

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Беліков Едуард Анатолійович

УДК 625.143.51

ДИСЕРТАЦІЯ

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ПРОМІЖНИХ СКРІПЛЕНЬ ТИПІВ ТРЕП ТА ТРЕП-Ш В УМОВАХ КОЛІЙ НЕЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

05.22.06 – Залізнична колія
27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Е.А.Беліков

Науковий керівник

Даренський Олександр Миколайович

доктор технічних наук,

професор

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Беліков Е.А. – Особливості роботи проміжних скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш в умовах колій незагального користування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія (27 – транспорт). – Український державний університет залізничного транспорту, Харків, 2019.

Дисертація присвячена експериментально–теоретичним дослідженням напружено–деформованого стану підрейкової основи з проміжними рейковими скріпленнями типів ТРЕП та ТРЕП–Ш з урахуванням сил взаємодії спеціального та спеціалізованого рухомого складу та залізничної колії в умовах залізниць незагального користування.

Зміст дисертації. У вступі представлена загальна характеристика роботи, наведено актуальність, зв'язок з науковими темами, сформульовано мету та задачі досліджень, описано практичне значення роботи та наукова новизна.

У першому розділі виконано аналіз технічних та експлуатаційних характеристик колій незагального користування України. Наведено характеристики конструкцій верхньої будови колії залізниць незагального користування. Розглянуто особливості спеціального та спеціалізованого рухомого складу. Встановлено, що найбільш поширеною конструкцією верхньої будови колії залізниць незагального користування є ланкова колія на залізобетонних шпалах зі скріпленнями типу КБ. Зазначено, що цей тип скріплення, який понад 50 років тому був розроблений для умов колій магістральних залізниць, в багатьох випадках не відповідає умовам експлуатації залізниць незагального користування. Серед таких умов експлуатації слід вказати на високі осьові навантаження, підвищену жорсткість ресорних комплектів рухомого складу, наявність значної кількості кривих малих радіусів, великі ухили.

Аналіз сучасних вітчизняних та закордонних конструкцій проміжних скріплень, які проходять дослідно–експериментальні випробування на магістральних залізницях, показав, що основними тенденціями при конструюванні

сучасних скріплень є застосування пружних прикріплювачів (клем), відмова від різьбових сполучень, застосування сучасних полімерних та композитних матеріалів для виготовлення амортизуючих та електроізолюючих елементів.

Зроблено висновок, що найбільш перспективними для умов залізниць незагального користування є скріплення типів ТРЕП та ТРЕП–Ш. Ці скріплення є близькими між собою конструктивно, а їх елементи є взаємозамінними. Основна відмінність – наявність металевої підкладки у скріпленні ТРЕП–Ш, що буде справляти позитивний вплив на роботу підрейкової основи в умовах високих осьових навантажень.

Зазначено, що визначення особливостей роботи проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш для умов залізниць незагального користування є можливим тільки на підставі аналізу сил взаємодії між рухомим складом та колією й аналізу напруженого стану елементів підрейкової основи (скріплень, шпал, баласту) при застосуванні таких скріплень.

Аналіз існуючих теоретичних моделей визначення сил взаємодії рухомого складу і колії та розрахунків напруженого стану елементів колії показав, що в більшості цих моделей використано розрахункову схему колії у вигляді балок, що спираються на суцільну пружну основу. Значний внесок в розвиток теорій зроблено професорами О.П. Єршковим, Є.М. Бромбергом, Г.М. Шахунянцом, М.Ф. Веріго, В.А. Лазаряном, С.В. Амеліним, М.П. Смирновим, М.А. Фрішманом, В.Ф. Яковлєвим, С.П. Першиним, В.І. Ангелейком, О.Я. Коганом, Е.І. Даніленком.

Однак ряд вчених (професори В.Ф. Яковлєв, К.Д. Бєлих) зазначають, що для умов залізниць незагального користування розрахункова схема колії як балки на суцільній пружній основі надмірно ідеалізує колію, її технічний стан та дає занижені результати.

Тому було зроблено висновок, що для визначення особливостей роботи скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш в умовах залізниць незагального користування доцільно використовувати комплекс математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж–колія», основи якої були розроблені професором

О.М. Даренським. Але в цей комплекс математичних моделей необхідно внести корегування, які дозволять враховувати роботу скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш в колії.

У другому розділі приведено результати досліджень впливу скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш на характеристики просторової жорсткості рейкових опор та зроблено прогнозну оцінку змін цих параметрів під час експлуатації колій. Такі дослідження були необхідні для внесення відповідних змін у математичну модель динамічної системи «екіпаж–рейкова колія».

Просторові жорсткості рейкових опор зі скріпленнями ТРЕП та ТРЕП–Ш представлені, як системи з послідовно і паралельно сполучених жорсткостей пружних елементів, які входять до складу цих опор: нашпальних і підрейкових прокладок; пружних клем; жорсткостей системи «шпала–баласт». В основу цих моделей було покладено концепцію багатошарової підрейкової основи, провідні положення якої були розроблені проф. Е.І. Даніленком.

На підставі цих моделей було визначено перелік характеристик пружних елементів і перелік залежностей їх змін під час експлуатації колій які потрібно було визначити експериментально.

Експериментальними дослідженнями, які були проведені в лабораторних умовах, було встановлено жорсткості пружних елементів скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш при їх навантаженні вертикальними і горизонтальними поперечними силами. Випробуваннями пружних елементів, які експлуатувалися в колії протягом 8 років на дослідних ділянках Південно–Західної залізниці, встановлено зміни їх жорсткостей під час експлуатації. Це дозволило не тільки визначити просторові жорсткості скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш при вертикальному, горизонтальному поперечному навантаженні та крученні рейки але й спрогнозувати зміни цих параметрів під час експлуатації. Діапазони динамічних навантажень при випробуваннях прокладок були прийняті відповідними вертикальним навантаженням, які виникають при русі екіпажів з осьовими навантаженнями до 211 кН, до 265 кН, до 343 кН, до 460 кН на вісь. Встановлено що динамічна жорсткість прокладок зростає в 7–7.4 рази зі збільшенням інтервалів навантажень.

Випробування прокладок, що були в експлуатації показали, що після 8 років експлуатації в колії жорсткість прокладок зростає в середньому на 19–20 %. Для визначення жорсткості пружних клем КПТ скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш були проведені їх випробування із застосуванням обладнання, яке досить точно моделює роботу клем у колії.

Середнє значення жорсткості цих клем при вертикальних деформаціях становить 970 кН/м, за середнього квадратичного відхилення $0,02 \cdot 10^4$ кН/м.

Складові просторових жорсткостей системи «шпала–баласт» були визначені на основі експериментальних досліджень, виконаних кафедрою «Колія та колійне господарство» УкрДУЗТ в 2008–2009 роках на коліях металургійних і гірничо-видобувних підприємств України.

На підставі даних експериментів були одержані емпіричні коефіцієнти постілі залізобетонних шпал від величини по коліях тоннажу з урахуванням діапазонів навантажень.

Проведені експериментальні роботи в лабораторних умовах та в колії дозволили визначити просторові жорсткості скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш і жорсткості рейкових опор при застосуванні цих скріпленнях. Таким чином отримані дані дозволили виконувати чисельні дослідження сил взаємодії рухомого складу та колії залізниць незагального користування при застосуванні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш.

У третьому розділі чисельними методами виконано дослідження сил дії на колію навантажень під час руху спеціальних і спеціалізованих вагонів при застосуванні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш. Для порівняння отриманих результатів виконано також розрахунки сил дії на колію при застосуванні скріплень КБ в однакових умовах експлуатації.

В розрахунках сил дії було використано математичні моделі просторової динамічної системи «екіпаж–колія», в основу яких покладено концепцію дискретної підрейкової основи з нелінійними дисипативними пружними характеристиками рейкових опор при застосуванні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш. Такий підхід дозволив враховувати додаткові динамічні сили, що викликані

нерівножосткістю підрейкової основи, відмінністю пружних і дисипативністю опор та їх нелінійністю. Для умов залізниць незагального користування величини таких додаткових сил можуть перевищувати 15 % від рівня статичних колісних навантажень.

Автором у розрахункову модель було внесено рівняння просторової жорсткості рейкових опор зі скріпленнями ТРЕП та ТРЕП–Ш при вертикальних та горизонтальних вигинах і крученні рейки. Таким чином, основна система диференціальних рівнянь просторової динамічної системи «екіпаж–колія» розв’язувалася в нелінійній постановці задачі.

В моделі враховані пружно–дисипативні сили, які виникають у точці контакту колеса і рейки, додаткові динамічні сили, що викликані дисбалансом колеса, нерівномірністю зносу поверхні кочення та повзунами. Модель враховує ширину колісної пари, ширину колії, нахил рейок, конічність поверхні кочення та наявність вертикальних і горизонтальних нерівностей колії. Математична модель реалізована в сучасній системі математичного проектування *Mathcad*.

Для виявлення особливостей взаємодії рухомого складу і колії при застосуванні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш, в порівнянні зі скріпленням КБ були виконані багатоваріантні розрахунки. Як розрахункові було взято напіввагони типу 12–1000, думпкари ВС–85 та 6–ВС–60, чавуновозну платформу вантажопідйомністю 75 т, шлаковоз з ємністю ковша 16,5 м³, чавуновози з ємністю ковша 50 та 140 т, та візок для виливниць І–120–5500.

Як змінні в розрахунках приймалися такі параметри рейкової колії:

- радіуси кругових кривих – 350–600 м;
- довжина вертикальних нерівностей – від 2–6 м;
- глибина вертикальних нерівностей – від 0,005 м до 0,006 м;
- довжина горизонтальних нерівностей – від 2–6 м;
- стріла вигину горизонтальних нерівностей від 0,005 м до 0,05 м;
- термін експлуатації колії – від 0 до 10 років.

Таким чином, були виконані розрахунки більш ніж 1540 варіантів взаємодії різних типів рухомого складу і колії з різними характеристиками.

Розрахунки показали, що на величини вертикальних сил взаємодії рухомого складу і колії впливають, головним чином (окрім характеристик рухомого складу), короткі (до 6 м) нерівності профілю, нерівножорсткість підрейкової основи та конструкції проміжних скріплень. Коефіцієнт динамічності таких сил може досягати значень 1,2–1,3 а абсолютні значення колісних навантажень можуть перевищувати 300 кН.

За швидкості руху зазначених типів рухомого складу коефіцієнти динаміки можуть перевищувати значення 1,22 для чавуновоза 140 т.

Порівняння вертикальних сил взаємодії рухомого складу та колії при застосуванні скріплень КБ, ТРЕП та ТРЕП–Ш показало, що рівень вертикальних динамічних сил при застосуванні скріплень ТРЕП підвищується в середньому на 4–6 % в порівнянні зі скріпленнями КБ. При застосуванні скріплень ТРЕП–Ш рівень сил зменшується до 12 %.

Розрахунки горизонтальних поперечних сил показали що на їх рівень, окрім типів скріплень, впливають характеристики плану та терміни експлуатації колії.

У прямих ділянках, за наявності горизонтальних нерівностей, можуть виникати горизонтальні сили, що перевищують 8 кН для деяких типів вагонів. У кривих ділянках колії горизонтальні поперечні сили перевищують 100 кН. При застосуванні скріплень типу ТРЕП рівень горизонтальних поперечних сил підвищується в середньому на 7 % відносно рівня сил, які виникають при застосуванні скріплень КБ. При скріпленні ТРЕП–Ш рівень таких сил знижується до 17 %.

У розділі чотири були виконані дослідження напруженого – деформованого стану елементів підрейкової основи колії з використанням просторової моделі, яку було розроблено з використанням методів скінченних елементів (МСЕ). Модулювання рейок, підрейкових прокладок та пружних клем було проведено із застосуванням (СЕ) для розрахунків напруженого – деформованого стану для об'єктів з однорідного лінійного пружного матеріалу. До параметрів цих СЕ вводять модулі пружності, коефіцієнт Пуассона, густоти матеріалу для урахування його власної ваги. Моделювання контактів між рейками, прокладками,

ізолюючими вкладишами та анкерами виконувалось за допомогою двовузлових скінченних елементів односторонніх пружних зв'язків.

В моделі залізобетонних шпал, крім СЕ, які моделюють бетон, введено елементи, що моделюють роботу арматури в тому числі із зусиллям попереднього натягу. Моделі баластного шару склалися з СЕ, призначених для моделювання однобічної роботи цих матеріалів на стиснення, з урахуванням зсуву.

До розрахункових параметрів цих СЕ входять модуль деформації, коефіцієнт Пуассона, питома вага, питоме зчеплення та кут внутрішнього тертя.

Зовнішнє навантаження на модель верхньої будови колії приймалося за результатами розрахунків, проведених у розділі 3.

Розрахунки показали, що на напружений стан клем істотно впливає рівень горизонтальних поперечних сил. У кривих ділянках колії напруження у клемах скріплень ТРЕП може досягати значення 1280 МПа, та при застосуванні скріплень ТРЕП Ш 1190 МПа при різних типах рухомого складу. Напруження в залізобетонних шпалах змінюється в межах від -12 МПа до $3,3$ МПа при скріпленнях ТРЕП. Застосування скріплень ТРЕП–Ш зменшують такі діапазон напруження до $-6,06$ та $1,81$ МПа. Еквівалентні напруження з урахуванням напружень попереднього натягнення можуть досягати $19,17$ МПа при скріпленнях ТРЕП та ТРЕП–Ш. На розподіл просторових напружень у шпалі істотно впливає перевантаження зовнішньої рейки у кривій та перерозподіл навантажень на шпалу від прокладки та анкерів внаслідок дії горизонтальних поперечних сил. Отримані розрахунками напруження в баласті досягають рівня $0,376$ МПа при скріпленнях ТРЕП на несучу здатність. З урахуванням широкого вживання на коліях незагального користування щебеню зі слабких гірських порід або шлаків, такий рівень перевищує його несучу здатність. Тому для ділянок з осьовими навантаженнями більше 300 кН рекомендовано застосування скріплень ТРЕП–Ш та посилювання баластної призми укладанням геотекстилю або георешіток.

Порівняння результатів розрахунків зі значеннями допустимих напружень показали, що підрейкова основа зі скріпленнями ТРЕП є цілком працездатною при обертанні рухомого складу з осьовими навантаженнями до 300 кН в прямих та

кривих ділянках з радіусами не менше 350 м; при осьових навантаженнях 301–450 кН можливе використання скріплень ТРЕП–Ш за швидкості руху до 15 км/год; при осьових навантаженнях більше 450 кН застосування зазначених скріплень не рекомендоване.

У п'ятому розділі виконано аналіз експериментальних досліджень роботи колії незагального користування при застосуванні скріплень типу ТРЕП. Головною метою проведення цих досліджень була перевірка адекватності запропонованих моделей і методів розрахунків реальним умовам експлуатації колії незагального користування. Крім того, отримані дані були використані для визначення жорсткостей системи «шпали–баласт».

Вимірювання силових параметрів були виконані електротензометричними методами із застосуванням мікропроцесорних аналого – цифрових перетворювачів і ноутбука для їх реєстрації у функції реального часу, зберігання та наступної обробки.

З метою виключення впливу деформацій та вібрацій баласту й земляного полотна на вимірювання переміщень елементів колії, було застосовано відеоцифрову систему. Ця система дозволяла вимірювати переміщення рейок та шпал із точністю 0,03 мм у функції реального часу з точністю 10^{-3} с.

Реєстрація результатів вимірювань силових параметрів і переміщень одним комп'ютером у функції реального часу дозволила поєднувати масиви цих даних для наступної обробки.

Основні експериментальні роботи були проведені на діючих коліях Харківської філії ПрАТ «Київ–Дніпровське МППЗТ» у 2012 році. На експериментальній ділянці сім шпал Ш–1–1 було замінено на шпали типу ША–Т зі скріпленнями ТРЕП.

Експериментальні роботи проводились під час руху спеціального потяга, що складався з локомотива ТГМ–4, двох платформ моделі 13–401 та двох думпкарів ВС–85. Платформи та думпкари були завантажені щебенем до вагової норми. Швидкості руху потяга поступово змінювалась від 3 до 33 км/год.

Під час проведення експериментальних робіт вимірювались вертикальні та горизонтальні сили, що діють на шпалу, й напруження, що виникають на верхній постелі шпали при її навантаженні. Крім того, були визначені із застосуванням метода Шлупфа горизонтальні поперечні сили.

Експериментальні роботи показали, що запропоновані моделі й методи розрахунків є адекватними реальним умовам роботи колії зі скріпленнями ТРЕП. Розбіжності при визначенні горизонтальних поперечних сил знаходяться в межах 8,5 %, при визначенні сил, що діють на шпалу в межах 9,4 %, при визначенні напружень на верхні постелі шпали в межах 9,6 %.

Ключові слова: верхня будова колії незагального користування, проміжні скріплення ТРЕП та ТРЕП–Ш, жорсткість рейкових опор, взаємодія рухомого складу та колії.

ABSTRACT

Bielikov E. A. – Features of work of intermediate fastenings TREP and TREP–Sh in conditions for non–public railways. Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in the specialty 05.22.06 – Rail–way Track (27 – Transport). Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv. 2019.

The dissertation is devoted to the experimental and theoretical study of the stressed–deformed condition of the sub–rail basis with intermediate rail fastenings of the types TREP and TREP–SH taking into account the forces of interaction between the special and specialized rolling stock on the railway track in the conditions of non–public railways.

The content of the dissertation. In the introduction substantiates the relevance of the topic under consideration. The purpose of research, object and tasks of researches are formulated. The methods of researches and scientific novelty of the received results are described.

In the **first section**, an analysis of the technical condition and performance characteristics of non–state railways in Ukraine. Features of the special and special rolling

stock are considered. It is established that the most widespread construction of the upper structure of the track for such railways is the railways track on reinforced concrete sleepers with fastenings of type KB. It was concluded that the construction of the said fastenings in most cases did not correspond to the conditions of exploitation of technological, special and specialized railways tracks of metallurgical enterprises. It is noted that this type of fastener, which was developed more than 50 years ago for main railways, in many cases does not meet the conditions of exploitation of non-public railways. Among such conditions of exploitation trace specify on high axial loads, increased stiffness spring sets rolling stock the presence of a significant number of curves of small radii, large deflect the plan track.

The analysis of existing fastenings undergoing experimental tests on the research sites of main railways showed that the main tendencies in the design of such fastenings are the use of elastic terminals (elastic terminals), the renouncement of threaded joints, the use of modern polymeric and composite materials for absorbers and electrical insulating elements. It has been established that the most promising intermediate fasteners for these conditions of non-public railways are the railways fastening of the types of TREP and TREP-Sh, which are constructive and close together, and their elements are interchangeable. It was concluded that the definition of the features of the use of these fastenings at this stage is possible by the method of studying the forces of interaction between the rolling stock and the railroad or the special and specialized rolling stock, followed by the investigation of the stressed state of elements of the undercutting base when applying the types of TREP and TREP-Sh.

The analysis of the existing theoretical models for defining the vehicle track interaction forces and calculations of a stress state of the track elements demonstrated, that nowadays the most important calculation models and methods, are ones based on the general track design diagram, which considered the track as beams rested on the whole elastic foundation; the author believe that these models do not conform with the structure and operational conditions for non-public railways. The analysis of the existing theoretical models for defining the vehicle track interaction forces and calculations of a stress state of the track elements demonstrated, that nowadays the most important

calculation models and methods, are ones based on the general track design diagram, which considered the track as beams rested on the whole elastic foundation; the author believe that these models do not conform with the structure and operational conditions for non-public railways.

The mathematical model of the spatial vehicle track dynamic system was taken as theoretical and a design track diagram with rails rested on separate supports with non-linear elastic-dissipative characteristics was taken on the base of it.

Therefore, it was concluded that in order to determine the features of the TREP and TREP-SH fastening operation in the conditions of non-public railways, it is expedient to use a complex of mathematical models of the spatial dynamic system "crew-railways track", the bases of which were developed by Professor O.M. Darensky.

But the application of this model required some changes, thus, vrahovuyuchu force into ac-count the force of interaction railways trac vikristannyam kriplen ty types of TRIP and TREP-Sh.

In the **Second Chapter** the mathematical models to form the spatial rigidities of the rail supports with the fastenings TREP and TREP-Sh were developed, and the experimental elastic characteristics were experimentally established.

The laboratory research established the static and dynamic rigidities in the elastic elements of the fastenings which impacted the rail foundation at various stress ranges. The predictive estimate of changes in these parameters under track operation was conducted.

On the base of experimental research conducted on the tracks belonging to metallurgical and mining enterprises in Ukraine, the rigidities of the sleeper ballast system allowing for load ranges, structural peculiarities of the ballast prism and the tonnage along this section were defined.

Thus, the information obtained on the base of the research allowed producing some needed changes in the mathematical model of the dynamic vehicle track system.

