкостей містить перший і другий ключі, послідовно з'єднані перший підсилювач і перший фільтр, перший нуль-орган і блок підсумовування.

Згідно з корисною моделлю [1] кожен канал виміру геометричних параметрів стику містить встановлені на буксі колісної пари датчики горизонтальної і вертикальної швидкостей букси. Кожен блок виміру висоти стику містить другий підсилювач, другий фільтр, третій і четвертий ключі, перший і другий блоки піднесення до квадрата, блок добування квадратного кореня, блок диференціювання, другий нуль-орган, перший і другий пристрої запам'ятовування. Причому виходи датчиків горизонтальної і вертикальної швидкості букси підключено відповідно до другого и третього входів блока виміру стикових швидкостей. Останні з'єднані з входами відповідно першого і другого підсилювачів, вихід першого фільтра – з інформаційними входами

першого і другого ключів, вихід першого ключа – з входом першого пристрою запам'ятовування, вихід якого – з першим входом обчислювального пристрою, з'єднаного виходом із другим входом блока реєстрації. Водночас вихід датчика стику з'єднано з керувальним входом першого ключа, вихід другого фільтра з'єднано з інформаційним входом третього ключа і входом першого нуль-органа, вихід першого нуль-органа – з другим керувальним входом першого ключа, а також першими керувальними входами другого і третього ключів. Виходи другого і третього ключів через перший і другий блоки піднесення до квадрата з'єднано з першим і другим входами блока підсумовування, який послідовно через блок добування квадратного кореня, блок диференціювання, другий нуль-орган – з'єднано з керувальним входом четвертого ключа. Інформаційний четвертого ключа з'єднано з виходом блока добування квадратного кореня, вихід через другий пристрій запам'ятовування з'єднано з другим входом обчислювального пристрою. Нарешті вихід другого нуль-органа з'єднано з другими керуючими входами другого і третього ключів.

Застосування в пристрої в кожному каналі виміру геометричних параметрів стику встановлених на буксі колісної пари датчиків вертикальної і горизонтальної швидкості букси, а також у кожному блоці виміру висоти стику – другого підсилювача, другого фільтра, третього ключа, першого і другого блоків піднесення до квадрата, блоків добування квадратного кореня і диференціювання, другого нуль-органа, четвертого ключа, першого і другого блоків запам'ятовування забезпечує одержання на виході першого пристрою запам'ятовування сигналу, величина якого пропорційна доударної швидкості V_1 букси колеса, а на виході другого пристрою запам'ятовування – пропорційної максимальному значенню післяударної швидкості $V_{2 \max}$. Водночас сигнал на виході обчислювального пристрою з урахуванням залежності $h = 3r(V_1 - V_2)/2V_1$ є пропорційним висоті h рейкового стику колії (тут r – радіус колеса).

У підсумку збільшується точність контролю стикових нерівностей рейкової колії шляхом виміру їхньої висоти і завдяки цьому підвищується

ефективність контролю геометричних параметрів рейкового стику, а також розширюються функціональні можливості пристрою.

Пристрій для виміру висоти рейкових стиків колії схематично зображено на рисунку 5.1.

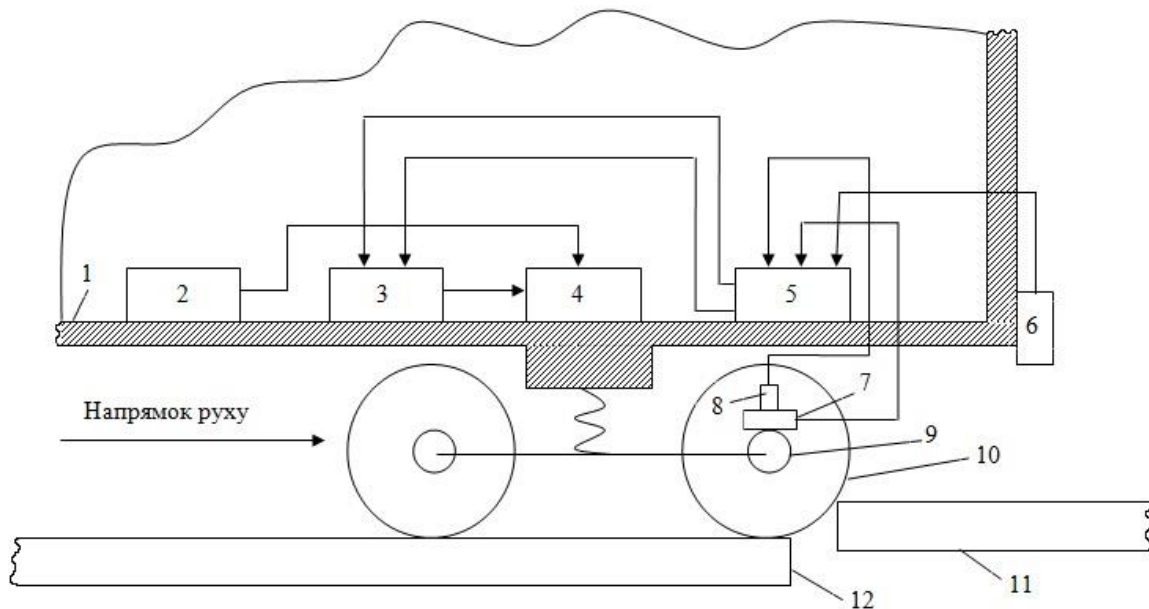


Рисунок 5.1 – Пристрій для виміру висоти рейкових стиків

Він містить встановлені на вагоні-шляховимірнику 1: вимірник 2 пройденого шляху, обчислювальний пристрій 3, блок 4 реєстрації, ідентичні по конструкції правий і лівий канали виміру геометричних параметрів стику (на кресленні показано складові лише правого каналу). Кожен із каналів містить блок виміру стикових швидкостей, датчик 6 стику, датчики горизонтальної 7 і вертикальної 8 швидкості правої букси 9 правого колеса 10.

У пристрої датчики 7, 8 жорстко закріплені на правій буксі 9 колісної пари вагона-шляховимірника 1. Перший вхід блока 5 виміру стикових швидкостей з'єднаного з виходом датчика 6 стику правого колеса 10. Другий і третій входи блока 5 виміру стикових швидкостей з'єднані із виходами датчиків 7, 8 відповідно.

Блок 5 виміру стикових швидкостей (рис. 5.2) містить: перший 13 і другий 14 підсилювачі; перший 15 і другий 16 фільтри; перший 17 і другий

26 нуль-органи; перший 18, другий 19, третій 20 і четвертий 27 ключі; перший 21 і другий 22 блоки піднесення до квадрата; блок 23 підсумовування; блок 24 добування квадратного кореня; блок 25 диференціювання; перший 28 и другий 29 пристрої запам'ятовування.

Рисунок 5.2 – Схема блока виміру стикових швидкостей

На рисунку 5.2 виходи датчиків горизонтальної 7 і вертикальної 8 швидкості букси підключено відповідно до другого і третього входів блока 5 виміру стикових швидкостей, які з'єднані з входами відповідно першого 13 і другого 14 підсилювачів. Вихід першого фільтра 15 з'єднано з інформаційними входами першого 18 і другого 19 ключів, вихід першого ключа 18 – з входом першого пристрою 28 запам'ятовування, вихід якого – з першим входом обчислювального пристрою 3, з'єданого виходом з другим входом блока 4 реєстрації. Причому вихід датчика 6 стику з'єднано з керувальним входом першого ключа 18, вихід другого фільтра 16 з'єднано з інформаційним входом третього ключа 20 і входом першого нуль-органа 17, вихід першого нуль-органа – з другим керувальним входом першого ключа 18, а також першими керувальними входами другого 19 і третього 20 ключів. Виходи другого і третього ключів через перший 21 і другий 22 блоки піднесення до квадрата з'єднано з першим і другим входами блока 23 підсумовування, який послідовно

через блок 24 добування квадратного кореня, блок 25 диференціювання, другий нуль-орган 26 з'єднано з керувальним входом четвертого ключа 27, інформаційний вхід якого з'єднано з виходом блока добування квадратного кореня 24, а вихід – через другий пристрій 29 запам'ятовування з'єднано з другим входом обчислювального пристрою 3. Причому вихід другого нуль-органа 26 з'єднано з другими керуючими входами другого 19 і третього 20 ключів.

Виходи першого 28 і другого 29 блоків запам'ятовування блока 5 виміру стикових швидкостей з'єднано відповідно з першим і другим входами обчислювального пристрою 3. Перший і другий входи блока 4 реєстрації з'єднано з виходами вимірника 2 пройденого шляху й обчислювального пристрою 3 відповідно.

На рисунку 5.3 зображена траєкторія руху букси 9 колеса 10.

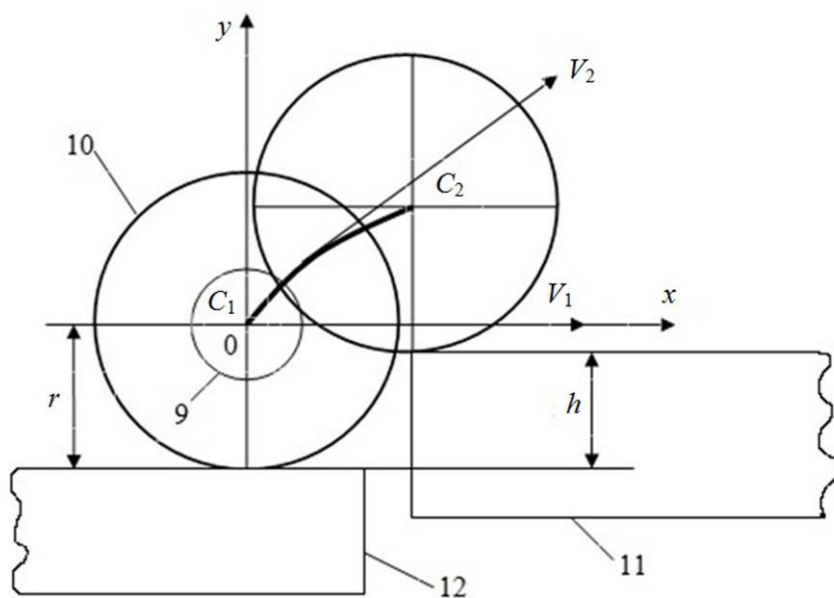


Рисунок 5.3 – Траєкторія руху букси

На рисунку 5.3: V_1 – горизонтальна до ударна (до стикова) швидкість руху букси 9 в момент торкання колесом 10 торця приймальної рейки 11; $V_2 = \sqrt{V_z^2 + V_v^2}$ – швидкість букси 9 на фазі руху по траєкторії C_1C_2 на інтервалі часу, коли колесо 10 заїжджає на приймальну рейку 11; V_z , V_v – горизонтальна і вертикальна складові швидкості V_2 букси 9 в напрямку осей Ox і Oy відповідно;

дуга c_1c_2 – траєкторія руху букси 9 на фазі заїзду колеса 10 на приймальну рейку 11 з віддавальної рейки 12.

На рисунку 5.4 – графік зміни за часом швидкості V_2 букси на фазі заїзду колеса на приймальну рейку (графік післяударної швидкості букси).

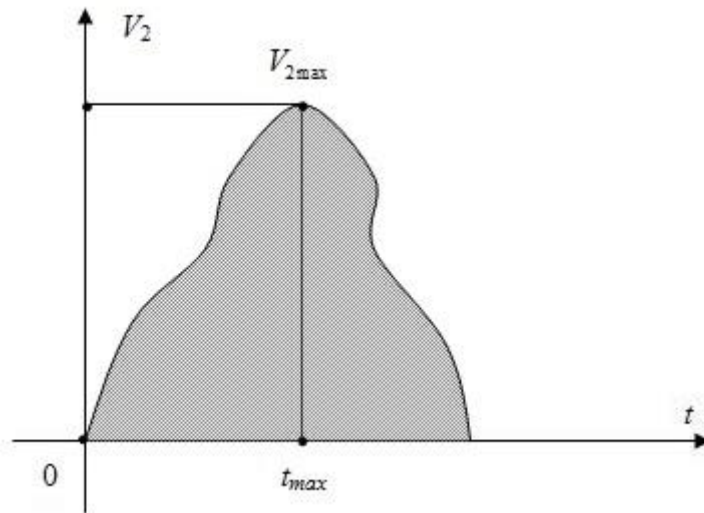


Рисунок 5.4 – Графік зміни за часом швидкості V_2 букси

На рисунку 5.4: V_{2max} – найбільше значення швидкості V_2 букси 9 під час руху по дугі c_1c_2 ; t_{max} – момент часу, коли швидкість V_2 приймає максимальне значення.