Multivariant numerical calculations have investigated the forces of interaction of special and specialized rolling stock, and the railway track in the conditions of non use routes. The mathematical model of the spatial dynamical system "crew-path" has allowed

to take into account additional dynamic forces that are caused by the unevenness of the sub-rail base, the difference between the elastic and dissipative characteristics of the supports and their nonlinearity. In the calculation model, the equations of the spatial stiffness of the rail supports with the intermediate rail fastenings of the types TREP and TREP-SH at vertical and horizontal bends and torsion of the railroad were added.

The model takes into account the elastic-dissipative forces that arise at the point of contact of the wheel and the rail, the additional dynamic forces that are caused by the wheel imbalance, the uneven wear of the rolling surface, the presence of sliders. The model takes into account the width of the wheel pair, the width of the track, the inclination of the rails, the finiteness of the surface of rolling wheels, the presence of vertical and horizontal roughness of the path. The proposed mathematical model is implemented in the modern mathematical modeling system Mathcad.

In the **Third Chapter** the multi-choice calculation was fulfilled to reveal peculiarities of the vehicle track interaction with the fastenings TREP and TREP-Sh or KB. Eight types of rolling stock with axial loads in a range of 200–450 kN were considered so that to cover a wider range of operational conditions. The calculations were made for straight sections and curves with radii from 350 to 600 m. Besides, tracks with vertical and horizontal irregularities were also studied. Thus, calculations for more than 1,500 interaction variants were made.

The vertical and horizontal forces from intermediate fastenings, irregular elastic track, track operational life, combination of irregular layout and profile were analyzed. It was established that while applying the fastening TREP the level of spatial dynamic forces was similar to that on the track with the KB fastenings. And the level of forces decreased by 8–12 % when the fastenings TREP-Sh were applied.

The further research was aimed at defining the mode of deformation of the rail foundation with models designed with finite element methods. Models of rails, elastic clamps, pads, bottom layers, reinforced-concrete sleepers and ballast were developed. The mode of deformation for these elements was calculated; the calculation was based on the interaction forces which demonstrated that the rail foundation with the fastening

TREP was workable for the rolling stock of axle loads up to 300 kN along straight sections and for curves of radii 350 m and more.

The fastenings TREP–Sh are recommended for sections with rolling stock capacity of up to 450 kN.

In the **Fourth Chapter** the adequacy of the proposed models and the methods of calculations were verified by comparing the calculation and experimental data. Experiments were carried out on the section of the non–public railway, consisting of straight and curved sections with a radius of 460 m. According to the study, there is a specially formed train consisting of the locomotive TGM–4, two flat cars 13–401 and two dump trucks BK–85. Wagon cars and dump trucks were loaded with bitstones to carriages. The speed of the train changed from 3 to 33 km/h. During testing, modern microprocessor and digital technologies, as well as a laptop for storing and further processing information were used. During the experiment, the vertical and horizontal forces, which act on the sleepers and the stresses that appear on the top bed of the sleepers, were measured. In addition, horizontal transverse forces were measured using the Schlumpf method. In order to exclude the influence of the strains and vibrations of the ballast and the earthen cloth on the measurements of the movement of the elements of the path, a video–digital system was used that allows measuring the movements of the rails and sleepers with an accuracy of 0.03 mm in real time with an accuracy of 10^{-3} s. Compared the results of calculations and experiments; they showed that the developed models and methods were adequate to the actual operating conditions of the TREP rail. The difference did not exceed 9.6%.

The **Fifth Chapter** the adequacy of the proposed models and the methods of calculations were verified by comparing the calculation and experimental data. Experiments were carried out on the section of the non–public railway, consisting of straight and curved sections with a radius of 460 m. According to the study, there is a specially formed train consisting of the locomotive TGM–4, two flat cars 13–401 and two dump trucks BK–85. Wagon cars and dump trucks were loaded with bitstones to carriages. The speed of the train changed from 3 to 33 km / h. During testing, modern microprocessor and digital technologies, as well as a laptop for storing and further

processing information were used. During the experiment, the vertical and horizontal forces, which act on the sleepers and the stresses that appear on the top bed of the sleepers, were measured. In addition, horizontal transverse forces were measured using the Schlumpf method. In order to exclude the influence of the strains and vibrations of the ballast and the earthen cloth on the measurements of the movement of the elements of the path, a video–digital system was used that allows measuring the movements of the rails and sleepers with an accuracy of 0.03 mm in real time with an accuracy of 10^{-3} s. Compared the results of calculations and experiments; they showed that the developed models and methods were adequate to the actual operating conditions of the TREP rail. Differences in the determination of horizontally transverse forces are within the limits of 8.5%, when determining the forces acting on the sleepers in the boundaries of 9.4%, when determining the stresses on the upper bed sleepers in the boundaries of 9.6%.

Keywords: permanent way of non–public railways, intermediate fastenings TREP and TREP–Sh, rail support rigidity, vehicle/track interaction.

Список публікацій здобувача:

1. Даренський О.М., Беліков Е.А. Аналіз вертикальної просторової жорсткості скріплення типу КППТ–7. *Зб. наук. Праць УкрДУЗТ*. Харків, УкрДУЗТ. 2015. Вип. 155. С. 190 – 195.

2. Даренський О.М., Беліков Е.А. Перспективні конструкції проміжних скріплень для умов промислового залізничного транспорту. *Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, УкрДУЗТ. 2015. Вип. 2. С. 57 – 61.

3. Даренський О.М., Беліков Е.А. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничних колій. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків, УкрДУЗТ. 2015. Вип. 154. С. 149 – 155.

4. Беліков Е.А. Жорсткість скріплень ТРЕП–Ш та ТРЕП при крученні рейки. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків, УкрДУЗТ. 2016. Вип. 162. С. 81 – 86.

5. Даренський О.М., Беліков Е.А. Експериментальне визначення жорсткостей прокладок скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків, УкрДУЗТ. 2017. Вип. 169. С. 150 – 156.

6. Даренський О.М. Беліков Е.А. Жорсткість скріплень ТРЕП під дією горизонтальних поперечних сил. Тези доповідей 80-ї міжнародної науково-технічної конференції 24 — 26 квітня 2018 року *«Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»* УкрДУЗТ. Харків, УкрДУЗТ. 2018. Вип. № 177. – С. 107 – 108.

7. Беліков Е.А. Жорсткість пружних клем скріплень ТРЕП, ТРЕП–Ш. Тези доповідей VI міжнародної науково-технічної конференції: 19–21 квітня 2018 року *«Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті»*. Харків. УкрДУЗТ. 2017. с.187

8. Патент на корисну модель. Україна МПК(2006): G01B 11/14, реєстраційний номер заявки № u2011 14788. *Система для вимірювання переміщень в елементі інженерних конструкцій і споруд під дією навантажень* / Даренський О.М., Астахов В.М., Вітольберг В.Г., Бугаєць Н.В., Беліков Е.А.; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. Заява 13.12.2011; опубліковано 11.06.2012 року, Бюл.№ 11/2012.

9. Патент на корисну модель № 74779 від 12.11.2012 року. Україна, МПК(2012.01): G01D 5/00, E01B 35/00, номер заявки № u201205038. *Пристрій для вимірювання переміщень елементів інженерних конструкцій або споруд під дією навантажень* / Даренський О.М., Астахов В.М., Клименко А.В, Беліков Е.А., Вітольберг В.Г., Бугаєць Н.В. заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. заявл. 23.04.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21, власник УкрДУЗТ.

ЗМІСТ

Анотація	2
Вступ	21
Розділ 1 Аналіз технічних та експлуатаційних умов роботи залізничних колій незагального користування	25
1.1 Норми проектування колій незагального користування	25
1.2 Типи і конструкції верхньої будови колії	27
1.3 Аналіз розвитку теорій розрахунків колії	42
1.4 Перспективні конструкції проміжних скріплень для умов промислового залізничного транспорту	47
1.5 Висновки й завдання досліджень	54
Розділ 2 Просторові жорсткості рейкових опор при залізобетонних шпалах і перспективних проміжних скріпленнях	57
2.1 Жорсткість рейкових опор при застосуванні проміжних скріплень типу ТРЕП, ТРЕП–Ш	57
2.2 Просторова жорсткість проміжних скріплення ТРЕП	58
2.2.1 Вертикальна жорсткість проміжних скріплення ТРЕП	58
2.2.2 Горизонтальна поперечна жорсткість проміжного скріплення ТРЕП	61
2.2.3 Жорсткість скріплення ТРЕП при крученні рейки	63
2.3 Просторова жорсткість проміжного скріплення типу ТРЕП–Ш	65
2.3.1 Вертикальна жорсткість вузла проміжного скріплення ТРЕП–Ш	65
2.3.2 Горизонтальна поперечна жорсткість проміжного скріплення ТРЕП–Ш	67
2.3.3 Жорсткість проміжного скріплення ТРЕП–Ш при крученні рейки	69
2.4 Експериментальне визначення жорсткості проміжних скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш	72

	18
2.4.1 Пружні характеристики пружних прокладок	72
2.5 Жорсткість металевих упорів при бічних переміщеннях рейок	80
2.6 Жорсткість пружних металевих клем	82
2.7 Складові вертикальної та горизонтальної поперечної жорсткостей рейкових опор, яка залежить від переміщень шпал	83
2.8 Просторова жорсткість рейкових проміжних скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш, жорсткість рейкових опор та її зміни під час експлуатації	91
2.9 Висновки за розділом	93
Розділ 3 Чисельні дослідження взаємодії колії й рухомого складу при застосуванні проміжних скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш	94
3.1 Теоретичні основи чисельних досліджень	94
3.1.1 Розрахункова схема підсистеми «екіпаж»	95
3.1.2 Вертикальні силові й кінематичні зв'язки підсистем «екіпаж» і «колія»	99
3.1.3 Силові й кінематичні зв'язки підсистеми «екіпаж і колія» в горизонтальній площині	101
3.1.4 Приведена вертикальна жорсткість рейкової нитки	104
3.1.5 Приведена горизонтальна жорсткість рейкової нитки	108
3.2 Алгоритм і програма розрахунків математичної моделі динамічної системи «екіпаж–колія»	112
3.3 Аналіз розрахунків сил взаємодії колії та рухомого складу при застосуванні проміжного скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш	116
3.4 Висновки за розділом	130
Розділ 4 Чисельні та експериментальні дослідження напруженого стану елементів підрейкової основи при застосуванні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш в умовах залізниць незагального користування	132
4.1 Загальні положення та допущення розрахунків	132

4.2 Моделювання елементів підрейкової основи методом скінченних елементів	134
4.3 Висновки за розділом	148
Розділ 5 Експериментальні дослідження роботи колії при застосуванні проміжних скріплень ТРЕП	149
5.1 Мета та завдання експериментальних досліджень	149
5.2 Визначення зусиль і переміщень елементів колії	149
5.3 Результати експериментальних досліджень роботи залізобетонних шпал ША–Т в умовах колій незагального користування	154
5.4 Висновки за розділом	160
Загальні висновки	162
Список використаних джерел	165
Додаток А. Технічні характеристики екіпажів і колії	186
А.1 Технічні характеристики екіпажів і колії, прийняті в розрахунках	186
А.2 Технічні характеристики екіпажів і колії, прийняті в розрахунках	189
Додаток Б. Результати розрахунків сил взаємодії	190
Б.1 Результати розрахунків сил взаємодії спеціального та спеціалізованого рухомого складу та колії, що має горизонтальні геометричні нерівності плану та профілю (початок 40 м). Епюра – 1840, шпали – залізобетонні, початок перехідної кривої – 15 м, довжина перехідної кривої – 15 м	190
Б.2 Результати розрахунків сил взаємодії рухомого складу й колії, що має горизонтальні геометричні нерівності (початок 40 м). Епюра – 1840, шпали – залізобетонні, початок перехідної кривої – 15 м, довжина перехідної кривої – 15 м	194
Додаток В. Результати розрахунків сил взаємодії	196

В.1 Результати розрахунків сил взаємодії спеціального та спеціалізованого рухомого складу та колій незагального користування	196
В.2 Результати розрахунків сил взаємодії спеціального та спеціалізованого рухомого складу й колії, що має горизонтальні геометричні нерівності плану та профілю (початок 40 м). Епюра –1840, шпали – залізобетонні, початок перехідної кривої – 30 м, довжина перехідної кривої – 50 м	197
Додаток Г. Результати розрахунків сил взаємодії	209
Г.1 Результати розрахунків сил взаємодії спеціального та спеціалізованого рухомого складу та колій незагального користування	209
Г.2 Результати розрахунків сил взаємодії спеціального та спеціалізованого рухомого складу й колії, що має горизонтальні геометричні нерівності плану та профілю (початок 40 м). Епюра – 1840, шпали – залізобетонні, початок перехідної кривої – 30 м, довжина перехідної кривої – 50 м	210
Додаток Д. Акти впровадження та патенти України на корисну модель	227
Додаток Е. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	233

ВСТУП

Актуальність теми. Колії незагального користування є складовою частиною транспортної системи України. Вантажонапруженість колій незагального користування може сягати до 40 млн т брутто/км за рік. Осьові навантаження для деяких типів спеціального та спеціалізованого рухомого складу, який є складовою технологічних процесів виробничих підприємств, можуть перевищувати 450 кН. Протяжність кривих ділянок колій незагального користування у тому числі з радіусами до 350 м складає 60 % від загальної протяжності колій, яка, в свою чергу, становить близько 20 000 км.

Окрім зазначених експлуатаційних особливостей колій незагального користування, має місце інтенсивне накопичування залишкових деформації підрейкової основи, внаслідок високих осьових навантажень та конструкційних особливостей спеціального та спеціалізованого рухомого складу. Особливості плану та профілю колій незагального користування також істотно впливають на рівень горизонтальних поперечних сил. Висока забрудненість баластного матеріалу, використання залізобетонних шпал призводять до збільшення параметрів жорсткості елементів колії в вертикальній та горизонтальній площині та до значного зростання додаткових динамічних сил.

Основною конструкцією верхньої будови колій незагального користування є ланкова колія на залізобетонних шпалах з проміжним рейковим скріпленням типу КБ. Цей тип скріплення має суттєві недоліки: наявність чотирьох різьбових з'єднань у кожному вузлі, значну металоємність, неможливість зміни ширини колії, неспроможність, за своїми конструктивними особливостями, стабільно сприймати горизонтальні поперечні сили.

У зв'язку з вищезазначеним на даний час є актуальним питання дослідження можливості використання інших типів проміжних рейкових скріплень, які б в більшій мірі відповідали особливим умовам експлуатації.

Отже, дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуальної науково-технічної задачі визначення можливості використання проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП-Ш в умовах залізниць незагального користування з

урахуванням сил взаємодії від спеціального та спеціалізованого рухомого складу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках тематики кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту за 2006 – 2017 рр. «Розробка теорії та методів оптимізації несучих конструкцій транспортних споруд» № ДР 0110U002127.

Мета дослідження — експериментально–теоретично дослідити напружено–деформований стан підрейкової основи з проміжними рейковими скріпленнями типів ТРЕП та ТРЕП–Ш з урахуванням сил взаємодії спеціального та спеціалізованого рухомого складу та колії в умовах залізниць незагального користування та надати рекомендації щодо їх використання в цих експлуатаційних умовах.

Об'єкт дослідження – робота підрейкової основи з проміжними рейковими скріпленнями типів ТРЕП та ТРЕП–Ш в умовах колій незагального користування.

Предмет дослідження – напружено–деформований стан підрейкової основи з проміжними рейковими скріпленнями з урахуванням сил взаємодії спеціального та спеціалізованого рухомого складу та залізничної колії в умовах залізниць незагального користування.

Задачі дослідження:

– розробити математичні моделі для визначення просторових жорсткостей елементів проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш;

– виконати експериментальні дослідження жорсткості пружних елементів проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш та порівняти отримані результати з даними жорсткостей елементів проміжного рейкового скріплення типу КБ для однакових умов експлуатації в коліях незагального користування;

– врахувати додаткові динамічні сили, викликані нерівнопружністю підрейкової основи, в математичній моделі просторової динамічної системи «екіпаж–колія» при застосуванні проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш;

– виконати числові дослідження просторових сил взаємодії спеціального та

спеціалізованого рухомого складу та колії при застосуванні проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш для умов залізниць незагального користування;

– розробити рекомендації щодо використання проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш в умовах колій незагального користування.

Методи дослідження – загальноприйняті методи розрахунків залізничної колії в умовах магістральних залізниць та колій незагального користування; метод скінченних елементів для оцінки напружено–деформованого стану підрейкової основи; методи математичної статистики для порівняння та аналізу результатів дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

Вперше визначено (досліджено):

– просторові жорсткості та вплив рівня навантажень на рейкові опори при застосуванні проміжних скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш і залізобетонних шпал під час експлуатації колій незагального користування;

– рівень вертикальних і горизонтальних поперечних сил, які діють на рейкові опори при застосуванні проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш, від спеціального та спеціалізованого рухомого складу залізниць незагального користування з урахуванням швидкостей руху, радіусів кривих, наявності вертикальних і горизонтальних поперечних нерівностей колії;

– напружено–деформований стан підрейкової основи з проміжними рейковими скріпленнями типів ТРЕП та ТРЕП–Ш і залізобетонних шпал в умовах залізниць незагального користування.

Удосконалено комплекс математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж–колія», що враховує напружено–деформований стан підрейкової основи з проміжними рейковими скріпленнями типів ТРЕП та ТРЕП–Ш.

Достовірність положень і висновків дисертації забезпечена співставленням результатів розрахунків та даних, отриманих із власних експериментів та інших досліджень, що відображені у відкритих публікаціях. При моделюванні роботи підрейкової основи з урахуванням її дискретності застосовувалися загальноприйняті теорії і припущення опору матеріалів та будівельної механіки; при оцінці

напружено–деформованого стану підрейкової основи для умов залізниць незагального користування – метод скінченних елементів.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено практичні рекомендації щодо використання проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш в умовах колій незагального користування. Практичне впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджується відповідними актами, які надано в додатках до дисертації.

Особистий внесок здобувача. Огляд та аналіз літератури за тематикою дослідження; підготовка експериментальних зразків та проведення експериментальних досліджень елементів проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш при статичному та динамічному навантаженнях; удосконалення комплексу математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж–колія»; розробка рекомендацій щодо використання проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш в умовах колій незагального користування. Особистий внесок автора у спільні публікації відображений у переліку опублікованих робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися і обговорювалися на науково–технічних конференціях: 77–ій міжнародній науково–технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 21–23 квітня 2015 року); 6–ій міжнародній науково–технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 19–21 квітня 2017 року).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 9 наукових праць, з них 5 статей у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, в тому числі 5 – у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази, 2 публікації апробаційного характеру, 2 патенти на корисну модель.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 234 сторінках і містить 128 сторінок основного тексту, 52 рисунки та 21 таблицю на 36 сторінках, список використаних джерел із 222 найменувань на 21 сторінці, 10 додатків на 49 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВ РОБОТИ КОЛІЙ ЗАЛІЗНИЦЬ НЕЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

1.1 Норми проектування колій залізниць незагального користування

Норми улаштування рейкової колії, норми елементів плану і профілю, характеристики верхньої будови колії повинні відповідати певним вимогам [1–4]. Колії поділяють на зовнішні та внутрішні. Зовнішні колії з комплексом будівель, споруд та пристроїв, призначених для зовнішніх перевезень вантажів підприємств, з'єднують станцію прилягання магістральних ліній із промисловою станцією. Внутрішні колії використовуються для внутрішніх перевезень вантажів підприємств і поділяються на колії промислових залізничних роздільних пунктів та станцій.

Залежно від призначення, розмірів і характеру руху існують три категорії залізничних колій:

I категорія – обсяги перевезень становлять менше 25 млн т брутто/рік, будь-яким порядком організації руху, довжиною від 3 км зі швидкістю руху до 80 км/год;

II категорія – обсяги перевезень становлять від 3 до 25 млн т брутто/рік, протяжність до 3 км з поїзним і організованим маневровим порядком, зі швидкістю руху до 40 км/год;

III категорія – обсяги перевезень становлять до 3 млн т брутто/рік, протяжність до 3 км з маневровим порядком, зі швидкістю руху до 25 км/год.

Позакатегорійними є: внутрішні під'їзні та з'єднувальні колії металургійних та гірничодобувних підприємств чорної металургії (за осьових навантажень від рухомого складу 265–294 кН та при обсягах перевезень понад 10 млн т на рік); колії технологічні (за осьових навантажень 294–450 кН та за обсягів перевезень до 10 млн т на рік); ділянки колій обігу спеціального рухомого складу (з осьовими навантаженнями 450–600 кН).

Швидкості руху приймаються відповідно до категорій:

I – основна – 80 км/год, у складних умовах – 60 км/год, в особливо складних умовах – 40 км/год;

II – відповідно 40, 30 км/год та 25 км/год;

Ш – 25, 15, 10 км/год.

При залізобетонних шпалах ширина колії у прямих та кривих ділянках із радіусами 350 м та більших приймається 1520 мм. При застосуванні дерев'яних шпал у прямих ділянках ширина колії повинна бути 1520 мм, у кривих – залежно від радіуса: 1535 мм – при радіусах більше 150 м, 1545 мм – при радіусах 100–149 м та 1550 мм, якщо радіуси є меншими 99 м.