Пристрій працює у такий спосіб. Під час руху вагона-шляховимірника 1 наявність стику колії фіксується датчиком 6 стику. Вихідний сигнал датчика 6 надходить на керувальний вхід першого ключа 18 блока 5 виміру стикових швидкостей. Ключ 18 підключає до входу першого пристрою 28 запам'ятовування вихідний сигнал першого фільтра 15, який пропорційний горизонтальній швидкості V_x букси 9.

У момент заїзду колеса 10 на приймальну рейку 11, тобто руху букси по траєкторії c_1c_2 , на виході другого фільтра 16 з'являється сигнал V_y , пропорційний вертикальній швидкості букси 9. Від сигналу V_y спрацьовує перший нуль-орган 17, який своїм вихідним сигналом вмикає ключі 19 і 20 і вимикає ключ 18. При цьому на виході першого пристрою 28 запам'ятовування

зберігається сигнал, пропорційний горизонтальній до стиковій швидкості букси 9 і відповідно до колеса 10, який надходить у вигляді сигналу V_1 на перший вхід обчислювального пристрою 3.

Вихідні сигнали V_r , V_θ другого 19 і третього 20 ключів надходять на входи першого 21 і другого 22 блоків піднесення до квадрата. Після блока 23 підсумовування вихідний сигнал блока 24 добування квадратного кореня $V_2 = \sqrt{V_r^2 + V_\theta^2}$ надходить на інформаційний вхід четвертого ключа 27 і далі на вхід другого пристрою 29 запам'ятовування. При цьому четвертий ключ 27 вмикається вхідним сигналом другого нуля-органа 26, який спрацьовує при нульовому значенні вихідного сигналу блока 25 диференціювання. Відповідно до закону зміни за часом швидкості V_2 вихідний сигнал блока 25 диференціювання матиме нульове значення у момент часу t_{max} (рис. 5.4), коли швидкість V_2 приймає максимальне значення V_{2max} .

У пристрої датчики 7, 8 жорстко закріплені на правій буксі 9 колісної пари вагона-шляховимірника 1. Перший вхід блока 5 виміру стикових швидкостей з'єднаного з виходом датчика 6 стику правого колеса 10. Другий і третій входи блока 5 виміру стикових швидкостей з'єднані із виходами датчиків 7, 8 відповідно. Перший і другий входи блока 4 реєстрації з'єднані з виходами вимірника 2 пройденого шляху й обчислювального пристрою 3 відповідно. Тут приймальна та віддавальна рейка шляху відповідають позиціям 11, 12.

Для визначення математичної залежності висоти стику від доударної і післяударної швидкостей вагона, що наїжджає на приймальну рейку шляху, розглянемо рівняння, що характеризує зміну моменту кількості руху, аналізованої на рисунку 3.1 механічної системи розділу 3 під час проходження колесом стику типу «зазор – ступінь вгору»:

$$V_2 = V_1 \frac{\left(\frac{2h}{r} + 1\right)}{3} \quad (5.1)$$

З (5.1) отримаємо:

$$h_1 = \frac{3r(V_1 - V_2)}{2V_1}. \quad (5.2)$$

Наприкінці висота стику типу «зазор – ступінь вгору» визначиться як

$$h = r - h_1. \quad (5.3)$$

У запропонованому обчислювальному пристрої 3 із закладеною в нього програмою розраховується висота h стику за формулою (5.3) і виразом (5.2), що разом із даними про шлях S , який пройдено, від вимірника 2, надходять у блок 4 реєстрації. Блоком 4 реєстрації оформлюються дані про висоту h стику на відстані S від точки виміру у вигляді таблиці.

Висновки з дослідження: розробка відноситься до колієвимірювальної техніки і може бути використана для контролю геометричних параметрів рейкових стиків залізничних і трамвайних колій. Застосування на практиці розглянутого пристрою забезпечує розширення функціональних можливостей, а також підвищення точності контролю стикових нерівностей рейкової колії і завдяки цьому підвищення ефективності контролю геометричних параметрів рейкового стику.

5.2 Спосіб технічної реалізації пристрою для виміру висоти рейкових стиків колії з урахуванням фаз руху вагона

В основу досліджень поставлена задача вдосконалення [2, 41] пристрою для виміру висоти рейкових стиків, у якому застосування в кожному каналі виміру додаткових пристроїв, їхній взаємозв'язок і виконання, дозволяє збільшити точність контролю стикової нерівності рейкової колії шляхом виміру висоти стику під колесами кожної з чотирьох колісних пар вагона-шляховимірника. Також забезпечується виділення найбільшої серед висот, що вимірюються з наступною реєстрацією останньої як реальної висоти стику. Шляхом цього вдається підвищити ефективність контролю, а також розширити функціональні можливості пристрою.

Поставлена задача розв'язується тим, що у відомому пристрої для виміру висоти рейкових стиків колії, що містить встановлені на платформі вагона-шляховимірника вимірник пройденого шляху, ідентичні за конструкцією правий та лівий канали виміру геометричних параметрів стику. Кожен із каналів містить блок виміру стикових швидкостей, перший обчислювальний пристрій, з'єднаний входами з виходами блока виміру стикових швидкостей, блок реєстрації, з'єднаний першим входом із виходом вимірника пройденого шляху, перший блок датчиків горизонтальної і вертикальної швидкості букси, встановлений на буксі першої колісної пари, і перший датчик стику, встановлений на платформі вагона-шляховимірника. Згідно з корисною моделлю кожен канал виміру геометричних параметрів стику містить другий, третій і четвертий блоки датчиків горизонтальної та вертикальної швидкості букси, які встановлено на буксах другої, третьої і четвертої колісної пари відповідно, другий, третій і четвертий датчики стику, встановлені на платформі вагона-шляховимірника, нуль-орган, з'єднаний входами з керуючими входами ключа, з'єданого інформаційними входами з виходами блоків датчиків горизонтальної та вертикальної швидкості букси, а керувальними входами – із виходами датчиків стику, причому виходи нуль-органа і ключа підключено відповідно до першого, другого і третього входів блока виміру стикових швидкостей, другий обчислювальний пристрій з'єднаний входом із виходом першого обчислювального пристрою, а виходами – з другим і третім входами блока реєстрації.

Застосування в пристрої в кожному каналі виміру геометричних параметрів стику, встановлених на буксах другої, третьої і четвертої колісної пари відповідно другого, третього і четвертого блоків датчиків горизонтальної і вертикальної швидкості букси. А також встановлених на платформі вагона-шляховимірника другого, третього і четвертого датчиків стику, нуль-органа і ключа, другого обчислювального пристрою. Це забезпечує одержання на виході другого обчислювального пристрою і подальшу реєстрацію найбільшого

значення висоти стику, які виникають під час проходження стику колесами кожної з чотирьох колісних пар вагона-шляховимірника.

У підсумку збільшується [2] точність контролю стикових нерівностей рейкової колії шляхом виміру їхньої висоти і завдяки цьому підвищується ефективність контролю геометричних параметрів рейкового стику, а також розширюються функціональні можливості пристрою.

На рисунку 5.5 схематично зображено пристрій для виміру висоти рейкових стиків колій.

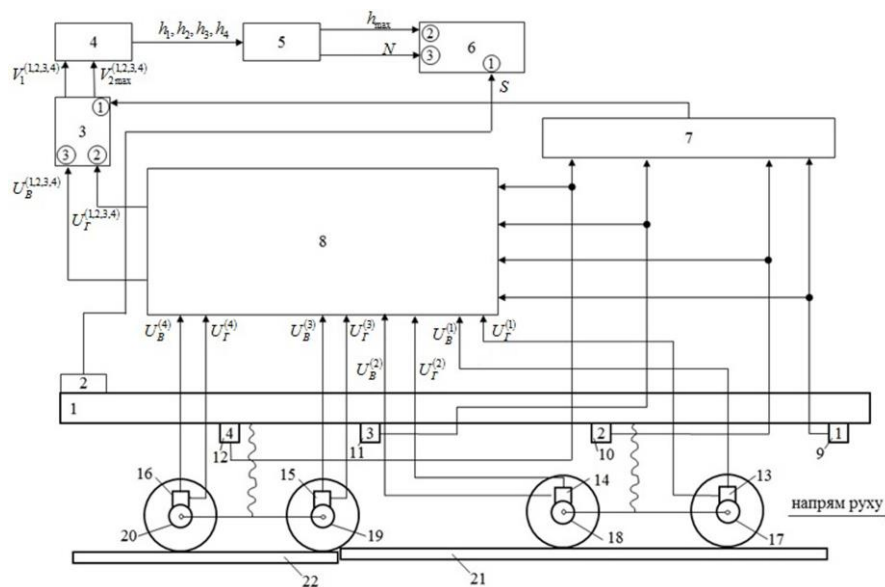


Рисунок 5.5 – Пристрій для виміру висоти рейкових стиків

Пристрій для виміру висоти рейкових стиків містить встановлені на платформі 1 вагона-шляховимірника: вимірник 2 пройденого шляху; ідентичні за конструкцією правий та лівий канали виміру геометричних параметрів стику (на кресленні показані складові лише правого каналу). Кожен із каналів містить блок 3 виміру стикових швидкостей, перший 4 і другий 5 обчислювальні пристрої, блок 6 реєстрації, нуль-орган 7 і ключ 8. Встановлені на платформі 1 перший 9, другий 10, третій 11 і четвертий 12 датчики стику. Також перший 13, другий 14, третій 15 і четвертий 16 блоки датчиків горизонтальної та вертикальної швидкостей, встановлені на буксах першої 17, другої 18, третьої 19 і четвертої 20 колісної пари, приймальну 21 і віддавальну 22 рейки шляху.

У пристрої датчики 9–12 стику жорстко закріплені на платформі 1 вагона-шляховимірника, датчики 13–16 горизонтальної і вертикальної швидкостей – на буксах першої 17, другої 18, третьої 19 і четвертої 20 колісної пари вагона-шляховимірника.

Тут вихід вимірника 2 пройденого шляху підключено до першого входу блока 6 реєстрації, вихід нуль-органа 7 – до першого входу блока 3 виміру стикових швидкостей, виходи першого 9, другого 10, третього 11 і четвертого 12 датчиків стику – до входів одночасно нуль-органа 7 і керуючих входів ключа 8. Інформаційні входи ключа 8 підключено до виходів блоків 13–16 датчиків горизонтальної і вертикальної швидкостей букси, а виходи – до другого і третього входів блока 3 виміру стикових швидкостей. Виходи блока 3 виміру стикових швидкостей підключено до входів першого 4 обчислювального пристрою, вихід першого 4 обчислювального пристрою – до входу другого 5 обчислювального пристрою, з'єднаний виходом – з другим і третім входами блока 6 реєстрації.

На рисунку 5.5:

$U_G^{(1,2,3,4)}$, $U_B^{(1,2,3,4)}$ – вихідні сигнали блоків 13–16 датчиків горизонтальної (індекс «Г») і вертикальної (індекс «В») швидкостей, що встановлені на буксах відповідно першої 17 (індекс 1), другої 18 (індекс 2), третьої 19 (індекс 3) і четвертої 20 (індекс 4) колісної пари;

$V_1^{(1,2,3,4)}$ – горизонтальна доударна швидкість букси відповідної з чотирьох колісних пар;

$V_{2\max}^{(1,2,3,4)}$ – найбільше значення післяударної швидкості $V_2^{(1,2,3,4)}$ букси відповідної з чотирьох колісних пар;

$h_{1\div 4}$ – висоти стику, що відповідають номеру колісної пари, колесо якої проходить стикову нерівність;

$h_{\max}$ – найбільша висота стику серед виниклих під час його проходження колесом кожної з чотирьох колісних пар вагона-шляховимірника;

S – довжина шляху до стику колії;

N – номер колісної пари, що проходить стикову нерівність.

Пристрій працює у такий спосіб. При русі платформи 1 вагона-шляховимірника наявність стику колії фіксується першим 9 датчиком стику. Вихідний сигнал датчика 9 надходить на входи нуль-органа 7 і ключа 8. Вихідний сигнал нуль-органа 7 надходить на перший вхід блока 3 виміру стикових швидкостей, чим вмикається в дію блок 3. Одночасно до виходів ключа 8 надходять вихідні сигнали $U_{\Gamma}^{(1)}$ і $U_B^{(1)}$ першого 13 блока датчиків горизонтальної і вертикальної швидкостей, які надходять відповідно на другий і третій входи блока 3 виміру стикових швидкостей. При цьому вихідні сигнали $U_{\Gamma}^{(2,3,4)}$ і $U_B^{(2,3,4)}$ другого 14, третього 15 і четвертого 16 датчиків швидкостей від виходу ключа 8 відмикаються.