Криві ділянки під'їзних та з'єднувальних колій проектується відповідно до категорій під'їзних та з'єднувальних колій. Для I категорії найменшим радіус кривих допускається в нормальних умовах 500 м, у складних – 250 м, особливо складних – 180 м. Для II категорії в нормальних умовах – 300 м, у складних – 200 м, в особливо складних – 160 м. Для III категорії в нормальних умовах – 250 м, у складних – 180 м, в особливо складних – 160 м. Для забудованих територій в особливо складних умовах для спеціального рухомого складу допускається приймати найменшим радіус кривих 60 м.

Довжина перехідних кривих приймається залежно від категорії ділянки й радіуса кругової кривої та становить 20–80 м кривих на ділянках I і II категорій та 20–60 м на ділянках III категорії.

Для кривих ділянок колії, за розрахункової швидкості руху поїздів 10 км/год і більше, влаштовується підвищення головки зовнішньої рейки, що визначається розрахунком, але не більше 150 мм.

Колії промислових станцій та окремих парків, маневрових районів повинні розташовуватися на горизонтальних майданчиках у складних умовах на ухилах, не крутіших 1,5 ‰; на прямих ділянках колій зі складними умовами допускається розміщення станцій у кривих ділянках колії з радіусом не менше 500 м, у кар'єрах і відвалах станції проектується у кривих ділянках з радіусом не менше 200 м.

Роз'їзди та обгінні пункти допускається розташовувати на ухилах, не крутіше 12 ‰, якщо не передбачається відчеплення локомотивів; на ухилах, рівних 75 % від керівного ухилу, також роз'їзди та обгінні пункти можуть розташовуватися на кар'єрних коліях. Розмір керівного ухилу не повинен перевищувати 30 ‰; у складних і особливо складних умовах, на з'єднувальних коліях II і III категорій, на коліях

кар'єрів допускається застосовувати керівний ухил 40 ‰; при використанні тягових агрегатів – керівний ухил може становити понад 40 ‰, але не крутіше 60 ‰. Довжина елементів поздовжнього профілю повинна бути не менше половини довжини поїзда, але й не менше 100 м.

1.2 Типи і конструкції верхньої будови колії

Залізниці промислових підприємств мають ряд істотних особливостей: великі осьові навантаження (до 500–600 кН); специфічні умови режиму руху; великий відсоток протяжності колій з кривими малих радіусів (до 80 м); великі ухили профілю (40–60 ‰); високий рівень забруднення баласту. Внаслідок цього експлуатація та утримання колії промислових підприємств у значній мірі відрізняються від експлуатації й утримання магістральних колій загального користування.

На внутрішніх коліях промислових залізниць обертається як рухомий склад, обіг якого дозволено на магістральних залізницях, так і спеціалізовані та спеціальні вагони й тягові агрегати, рух яких, через їх конструкційні особливості, на залізницях загального користування заборонений. Характеристики елементів верхньої будови під'їзних і внутрішніх з'єднувальних та станційних колій промислового транспорту встановлюються залежно від статичного осьового навантаження рухомого складу та річного обсягу перевезень [2] (табл. 1.1). У таблиці 1.1 літерою "С" вказані типи відремонтованих старопридатних рейок із допустимим зносом (згідно з чинними нормативними документами [5] на старопридатних рейках для залізниць колії 1520 мм).

Сфери застосування посиленних або спеціальних конструкцій колії наведено на рис. 1.1 [6].

Нижче розглянуто умови застосування, характеристики та особливості роботи основних елементів верхньої будови колії у специфічних умовах роботи промислового транспорту.

Рейки на під'їзних коліях промислових доріг України використовуються нові та старі типу Р65, II і III груп придатності, довжиною 25 м, 12,5 м. Ланкові колії використовуються у 80–85 % протяжності промислових колій. Застосування безстикової колії через її специфіку обмежено 15–20 %.

Таблиця 1.1

Типи відремонтованих староприсадибних рейок із допустимим зносом

Характеристика елементів верхньої будови колій незагального користування. Параметри елементів верхньої будови колії		Значення параметрів при осьовому навантаженні (кН)								
		до 265			265–294			294–450		
		Обсяг перевезень (млн т бруто / рік)								
		≤ 1	> 1–3	> 3–10	> 10–25	> 25	≤ 3	> 3–10	> 10	≤ 10
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип рейок		Під'їзні та з'єднувальні колії, головні та приймально–відправні колії на роздільних пунктах, у яких здійснюється безупинний рух поїздів								
		P50 (с)	P50 (с)	P65 (с)	P50	P65	P65 (с)	P50	P65	P65
Кількість шпал на 1 км колії		1440	1600	1600	1840	1840	1600	1840	1840	1840
Рівень баласту під дерев'яною шпалою, (см)	одношаровий	25	25	25	30	–	30	30	–	–
	двошаровий	–	–	–	–	25/20	–	–	25/20	25/20
Рівень баласту під залізобетонною шпалою, (см)	одношаровий	30	30	–	–	–	35	–	–	–
	двошаровий	15/20	15/20	20/20	30/20	35/20	20/20	25/20	–	–

продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип рейок	Головні та приймально–відправні колії, на яких не здійснюється безупинний рух поїздів, інші внутрішні колії								
	P50 (с)	P50 (с)	P65 (с)	P50 (с)	P50, P65 (с)	P65 (с)	P65 (с)		
Кількість шпал на 1 км колії	1440	1440	1600	1440	1600	1600	1600	1600	
Рівень баласту під дерев'яною шпалою, (см)	одношаровий	20	20	25	25	25	–	–	
	двошаровий	–	–	–	–	–	20/20	20/20	
Рівень баласту під залізобетонною шпалою, (см)	одношаровий	25	–	–	30	–	–	–	
	двошаровий	15/20	20/20	25/20	20/20	25/20	–	–	

Умови експлуатації призводять до великих контактних напруг, що веде до пластичних деформацій головок рейок на коліях руху зливковізних візків. За навантажень від колісної пари 400–450 кН незагартовані рейки Р65 пропускають 50 – 70 млн т брутто. На ділянках, де осьові навантаження становлять до 500 – 600 кН, укладають термозміцнені рейки Р65 І групи з епюрою шпал до 2000 шт./км – така конструкція відповідає умовам міцності.

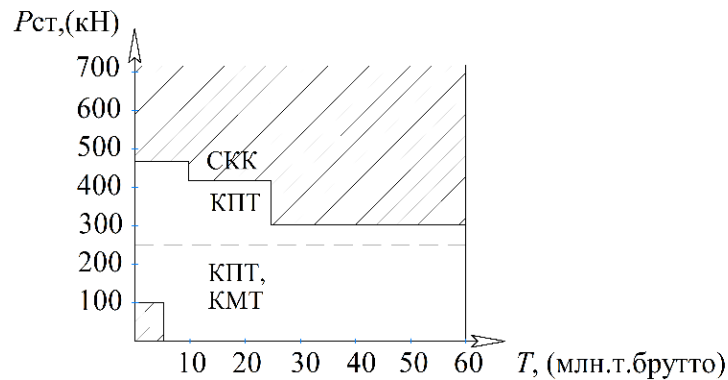


Рис. 1.1 Сфери застосування спеціальних конструкцій колій

СКК–спеціальні конструкції колії; КПТ–колії промислового транспорту;

КМТ–колії магістрального транспорту

За осьових навантажень 1000 кН і більше виконують розрахунок умов міцності за контактними напругами із загальнозгинальними напруженнями в рейках. Для зниження цих напружень у рейках застосовують їх суцільне спирання на пружні прокладки та залізобетонні фундаментні блоки. За навантажень, що перевищують 1200 кН на вісь, застосовуються спеціальні профілі рейок звичайної або легованої сталі. Контррейки на промисловому залізничному транспорті встановлюються у кривих ділянках колії радіусом менше 150 м [7]. Контррейки, як елемент посилення колії у кривих можуть укладатися як в одну (внутрішню) рейкову нитку, так і в обидві. Ширина жолобів між робочими гранями рейок і контррейок визначається розрахунками і повинна бути, як правило, в межах 60–90 мм. Як контррейки використовують звичайні рейки, укладаючи їх в один рівень із колійними рейками або підвищивши на 20 мм. Рейкові стяжки, як елемент посилення колії на дерев'яних шпалах у кривих широко застосовуються на промисловому транспорті при радіусах кривих 350 м і менше [7–10]. За способами кріплення стяжки можуть приєднуватися

до шийок або підошви рейок. Залежно від типу рейок і радіуса кривих кількість рейкових стяжок приймається від 10 до 25 штук на 25–метровій ланці. Рейкові упорки встановлюють для зменшення бічних відстань головок рейок та для забезпечення стабільності ширини колії у кривих радіусами до 400 м. Конструкції упорок є різноманітними – від елементів у вигляді скоб, приварених до підкладок, до використання елементів стрілочних переводів.

Шпали на промислових залізницях використовуються дерев'яні, залізобетонні, металеві; також як шпали використовуються малогабаритні залізобетонні рами (комбінат «Азовсталь»).

Дерев'яні шпали застосовують на коліях усіх категорій, на прямих і кривих ділянках будь–яких радіусів. На коліях III категорії укладають дерев'яні шпали III типу; на станційних коліях, де обертаються потяги з осьовими навантаженнями до 294 кН, застосовують шпали II типу; на головних станційних під'їзних та з'єднувальних коліях II категорії застосовують шпали I типу.

Кількість дерев'яних шпал на коліях різних підприємств коливається в межах від 60 % до 20 % і постійно скорочується. Масовий випуск шпал типу Ш–1–1 промисловістю та порівняно низька вартість дозволяють активно застосовувати шпали цього типу на промислових коліях. Залізобетонні шпали експлуатуються в ланковій колії за довжини рейок 25 м і 12,5 м. На багатьох підприємствах застосовують залізобетонні шпали в ланковій колії на ділянках усіх категорій, у кривих малих радіусів, на значних ухилах, на коліях обертання рухомого складу з високими осьовими навантаженнями. Дослідження [4] допускають такі сфери застосування залізничних шпал залежно від швидкостей руху та осьових навантажень рухомого складу, як наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Таблична залежність швидкості руху рухомого складу від допустимого навантаження

V (км/год)	5	15	25	40	60
P (кН)	410	395	360	310	265

Укладання в коліях металургійних підприємств дослідних партій полегшених залізобетонних шпал типів С–62 і З–64–2, а також шпал для високих осьових

навантажень З-56-2-ПТ і З-72-1 не виявили їх істотних переваг над шпалами типу Ш-1-1.

Застосування металевих шпал на коліях промислового транспорту є обмеженим. Їх можуть застосовувати на ділянках розливу продуктів топлення металу, коліях відвалів гарячих шлаків, пересувних коліях гірничодобувних підприємств. Типових конструкцій металевих шпал не існує.

Баластовий шар, як баласт на коліях промислового транспорту застосовують щебінь, металургійні шлаки, гравій, піщано-гравійну суміш і пісок.

На позакатегорійних коліях I та II категорій, а також ділянках станційних колій використовують щебінь та шлаковий баласт. Гранулометричний склад шлакового баласту повинен відповідати щебеневому.

Гравій, піщано-гравійна суміш і пісок використовуються на малозадіяних під'їзних і станційних коліях, а також застосовуються подушки під щебеновий або шлаковий баласт при двошаровій конструкції баластної призми.

Поперечні профілі баластної призми на зовнішніх під'їзних коліях та частині внутрішніх станційних та з'єднувальних колій є такими самими, як і на магістральних залізницях. Товщина баластного шару встановлюється залежно від величини осьових навантажень та річних обсягів перевезень (табл. 1.2). Беручи до уваги результати досліджень, виконаних ВНДІЗТ [11], було встановлено, що в умовах промислового транспорту товщина баласту за осьових навантажень 300–450 кН повинна становити 80–100 см.

Для колій з осьовими навантаженнями до 1000 кН рекомендується застосовувати конструкції колій з підбаластними і надбаластними плитами через їхню розподільну здатність.

Для колій з осьовими навантаженнями понад 1000 кН застосовують рейкові підстави фундаментного типу у вигляді стрічкових фундаментів.

Окремі шарнірно-з'єднані блоки такі фундаменти виготовляють зі звичайного залізобетону зі зварними каркасами.

Рейкові скріплення на коліях промислових підприємств застосовуються стикові, стандартних типів із двоголовими накладками. Для рейок типу Р65

використовуються чотирьохотворні й шестиотворні накладки, для Р50 – шестиотворні. Для з'єднання рейок різних типів використовують перехідні металеві накладки.

Найпоширеніше проміжне скріплення дерев'яних шпал змішане скріплення типу ДО. Відомі такі недоліки цього скріплення: повна відсутність опору подовжніх переміщень рейок, інтенсивна розробка костильних отворів під дією горизонтальних поперечних сил у кривих ділянках колій.

Ці недоліки проявляються на ділянках із високими осьовими навантаженнями. Для їх усунення необхідно встановлювати до 44 пар протиугонів на 25–метровій ланці й посилювати рейкову колію встановленням упорок і упорів для забезпечення стабільності ширини колії.

Скріплення типу Д–2 і Д–4 застосовуються обмежено на ділянках кар'єрного транспорту з великими поздовжніми ухилами.

Для залізобетонних шпал найбільш придатним типом проміжного скріплення на коліях промислового транспорту є скріплення типу КБ. Відомі такі недоліки цього скріплення: висока матеріаломісткість, велика кількість різьбових з'єднань, багатоелементність, неможливість конструктивно змінювати ширину колії у кривих ділянках.

Але є й переваги: скріплення типу КБ забезпечує стабільність ширини колії на прямих і кривих ділянках колії радіусом 350 м, за якісного складу краще сприймає бічні навантаження, має добрі охоронні властивості.

Скріплення таких типів, як К–2, ЖБ, ЖБР розроблені для умов магістральних залізниць не знайшли застосування на промисловому транспорті.

На коліях промислових підприємств України не існує типів скріплень для металевих шпал. Застосовуються кріплення рейок до цих шпал: використовують пластини й жорсткі клеми, які за допомогою болтів притискають подошву рейки до шпали, клеми із клиновим прикріпленням, підкладки скріплень марки Д2 приварюються до металевої шпали.

Технічними характеристиками, що впливають на сили взаємодії колії й рухомого складу у вертикальній та горизонтальній поперечній площині, є маса

екіпажа (для вагонів – у порожньому й навантаженому стані), маса обресорених і непідресорених елементів візків, схема ресорного підвішування, жорсткості ресорних комплектів у вертикальній та горизонтальній площинах, характеристики погашувачів коливань, радіуси коліс, відстань між осями екіпажа та його жорстка повна база.

Вагони промислового залізничного транспорту поділяються на вагони, що допускаються до виходу на магістральні колії, та вагони, яким такий вихід заборонений через підвищення осьових навантажень, у деяких випадках – збільшення габариту.

Першу групу вагонів складають вагони загального призначення, які використовуються для виконання основного обсягу перевезень вхідного та вихідного вантажопотоків з підприємств. До цього виду рухомого складу належать піввагони, платформи, цистерни та ін. Цей рухомий склад широко використовується і для внутрішньозаводських перевезень. Зараз застосовуються чотири –, шести – й восьмивісні вагони цієї групи, причому в чотиривісних і восьмивісних вагонах застосовуються в основному візки типу ЦНІІ–ХЗ–О. Візки цього типу є найбільш широко уживаними для вантажних вагонів. Деякі технічні характеристики найбільш уживаних на промисловому транспорті вагонів загального призначення наведені в табл. 1.3.

Спеціалізовані вагони [12–13] призначені загалом для перевезення одного або кількох однорідних вантажів. До спеціалізованих відносяться вагони типу хоперів для перевезення гарячого агломерату, залізородних окатишів, вугілля, коксу.

Спеціалізовані вагони, які є в обігу тільки на внутрішньозаводських коліях, можуть мати підвищені осьові навантаження; наприклад, осьові навантаження платформ для перевезення гарячого зливкового чавуну можуть досягати 350 кН.

Велику групу спеціалізованих вагонів складають саморозвантажувальні вагони – думпкари, призначені на магістральному транспорті для перевезення сипучих матеріалів. На відкритих гірських розробках думпкари використовуються для перевезення гірської маси та руди і є найбільш масовим типом рухомого складу залізничного транспорту в кар'єрах і на гірничо–збагачувальних комбінатах.

Вантажопідйомність думпкарів становить від 50 до 180 т.

Спеціалізовані вагони, як правило, є чотиривісними; виняток становлять шестивісні думпкари вантажопідйомністю 90, 100 і 105 т і восьмивісні думпкари типу 2ВС–180 вантажопідйомністю 172 т.

Ходовими частинами чотири і восьмивісних спеціалізованих вагонів є візки ЦНИИ–ХЗ–ПРО і ДВЗ–30 Дніпродзержинського вагонобудівного заводу. Візок виконано за типом візка ЦНИИ–ХЗ–ПРО і відрізняється тим, що в нього посилені колісні пари, бічні рами, надресорна балка й ресорні комплекти для досягнення достатньої міцності при осьових навантаженнях до 295 кН. Фрикційні погашувачі коливань є аналогічними погашувачів візка ЦНИИ–ХЗ–О. Загальна маса візка ДВЗ–30 більше на 865 кг, порівняно з візком ЦНИИ–ХЗ–О.

Спеціальний технологічний рухомий склад призначений для забезпечення транспортного зв'язку в технологічному процесі підприємств [12–18]. На коліях де використання цього рухомого складу відзначається найбільша інтенсивність руху й забезпечується перевезення основних видів вантажів із виконанням великого обсягу маневрової роботи.

Транспортування рідкого чавуну (температура 1400–1500°C) з доменного цеху у сталеплавильний або на розливні машини здійснюється чавуновозами. Існують чавуновози з ківшами відкритого й закритого (міксерного) типу. Перший тип зберігає рівень температури протягом двох годин, другий – протягом 8 годин. Чавуновози з ковшами відкритого типу мають ємність ковша 40, 50, 80, 100 і 140 т. Найбільш застосовувані – 100 і 140 т. Ковші міксерного типу випускаються ємністю 420 т. Осьові навантаження чавуновозів складають від 205 до 560 кН.

Транспортування гарячого шлаку з доменного й маневрового цехів здійснюється шлаковозами з ємністю ковша від 11 до 16,5 м³. Для транспортування гарячих злиwkів сталі у виливницях у прокатні цехи застосовуються зливковісні візки. Цей тип рухомого складу відрізняється великими осьовими навантаженнями 353–455 кН. На металургійних підприємствах застосовується й інший технологічний рухомий склад для перевезення злиwkів чавуну, слябів, мульд та інших вантажів.

В основному, за винятком міксерних чавуновозів, спеціальні вагони

промислового транспорту являють собою чотиривісні екіпажі.

Ходовими частинами спеціального рухомого складу служать як візки ЦНИИ–ХЗ–О, так і спеціалізовані візки для підвищених осьових навантажень ДВЗ–30, ДВЗ–35, візки конструкції Брянського машинобудівного заводу й Уральського заводу транспортного машинобудування. Відмітними характеристиками візків промислового рухомого складу є велика необресорена маса, висока жорсткість ресорних комплектів, короткі жорсткі бази (1,3–1,5 м) і малі діаметри коліс (0,65–0,84 м).

Ще однією відмінною особливістю спеціального рухомого складу промислових підприємств є відсутність гальмівних пристроїв на осях чавуновозів відкритого типу, шлаковозів, візків для виливниць ряду інших екіпажів. Гальмування потяга виконується за рахунок гальмівної системи локомотива й гальмівної системи чотиривісної платформи прикриття, яка завантажується до вагової норми бракованими зливками чавуну або сталі. Така особливість спеціальних вагонів при частих, для умов промислового транспорту, розгонах і уповільненнях потягів викликає значні поздовжні сили. Ці сили у кривих ділянках створюють значний додатковий горизонтальний та поперечний вплив на колію. Основні технічні характеристики спеціалізованих та спеціальних вагонів промислового транспорту наведені в табл. 1.3.

На залізничному транспорті промислових підприємств, при маневровому характері роботи, за малих швидкостей руху, при частому розгоні й уповільненні, при використанні екіпажів без гальмівних пристроїв на осях, основними необхідними параметрами локомотивів є сила тяги під час рушання з місця, розгін та службова маса. Як основні на металургійних підприємствах використовуються маневрові тепловози з гідравлічною й електричною передачею. Зрідка застосовуються тепловози серії ТЕ–3, ПЕ–7, ПЕ–10. На окремих тепловозах, з метою підвищення їх зчіпної маси, виконують добаластування (ТГМ–4). Технічні характеристики використовуваних тепловозів наведені в табл. 1.4. Промислові електровози використовуються загалом на гірничодобувних підприємствах.

Таблиця 1.3

Технічні характеристики вагонів промислових залізниць

Тип вагона	Осьові навантаження, кН	Вантажона–пруженість, т	Кількість вісей, одн	База візка, м	База вагона, м	Діаметр колеса, м
Вагони загального призначення:						
Піввагони	210–212	62–126	4–8	1,85–3,5	10,5–	0,95
Криті вагони	182–215	50–95	4–6	1,85–3,5	10,5–	0,95
Платформи	200–208	62	4	1,85	10,5	0,95
Спеціалізовані вагони:						
Для перевезення агломерату	208–330	57–100	4	1,85	10,5–12	0,95
Для перевезення залізрудних	200–225	65–70	4	1,85	10,5–12	0,95
Для перевезення коксу	220	59	4	1,85	17,5	0,95
Коксогасний вагон	162	13	4	1,85	11,8	0,95
Спеціальні вагони:						
Чавуновози відкритого типу	205–526	50–140	4	1,3–1,85	4,1–5,0	0,84–0,95
Чавуновози закритого (міксерного)	224–560	150–600	16–24	1,3–1,5	16–24	0,84
Шлаковози	215–250	70–100	4	1,3	4,1–4,22	0,84–0,95
Зливковізні візки	355–456	120–230	4–6	1,4–2,6	3,1–3,4	0,65

Таблиця 1.4

Технічні характеристики тепловозів на промисловому транспорті

Серія тепловоза	Осьова формула	Службова вага, т	Навантаження на вісь, кН	Максимальне зусилля тяги, кН	Жорстка база, м	Мінімальний радіус вписування, м
ТГМ-1	0-3-0	46	153	122	3,4	60
ТГМ-3	2-2	68	170	204	2,1	40
ТГМ-4	2-2	80	200	264	2,1	40
ТГМ-6А	2-2	90	225	297	2,1	40
ТГМ-23	0-3-0	44	146	110	3,6	60
ТГК-2	0-2-0	28	140	75	3,2	50
ТЭМ-1	30-30	120	200	260	4,2	80
ТЭМ-2	30-30	120	200	396	4,2	80
ТЭМ-7	20+20- 20+20	180	225	594	4,2	80
ТЭ-3	2(30-30)	2×127	212	280	4,2	125

Для залізничного транспорту великих відкритих гірничих розробок глибиною від 100 до 250 м призначені тягові агрегати постійного струму напругою 3 кВ і однофазного змінного струму напругою 10 кВ, що складаються з чотиривісного електровоза керування і двох чотиривісних електромоторних думпкарів масою 120 т, з вантажопідйомністю до 50 т, (ПЕ-2, ЕЛ-10, ОПЕ-2).

Промислові електровози постійного струму напругою 1,5 кВ (ЕЛ-1, ЕЛ-2, 21-Е-1, 26-Е) і електровози змінного струму напругою 10 кВ (Д-94, Д-100) застосовуються в кар'єрах глибиною до 100 м. У таких кар'єрах також використовуються локомотиви подвійної дії ОПЕ-1А та ОПЕ-1Б, що складаються з електровоза, дизельної секції з тяговими двигунами на осях і електромоторного думпкара вантажопідйомністю 50 т. Усі екіпажі в цьому тяговому агрегаті є чотиривісними. Інші електровози використовують для допоміжних перевезень.

Обстеження фактичних умов експлуатації колії декількох промислових підприємств, яке було проведено у 2007–2012 роках [19], дозволяють дійти певних

висновків та зробити узагальнення.

Криві ділянки колії не перевищують 60 %. Криві ділянки колії радіусом більше 600 м складають 20–30 %, радіусом 300–600 м — 30–45 %, від 300 м та менше 150 м — 30–40 %.

На ухилах розташовано 10–30 % частини ділянок колії до 15 ‰; при цьому до 10 % протяжності складають ухили 10–15 ‰.

Рейки Р65 становлять більше 80 % загальної протяжності колії, включаючи старопридатні I, II і III груп придатності.

Ланкова колія переважно експлуатується з рейками завдовжки 25–12,5 м на залізобетонних шпалах, у тому числі старопридатні складають від 50 до 80 %. Укладаються такі рейки на ділянках практично з будь-якими осьовими навантаженнями, як у прямих, так і у кривих ділянках колії, у тому числі у кривих із радіусами менше 350 м.

Старопридатна решітка укладається в коліях, як правило, без перебирання проміжних скріплень типу КБ. Терміни служби дерев'яних шпал на коліях металургійних заводів становлять, як правило 3–8 років. На 1 км колії припадає в середньому 3,8 переводу.

Баласт колій – щебеневий та шлаковий – досягає 86 %; піщаний баласт, гравійні матеріали застосовуються на станційних, складських ділянках.

Колії влаштовуються як зі звичайною, так зі заглибленою баластною призмою, необхідною за умов планування майданчиків підприємств.

Протяжність колій із заглибленим баластним шаром на різних підприємствах може становити від 40 до 60 %. На окремих ділянках забрудненість баласту може досягати 60 %.

Інтенсивної корозії металу різьбових з'єднань у проміжних і стикових скріпленнях зазнають колії, які знаходяться на ділянках гасіння коксу, розливних машин, охолодження ізложниць, грануляції шлаку, де верхня будова колії постійно перебуває в зоні підвищеної вологості, що в поєднанні із заглибленим баластом і хімічними виносом, призводить до цього.

Залізобетонні шпали експлуатуються, як правило, в конструкції ланкової колії

зі скріпленнями типу КБ з рейками завдовжки 25 м.

Безстиківі пліти застосовуються рідко – не більше 10 % протяжності колії на залізобетонних шпалах.

Вантажообіг – це один з найбільш універсальних показників, що узагальнює силові дії рухомого складу на колію.

Характеристики електровозів, які обертаються на коліях промислового транспорту наведені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Технічні характеристики електровозів промислового транспорту

Серія електровозів	Осьова формула	Службова вага, т	Навантаження на вісь, кН	Максимальні зусилля тяги, кН	Мінімальний радіус вписування, м
ПЭ–2	3(20–20)	360	300	1080	80
ЕЛ–10	3(20–20)	367	300	1190	80
ОПЭ–2	3(20–20)	375	300	1200	80
ЕЛ–1	20+20+20	150	250	495	50
ЕЛ–2	20+20	100	250	330	50
21–Е–1	20+20+20	150	250	495	60
26–Е	20+20+20	180	300	594	60
Д 94	20–20	94	235	310	80
Д 100	20–20	100	250	330	80
ОПЭ–2	3(20–20)	375	300	1200	80
IV–УКП–1	20+20	80	200	264	40

Загальні дані наведені в табл. 1.6. Середній вантажообіг експлуатованих колій промислових підприємств України становить 12–14 млн т/рік. Найбільші значення вантажообігу відповідають коліям обігу спеціального рухомого складу з високими осьовими навантаженнями.

Межі змін осьових навантажень, диференційовані за групами вагонів залежно від їх призначення за даними обстеження, наведені в таблиці 1.7.

Таблиця 1.6

Усереднений річний вантажообіг на промислових підприємствах

Колії обертання вагонів, призначення колій	Річний вантажообіг за підприємствами, (млн т/рік)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Зливковози	12	6	6	12	15	9	10	10
Чавуновози	10	4	4	8	10	7	9	9
Шлаковози	8	3	2	7	6	6	4	8
Агломераційні вагони	–	2	2	4	–	5	6	2
Платформи зі зливковим чавуном	2	3	3	2	1	2	–	3
Вантажо– розвантажувальні	9	10	8	6	9	9	7	8
Шлакових відвалів	2	2	2	4	4	3	4	3

Таблиця 1.7

Значення осьових навантажень від вагонів на верхню будову колії

Призначення вагонів	Осьові навантаження, кН			
	Паспортні дані		Дані обстежень	
	Порожні	Завантажені	Порожні	Завантажені
Вагони загального призначення	52,4–62,8	182,2–212,0	50,4–54,4	195,2–224,0
Спеціалізовані вагони	55,0–90,0	210,0–340,0	57,0–142,9	185,6–350,0
Спеціалізовані вагони	37,4–161,2	187,0–560,0	98,0–280,0	172,0–514,0

Для кар'єрних колій є характерним обертання рухомого складу з осьовими навантаженнями 250–320 кН, зі швидкостями руху до 60 км/год в умовах великої кількості числа кривих ділянок колії й ухилів до 40–60 %.

Загальні результати аналізу технічних і експлуатаційних характеристик колій підприємств наведені в табл. 1.8.

Таблиця 1.8

Експлуатаційні й технічні характеристики кар'єрних колій промислових підприємств

Показники	Залізничні колії	
	пересувні	постійні
Протяжність від загальної протяжності на підприємстві, %	25–30	70–75
Найбільший ухил поздовжнього профілю, ‰	до 15	до 60
Найменші радіуси кривих, м	100	80
Протяжність кривих ділянок колії, %	до 55	30–50
в тому числі радіусом		
– більше 350 м	15–20	15–30
– від 350 м до 100 м	25–35	15–20
Швидкість руху рухомого складу, км/год.	до 10	40–60
Вантажообіг, млн т/рік	до 5	15–20
Число перекладених колій за рік	2–4	–
Протяжність колій з рейками типу Р65, %	55–70	85–90
Протяжність колій на залізобетонних шпалах	–	65–70

Рейки типу Р65 є найбільш застосовними – у більше 80% загальної протяжності колій підприємств використовуються рейки як нові, так і старопридатні, в основному I і II груп придатності.

Залізобетонні шпали Ш–1–1, у тому числі старопридатні, укладаються у прями та криві радіусом 350 м і більше, на ділянках, ухили яких не перевищують 15 ‰. У кривих ділянках колії з радіусами 400 м і менше при застосуванні дерев'яних шпал проводиться посилення рейкової колії розширенням баластної призми, посиленням епюри шпал, установкою контррейок, стягувань і упорок. Слід зазначити, що у 5–8 % думпкарів, які вивозять руду з кар'єрів на збагачувальні фабрики, відмічається перевантаження осей, що досягають 10 %, а в окремих випадках – 12 % від паспортних значень.

1.3 Аналіз розвитку теорій розрахунків колії

Разом із будівництвом перших залізниць у кінці 19-го століття беруть свій початок перші розрахунки впливу колеса рухомого складу на колії й на верхню будову колії для визначення оптимальних експлуатаційних характеристик. У

1835 році відомий інженер–залізничник П.П. Мельников розглядав у своїх розрахунках рейки як розрізну балку на двох непружних опорах. У 1859 році Д.І. Журавський, а потім, у 1868 році Г. Пуанкер, а в 1874 р. Ф. Енрольд перейшли до розрахунків рейки як нерозрізної балки, що лежить на багатьох непружних опорах. У 1888 р. Ф. Циммерман, А.А. Холодецький [20], В.Г. Бобилев, В.В. Григор'єв здійснили перехід до розрахункової схеми рейки як балки, що лежить на багатьох пружних опорах. У 1895 р. С.Н. Смірнов сформулював головні правила вписування екіпажів у криві [21].

На початку 20–го століття цим питанням займалися: у 1896 р. – А.А. Холодецький, у 1903 р. – К.Ю. Цеглинський [22], у 1910 р. – А.Е. Раєвський [23], у 1913 р. – Х. Хейман [24], у 1917 р. – Н.Т. Матюшин [25]; вони продовжили розв'язання практичних задач, пов'язаних із геометрією проходження кривих. У 1906 р. Н.П. Петров [26–30] сформулював теорію взаємодії колії та рухомого складу й виконав розрахунок рейки як балки на пружній основі. У 1899 р. А.Л. Васютинський [31], у 1905 р. С.П. Тимошенко [32–33], у 1915 р. А.М. Годицький–Цвірко [34], ґрунтуючись на досліді й беручи до уваги розрахункову схему колії як балки, що лежить на суцільній пружній основі, суттєво вдосконалили розрахунки сил інерції необресорених мас, дали оцінку впливу вібрації на ці сили. У 1926 р. С.П. Тимошенко [35] розробив найбільш застосовну до сучасних реалій теорію кручення рейки під дією горизонтальних поперечних сил, яку доповнили: в 1930 р. – А.М. Годицький–Цвірко [36]; С.А. Степкін [37]; у 1941 р. – Г.М. Шахунянц [38]; Д.Г. Голованов [39]; у 1938 р. – М.Л.Корольов; у 1950р.–М.І.Кулагін[40]; у 1950 р.–Н.К.Снитко [41].

У другій половині 20–го століття дослідженнями цього питання займалися видатні вчені. У 1949–1958 р. В.І. Ангелейко отримав розв'язок задачі про горизонтальний згин і кручення рейки, застосовуючи також розрахункову схему рейки як балки на пружних опорах з урахуванням характеристик жорсткості проміжних рейкових скріплень. Під час проведення розрахунків по черзі використовувалися схеми однопрогонової, трипрогонової та п'ятипрогонової балок на пружних опорах для послідовного наближення до необхідної точності рішення

[42–45]. У 1951 р. О.П. Єршков, розв'язуючи задачу про згини і кручені рейки стосовно застосування до балки на пружній основі, виконав аналіз можливості спільного або роздільного розгляду деформацій горизонтального згину і кручення [46], а в 1960–1966 роках провів детальні дослідження характеристик просторової теорії пружності рейкових ниток, необхідних для практичного розв'язання задач про згинні та кручені рейки як балки на пружній основі [47].

Дослідник також зробив значний внесок у розробку теорії руху екіпажів у кривих ділянках колії й розробив узагальнений аналітичний метод визначення поперечних сил у кривих та методику визначення бічного впливу на колію різних екіпажів графоаналітичним способом за допомогою так званих графіків–паспортів [48–52]. У 1956–1987 р. ідеї академіка Н.П. Петрова [27–28, 53–55] про необхідність урахування ймовірнісного характеру динамічних навантажень, вперше реалізовані О.П. Єршковим, набули детального і всебічного розвитку у роботах Є.М. Бромбера і Г.М. Шахунянца [56–59]. У 1949–1967 р. М.Ф. Веріго виконав фундаментальне узагальнення й розвинув цей підхід в розрахунках динамічних навантажень [60–63]. У 1954 р. В.А. Лазарян, С.В. Амелін, Н.А. Ковальов, С.М. Куценко, М.П. Смирнов, М.А. Фрішман, М.А. Чернишов, В.Ф. Яковлев зробили великий внесок у розвиток теорії взаємодії колії та рухомого складу. На підставі виконаних ними досліджень були розроблені правила проведення розрахунків колії на міцність, затверджені в 1954 р.

Значний внесок у вирішення питань взаємодії рухомого складу та колії належить науковим школам, які сформували професор Е.І. Даніленко [64–77], професор В.В. Рибкін [78–88], [64,89–96] академік В.А. Лазарян та професор М.А. Фрішман [58–59], [97–100] професор М.Ф. Веріго [101–110], [60–63, 94, 111–122], професор С.П. Першин [123–134], та професор В.Ф. Яковлев [127–130,135–139].

Слід відзначити, що в цих дослідженнях використовувалася загальна розрахункова схема колії у вигляді балки на суцільній пружній основі. Ця схема передбачає постійність пружних дисипативних характеристик підрейкової основи. Однак аналіз, проведений у роботі [140], показав, що така схема для умов промислового транспорту надмірно ідеалізує колію та її технічний стан.

Тому професор О.М. Даренський у своїх роботах [19, 140–153], розробив моделі та методи досліджень сил взаємодії рухомого складу й колії, а також розрахунків напружено–деформованого стану залізничної колії застосуванням просторової розрахункової схеми колії у вигляді балок–рейок, які спираються на пружно–дисипативні опори–шпали з нелінійними характеристиками.

У роботах О.М. Даренського було розроблено концепцію визначення динамічних просторових сил взаємодії спеціального і спеціалізованого рухомого складу й колії при дискретній підрейковій основі з нелінійними пружно–динамічними характеристиками. Удосконалено модель та метод визначення просторових пружно–динамічних характеристик дискретних рейкових опор з урахуванням умов і термінів їх експлуатації залежно від рівня діючих сил. Досліджено закономірності формування й розвитку геометричних нерівностей плану та профілю колії промислових підприємств, які є джерелом вимушених коливань рухомого складу. Обґрунтовано й розроблено комплекс математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж–колія» з урахуванням особливих характеристик спеціального і спеціалізованого рухомого складу на промисловому транспорті. Розроблено функціональні моделі елементів верхньої будови колії – рейок, елементів скріплень, шпал, баласту на основі використання метод скінченних елементів (МСЕ) та узагальнено метод синтезу моделей елементів верхньої будови колії МСЕ на основі формування модульної концепції моделювання. Проведено порівняльну оцінку відомих і запропонованих методів досліджень напружено–деформованого стану елементів колії на основі даних експериментальних досліджень. Запропоновано наукові підходи до визначення критичних станів колії промислових залізниць, при яких можлива відмова у системі «екіпаж–рейкова колія». Встановлено безпечні умови експлуатації колії в таких станах. Надано рекомендації щодо планування попереджувальних і ремонтних робіт для підвищення загальних ресурсів елементів верхньої та нижньої будови колії промислового транспорту.

В.Г. Вітольберг [155–156] розробив математичну модель роботи скріплення КПП–5 під дією поздовжніх сил [148–149]. У цих наукових роботах сформульовано

й вирішено важливу науково–технічну проблему прогнозування ресурсів роботи перспективних та ефективних шпал типу СБ 3–0 в коліях незагального користування. Для визначення об'ємного напруженого стану шпал СБ 3–0 в умовах колій незагального користування розроблені функціональні моделі цих шпал, елементів скріплень КПП–5 та баласту на основі використання методу скінченних елементів. Розроблені моделі дозволили, на відміну від методів найбільш уживаних у практиці інженерних розрахунків, визначити об'ємний напружений стан шпал під дією просторових сил, визначити місця концентрації напружень, умови та особливості взаємного контактування вказаних елементів.

Н.В. Бугаєць [157–161] встановила особливості роботи колії при змінах характеристик рейко–шпальної основи (РШО); розрахунками дослідила вплив конструкції РШО на просторові пружно–дисипативні характеристики рейкових опор колій з урахуванням коливань рівнів навантажень, які на них діють, на підставі удосконаленого теоретичного аналізу та експериментальних досліджень; чисельними дослідженнями та експериментальними методами визначила фактичний рівень навантажень на рейко–шпальну основу при обігу спеціального та спеціалізованого рухомого складу; дослідним методом з'ясувала вплив на напружено–деформований стан конструкції рейко–шпальної основи колії, швидкості руху, радіусів кривих, наявних нерівностей колії, рейкових стиків; за допомогою МСЕ нею було досліджено напружено–деформативні стани рейко–шпальної основи колії; удосконалено визначення впливу на рейко–шпальну основу конструктивних особливостей спеціального і спеціалізованого рухомого складу та конструктивних особливостей колії промислових підприємств. Розрахунками отримано рівень вібраційних дій у рейко–шпальної основи в умовах колій незагального користування. Встановлено вплив осьових навантажень, швидкостей руху, конструктивних особливостей колії на значення віброприскорень у баласті та на основному майданчику земляного полотна. Удосконалено наукові підходи до визначення допустимих напружень у баласті та на основному майданчику земляного полотна, з урахуванням особливостей експлуатації колій незагального користування. Систематизовано раціональні та запропоновано оптимальні з

погляду підвищення несучої здатності, методи підсилення рейко–шпальної основи колії залізниць незагального користування.

А.В. Клименко [162–163] завдяки розв'язанню системи рівнянь у матричному вигляді із застосуванням формули Крамера, запропонував спосіб розрахунку рейки як балки на дискретних пружно–дисипативних опорах у зоні рейкового стику, який дозволяє враховувати зміни жорсткості рейки в цій зоні.

Запропонований спосіб дозволив визначити зміни вертикальних сил взаємодії рухомого складу і колії, які викликають зміни жорсткості рейкової нитки у стиках. Складена математична модель дозволяє розраховувати додаткові ударні динамічні сили, викликані стиковим зазором та можливою сходинкою у стикі. Визначено перелік залежностей жорсткості рейкової нитки в зоні стику від конструктивних та експлуатаційних характеристик колії.

Таким чином, можна вважати обґрунтованим застосування для подальших досліджень загальнорозрахункової схеми колії у вигляді балок на дисипативних опорах з нелінійними пружно–дисипативними характеристиками.

1.4 Перспективні конструкції проміжних скріплень для умов промислового залізничного транспорту

З урахуванням особливостей роботи рейкових колій промислового залізничного транспорту, а також на підставі аналізу елементів і конструкцій верхньої будови колії, які застосовуються в цих умовах, слід зробити висновок, що найбільш проблемними є вузли прикріплення рейок до залізобетонних шпал. Необхідно особливо підкреслити, що на цей час практично єдиним типом проміжних скріплень у таких умовах є скріплення КБ, яке має суттєві недоліки, про що йшлося вище.

Останнім часом на коліях магістральних залізниць проходять дослідно–експериментальну перевірку проміжні скріплення КПП–5, КПП–5М, КПП–5К, СКД–65Б, СКД–65Д, АРС–4, ІМЕТ–1, ТРЕП, ТРЕП–Ш, Pandrol FASTCLIP FE, W–30 (рис. 1.2).