У результаті на виході блока 3 з'являються сигнали, пропорційні горизонтальній до стиковій швидкості $V_1^{(1)}$ та найбільшому значенню $V_{2\max}^{(1)}$ післяударної швидкості $V_2^{(1)}$ букси першої колісної пари 17. Перший 4 обчислювальний пристрій за закладеною в нього програмою $h = 3r(V_1^{(1)} - V_{2\max}^{(1)}) / 2V_1^{(1)}$, $h_1 = r - h$ розраховує висоту h_1 стику, яка відповідає першій 17 колісній парі, колесо якої зараз проходить стикову нерівність. Вихідний сигнал блока 4, пропорційний висоті h стику запам'ятовується другим 5 обчислювальним пристроєм.

За подальшого руху платформи 1 вагона-шляховимірника на стик наїжджає колесо другої 18 колісної пари. Наявність стику фіксується другим 10 датчиком стику, що надходить на вхід нуль-органа 7 і керувальний вхід ключа 8. Знову на перший вхід блока 3 надходить вихідний сигнал нуль-органа 7, а до другого і третього його входів – вже вихідні сигнали $U_{\Gamma}^{(2)}$ і $U_B^{(2)}$ ключа 8. В результаті на виході блока 3 з'являються сигнали $V_1^{(2)}$ і $V_{2\max}^{(2)}$, на виході блока 4 – сигнал $h_2 = 3r(V_1^{(2)} - V_{2\max}^{(2)}) / 2V_1^{(2)}$, $h_2 = r - h$ який також запам'ятовується пристроєм 5.

Принцип дії пристрою повторюється для третьої 19 і четвертої 20 колісних пар, колесо яких наїжджає на стик. Водночас другим пристроєм 5 закладеною в нього програмою $h_{\max} = \max(h_1, h_2, h_3, h_4)$ розраховується найбільша висота стику серед тих, що виникли під час проходження колесом кожної з чотирьох колісних пар. Вихідний сигнал пристрою 5, пропорційний висоті стику $h_{\max}$, надходить на другий вхід блока 6 реєстрації, а пропорційний номеру N ($N = 1, 2, 3, 4$), який відповідає номеру висоти стику, що є найбільшою серед тих, що надійшли на вхід пристрою 5, на третій вхід блока 6 реєстрації, на який разом надходить від вимірника 2 пройденого шляху сигнал про шлях S , який пройдено. Блоком 6 реєстрації оформлюються дані про висоту стику $h_{\max}$ під колесом N -ї колісної пари на відстані S від точки виміру у вигляді таблиці.

Висновки з дослідження: розробка відноситься до колієвимірювальної техніки і може бути використана для контролю геометричних параметрів рейкових стиків залізничних і трамвайних колій. Застосування пристрою забезпечує розширення функціональних можливостей, а також підвищення точності контролю стикових нерівностей рейкової колії і завдяки цьому підвищення ефективності контролю геометричних параметрів рейкового стику.

5.3 Висновки з розділу 5

1. Розроблено оригінальні пристрої електромеханічного принципу дії, які належать до колієвимірювальної техніки, можуть бути використані для контролю геометричних параметрів рейкових стиків залізничних і трамвайних колій і забезпечують збільшення ефективності контролю геометричних параметрів стику шляхом підвищення точності контролю стикової нерівності рейкової колії, шляхом виміру їхньої висоти незалежно від проходження стику кожним колесом колісної пари вагона-шляховимірника, а також розширення функціональних можливостей.

2. Новизну пристроїв підтверджено патентами України № 91565 «Пристрій для виміру висоти рейкових стиків залізничної і трамвайної колій», № 115820 «Пристрій для виміру висоти рейкових стиків залізничної і трамвайної колій».

3. Слід зазначити, що запропоновані схемні рішення є універсальними з погляду сфери використання: метрополітен, залізничний транспорт.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі розв’язана актуальна науково-технічна задача, що пов’язана зі створенням сучасних методів і засобів дослідження процесів механічної взаємодії трамвайного вагона з віддавальною та приймальною рейками шляху в зоні стикової нерівності з урахуванням фаз руху, шляхом врахування впливу експлуатаційних, конструктивних і механічних факторів трамвайного вагона і верхньої будови колії на статичні і динамічні прогини, а також процеси ударної взаємодії в зоні стикової нерівності під першою шпалою приймальної рейки. На підставі виконаних авторами досліджень отримані нові наукові експериментально та теоретично обґрунтовані результати для вирішення проблеми взаємодії вагона електричного транспортного засобу з колією в зоні стикової нерівності, що безпосередньо підвищує безпеку руху, пропускну та провізну здатність станцій, знижує витрати на утримання рухомого складу та рейкового шляху, та зроблено такі висновки:

- створено метод послідовного статично-ударно-динамічного розрахунку прогинів приймальної рейки під першою шпалою на фазі зростання, який враховує фази руху трамвайного вагона відносно стикової нерівності, його завантаження і швидкість, а також граничні умови закріплення віддавальної і приймальної рейок, геометричні і механічні характеристики рейок та стикових накладок, шпал і баластового шару. Метод ПСУДР використовується в науковому аспекті під час дослідження закономірностей механічної взаємодії трамвайного вагона і рейкового шляху, а на практиці – для вдосконалення режимів експлуатації транспортного засобу, а також верхньої будови колії;

- встановлено і досліджено нові закономірності ударної взаємодії трамвайного вагона з рейковою колією в умовах проходження транспортним засобом стикової нерівності за варіювання його швидкості, завантаження і висоти стику колії, а також залежно від фази руху; аналіз показує: зміна зведеної до одного колеса маси трамвайного вагона в діапазоні $m = [2125 \div 3814]$ кг, наприклад, за швидкості руху $V_{1k} = 15$ м/с призводить до