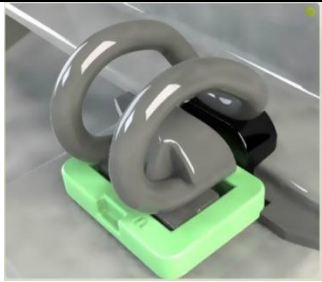
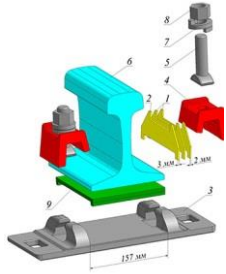
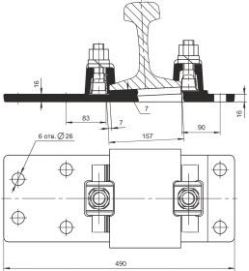

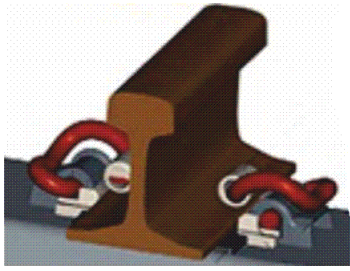




			
Скріплення КПП–5	Скріплення КПП–5М	Скріплення КПП–5К	Скріплення СКД–65Б
			
Скріплення СКД–65Д	Скріплення АРС–4	Скріплення ІМЕТ–1	Скріплення ТРЕП
			
Скріплення ТРЕП–ІІІ	Скріплення PANDROL FASTCLIP FE	Скріплення W–30	

Рис. 1.2. Перспективні конструкції проміжних скріплень.

Скріплення КПП–5 прикріплює рейку до шпали без металевої підкладки. Є основним скріпленням, яке використовувалось протягом останніх 4 років. Має основне призначення для використання на прямих ділянках безстикової залізничної колії та криволінійних ділянках із радіусом від 350 м. Середній ресурс надійності становить 500 млн т брутто пропущеного вантажу; можна укласти в колію з рейками типу Р65, Р50 або подібними європейського типу на залізобетонних шпалах. Скріплення складається з анкера закладного АЗ–2, в який кріпиться клема пружна типу КП–5.2 та забезпечує постійне притиснення рейки до шпали. Між клемою та рейкою встановлюється ізолювальний вкладень ВІП–65.1 (ВІП–65.1–С). Для електричної ізоляції підшви рейки від залізобетонної шпали та зниження динамічних навантажень від рухомого складу встановлюють прокладку підрейкову ПРП–2.1. Система менеджменту якості сертифікована органом сертифікації в системі TUV NORD CERT (Німеччина).

Скріплення КПП–5М призначене для використання на прямих ділянках безстикової залізничної колії та криволінійних ділянках із радіусом від 350 м. Середній ресурс надійності для КПП–5М – 800 млн т брутто пропущеного вантажу. Вкладається в колію з рейками Р65. Скріплення складається з анкера закладного АЗ–2, в який кріпиться клема КП–5.4. Між клемою і рейкою встановлюється ізолювальний вкладень ВІ–М. Для електричної ізоляції підшви рейки від залізобетонної шпали і зниження динамічних навантажень від рухомого складу встановлюють прокладку ПРП–3.2. Система менеджменту якості сертифікована органом сертифікації в системі TÜV NORD CERT (Німеччина).

Скріплення КПП–5–К призначене для регулювання ширини колії у кривих ділянках з уширенням колії до 1535 мм на залізобетонних шпалах. Середній ресурс надійності для КПП–5–К 800 млн т брутто пропущеного вантажу. Вкладається в колію з рейками Р65. Скріплення складається з анкера закладного АЗ–2.К, в який кріпиться клема КП–5.2. Між клемою і рейкою встановлюється ізолювальний вкладень ВІ–К. Для електричної ізоляції підшви рейки від залізобетонної шпали та зниження динамічних навантажень від рухомого складу встановлюють прокладку ПРП–3.2–К. Для регулювання ширини колії встановлюється втулка

ВР–65–К. Система менеджменту якості сертифікована органом сертифікації в системі TÜV NORD CERT (Німеччина).

Скріплення СКД65–Б, а для дерев'яних шпал – СКД65–Д розроблене та запатентоване Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна спільно з Головним управлінням колійного господарства Укрзалізниці. Конструкція проміжного рейкового скріплення для рейок типу Р65 для кривих із радіусами до 350 м отримала назву «тип СКД65», для залізобетонних шпал – «СКД65–Б», а для дерев'яних шпал – «СКД65–Д».

Конструкція скріплення СКД65–Б практично не відрізняється від скріплення КБ65 і призначена для застосування в колії із залізобетонними шпалами Ш–1–1, Ш–6. Конструкція клемного вузла проміжного скріплення з регулювальними картками показана на рис. 1.2. Від скріплення КБ65 відрізняється конструкцією підкладки і наявністю регулювальних карток, які укладаються вертикально між бічними гранями підшви рейки й ребрами підкладки. У кожне проміжне скріплення одночасно укладається набір із трьох карт товщиною 2 мм і 3 мм. Сумарна товщина трьох карт становить 7 мм. Карти виготовляються сталевими. Від руху вздовж рейки карти фіксуються конструктивною клемою. Для цього використовують пази верхньої частини карти. За допомогою використання СКД65–Б можливо виконати такі завдання: по–перше, створити колію із залізобетонними шпалами Ш–1–1 на кривих ділянках радіусом від 450 до 200 м, з шириною колії від 1520 до 1534 мм, в тому числі змінної ширини в зоні перехідної кривої із кроком змінності ширини 1 мм; по–друге, при поточному утриманні за допомогою карток скріплення СКД65–Б можна регулювати ширину колії у кривих ділянках на звуження від 1 до 28 мм при застосуванні шпал Ш–1–1 та від 1 до 14 мм – при застосуванні шпал Ш–6; по–третє, на ділянках колії, де існує звуження колії (наприклад, при застосуванні старопридатних рейок), скріплення СКД65–Б дозволяє регулювати ширину колії на розширення від 1 до 14 мм із кроком розширення 1 мм; таке рішення завдання на металевих мостах із плитами БМП дає можливість регулювання колії у плані методом поперечного переміщення рейок у межах від 1 до 7 мм із кроком регулювання 1 мм; завдяки цьому вказане скріплення

може використовуватися для розрядки кушової гнилої колії з дерев'яними шпалами на кривих ділянках із застосуванням шпал Ш–1–1 і Ш–6.

Рейкове скріплення АРС–4 вкладається в безстикову колію із залізобетонними шпалами ШС–АРС чи шпалами Ш–А05 (з покращеними експлуатаційними характеристиками на поздовжній та поперечній осях колії на зсувне зусилля, посиленням центральної та торцевої частини); його можна укладати у прямих ділянках залізничної колії й кривих із радіусом до 350 м, з шириною рейкової колії 1520 мм (укладені дослідні ділянки у кривих радіусом менш ніж 300 м; виконуються дослідні роботи, що стосуються вивчення характеристик шпал ШС–АРС–К для ділянок колії у кривих із шириною колії 1530 мм, також для перехідних зі змінною шириною колії 1522, 1524, 1526 і 1528 мм); вказане скріплення застосовується на мостах, з можливістю руху як на баласті зі шпалами типу ШС–АРС–М з елементами скріплень охоронних пристроїв, так і на безбаластному мостовому полотні; зі шпалами типу ШС–АРС–Ч — для укладання в човниках охоронних пристроїв та типу ШС–АРС–Ч1 — для укладання в межах човників чи всього мосту з баластним шаром між човниками; в тунелях (розроблено конструкцію віброзахисної колії на лежнях). За кліматичних умов скріплення АРС можна використовувати в регіонах із значними річними амплітудами температури рейок.

Скріплення ІМЕТ–1 має ряд економічних та експлуатаційних переваг: нечисленність та простота складових компонентів; пружність скріплення, що дозволяє знижувати рівень вібрації й шуму; велика експлуатаційна стійкість; висока безпека та надійність; широкі можливості адаптації до наявних конструкцій; фактично повна відсутність потреби в обслуговуванні; відсутність різьбових з'єднань, що піддаються зривам чи корозії; простота використання в ході заміни рейок і розрядження напруги у рейкових коліях; використання на стрілочних переводах; сумісність з усіма типами шпал; зниження трудовитрат під час збірки колійної решітки, економія трудовитрат у грошовому вираженні на 1 км; знижуються трудовитрати при поточному утриманні колії; пружне скріплення відкриває нові можливості у питанні планування й ремонтів колії, оскільки не

вимагає постійного докручування болтів.

Безпідкладкове анкерне скріплення ТРЕП призначене для прикріплення рейок типу Р–65 до залізобетонних шпал у прямих і кривих ділянках безстикової й ланкової колії з вантажонапруженістю 40 млн. т брутто/км на рік.

Зусилля притиснення рейки до шпали (двома клемами) – від 20 кН, робоче 22–26 кН. Вертикальне статичне навантаження до 30 тс. Елементи скріплення виготовлені ЗАТ «Трансроуд Груп» (м. Київ).

Серед переваг скріплення ТРЕП можна відзначити: стабільність ширини колії 1520–1521 мм, зусилля притиснення клем до шпали робоче 22–26 кН, сприйняття високих вертикальних статичних навантажень – до 30 тс, малодетальність і простоту в поточному утриманні.

Результати експлуатаційних випробувань дослідної партії пружинного рейкового скріплення типу ТРЕП в умовах магістральних залізниць можна вважати позитивними.

Планується провести експлуатаційні випробування скріплення на прямих та кривих ділянках радіусом не більше 700 м і вантажонапруженістю близько 40 млн т км брутто/км в рік на плитах безстикової колії зі зрівняльними прогонами.

Підкладкове анкерне скріплення ТРЕП–Ш призначене для прикріплення рейок типу Р–65 до залізобетонних шпал на прямих та кривих ділянках безстикової і ланкової колії з вантажонапруженістю 60 млн т брутто/км за рік і більше. Зусилля притиснення рейки до шпали (двома клемами) – від 20 кН, робоче — 22–26 кН.

Вертикальне статичне навантаження на рейки від вісі рухомого складу – до 300 кН. Елементи скріплення виготовлені ЗАТ «Трансроуд Груп» (м. Київ).

Конструкція скріплення PANDROL FASTCLIP передбачає закріплення рейки безболтовим способом за допомогою анкера і пруткових пружинних клем. Усі компоненти поставляються від заводу–виробника залізобетонних шпал попередньо зібраними на шпалі, що забезпечує значну економію трудових ресурсів, зменшуючи витрати з укладання колії, розрядження напруги та при заміні рейок.

Також виключено небезпеку втрати елементів скріплення під час перевезення та укладання колії. Скріплення дозволяє змінювати типорозмір рейки або ширину

колії, використовуючи бічні ізолятори різної товщини.

При заміні бічного ізолятора клема залишається на шпалі.

Скріплення дозволяє створити номінальні притиснення 10 кН на клеми з допуском $\pm 10\%$. Необхідне зусилля притиснення автоматично досягається, коли клема приводиться до робочого стану. Це виключає необхідність додавання точного моменту затягування, як у скріпленнях із різьбовими з'єднаннями.

Скріплення PANDROL FASTCLIP не має різьбових компонентів, що виключає необхідність застосування мастила і підтяжок, а також виключає можливість замерзання води в отворах шпали.

Скріплення дозволяє змінювати типорозмір рейки або ширину колії, просто використовуючи бічні ізолятори різної товщини. При заміні бокового ізолятора клема залишається на шпалі. Анкер електрично ізолюваний від рейки бічним опорним ізолятором. Клема електрично ізолювана від рейки ізолятором притискної частини.

Конструкція скріплення W-30 (проект фірми «ФОССЛЮ» № 0.4056.b) передбачає закріплення рейок із допомогою двох кутноспрямованих плит, пружних прокладок, шпальних шурупів із прямокутною головкою і пружних клем Skl 30. Скріплення нероздільного типу призначене для кріплення залізничних рейок типу Р65 на залізобетонні шпали. Підшва рейки укладається на рейкову прокладку між кутноспрямованими плитами, які утворюють точне посадочне місце для рейки. Кріплення рейки проводиться за допомогою пружних клем і шпальних шурупів, які закручуються у спеціальні пластмасові дюбелі у шпалі.

Вільні кінці клеми притискають підшву рейки, а центральна петля клеми спирається на кутноспрямовану плиту, перешкоджаючи перекиданню рейки. Електроізоляція однієї рейкової нитки від іншої здійснюється за допомогою полімерного дюбеля, замоноличеного в залізобетонну шпалу, кутноспрямованої плити і рейкової прокладки.

З викладеного вище можна зробити висновок, що для умов промислового залізничного транспорту найбільш прийнятними є проміжні скріплення типу ТРЕП та ТРЕП-Ш, які пройшли перевірку під час експлуатації на магістральних коліях

та мають істотні переваги порівняно з іншими типами скріплень, що розглядалися.

Однак для надання рекомендації щодо їх використання в цих експлуатаційних умовах необхідно провести експериментально-теоретичні дослідити напружено-деформованого стану підрейкової основи з проміжними рейковими скріпленнями типів ТРЕП та ТРЕП-Ш з урахуванням сил взаємодії спеціального та спеціалізованого рухомого складу та колію.

1.5 Висновки й завдання досліджень

Аналіз норм улаштування залізничної колії у промисловому транспорті та її експлуатаційних конструктивних особливостей дозволив отримати принципові висновки в роботі (порівняно з магістральними залізницями), у тому числі й визначити особливості роботи проміжних скріплень для залізобетонних шпал.

1. Залізобетонні шпали на коліях промислового транспорту набули широкого застосування завдяки більш низькій вартості та значно більшим термінам служби в колії порівняно з дерев'яними шпалами. Залізобетонні шпали укладають на ділянках з осьовими навантаженнями понад 295 кН у кривих радіусом менше 350 м та, як правило, ланкових конструкціях колії.

2. На коліях промислового транспорту для залізобетонних шпал застосовується скріплення типу КБ. Цей тип скріплення має суттєві недоліки: перш за все, наявність чотирьох різьбових з'єднань у кожному вузлі шпали, значну металоємність, неможливість зміни ширини колії у кривих та колійних відводах ширини колії за її нормативної зміни. Дослідження експлуатації колій у магістральних залізницях показало, що за невеликих значень вантажонапруженості обґрунтованим є застосування безпідкладових типів проміжних скріплень.

3. Колії незагального користування характеризуються вельми різноманітними експлуатаційними умовами; вантажонапруженість ділянок колій промислового транспорту може змінюватися від 1 млн т брутто/км за рік до 40 млн т брутто/км за рік та мати осьові навантаження від 295 кН до 450 кН та більші. Протяжність кривих ділянок, у тому числі з радіусами до 350 м, може досягати 60 %.

4. Окрім зазначених вище експлуатаційних особливостей, слід звернути увагу

на інтенсивне накопичування залишкової деформації внаслідок високих осьових навантажень, а також конструкційних особливостей спеціального та спеціалізованого рухомого складу. Особливості плану та профілю колії у значній мірі впливають на накопичення бічних сил. Висока забрудненість баластного матеріалу й укладання залізобетонних шпал призводить до збільшення нерівностей колії по вертикальній та горизонтальній площинах та значного зростання додаткових динамічних сил.

5. Застосування в різноманітних умовах експлуатації промислових залізниць тільки скріплень типу КБ, які мають суттєві недоліки, визначені й описані вище, не можна вважати раціональним.

Аналіз даних про досліду експлуатацію перспективних проміжних скріплень для залізобетонних шпал в умовах магістральних залізниць показав, що для умов промислового транспорту перспективними є проміжні скріплення типів ТРЕП та ТРЕП–Ш. Переваги цих типів скріплень для умов промислових залізниць полягають у наступному:

1) Відсутність різьбових сполучень та менша кількість елементів (порівняно зі скріпленнями типу КБ) дозволить суттєво знизити як вартість ремонтів, так і вартість поточного утримання.

2) Ці типи скріплень використовуються при однаковій конструкції залізобетонних шпал, яка відрізняється від шпал типу Ш–1–1 наявністю анкера.

3) Скріплення ТРЕП є безпідкладковим, може застосовуватися на ділянках із меншими осьовими навантаженнями та за невеликих значень вантажонапруженості. Підкладкове скріплення ТРЕП–Ш може застосовуватись у більш складних умовах.

Але визначення особливості роботи проміжних скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш в умовах колій незагального користування потребує спеціальних досліджень.

З урахуванням зазначеного вище до головних завдань дисертаційної роботи були віднесені такі:

1. Теоретичні дослідження формування просторової жорсткості рейкових опор

при застосуванні проміжних скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш. Визначення переліку параметрів жорсткості пружних елементів цих скріплень, які необхідно отримати експериментально.

2. Експериментальні дослідження параметрів жорсткості пружних елементів скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш та їх змін під час експлуатації.

3. Розвиток математичної моделі динамічної системи «екіпаж–рейкова колія» для врахування особливостей роботи колії зі скріпленнями ТРЕП та ТРЕП–Ш.

4. Чисельні дослідження сил взаємодії спеціального і спеціалізованого рухомого складу та колії при застосуванні скріплень ТРЕП, ТРЕП–Ш. Порівняльний аналіз напруженого стану елементів колії (шпал і рейок) при використанні скріплень КБ та ТРЕП, ТРЕП–Ш.

5. Експериментальні роботи, що мають бути проведені з метою перевірки даних теоретичних розрахунків в умовах експлуатації промислових залізниць.

6. Визначення особливості роботи проміжних скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш в умовах колій незагального користування, з погляду напружено–деформованого стану елементів колії.

Матеріали, які викладені в цьому розділі, опубліковані в роботах [215, 216]

РОЗДІЛ 2

ПРОСТОРОВІ ЖОРСТКОСТІ РЕЙКОВИХ ОПОР ПРИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛАХ І ПЕРСПЕКТИВНИХ ПРОМІЖНИХ СКРІПЛЕННЯХ

2.1 Жорсткість рейкових опор при застосуванні проміжних скріплень типу ТРЕП, ТРЕП–Ш

Під жорсткістю звичайно розуміється відношення прикладеного до споруди або конструкції навантаження до пружної деформації. Стосовно окремої рейкової опори залізничної колії її просторова жорсткість визначається як приріст у певному діапазоні навантаження на опору (або зміна в певному діапазоні реакції опору на навантаження від рейкової нитки) до відповідного приросту деформації опори (рис. 2.1):

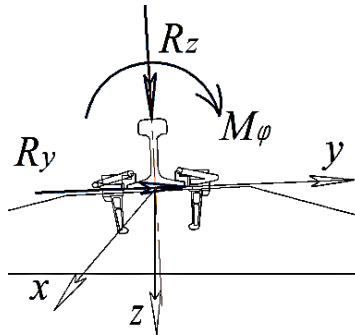


Рис. 2.1. Розрахункова схема для визначення жорсткостей рейкової опори у вертикальному й горизонтальному поперечному напрямках та при крученні рейки

$$\left. \begin{aligned} \text{а) } C_z &= \frac{R_{z2} - R_{z1}}{z_2 - z_1}, \frac{\text{Н}}{\text{м}} \\ \text{б) } C_y &= \frac{R_{y2} - R_{y1}}{y_2 - y_1}, \frac{\text{Н}}{\text{м}} \\ \text{в) } C_\varphi &= \frac{M_{\varphi 2} - M_{\varphi 1}}{\varphi_2 - \varphi_1}, \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}} \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

де а) – вертикальна жорсткість;

б) – горизонтальна поперечна жорсткість;

в) – жорсткість при крученні рейки під дією горизонтальної поперечної сили;

R_{z2}, R_{z1} – значення вертикальних навантажень на опору, (Н);

R_{y2}, R_{y1} – значення горизонтальних поперечних навантажень на опору, (Н);

$M_{\varphi 2}, M_{\varphi 1}$ – значення крутних моментів, які діють на опору, (Н · м);

z_2, z_1, y_2, y_1 – пружні деформації опори у вертикальному, горизонтальному поперечному напрямках за навантажень відповідно R_2 і R_1 , (м);

φ_1, φ_2 – кути повороту рейки на опорі під дією крутних моментів, (рад).

Значення навантажень R_1 і R_2 обирають з умов фактичних навантажень на опору, за яких залежність $z = f(\rho)$, $y = f(\rho)$, $x = f(\rho)$ та $\varphi = f(\rho)$ набуває характеру, близького до лінійного. При використанні як рейкових опор залізобетонних шпал пружні лінійні й кутові переміщення рейки на опорі складаються з переміщень за рахунок деформацій пружних елементів у вузлі проміжного скріплення і пружних переміщень шпал у балласті.

Переходячи до складових просторової жорсткості опори однієї рейкової нитки і з урахуванням характеру її роботи, можна записати:

$$\left. \begin{aligned} \text{а) } C_z &= \frac{C_{zск} \cdot 0,5 \cdot C_{zш}}{C_{zск} + C_{zш}}, \frac{\text{Н}}{\text{м}} \\ \text{б) } C_y &= \frac{C_{yск} \cdot C_{yш}}{C_{yск} + C_{yш}}, \frac{\text{Н}}{\text{м}} \\ \text{в) } C_\varphi &= \frac{C_{\varphiск} \cdot C_{\varphiш}}{C_{\varphiск} + C_{\varphiш}}, \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

де $C_{zск}$, $C_{yск}$, $C_{\varphiск}$, – жорсткості проміжного скріплення у вертикальному і горизонтальному поперечному напрямках і при крученні рейки;

$C_{zш}$, $C_{yш}$, $C_{\varphiш}$ – те саме, системи «шпала–баласт».

Результати детальних досліджень модулів пружності підрейкової основи стосовно конструкції колії на залізобетонних шпалах [164] (модуль пружності шпали $E_{ш}^{вигин} = 3,5 \cdot 10^4$ МПа і коефіцієнт $C_6 = (14 \div 22) \cdot 10^4$ кН/м³) показали, що вплив вигину шпали на формування жорсткості опори при крученні рейки виявив менше 1 %.

З урахуванням цього, можна вважати обґрунтованим припущення:

$$C_\varphi = C_{\varphiскр} \quad (2.3)$$

Розглянемо сили формування просторових жорсткостей скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш.

2.2 Просторова жорсткість проміжних скріплення ТРЕП

2.2.1 Вертикальна жорсткість проміжних скріплення ТРЕП

Під час монтажу вузла скріплення ТРЕП відбувається початкова вертикальна деформація пружинної клеми $z_{кл}^{поч}$ (рис. 2.2), яка може досягати, з урахуванням конструктивних розмірів клем, анкерів, прокладки, вкладиша, що ізолює і розмірів підшви рейки, 6 мм.

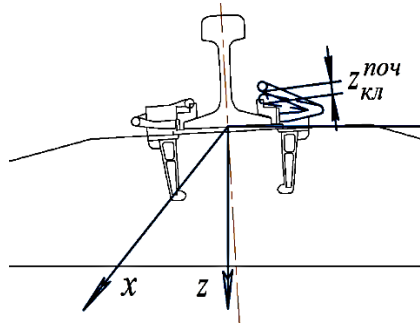


Рис. 2.2. Початкова вертикальна деформація пружинної клеми скріплення ТРЕП

При цьому кожна клема притискає підшву рейки до шпали із силою $Q_{кл}^{поч}$:

$$Q_{кл}^{поч} = z_{кл}^{поч} \cdot J_{кл}, \quad (2.4)$$

де $J_{кл}$ – жорсткість пружинної клеми при вертикальних деформаціях, (кН/м).

Під дією сил клемного натискання $2Q_{кл}^{поч}$ підрейкова прокладка стискається та утворює пружний опір цьому стисканню силою $Q_{пр}$:

$$Q_{пр}^M = u_{ПШТ}^{ст} \cdot z_{пр}^M, \quad (2.5)$$

де $u_{ПШТ}^{ст}$ – жорсткість підрейкової прокладки типу ПШТ при статичному стиску, (кН/м);

$z_{пр}^M$ – деформація стиску прокладки при монтажі, (м).

Силу $Q_{пр}^M$ можна показати (рис. 2.3) у вигляді розподіленого пружного опору стиску з інтенсивністю $q_{пр}^M$:

$$q_{пр}^M = \frac{Q_{пр}^M}{b}, \quad (2.6)$$

де b – ширина підшви рейки, (м).

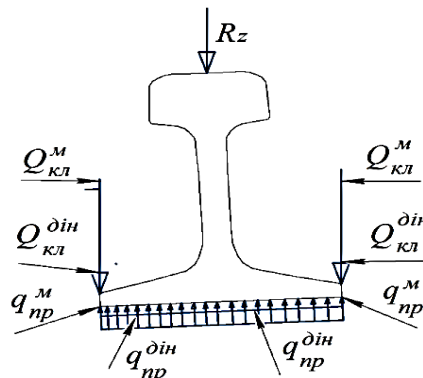


Рис. 2.3. Розрахункова схема для визначення вертикальної жорсткості скріплення ТРЕП

При стисненні підрейкової прокладки на величину $z_{\text{пр}}^{\text{М}}$ відбувається зворотна пружна деформація пружинних клем, у результаті цього зменшується сила клемного натискання. Залишкова монтажна сила клемного натискання буде дорівнювати:

$$Q_{\text{кл}}^{\text{М}} = (z_{\text{кл}}^{\text{поч}} - z_{\text{пр}}^{\text{М}}) \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}} \cdot \quad (2.7)$$

Рівновага сил у вузлі скріплення настане тоді, коли залишкові монтажні сили клемного натискання будуть дорівнювати пружному опору прокладки:

$$2Q_{\text{кл}}^{\text{М}} = Q_{\text{пр}}^{\text{М}} = q_{\text{кл}}^{\text{М}} \cdot \mathbf{V} \quad (2.8)$$

Підставимо до формули (2.6) рівняння (2.7) і (2.8):

$$2(z_{\text{кл}}^{\text{поч}} - z_{\text{пр}}^{\text{М}}) \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}} = z_{\text{пр}}^{\text{М}} \cdot u_{\text{ПІПТ}}^{\text{СТ}} \cdot \quad (2.9)$$

При дії на вузол скріплення вертикальної динамічної сили R_z , умову рівноваги сил (рис. 2.2) можна записати як:

$$R_z = Q_{\text{пр}}^{\text{ДИН}} - 2Q_{\text{кл}}^{\text{ДИН}}, \quad (2.10)$$

де $Q_{\text{пр}}^{\text{ДИН}}$ – сила опору прокладки стиску динамічним навантаженням і натисканню клемами, (кН);

$Q_{\text{кл}}^{\text{ДИН}}$ – сила клемного натискання при дії на вузол скріплення динамічного навантаження R_z , (кН).

Величина $Q_{\text{пр}}^{\text{ДИН}}$ буде дорівнювати:

$$Q_{\text{пр}}^{\text{ДИН}} = z_{\text{пр}}^{\text{М}} \cdot u_{\text{ПІПТ}}^{\text{СТ}} + \Delta z_{\text{пр}}^{\text{ДИН}} \cdot u_{\text{ПІПТ}}^{\text{ДИН}}, \quad (2.11)$$

де $\Delta z_{\text{пр}}^{\text{ДИН}}$ – додатково динамічний стиск прокладки під дією сили R_z , (м);

$u_{\text{ПІПТ}}^{\text{ДИН}}$ – жорсткість підрейкової прокладки при динамічному стисканні, (кН/м).

Сила клемного натискання при дії вертикального динамічного навантаження R_z зменшиться за рахунок зворотної пружної деформації клеми на величину Δz :

$$Q_{\text{кл}}^{\text{ДИН}} = (z_{\text{пр}}^{\text{поч}} - z_{\text{пр}}^{\text{М}}) \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}} - \Delta z \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}} \cdot \quad (2.12)$$

Тоді формулу (2.10) можна подати у вигляді:

$$R_z = \Delta z u_{\text{пр}}^{\text{дин}} + z_{\text{пр}}^{\text{м}} \cdot u_{\text{ППТ}}^{\text{ст}} - 2(z_{\text{кл}}^{\text{поч}} - z_{\text{пр}}^{\text{м}}) \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}} + 2\Delta z \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}}.$$

Замінивши в цій формулі $2(z_{\text{кл}}^{\text{поч}} - z_{\text{пр}}^{\text{м}}) \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}}$ на $z_{\text{пр}}^{\text{м}} \cdot u_{\text{ППТ}}^{\text{ст}}$ з виразу (2.9), отримаємо: $R_z = \Delta(u_{\text{ППТ}}^{\text{дин}} + 2 \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}})$.

Або, переходячи до вертикальної жорсткості вузла скріплення ТРЕП

$$C_{\text{зск}} = \frac{R_z}{\Delta z} \text{ остаточно отримаємо:}$$

$$C_{\text{зск}} = u_{\text{ППТ}}^{\text{дин}} + 2 \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}}. \quad (2.13)$$

2.2.2 Горизонтальна поперечна жорсткість проміжного скріплення ТРЕП

Умову рівноваги сил у вузлі скріплення при дії бічної сили R_y (рис. 2.4) можна записати як:

$$R_y = 2F_{\text{тр}}^{\text{кл}} + Q_{\text{пр}}^{\Gamma} + Q_{\text{вк}}, \quad (2.14)$$

де $F_{\text{тр}}^{\text{кл}}$ – сила тертя ізолювального вкладиша по верхній грані підшви рейки, (кН);

$Q_{\text{пр}}^{\Gamma}$ – пружний опір підрейкової прокладки при зсуві, (кН);

$Q_{\text{вк}}$ – сила опору поперечному переміщенню підшви рейки частини ізолюючого вкладиша між підшвою й анкером, (кН).

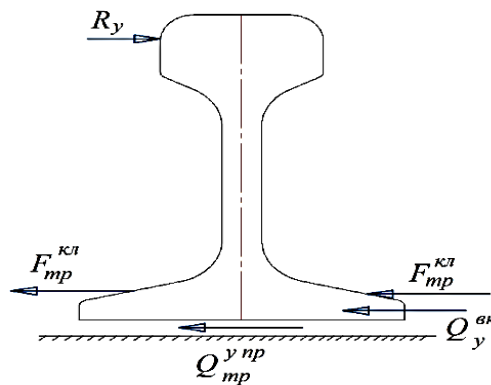


Рис. 2.4. Умова рівноваги горизонтальних поперечних сил у вузлі скріплення ТРЕП

Пружними складовими у формулі (2.12) є сили $Q_{\text{пр}}^{\Gamma}$ й $Q_{\text{вк}}$:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{уп}} &= \Delta y \cdot u_{\text{уп}} \\ Q_{\text{пр}}^{\Gamma} &= \Delta y \cdot u_{\text{ППТ}}^{\Gamma} \end{aligned} \right\}, \quad (2.15)$$

де $u_{\text{уп}}$ – жорсткість упору при бічних переміщеннях рейки, (кН/м);

$u_{\text{ПШТ}}^{\Gamma}$ – жорсткість підрейкової прокладки при зсуві, (кН/м).

Під упорами розуміють частину ізолювального вкладиша, яка контактує з анкером шпали.

Силу тертя $F_{\text{тр}}^{\text{кл}}$ можна визначити:

$$F_{\text{тр}}^{\text{кл}} = f_{\text{вк}} \cdot Q_{\text{кл}}^{\text{дин}}, \quad (2.16)$$

де $f_{\text{вк}}$ – коефіцієнт тертя вкладиша по підшві рейки (поліамід – сталь);

$Q_{\text{кл}}^{\text{дин}}$ – сила клемного натискання при дії на вузол скріплення вертикальної сили R_z , (кН).

Цю величину можна подати використовуючи вираз (2.12) у вигляді:

$$Q_{\text{кл}}^{\text{дин}} = Q_{\text{кл}}^{\text{м}} - \Delta z \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}},$$

де Δz – пружні динамічні вертикальні деформації у вузлі скріплення, (м).

Або інакше, виражаючи Δz через вертикальну силу R_z та вертикальну жорсткість скріплення (формули (2.14, 2.15)):

$$Q_{\text{кл}}^{\text{дин}} = Q_{\text{кл}}^{\text{м}} - \frac{R_z \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}}}{u_{\text{ПШТ}}^{\text{дин}} + 2\mathcal{J}_{\text{кл}}}, \quad (2.17)$$

де $Q_{\text{кл}}^{\text{м}}$ – сила монтажного натискання клеми, (кН).

Жорсткість поліуретанової підрейкової прокладки при зсуві бічними силами залежить від коефіцієнта форми [165], отже, від ступеня її стискання вертикальними силами. Ця залежність нелінійна й визначена експериментально у вигляді:

$$u_{\text{ПШТ}}^{\Gamma z} = f(\Delta h),$$

де Δh – зміна товщини прокладки, (м).

З урахуванням прийнятих раніше позначень $\Delta h = \Delta z$ виражаючи величину Δh через вертикальну силу, що діє на вузол скріплення R_z й параметри вертикальної жорсткості (рівняння 2.13), можна отримати напівемпіричне рівняння, що враховує вплив вертикальної сили на жорсткість підрейкової прокладки при зсуві:

$$u_{\text{ПШТ}}^{\Gamma z} = f_1 \left(\frac{R_z}{u_{\text{ПШТ}}^{\text{дин}} + 2\mathcal{J}_{\text{кл}}} \right). \quad (2.18)$$

Тут усі позначення подано відповідно до попередніх формул.

Таким чином, умови прояву та рівняння формування горизонтальної поперечної жорсткості вузла скріплення ТРЕП будуть мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} & \text{– при } R_y < f_{GK} \left(Q_{\text{кл}}^M - \frac{R_z \cdot \text{Ж}_{\text{кл}}}{u_{\text{ППТ}}^{\text{дин}} + 2\text{Ж}_{\text{кл}}} \right) \\ & C_{\text{уск}} = \infty \\ & \text{– при } R_y \geq f_{GK} \left(Q_{\text{кл}}^M - \frac{R_z \cdot \text{Ж}_{\text{кл}}}{u_{\text{ППТ}}^{\text{дин}} + 2\text{Ж}_{\text{кл}}} \right) \\ & C_{\text{уск}} = u_{\text{уп}} + u_{\text{ППТ}}^{\Gamma} \\ & \text{– де } u_{\text{ППТ}}^{\Gamma} = f_1 \left(\frac{R_y}{u_{\text{ППТ}}^{\text{дин}} + 2\text{Ж}_{\text{кл}}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

2.2.3 Жорсткість скріплення ТРЕП при крученні рейки

При дії на вузол скріплення крутного моменту $M_{\text{кр}}$ переріз рейки повернеться на кут $\Delta\varphi$ величину якого, через малість, можна отримати таким чином (рис. 2.5)

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta z_1 + \Delta z_2}{b}, \quad (2.20)$$

де Δz_1 й Δz_2 – додаткові переміщення крамок підшви рейки при повороті перерізу, (м);

b – ширина підшви рейки, (м).

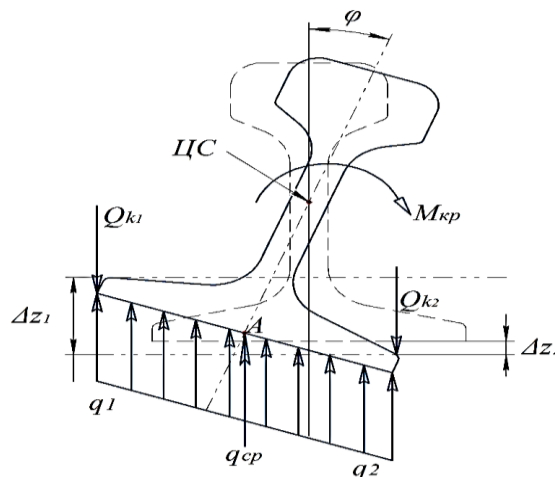


Рис. 2.5. Розрахункова схема для визначення жорсткості скріплення ТРЕП при крученні рейки

Жорсткість вузла скріплення при крученні:

$$C_{\varphi} = \frac{M_{\text{кр}}}{\Delta\varphi}, \text{ (кН/рад).}$$

Умови рівноваги моменту $M_{кр}$, моментів сил клемного натискання і моменту нерівномірно розподіленого опору підрейкової прокладки стиску щодо центру повороту перерізу рейки (ЦП) набувають вигляду:

$$M_{кр} + Q_{к2} \cdot \frac{b}{2} - \frac{q_2 - q_{ср}}{2} \cdot \frac{b^2}{8} + \frac{q_{ср} - q_1}{2} \cdot \frac{b^2}{8} - Q_{к1} \cdot \frac{b}{2} = 0$$

Після перетворень отримаємо:

$$M_{кр} = (Q_{к2} - Q_{к1}) \cdot \frac{b}{2} + (q_2 - q_1) \cdot \frac{b^2}{8}, \quad (2.21)$$

де $Q_{к2}$ й $Q_{к1}$ – сили натискання клем при повороті рейки, (кН);

q_1 і q_2 – інтенсивності по кромках підшви нерівномірно розподіленого опору підрейкової прокладки при її нерівномірному стиску, (кН/м).

Сили натискання клем при повороті рейки:

$$Q_{к1} = Q_{кл}^M - \Delta Q_{к1} = Q_{кл}^M - ж_{кл} \cdot \Delta z_1;$$

$$Q_{к2} = Q_{кл}^M - \Delta Q_{к2} = Q_{кл}^M - ж_{кл} \cdot \Delta z_2.$$

Тоді

$$Q_{к2} - Q_{к1} = ж_{кл} (\Delta z_1 + \Delta z_2).$$

Аналогічно можна отримати:

$$q_2 - q_1 = \frac{u_{ПТТ}^{дін}}{B} \cdot (\Delta z_1 + \Delta z_2).$$

Тоді рівняння (2.21) набуває вигляду:

$$M_{кр} = ж_{кл} (\Delta z_1 + \Delta z_2) \cdot \frac{b}{2} + u_{ПТТ}^{дін} \cdot \frac{(\Delta z_1 + \Delta z_2)}{b} \cdot \frac{b^2}{16}$$

Підставляючи значення $\Delta \varphi$ з рівняння (2.20), отримаємо:

$$M_{кр} = ж_{кл} \cdot \frac{b^2}{2} + u_{ПТТ}^{дін} \cdot \Delta \varphi \cdot \frac{b^2}{16}$$

Переходячи до жорсткості скріплення при крученні:

$$C_\varphi = ж_{кл} \cdot \frac{b^2}{2} + u_{ПТТ}^{дін} \cdot \frac{b^2}{16}, \quad (\text{кН/рад}). \quad (2.22)$$

Таким чином, просторова жорсткість скріплення ТРЕП визначається жорсткістю пружних клем $ж_{кл}$, жорсткістю підрейкових прокладок при стиску за

статичного $u_{\text{ПТТ}}^{\text{ст}}$ та динамічного $u_{\text{ПТТ}}^{\text{дин}}$ навантаження, жорсткістю ізолювального вкладиша при зсуві рейки $u_{\text{ВП}}$ та жорсткістю підрейкової прокладки при зсуві $u_{\text{ПТТ}}^{\Gamma}$.

2.3 Просторова жорсткість проміжного скріплення типу ТРЕП–Ш

2.3.1 Вертикальна жорсткість вузла проміжного скріплення ТРЕП–Ш

Вертикальні деформації у скріпленні ТРЕП–Ш під дією вертикальних сил можна показати як:

$$z = z_1 + z_2, \quad (2.23)$$

де z_1 – вертикальні деформації за рахунок системи «підрейкова прокладка–пружна клема» (перша система), (м);

z_2 – вертикальні деформації за рахунок системи «нашпальна прокладка–клема пружна» (друга система), (м).

Або, виражаючи деформації через вертикальну реакцію скріплення на дію зовнішнього навантаження R_z і відповідні жорсткості, одержимо:

$$\frac{R_z}{C_z} = \frac{R_z}{C_{z1}} + \frac{R_z}{C_{z2}}. \quad (2.24)$$

Тоді вертикальна жорсткість вузла скріплення:

$$C_{\text{уск}} = \frac{C_{z1} \cdot C_{z2}}{C_{z1} + C_{z2}}, \quad (\text{кН/м}), \quad (2.25)$$

де C_{z1} та C_{z2} – вертикальна жорсткість першої та другої систем, (кН/м).

Розглянемо умови рівноваги сил у першій системі при дії сили R_z (рис. 2.6):

$$R_z - q_p \cdot b + 2 \cdot \frac{Q_k}{2} = 0, \quad (2.26)$$

де q_p – розподілена реакція підрейкової прокладки на стиснення, (кН/м);

b – ширина подошви рейки, (м);

Q_k – сила натиснення однієї клеми на подошву рейки, (кН).

$$\Delta Q_k = j_{\text{кл}} \cdot z_{1\text{кл}}, \quad (2.27)$$

де $j_{\text{кл}}$ – жорсткість пружинної клеми, (кН/м).

Розподілена реакція підрейкової прокладки при її стисненні клемами й зовнішнім навантаженням дорівнює:

$$q_p = q_p^{\text{поч}} + q_p^{\text{дин}}, \quad (\text{кН/м}), \quad (2.28)$$

де $q_p^{\text{поч}}$ – розподілена реакція на початкове пружно–клемне натиснення під час монтажу вузла скріплення, (кН/м);

$q_p^{\text{дин}}$ – розподілена реакція на дію динамічної сили, (кН/м).

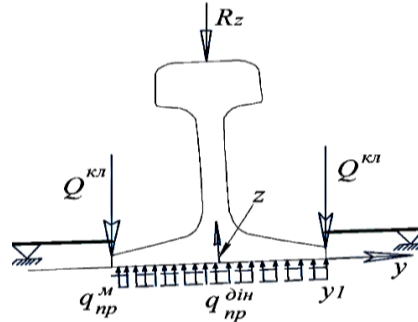


Рис. 2.6. Розрахункова схема для визначення вертикальної жорсткості системи «підрейкова прокладка–пружна клемна»

Тоді:

$$\left. \begin{aligned} q_p^{\text{поч}} &= \frac{Q_{\text{кл1}}^{\text{поч}}}{B} \\ q_p^{\text{дин}} &= \frac{z_1 \cdot u_{\text{ПШТ}}^{\text{дин}}}{B} \end{aligned} \right\}, \quad (2.29)$$

де $u_{\text{ПШТ}}^{\text{дин}}$ – динамічна жорсткість підрейкової прокладки при стисненні, (кН/м).