зміни післяударної швидкості залежно від фаз руху вагона відповідно в діапазонах $V_1 = [4,635 \div 10,93]$ м/с, $V_1 = [2,355 \div 4,708]$ м/с, $V_1 = [3,729 \div 8,234]$ м/с, $V_1 = [1,368 \div 2,623]$ м/с, тобто до її зростання в 2,36; 1,99; 2,2; 1,92 разів; збільшення швидкості руху трамвайного вагона в діапазоні $V_{1k} = [1 \div 15]$ м/с при завантаженні трамвайного вагона, що відповідає зведеній до одного колеса масі вагона $m = 3814$ кг, призводить до зміни післяударної швидкості залежно від фаз руху трамвайного вагона відповідно в діапазонах $V_1 = [3,643 \div 10,93]$ м/с, $V_1 = [1,569 \div 4,708]$ м/с, $V_1 = [2,745 \div 8,234]$ м/с, $V_1 = [0,874 \div 2,623]$ м/с, тобто до її зростання в 3,0; 3,0; 2,99; 3,0 рази; встановлена закономірність, що остання властивість практично не залежить від фаз руху трамвайного вагона;

– отримано залежності статичної, динамічної і узагальнених складових висот стикової нерівності на етапі зростання від фаз руху трамвайного вагона, які враховують ортогональність форм коливань приймальної рейки, експлуатаційні, конструктивні і механічні характеристики трамвайного вагона та верхньої будови шляху; парадигму досліджень особливостей взаємодії трамвайного вагона та рейкової колії побудовано на базі багатофакторного аналізу; створено новий підхід до розв'язання задачі механічної взаємодії трамвайного вагона рейкового транспорту і колії в місці стикового з'єднання, що дозволяє розглядати різноманітні типи стиків рейкової колії з урахуванням конструктивних і експлуатаційних особливостей транспортного засобу;

– удосконалено динамічну модель прогинів приймальної рейки, яка враховує характеристики жорсткості і демпфірування підвіски трамвайного вагона і баластового шару, швидкості, завантаження й фазу руху трамвайного вагона через поточні кількісні параметри зведених мас коліс на рейці, що дозволило розрахувати параметри післяударної взаємодії механічної системи «трамвайний вагон – рейкова колія» на фазі зростання прогинів під першою шпалою; встановлено, що зміна зведеної до одного колеса маси трамвайного вагона в діапазоні $m = [2125 \div 3814]$ кг, наприклад, за швидкості руху

$V_{1k} = 15$ м/с призводить до зміни динамічного прогину приймальної рейки під першою шпалою залежно від фаз руху трамвайного вагона відповідно в діапазонах $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 1} = [4,428 \div 8,184]$ мм, $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 2} = [4,791 \div 9,092]$ мм, $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 3} = [4,84 \div 9,214]$ мм, $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 4} = [4,255 \div 8,054]$ мм, тобто до його зростання в 1,848; 1,897; 1,9; 1,89 рази; збільшення швидкості руху трамвайного вагона в діапазоні $V_{1k} = [1 \div 15]$ м/с при завантаженні трамвайного вагона, що відповідає зведеній до одного колеса масі трамвайного вагона $m = 3814$ кг, призводить до зміни величини прогину залежно від фаз руху трамвайного вагона відповідно в діапазоні $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 1} = [4,708 \div 8,184]$ мм, $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 2} = [4,968 \div 9,092]$ мм, $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 3} = [4,904 \div 9,214]$ мм, $w(t, x = l_1)_{\max, \phi 4} = [4,633 \div 8,054]$ мм, тобто до його зростання в 1,738; 1,83; 1,89; 1,75 рази;

– розроблено оригінальні пристрої електромеханічного принципу дії (патенти України № 91565, № 115820), які належать до колієвимірювальної техніки, можуть бути використані для контролю геометричних параметрів рейкових стиків залізничних і трамвайних колій і забезпечують збільшення ефективності контролю геометричних параметрів стику, а також розширення функціональних можливостей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пат. № 91565. Україна, МПК E01B 35/00 (2014.01). Пристрій для виміру висоти рейкових стиків залізничної і трамвайної колій / В. П. Шпачук, Т. О. Супрун, О. М. Кузнецов, О. І. Рубаненко, Б. В. Кучеренко, Л. О. Гудзловенко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Заявл. 03.02.2014; Опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13.
2. Пат. № 115820. Україна, МПК E01B 35/00 (2006.01). Пристрій для виміру висоти рейкових стиків залізничної і трамвайної колій / В. П. Шпачук, Т. О. Супрун, В. Ф. Далека, А. В. Коваленко, О. І. Укіс ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Заявл. 28.11.2016; Опубл. 25.04.2017, Бюл. № 8.
3. Aguiar R. R. Impact Force Magnitude Analysis of an Impact Pendulum Suspended in a Vibrating Structure / R. R. Aguiar, H. I. Weber // Shock and Vibration. – Brazil: Pontificai Catholic University of Rio de Janeiro, 2012. – Vol. 19 (6). – P. 1359–1372.
4. Pat. № US 2011/0209549 A1. USA. Int. Cl. GOIN 29/04 (2006.01) GOIN 33/00 (2006.01). Apparatus for and method of detecting defects in a rail joint bar / Jason M. Kahn, Herzog Services. – Filed: Aug. 31, 2010; Pub. Date: Sep. 1, 2011.
5. Bogacz R. Influence of sleepers shape and configuration on track-train dynamics / R. Bogacz W. Czyczula, R. Konowrocki // Shock and Vibration. – Brazil : Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, 2014. – 7 p.
6. Bogacz R. On new effects of wheel-rail interaction / R. Bogacz, R. Konowrocki // Archive of Applied Mechanics. – Switzerland : Springer Berlin Heidelberg, 2012. – Vol. 82. – P. 1313–1323.
7. Esveld C. Interaction of the way and rolling stock when moving with high velocity / C. Esveld, A. Kok // Rail Engineering International, 1998. – Vol. 3. – P. 14–16.

8. Insulated railway joint design methodology through parametric finite element based modeling. A Compendium of International Applications / Chase C. Holland, Thong Q. Do, Robert L. West, Mehdi Ahmadian // Joint Rail Conference, 2010. – Urbana, Illinois, USA. – P. 1–9.
9. Impact vibration characteristics of a shrouded blade with asymmetric gaps under wake flow excitations / Chu S., Cao D., Sun S., Pan J., Wang L. // Nonlinear Dynamics. – Netherlands, 2013. – Vol. 72 (3). – P. 539–554.
10. A holistic approach for the design and assessment of railway tracks / D. Kostovasilis E. Ntotsios, M. F. M. Hussein, D. J. Thompson, G. Squicciarini / Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, 30 June – 2 July 2014 Porto, Portugal: EURODYN, 2014. – P. 855–861.
11. Markine V. A procedure for design and optimization of a railway track structure / V. Markine, A. P. De Man, C. Esveld // In Proc. Interactive Conference: Cost Effectiveness and Safety Aspects of Railway Track (UIC). France: Paris, 1998. – P. 1–10.
12. Progress on wheel-rail dynamic performance of railway curve negotiation / K. Wang, C. Huang, W. Zhai, P. Liu, S. Wang // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2014. – Vol. 1. – P. 209–220.
13. Бугаєць Н. В. Аналіз способів підвищення несучої здатності рейкошпальної основи промислових залізниць / Н. В. Бугаєць // Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 2007. – Вип. № 87. – С. 178–184.
14. Велінець В. П. Експериментальні дослідження горизонтальної поперечної жорсткості рейкових ниток при різних конструкціях рейкових скріплень / В. П. Велінець // Наука та прогресс транспорту, 2015. – Вип. № 6 (60). – С. 57–64.
15. Данович В. Д. Взаимодействие колес вагона с рельсами Р65 и UIC60 / В. Д. Данович, В. Я. Закапко // Залізн. трансп. України, 2000. – Вип. № 3. – С. 18–21.

16. Данович В. Д. Пространственные колебания скоростных рельсовых экипажей / В. Д. Данович, Т. Ф. Мокрый, Е. Ю. Трубицкая // Колебания и динамические качества механических систем. – Київ : Наукова думка, 1983. – С. 72–76.
17. Моделювання елементів верхньої будови колії методом кінцевих елементів / О. М. Даренський, О. В. Лобяк, Н. В. Бугаєць, Л. Г. Волчок // Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 2011. – Вип. № 122. – С. 270–279.
18. Даренський О. М. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничних колій / О. М. Даренський, Е. А. Беліков // Зб. наук. пр. УкрДУЗТ, 2015. – Вип. № 154. – С. 149–155.
19. Даренський О. М. Математична модель системи «екіпаж-колія» для умов метрополітену / О. М. Даренський, А. С. Малішевська // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2016. – Вип. № 6. – С. 56–61.
20. Novel discrete element modeling coupled with finite element method for investigating ballasted railway track dynamics / D. Nishiura, H. Sakai, A. Aikawa, S. Tsuzuki, H. Sakaguchi // Computers and Geotechnics, 2018. – Vol. 96. – P. 40–54.
21. Ушкалов В. Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, С. Ф. Редько. – Київ : Наукова Думка, 1982. – 359 с.
22. Рівні статичної взаємодії трамвая з рейковою колією на четвертій фазі проходження вагоном стикової нерівності / В. П. Шпачук, О. О. Чупринін, А. О. Гарбуз, Т. О. Супрун // Зб. наук. праць УкрДУЗТ, 2016. – Вип. № 162. – С. 11–20.
23. Studying the railroad track geometry deterioration as a result of an uneven subsidence of the ballast layer / O. Nabochenko, M. Sysyn, V. Kovalchuk, Yu. Kovalchuk, A. Pentsak, S. Braichenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019. – Vol. 7 (97). – P. 50–59.

24. Pat. № 2010060320. Japan. B61K 9/08 G01B 11/14. 18.03.2010 Device for measuring opening of rail joint / Nagasaka Hitoshi, Tsuchiya Takashi, Nozue Michiko, Miyashita Yoshitaka, Watanabe Yoshihiro.; owner JPO & INPIT. – Filed: 01.09.2008; Pub. Date: 18.03.2010.
25. A Drivable Slab Track Cover System For Railway Tunnels / A. Andreatta, Y. Theiner, G. Hofstetter, J. Feix // ACEE, 2013. – Vol. 01 (02). – P. 84–98.
26. Bifurcation analysis of a smoothed model of a forced impacting beam and comparison with an experiment / M. Elmegard, B. Krauskopf, H. M. Osinga, J. Starke, J. J. Thomsen // Nonlinear Dynamics, 2014. – Vol. 77(3). – P. 951–966.
27. Frangopol D. M. Life-cycle performance, management, and optimization of structural systems under uncertainty: accomplishments and challenges / D. M. Frangopol // Structure and infrastructure engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, 2011. – Vol. 7. – Iss. 6. – P. 389–413.
28. A holistic approach for the design and assessment of railway tracks / D. Kostovasilis, E. Ntotsios, M. F. M. Hussein, D. J. Thompson, G. Squicciarini // Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN. – Porto, Portugal: 30 June – 2 July 2014. – P. 855–861.
29. Matsui N. A practical calculation method of quasistatic curving performance of railway bogie / N. Matsui // Vehicles Sust. Dynamic, 1979. – Vol. 2/3. – P. 152–157.
30. Moon S.-I. Fatigue life evaluation of mechanical components using vibration fatigue analysis technique / S.-I. Moon, I.-J. Cho, D. Yoon // Journal of Mechanical Science and Technology, 2011. – Vol. 25 (3). – P. 631–637.
31. A mathematical model to study railway track dynamics for the prediction of vibration levels generated by rail vehicles / J. Otero, M. A. Martinez, de los Santos, S. Cardona // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2011. – Vol. 226, Issue 1. – P. 62–71.

32. Rose, J. G. Optimization of rail inserts using finite element analysis / P. F. Teixeira, N. E. Ridgway // A Compendium of International Applications. Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference. Urbana, Illinois, USA, April 2010. – P. 239–255.
33. Голубенко А. Л. Сцепление колеса с рельсом / А. Л. Голубенко. – Киев : ВИПОЛ, 1993. – 448 с.
34. Шпачук В. П. Динамічна взаємодія рухомого складу і рейкової колії з урахуванням фаз руху / В. П. Шпачук, О. О. Чупринін, Т. О. Супрун // Актуальні проблеми інженерної механіки: матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції, 2012. – С. 34–36.
35. Шпачук В. П. Динамічна взаємодія трамвая з рейковою колією на першій фазі проходження вагоном стикової нерівності / В. П. Шпачук, О. О. Чупринін, Т. О. Супрун // Коммунальное хозяйство городов. – 2012. – № 105. – С. 376–385.
36. Особливості динамічної взаємодії на четвертій фазі проходження вагоном стикової нерівності / В. П. Шпачук, О. О. Чупринін, Т. О. Супрун, А. О. Гарбуз // 36. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту, 2016. – № 165. – 167–173.
37. Шпачук В. П. Механічна взаємодія вагону трамвая з рейковою колією в зоні стикової нерівності / В. П. Шпачук, О. І. Рубаненко, Т. О. Супрун // Математичні проблеми технічної механіки, 2012. – С. 136.
38. Шпачук В. П. Особливості динамічної взаємодії вагону з рейковою колією в зоні стикової нерівності типу «ступінь вгору» / В. П. Шпачук, О. І. Рубаненко, Т. О. Супрун // Праці Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу» яка присвячена 100-річчю професора Мойсея Абрамовича Фрішмана, 2013. – С. 70–71.