Підставляючи вирази (2.27) і (2.26) у формулу (2.29), одержимо:

$$R_z - B \left(\frac{Q_{\text{к}}^{\text{нач}}}{B} + \frac{z_1 u_{\text{р}}^{\text{дин}}}{B} \right) + (Q_{\text{к}}^{\text{поч}} - 2 \cdot \mathcal{J}_{\text{ш}} \cdot z_1) = 0, \quad (2.30)$$

або, після перетворень:

$$R_z = z_1 u_{\text{ПШТ}}^{\text{дин}} + 2 \cdot z_1 \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}}, \quad (2.31)$$

Переходячи до жорсткості першої системи:

$$C_{z1} = u_{\text{ПШТ}}^{\text{дин}} + 2 \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}}. \quad (2.32)$$

Вертикальну жорсткість другої системи можна одержати аналогічно, з урахуванням характеру роботи пружинних клем (рис. 2.7):

$$C_{z2} = u_{\text{ПШТ}}^{\text{дин}} + 2 \cdot \mathcal{J}_{\text{кл}}, \quad (2.33)$$

де $u_{\text{ПШТ}}^{\text{дин}}$ – динамічна жорсткість нащпальної прокладки при стисненні, (кН/м).

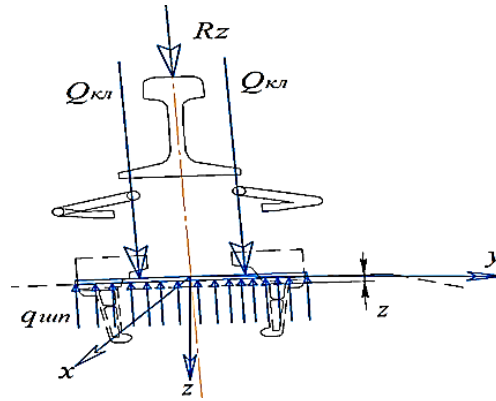


Рис. 2.7. Розрахункова схема для визначення вертикальної жорсткості системи «нашпальна прокладка–пружні клеми»

2.3.2 Горизонтальна поперечна жорсткість проміжного скріплення ТРЕП–Ш

Горизонтальна поперечна жорсткість вузла скріплення $C_{\text{уск}}$, як і вертикальна, може бути визначена з урахуванням послідовного з'єднання жорсткостей першої та другої систем (рис. 2.8):

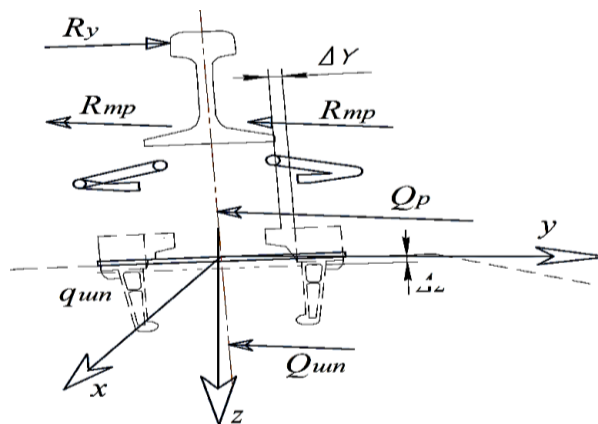


Рис. 2.8. Розрахункова схема для визначення горизонтальної жорсткості скріплення ТРЕП–Ш

$$C_{\text{уск}} = \frac{C_{y1} \cdot C_{y2}}{C_{y1} + C_{y2}}, \quad (2.34)$$

Розглянемо формування жорсткості першої системи (рис. 2.3). Умови рівноваги сил, які діють у першій системі:

$$R_z = 2 \cdot F_{\text{тр}} + Q_p^\Gamma + Q_{\text{вн}}^\Gamma, \quad (2.35)$$

де $F_{\text{тр}}$ – сила тертя на контакті підшви рейки і клемної пружини, (кН);

Q_p^Γ – пружний опір підрейкової прокладки при зсуві, (кН);

$Q_{\text{вн}}^\Gamma$ – пружний опір вкладки при зсуві рейки шпали, (кН).

Силу тертя $F_{\text{тр}}$ можна визначити з виразу:

$$F_{\text{тр}} = \left(Q_{\text{к}}^{\text{нач}} - \frac{1}{2} R_z \frac{Ж_{\text{кл}}}{u_{\text{ПНТ}}^{\text{дин}} + 2 \cdot Ж_{\text{кл}}} \right) \cdot f_{\text{кл}}, \quad (2.36)$$

де $f_{\text{кл}}$ – коефіцієнт тертя клемної пружини по підшві рейки.

Решту позначень у формулі (2.36) взято з попередніх формул.

Горизонтальне поперечне переміщення рейки за рахунок першої системи є можливим в межах зазору між бічними гранями підшви рейки й ребордами підкладки. Величина зазору – 1 мм.

Таким чином, для першої системи можна записати:

$$\left. \begin{array}{l} \text{– при } R_y < \left(Q_{\text{к}}^{\text{поч}} - R_z \cdot \frac{Ж_{\text{кл}}}{u_{\text{ПНТ}}^{\text{дин}} + 2 \cdot Ж_{\text{кл}}} \right) \cdot f_{\text{кл}} \\ C_z = \infty; y_1 \\ \text{– при } R_y = \left(Q_{\text{к}}^{\text{поч}} - R_y \cdot \frac{Ж_{\text{кл}}}{u_{\text{ПНТ}}^{\text{дин}} + 2 \cdot Ж_{\text{кл}}} \right) \cdot f_{\text{кл}} \\ C_{y1} = u_{\text{ПНТ}}^{\text{Гz}} + u_{\text{УП}}; z_1 = 0 \div 1 \text{ мм} \end{array} \right\} \quad (2.37)$$

Усі позначення у формулах (2.37) взято з формул, поданих раніше.

Горизонтальна жорсткість другої системи, з урахуванням паралельної роботи пружних елементів, буде дорівнювати:

$$C_{z2} = u_{\text{ПНТ}}^{\text{Г}} + u_{\text{УП}}, \quad (2.38)$$

де $u_{\text{ПНТ}}^{\text{Г}}$ – горизонтальна поперечна жорсткість нащпальної прокладки при зсуві, (кН/м);

$u_{\text{УП}}$ – жорсткість упору при зсуві підкладки, (кН/м).

Тут мається на увазі жорсткість частини вкладиша, яка контактує з анкером, та частини нащпальної прокладки, яка забезпечує електроізоляцію підкладки від анкера.

Горизонтальна динамічна жорсткість нащпальної прокладки при поперечному зсуві залежить, як і підрейкової прокладки, від величини її стиснення. З урахуванням характеру роботи пружних клем і використовуючи викладені вище міркування, величину $u_{\text{ПНТ}}^{\text{Г}}$ можна визначити як функцію її стиснення монтажними і вертикальними динамічними силами:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{ПНТ}}^{\Gamma} &= f(\Delta z) \\ u_{\text{ПНТ}}^{\Gamma z} &= f\left(\frac{2 \cdot Q_{\text{кп}}^{\text{поч}}}{u_{\text{ПНТ}}^{\text{ст}}} + \frac{R_y}{u_{\text{ПНТ}}^{\text{дин}} + 2 \cdot \mathcal{J}_{\text{кп}}}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (2.39)$$

де $u_{\text{ПНТ}}^{\Gamma}$, $u_{\text{ПНТ}}^{\text{дин}}$ – жорсткість нащпальної прокладки при стисненні за статичного й динамічного завантаження, (кН/м);

2.3.3 Жорсткість проміжного скріплення ТРЕП–Ш при крученні рейки

Жорсткість вузла скріплення при крученні рейки під дією горизонтальних поперечних сил і під дією вертикальних сил, з урахуванням послідовного з'єднання жорсткостей першої і другої системи, дорівнює:

$$C_{\phi} = \frac{C_{\phi 1} \cdot C_{\phi 2}}{C_{\phi 1} + C_{\phi 2}}, \quad (2.40)$$

Розглянемо вплив сумарного крутного моменту $M_{\text{кр}}$ на першу систему (рис. 2.9). Умову рівноваги зовнішнього крутного моменту $M_{\text{кр}}$, моментів сил клемного натиснення й моменту нерівномірно розподіленої реакції підрейкової прокладки відносно центру повороту перерізу рейки (ЦП) можна записати як:

$$M_{\text{кр}} + Q_{\text{к2}} \cdot \frac{B}{2} (q_2 + q_{\text{ср}}) \cdot \frac{B^2}{16} + (q_{\text{ср}} + q_1) \frac{B^2}{16} - Q_{\text{к1}} \cdot \frac{B}{2} = 0. \quad (2.41)$$

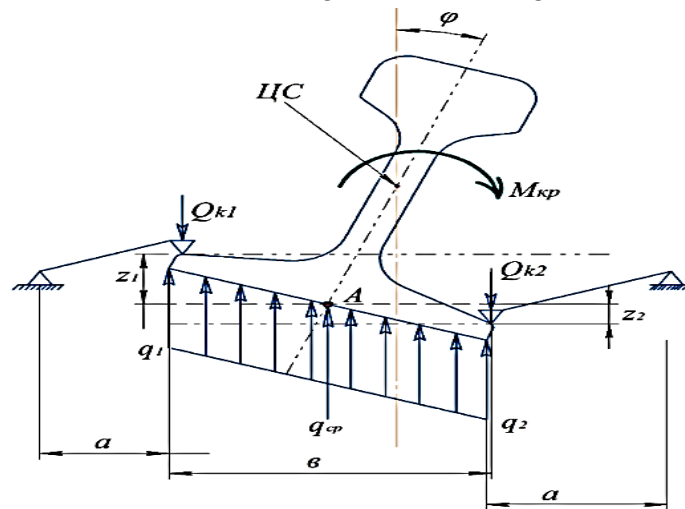


Рис. 2.9. Розрахункова схема для визначення жорсткості при крученні системи «підрейкова прокладка–пружна клема»

Після перетворень одержимо:

$$M_{\text{кр}} = Q_{\text{к1}} - Q_{\text{к2}} \cdot \frac{B}{2} + (q_2 - q_1) \frac{B^2}{16}, \quad (2.42)$$

де $Q_{к1}$ і $Q_{к2}$ – сила натиснення пружних клем, (кН);

q_1 і q_2 – інтенсивності нерівномірно розподіленої реакції підрейкової прокладки при її стисненні пружними клемами й зовнішнім крутним моментом $R_z = 2,57 \cdot 10^5 \cdot z^{1,241}$, (кН/м).

Сили натиснення клем на підшви рейки за сумісної дії на вузол скріплення вертикальних сил і крутних моментів будуть дорівнювати:

$$\begin{aligned} Q_{к1} &= Q_{к}^{\text{поч}} - \Delta Q_{к} + \Delta Q_{кp1} \\ Q_{к2} &= Q_{к}^{\text{поч}} - \Delta Q_{к} + \Delta Q_{кp2} \end{aligned} \quad (2.43)$$

де $Q_{к}^{\text{поч}}$ – монтажна сила натиснення пружних клем, (кН);

$\Delta Q_{к}$ – зміна сили клемного натиснення при дії вертикальної сили на скріплення, (кН);

$\Delta Q_{кp1}$, $\Delta Q_{кp2}$ – зміна сил клемного натиснення при крученні рейки, (кН).

Позначимо зміну прогинань кромки підшви рейки при її крученні через Δz_1 і Δz_2 (рис. 2.9). Тоді величини $\Delta Q_{кp1}$ та $\Delta Q_{кp2}$, з урахуванням характеру роботи, дорівнюватимуть:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{кp1} &= z_{y1} \cdot \mathcal{J}_{кл} \\ \Delta Q_{кp2} &= z_{y2} \cdot \mathcal{J}_{кл} \end{aligned} \quad (2.44)$$

де $\mathcal{J}_{кл}$ – жорсткість пружної клеми, (кН/м).

Різницю величин $Q_{к1} - Q_{к2}$ у формулі (2.42) можна записати як:

$$Q_{к1} - Q_{к2} = \mathcal{J}_{ш} (\Delta z_1 + \Delta z_2). \quad (2.45)$$

Застосовуючи той самий підхід до значень q_1 і q_2 , отримаємо:

$$q_1 - q_2 = u_{\text{ППТ}}^{\text{дин}} \cdot \left(\frac{\Delta z_1 + \Delta z_2}{b} \right). \quad (2.46)$$

Підставимо вирази (2.45) і (2.46) до формули (2.42):

$$M_{кр} = C_{\varphi 1} \cdot \varphi_1 \quad (2.47)$$

Замінюючи в цьому виразі:

$$\varphi_1 = \frac{\Delta z_1 + \Delta z_2}{b} \quad (2.48)$$

і, враховуючи малість кута, отримаємо значення жорсткості першої системи

при крученні рейки залежно від характеристик пружних елементів:

$$C_{\varphi 1} = \frac{b^2}{4} \cdot \left(J_{ш} + \frac{u_{ППТ}^{дин}}{4} \right), \text{ (кН/рад)}, \quad (2.49)$$

де b – ширина підшви рейки, (м).

Аналогічно розглядаючи жорсткість другої системи при крученні, можна одержати вираз (рис. 2.10):

$$C_{\varphi 2} = \frac{b^2}{4} \cdot J_{кл} + \frac{d^2}{4} u_{ППТ}^{дин}, \text{ (кН/рад)}, \quad (2.50)$$

де d – довжина підкладки скріплення, (м);

$u_{ППТ}^{дин}$ – жорсткість нашпальної прокладки при стисненні динамічним навантаженням, (кН/м); решту позначень взято з попередніх формул.

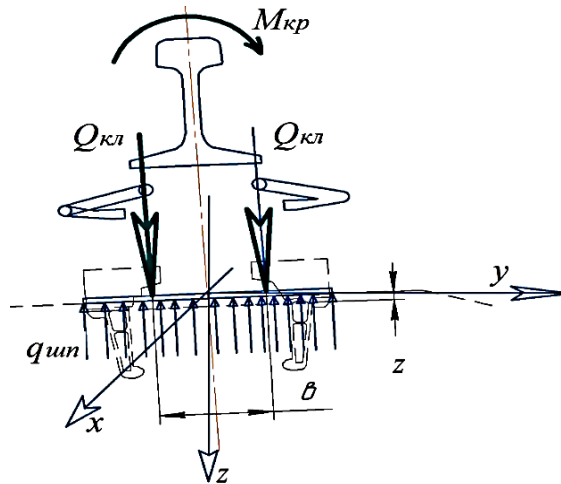


Рис. 2.10. Розрахункова схема для визначення жорсткості при крученні системи «нашпальна прокладка–пружні клеми».

Вирази (2.40, 2.47 і 2.50) дозволяють дійти висновку про те, що жорсткість скріплень ТРЕП при крученні рейки залежить лише від жорсткості прокладок і пружинних клем при їх стисненні.

Аналіз формування просторових жорсткостей вузла скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш дозволив визначити необхідний перелік характеристик пружних елементів цього скріплення і перелік залежностей їх зміни у процесі експлуатації.

До таких характеристик і залежностей слід віднести:

- статичну й динамічну жорсткості підрейкових та нашпальних при стисненні прокладок та їх зміни у процесі експлуатації;
- динамічну жорсткість підрейкових і нашпальних прокладок при зсуві в

поперечному та подовжньому напрямках і залежності цієї жорсткості від величини стиснення прокладок вертикальними силами;

- жорсткість пружних клем;
- жорсткість вкладиша при діючих переміщеннях рейки.

Ці характеристики і залежності можуть бути визначені експериментально.

2.4 Експериментальне визначення жорсткості проміжних скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш

2.4.1 Пружні характеристики пружних прокладок

У дослідних розрахунках приймають жорсткість прокладки величиною постійною, замінюючи її графічний тип (м'який чи жорсткий) на лінійний на робочій ділянці методом хорд або дотичних.

При цьому важливо правильно обрати робочу ділянку, оскільки жорсткості елементів скріплень, одержані дослідними методами можна використовувати тільки в межах тих амплітуд, для яких вироблено лінеаризацію.

У підрозділах 2.2 та 2.3 встановлено, що під дією на вузли проміжних скріплень вертикальних сил, жорсткості нашпальних і підрейкових прокладок при стисненні є складовими вертикальної жорсткості скріплень.

При дії горизонтальних сил у вузлах скріплень виникають реактивні моменти опорів крученню рейки за рахунок, зокрема, нерівномірного стиснення прокладок і реактивні сили опору поперечному вигину рейки, на формування яких впливає робота прокладок на зсув.

При стисненні або зсуві гуми та інших полімерних матеріалів деформації продовжуються й після того, як навантаження досягає постійного значення. Якщо ці явища є оборотними, вони називаються пружною післядією [166, 167].

У результаті пружної післядії жорсткості прокладок змінюються залежно від виду навантаження, яке змінюється.

Результати випробувань прокладок скріплень КБ на дію сил зсуву наведені в роботах [146, 168], та отримано залежності жорсткості прокладок при зсуві від величини стиснення.

В основу цих досліджень було покладено такі міркування.

Залежність тангенціальних напруг у прокладках від деформацій зсуву в першому наближенні характеризується законом Гука [169, 170]:

$$\tau = G \frac{\psi}{h},$$

де τ – тангенціальні напруги зсуву, (Па);

ψ – деформації зсуву, (м);

h – товщина шару гуми або іншого полімерного матеріалу, (м);

G – модуль зсуву, (Па).

Оскільки $\tau = \frac{R_{\Gamma}}{F_{\text{оп}}}$, можна записати :

$$R_{\Gamma} = G \cdot F_{\text{оп}} \frac{\psi}{h}, \quad (2.51)$$

де R_{Γ} – горизонтальна сила, (Н);

$F_{\text{оп}}$ – площа опорної поверхні прокладки, (м²).

Тоді жорсткість прокладки при зсуві визначається як:

$$u^{\Gamma} = \frac{R_{\Gamma}}{\psi} = \frac{G \cdot F_{\text{оп}}}{h}. \quad (2.52)$$

Оскільки прокладка працює на зсув, будучи стисненою прикріплювачами – клемми і, крім того, нерівномірно стисненою за рахунок сумісної дії вертикальних R_y і горизонтальних R_x чи R_z сил, величина h є змінною.

Тому потрібно експериментально визначити залежність жорсткості прокладки при зсуві як функцію величини її стиснення Δh . Таким чином, при плануванні експериментальних досліджень пружних характеристик прокладок передбачалося визначити статичну й динамічну жорсткості найпоширеніших типів гумових і гумокордових прокладок скріплень типу ТРЕП та ТРЕП–Ш при стисненні й бічному зсуві. Випробування проводилися пресом (дослідний прес, з максимальним навантаженням – 10 т) ДП–10 – при статичних навантаженнях (рис. 2.11) та на універсальному дослідному пульсуючому гідравлічному пресі УДМ–50 – при динамічному навантаженні (рис. 2.12).

Прокладки при динамічному навантаженні випробовувалися у спеціальному пристрої (рис. 2.13), який дозволяє проводити дослідження як на дію тільки сил стиснення (кут нахилу робочого майданчика $\alpha = 0$), так і на сумісну дію

стискувальних і зсувних сил. Співвідношення зсувних і стискувальних сил задавалося зміною кута нахилу робочого майданчика.

При статичних випробуваннях на стиснення прокладок навантаження прикладалося безперервно в діапазоні від 0 до 95 кН з постійною швидкістю 0,2 кН/с з подальшим повним розвантаженням.

Інтервали динамічного навантаження при випробуваннях прокладок тільки на стиснення на 100 кН, які відповідають навантаженням на шпалу під час руху екіпажів з осьовими навантаженнями 210 кН, 265 кН, 343 кН, 440 кН.



Рис. 2.11. Випробування на статичне навантаження прокладок ППТ і ПНТ



Рис. 2.12. Випробування прокладок ППТ і ПНТ при динамічному навантаженні

Пульсуюче навантаження нижче 20 кН не вдавалося забезпечити через конструктивні особливості преса. Випробування проводилися за частот пульсуючого навантаження 5,5 Гц та 11,0 Гц циклів у хвилину, що відповідає швидкостям проходження осей чотиривісного екіпажа 35 та 70 км/год з відстанню між осями 1,8 м.

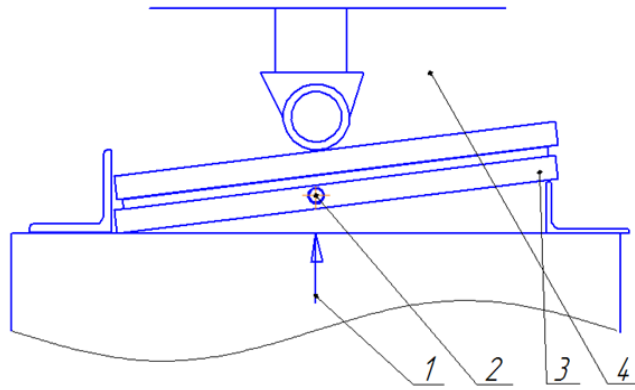


Рис. 2.13. Схема установки для випробувань прокладок: 1 – навантаження; 2 – мішень відеофіксації переміщень; 3 – робочий майданчик; 4 – дослідні прокладки (підрейкова чи нашпальна).