39. Шпачук В. П. Особливості проходження стику другою колісною парою / В. П. Шпачук, О. О. Чупринін, Т. О. Супрун // Праці Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу» яка присвячена 100-річчю професора Мойсея Абрамовича Фрішмана, 2013. – С. 72–73.

40. Шпачук В. П. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на статичні і динамічні прогини рейкової колії в зоні стикової нерівності / В. П. Шпачук, О. О. Чупринін, Т. О. Супрун // Вібрації в техніці та технологіях, 2014. – Вип. № 4 (76). – С 102–108.

41. Шпачук В. П. Стикова динаміка трамвая : монографія / В. П. Шпачук, В. Х. Далека, А. В. Коваленко. – Харків : ХНАМГ, 2005.– 150 с.

42. Математична модель взаємодії колії і рухомого складу в зоні рейкових стиків / О. М. Даренський, Н. В. Бугаєць, І. О. Покотецький, В. М. Коваль // 36. наук. пр. УкрДУЗТ, 2018. – Вип. № 180. – С. 96–106.

43. Пат. № 4874. Україна. МКІ E01B35/00 Пристрій для виміру висоти рейкових стиків залізничної і трамвайної колій / В. П. Шпачук, А. В. Коваленко, О. О. Чупринін ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Заявл. 12.05.2004. Опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2.

44. Пат. № 7936. Україна. МКІ E01B35/00/ Пристрій для виміру і контролю геометричних параметрів рейкових стиків залізничної та трамвайної колій / В. П. Шпачук, А. В. Коваленко, Є. О. Личкатий, О. О. Чупринін ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Заявл. 20.12.2004. Опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7.

45. Пат. № 95863. Україна. МКІ B61K 9/00, G01S 5/14 Спосіб дистанційного акустичного контролю рейкового рухомого складу під час руху / Д. І. Скуріхін, Р. І. Візняк, В. В. Бондаренко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Заявл. 05.05.2010. Опубл. 12.09.2011 Бюл. № 17.

46. A multifactor analysis of the rail transport car that passes over a joint unevenness with respect to the phases of its motion / V. Shpachuk, A. Chuprynin, T. Suprun, A. Garbuz // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2018. – Vol. 1, Issue 7 (91). – P. 55–61.

47. К задаче моделирования ударного взаимодействия в дискретно-континуальной системе / В. П. Шпачук, А. А. Чупрынин, Л. А. Гудзловенко // Dynamical systems modeling and stability investigation : abstracts of international conference, Киев, 27–29 мая 2015 г. – Киев : КНУ им. Т. Шевченко, 2015. – С. 132–133.

48. Шпачук В. П. Ударное взаимодействие трамвая с принимающим рельсом в месте изолированной стыковой неровности / В. П. Шпачук, А. В. Коваленко // Східно-Європейський журнал передових технологій, 2005. – Вып. № 2/2 (14). – С. 31–33.

49. Ударное взаимодействие в дискретно-континуальной системе «вагон – колёсная пара – рельсовый путь» на фазе возрастания прогибов / В. П. Шпачук, А. А. Чупрынин, Т. О. Супрун [и др.] // Проблеми та перспективи розвитку технічних засобів транспорту та систем автоматизації : матеріали міжнар. наук.техн. конф., Харків, 1–3 жовт. 2014 р. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова [та ін.]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. – С. 46–47.

50. Павловський М. А. Теоретична механіка / М. А. Павловський. – Київ : Техніка, 2002. – 512 с.

51. Шпачук В. П. Теоретична механіка : підручник / [В. П. Шпачук, І. В. Кузьо та ін.]. – Харків : Фоліо, 2017. – 780 с.

52. Механічна взаємодія вагону трамвая з рейковою колією в зоні стыкової нерівності типу «ступінь угору» / В. П. Шпачук, О. І. Рубаненко, О. М. Кузнєцов, Т. О. Супрун // Зб. наук. праць (галузеве машинобудування, будівництво) ПолтНТУ, 2012. – Вип. № 2. – С. 236–241.

53. Лазарян В. А. Динамика транспортных средств : Изб. тр. / В. А. Лазарян. – Киев : Наук. думка, 1985. – 528 с.

54. Динамика установившегося движения локомотивов в кривых / Под ред. С. М. Куценко. – Харків : Вища школа, 1975. – 132 с.
55. Маслиев В. Г. Математическое моделирование динамических процессов в системе «экипаж – рельсовый путь» / В. Г. Маслиев // Міжвуз. зб. наук. праць / Харків. – ХарДАЗТ, 1998. – Вип. № 34. – С. 23–26.
56. Маслієв В. Г. Вплив примусового нахилу кузова вагона на сили взаємодії колеса з рейками / В.Г. Маслієв, О.Л. Литвинова // Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 2014. – Вип. № 147. – С. 36–40.
57. Multiple-factor analysis of the dynamic interaction between railroad cars and joint irregularity / V. Shpachuk, A. Chuprynin, T. Suprun, A. Kovalenko // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 2018. – Vol. 99. – P. 183–192.
58. Пузир В. Г. Технічні засоби для виявлення причин транспортних подій / В. Г. Пузир, О. В. Устенко, В. С. Крот. // Зб. наук. праць УкрДАЗТ «Безпека руху та людський фактор на транспорті», 2007. – С. 173–177.
59. Супрун Т. О. Технічні засоби дослідження впливу висоти рейкових стиків залізничної і трамвайної колії на рівні коливань вагону / Т. О. Супрун // Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту, 2016. – № 165. – С. 223–231.

Електронне наукове видання

МЕХАНІКА ПРОГИНІВ ТРАМВАЙНОЇ КОЛІЇ

МОНОГРАФІЯ

Відповідальний за випуск *А. О. Гарбуз*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *Т. О. Супрун*

Підп. до друку 17.12.2024. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 7,6.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.