При статичних випробуваннях деформації прокладок вимірювалися приладами часового типу з точністю 0,01 мм. При динамічних – застосовувалася відеоцифрова система [221, 222]; точність вимірювань була оцінена 0,01 мм, але є реальна можливість підвищення точності до 0,001 мм. Прокладки випробовувалися при температурах 12–22 °С. Перед записом деформацій заздалегідь "тренували" прокладки приблизно 200–300 пульсацій.

При статичних і динамічних навантаженнях досліджувалося по 25 зразків для прокладок кожного типу для скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш. Набуті значення піддавалися статистичній обробці за загальноприйнятою методикою з визначенням мінімальних, максимальних, середніх значень і середньоквадратичних відхилень. На рис. 2.14 наведено графіки залежностей між величиною стиснення прокладки z і вертикальним навантаженням R_z (пружні характеристики), одержані в результаті обробки даних випробувань на статичне стиснення підрейкових прокладок ППТ для скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш.

На рис. 2.14 чітко відзначається петля гістерезису, що характеризує розсіювання енергії за один цикл. Це дозволило в подальшому використовувати ці дані для визначення параметрів дисипації рейкових опор.

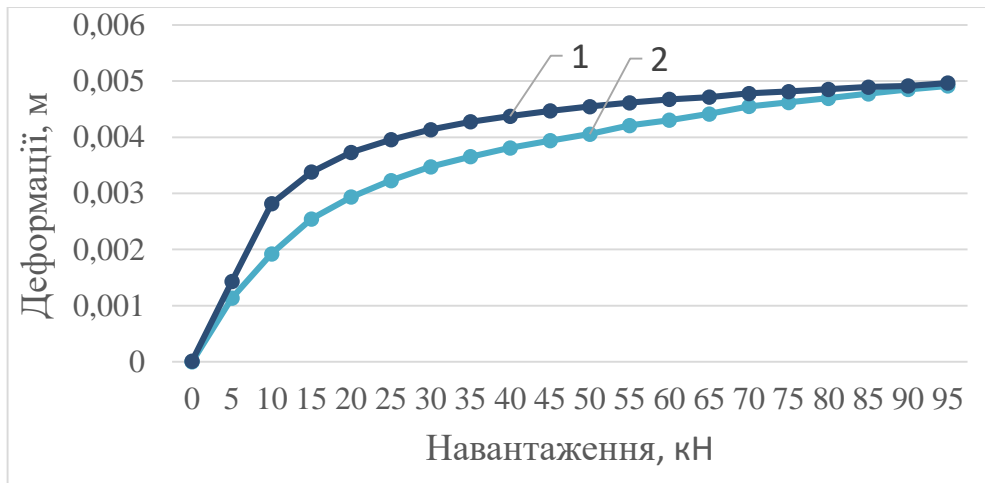


Рис. 2.14. Графік залежностей між навантаженням на прокладках ППТ та їх деформаціями: 1 – навантаження, 2 – розвантаження.

Пружні характеристики прокладок скріплень ППТ та ПНТ є затухаючими (жорсткими); при цьому відбувається збільшення жорсткості зі збільшенням діапазонів навантажень. Таким чином, для лінеаризації пружних характеристик прокладок застосовувався метод хорд.

Як діапазони навантажень, за яких визначалися жорсткості прокладок при стисненні за статичного і динамічного навантаження, було взято реальні навантаження, що діють у вузлах скріплень. Статична жорсткість визначалась для діапазону 0–95 кН, що відповідає монтажним навантаженням на прокладки, динамічна – для діапазонів 210 кН, 265 кН, 343 кН, 440 кН. Ці діапазони відповідають вертикальним навантаженням на опори, які виникають під час руху екіпажів з осьовими навантаженнями до 265 кН, до 343 кН і до 440 кН на вісь.

Отримані в результаті лабораторних випробувань значення статичної U_{st} та динамічної U_{din} жорсткості прокладок і середньоквадратичні відхилення цих величин наведені в табл. 2.1.

Збільшення динамічної жорсткості прокладок типів ППТ та ПНТ, порівняно зі статичною жорсткістю, становить від 1,7 до 13,7 разу при різних діапазонах навантажень, що узгоджується з даними інших досліджень [171–175].

Динамічна жорсткість прокладок зростає в 7,0–7,4 разу зі збільшенням інтервалів навантажень від 20–35 до 55–105 кН. Це можна пояснити, зокрема, деформацією рифлених прокладок і збільшенням їх опорних поверхонь.

Таблиця 2.1

Жорсткості прокладок при стисканні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш на залізобетонних шпалах

Тип скріплення	Призначення прокладки	Динамічна жорсткість та її середньоквадратичні відхилення, (кН/м)													
		Діапазони навантажень, кН, (частота коливань, Гц)													
		20–35 (5,5)		30–57,5 (5,5)		45–87,5 (5,5)		55–105 (5,5)		55–105 (11,0)		55–105 (11,0)		55–105 (11,0)	
		$u_{ст}$	S	$u_{дин}$	S	$u_{дин}$	S	$u_{дин}$	S	$u_{дин}$	S	$u_{дин}$	S	$u_{дин}$	S
ТРЕП, ТРЕП–Ш	ППТ	$12,33 \cdot 10^3$	$0,86 \cdot 10^3$	$20,6 \cdot 10^3$	$1,03 \cdot 10^3$	$63,9 \cdot 10^3$	$4,47 \cdot 10^3$	$102,4 \cdot 10^3$	$8,01 \cdot 10^3$	$148,8 \cdot 10^3$	$11,9 \cdot 10^3$	$164,3 \cdot 10^3$	$9,59 \cdot 10^3$		
ТРЕП–Ш	ПНТ	$7,97 \cdot 10^3$	$0,32 \cdot 10^3$	$15,2 \cdot 10^3$	$0,91 \cdot 10^3$	$35,3 \cdot 10^3$	$2,12 \cdot 10^3$	$81,7 \cdot 10^3$	$3,27 \cdot 10^3$	$96,2 \cdot 10^3$	$5,77 \cdot 10^3$	$106,4 \cdot 10^3$	$6,36 \cdot 10^3$		

Під час проведення лабораторних випробувань прокладок ППТ та ПНТ на стиснення зафіксовано, на відміну від результатів випробувань прокладок скріплення [172], зміни динамічної жорсткості за збільшення частоти дії навантажень у діапазонах від 5,5 до 11,0 Гц. Збільшення становить у середньому 11 %, що зумовлено фізико–хімічними характеристиками поліуретану, з якого виготовлені прокладки.

З часом відбуваються зміни фізико–хімічних характеристик полімерних матеріалів та їх складових.

У результаті цих явищ змінюються механічні характеристики матеріалу, що використовується як амортизатор у механічних пристроях і конструкціях, зокрема збільшується жорсткість таких амортизаторів. Зміни механічних характеристик прийнято називати старінням матеріалу. Збільшення амортизаційної жорсткості гумових амортизаторів при стисненні з часом відзначено в роботах [174–175],[166–167].

Для визначення кількісних характеристик змін динамічної жорсткості прокладок проміжних скріплень при стисненні внаслідок старіння поліуретану (назва матеріалу) були проведені випробування прокладок, що перебували в експлуатації, за викладеною вище методикою.

Випробовувались прокладки ПНТ й підрейкова підкладка ППТ, які було знято з дослідної ділянки Південно–Західної залізниці після 8 років експлуатації.

У результаті випробувань прокладок, що були в експлуатації, на динамічне стиснення було встановлено, що жорсткість прокладок типу ПНТ (ТРЕП–Ш) зросла в середньому на 20 %, ППТ – на 19 %.

Таким чином, припускаючи лінійну залежність зміни жорсткостей прокладок при динамічному стисненні від терміну їх служби, можна одержати емпіричні рівняння, наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Залежність змін жорсткостей прокладок при стисненні від терміну їх служби в колії (років)

Тип скріплення	Тип прокладки	Емпірична залежність $u_{\text{пр}}^{\text{дин}}(t) = f(t), (\text{кН/м})$	Середня помилка апроксимації (%)
1	2	3	4
ТРЕП, ТРЕП–Ш	ППТ	$u_{\text{пр}}^{\text{дин}}(t) = u_{\text{пр}}^{\text{дин}} + 0,08 \cdot 10^4 t$	4,17
ТРЕП–Ш	ПНТ	$u_{\text{пр}}^{\text{дин}}(t) = u_{\text{пр}}^{\text{дин}} + 0,51 \cdot 10^4 t$	2,84

Середня помилка апроксимації розраховувалася для оцінки адекватності розрахункових значень емпіричної залежності щодо експериментів і визначалась за формулою (2.53):

$$\varepsilon = \frac{100}{N} \cdot \sum_1^N \left(\frac{u_i^{\text{розр}} - u_i^{\text{оп}}}{u_i^{\text{оп}}} \right), (\%), \quad (2.53)$$

де: $u_i^{\text{розр}}$ – розрахункові значення жорсткості, (кН/м);

$u_i^{\text{оп}}$ – її досліджені значення, (кН/м);

N – кількість спостережень.

Для визначення залежності жорсткості підрейкових і нашпальних прокладок при зсуві від величини їх стиснення Δz вертикальними силами (формула 2.12 і 2.14) були проведені випробування в установці, зображеній на рис. 2.13. Прокладки

випробовувалися під дією пульсуючого динамічного навантаження в діапазонах 20–35, 30–57,5, 40–87,5 і 55–105 кН. При кожному діапазоні навантаження кут нахилу робочого майданчика встановлювали послідовно рівним 4° та 8° . Таким чином, співвідношення зсувного і стискального навантажень склало 0,07 та 0,14 при кожному діапазоні навантажень.

Залежності жорсткостей прокладок при зсуві від величини їх стиснення Δh є показовими функціями і були апроксимовані виразами вигляду:

$$U_z^{\text{дин}} = a \cdot \Delta z^b, \quad (2.54)$$

де Δz – величина стиснення прокладки, (м);

a, b – емпіричні параметри рівнянь.

Ці параметри були визначені методом якнайменших квадратів за даними випробувань прокладок на сумісну дію стискальних і зсувних сил. Одержана залежність жорсткостей прокладок при зсуві в поперечному u_z^{Γ} напрямку наведена в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Залежності змін жорсткостей прокладок при зсуві від величини їх стиснення Δz , м

Тип скріплення	Тип прокладки	Залежності жорсткості при зсуві $u_{\text{пр}}^{\Gamma} = f(\Delta z)$, (кН/м) ($\Delta z \cdot 10^3$, м)	Коефіцієнт кореляції
ТРЕП, ТРЕП–Ш	ППТ	$u_{\text{ППТ}}^{\Gamma} = 2,452 \cdot 10^3 \cdot \Delta z^{2,0312}$	0,9236
ТРЕП–Ш	ПНТ	$u_{\text{ПНТ}}^{\Gamma} = 1,865 \cdot 10^3 \cdot \Delta z^{2,4465}$	0,9727

Випробування прокладок, що були в експлуатації, на сумісну дію стискальних і зсувних сил дозволило одержати емпіричну залежність зміни жорсткості прокладок при зсуві від терміну роботи їх у колії. Збільшення цієї жорсткості після 8 років експлуатації для поліуретанових прокладок скріплень ПНТ та ППТ становить у середньому 23–25 %.

Застосовуючи лінійний закон зміни жорсткості прокладок при зсуві від терміну служби, ми одержали орієнтовну залежність, наведену в табл. 2.4.

Таким чином, у результаті проведених експериментальних робіт були одержані такі параметри залежностей, що характеризують жорсткість прокладок–

амортизаторів проміжних скріплень ТРЕП, ТРЕП–Ш:

- жорсткості прокладок при стисненні при статичному навантаженні монтажними силами;
- жорсткості прокладок при стисненні при динамічному навантаженні в діапазонах, відповідних осьовим навантаженням 210 кН, 265 кН, 343 кН, 440 кН на вісь спеціального рухомого складу промислового транспорту;
- емпіричні залежності змін динамічної жорсткості прокладки при стисненні від термінів служби прокладок у колії;
- емпіричні залежності змін жорсткості прокладок при зсуві від величини їх стиснення вертикальними силами;
- емпіричні залежності змін жорсткості прокладки при зсуві від термінів їх служби в колії.

Таблиця 2.4

Залежності змін жорсткості прокладок при зсуві від терміну їх служби в колії (років)

Тип скріплення	Тип прокладки	Емпіричні залежності $u_{np}^{\Gamma} = f(t)$, (кН/м)	Середня помилка апроксимації, (%)
ТРЕП, ТРЕП–Ш	ППТ	$U_{np}^{\Gamma}(t) = U_{np}^{\Gamma} + 0,11 \cdot 10^4 \cdot t$ $U_{np}^z(t) = U_{np}^z + 0,11 \cdot 10^4 \cdot t$	4,17
ТРЕП–Ш	ПНТ	$U_{np}^{\Gamma}(t) = U_{np}^{\Gamma} + 0,31 \cdot 10^4 \cdot t$	2,84

2.5 Жорсткість металевих упорів при бічних переміщеннях рейок

Під жорсткістю упорів скріплення ТРЕП та першої системи ТРЕП–Ш розуміється жорсткість частини ізолювального вкладиша, яка контактує з анкером шпали (розділ 2.2.2). Для другої системи скріплення ТРЕП–Ш під цим терміном розуміється жорсткість частини вкладиша та частини нашпальної прокладки, яка забезпечує ізоляцію підкладки від анкера (розділ 2.3.2). Для визначення цих параметрів були проведені випробування вузлів цих скріплень у лабораторних умовах. Використовувався комплект приладів, який складався з гідравлічного домкрата вантажопідйомністю 100 кН, зразкового динамометра ДС–5, індикаторів переміщень годинникового типу ІЧ–10 та опорної станини (рис. 2.15).



Рис. 2.15. Схема випробувань вузлів скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш для визначення жорсткості упорів при горизонтальних поперечних навантаженнях

Горизонтальне поперечне навантаження темплета прикладалося до головки рейки завдовжки 260 мм за допомогою гідравлічного домкрату. Навантаження прикладалось поступово – по 5 кН до досягнення переміщень підшви рейки, рівних 0,6 мм, що відповідає реальним переміщенням колії у кривій радіусом 400 м під час руху екіпажів з осьовими навантаженнями до 250 кН. Рівень навантаження фіксувався динамометром ДС–5. Переміщення кромки підшви рейки (скріплення ТРЕП та ТРЕП–Ш) та підкладки (ТРЕП–Ш) фіксувалися індикаторами ІЧ–10 з точністю 0,01 мм.

Усього було проведено по десять серій випробувань вузлів скріплень кожного типу. На початку кожної серії вузол скріплення стискався горизонтальною силою 10 кН для вибірки люфтів та зазорів з подальшим повним розвантаженням; після цього встановлювалися нульові відліки індикаторів ІЧ–10 та починались випробування.

У кожній серії виконувалось не менше десяти навантажень до рівня поперечних переміщень 0,6 мм з подальшим повним розвантаженням. Одержані результати оброблялися за загальноприйнятою методикою з визначенням середніх значень та середньоквадратичних відхилень.

Пружні характеристики вузлів скріплень при поперечних навантаженнях є близькими до лінійних. Таким чином була отримана методом дотичних горизонтальна поперечна жорсткість вузлів скріплень за відсутності вертикального навантаження від рухомого складу. Горизонтальна поперечна жорсткість при зсуві прокладок ППТ та ПНТ визначалась за величин стиснення тільки монтажними

зусиллями від клем. Величину монтажного зусилля було взято рівною 26,25 кН, жорсткості прокладок при зсуві були розраховані за залежностями, наведеними в табл. 2.3. Далі з використанням формул (2.19), (2.34), (2.37) та (2.38) розраховувались значення жорсткості упорів для скріплень ТРЕП та упорів для першої та другої систем скріплення ТРЕП–Ш:

$$\begin{aligned} \text{ТРЕП} - U_{\text{уп}} &= 5,92 \cdot 10^3, \frac{\text{кН}}{\text{м}}, \\ \text{ТРЕП-Ш} - U_{\text{уп}} &= 5,92 \cdot 10^3, \frac{\text{кН}}{\text{м}}, \\ U_{\text{упз}} &= 9,846 \cdot 10^3, \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Середня помилка апроксимації (2.53) склала 2,4 %.

2.6 Жорсткість пружних металевих клем

Параметром проміжного скріплення ТРЕП, ТРЕП–Ш для залізобетонних шпал, що впливає на просторову жорсткість цих скріплень, є жорсткість пружинної клеми КПТ скріплень ТРЕП, ТРЕП–Ш при її вертикальній деформації $j_{\text{кл}}$ (кН/м).

Величина натискання клем на підшву рейки становить 12 кН. Це закріплено дослідами, виконаними комплексним відділенням ВНІЗТУ [105].

Укладена дослідна ділянка колії зі скріпленнями ТРЕП та ТРЕП–Ш що року перевіряється колійною обстежувальною станцією. Параметром, який перевіряється та порівнюється, є можливість зміни геометричних параметрів клеми КПТ. Далі дослідним визначенням вимірюється зміна розміру (висоти клеми) та розраховується жорсткість вузла в цілому. Значенням, визначеним в дослідному цеху УЗ, виявлено значення 26,25 кН – це необхідна сила для відриву рейки від шпали та можливості виміряти зазор, рівний 1 мм. Для більш повного випробування клем КПТ застосовувалося обладнання (рис. 2.16), яке досить точно моделює роботу клем у колії.

Зміни навантаження на клеми визначались за допомогою правил важеля, вертикальна деформація клем – індикатором переміщень ИЧ–10 з точністю до 0,01 мм і дорівнювала 16 мм; максимальне навантаження на клеми становило від 0 кН до 16,82 кН.



Рис. 2.16. Обладнання для випробування пружних клем КПТ

Усього було випробувано 4 клеми, які було надано автором скріплень для дослідів. Отримане середнє значення жорсткості при вертикальних деформаціях становить 970 кН/м за середньоквадратичного відхилення $0,02 \cdot 10^4$ кН/м.

2.7 Складові вертикальної та горизонтальної поперечної жорсткостей рейкових опор, яка залежить від переміщень шпал

Визначення складових вертикальної жорсткості рейкової опори, яка залежить від пружних властивостей шпал при вигинанні під дією вертикальних сил і пружних властивостей баластного шару й земляного полотна та складових горизонтальної поперечної жорсткості опор, яка залежить від пружних сил опору переміщенням шпал у баласті (далі – горизонтальна поперечна жорсткість залізобетонних шпал), є дуже складною задачею в організаційно–технічному та методологічному плані. Мова йде насамперед про той факт, що шпали типу ША–Т (ТРЕП), ША–ТШ (ТРЕП–Ш) на коліях незагального користування України ніколи не укладались навіть у дослідному порядку. Тому завдання експериментального визначення таких складових жорсткостей рейкових опор у цій дисертаційній роботі не ставилось. Але такі дані необхідні для проведення чисельних досліджень сил взаємодії колії та рухомого складу при застосуванні проміжних скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш.

Шпали типу ША–Т (ТРЕП), ША–ТШ (ТРЕП–Ш), які призначені для цих типів скріплень, є абсолютно ідентичними шпалам типу Ш–1–1 за геометричними й технічними параметрами. Тому є сенс використати результати докладних досліджень зазначених вище параметрів жорсткості рейкових опор зі шпалами

Ш–1–1, які були виконані кафедрою «Колія та колійне господарство» Українського державного університету залізничного транспорту в 2008–2009 роках в умовах металургійних і гірничодобувних підприємств України [176–178]. У цих роботах $C_{ут}$ – складова вертикальної жорсткості рейкової опори, яка залежить від пружних властивостей шпали при вигинанні під дією вертикальних сил і пружних властивостей баластного шару й земляного полотна (кН/м) та визначається як:

$$C_{ут} = C_{уб} \cdot \alpha \cdot \Omega_{ш}, \quad (2.55)$$

де $C_{уб}$ – коефіцієнт постелі шпали, (кН/м³);

α – коефіцієнт вигину шпали;

$\Omega_{ш}$ – площа полушпали, (м²).

Експериментальному визначенню значень коефіцієнта постелі шпали було присвячено багато робіт [179–183]. В основному наведено значення параметра $C_{уб}$ при статичному завантаженні колії, оскільки методи визначення динамічних жорсткостей є певною мірою складними та трудомісткими. Відомі, наприклад, методи визначення динамічних параметрів, запропоновані в роботах [2, 68]. Наголошується, що за динамічних навантажень значення коефіцієнта постелі можуть становити 70 %, а в деяких випадках – 60 % від значень цієї величини за статичного навантаження. Теоретичне обґрунтування цього явища в результаті дії вібрації баласту наведено в [184]. У процесі експлуатації в міру ущільнення й забруднення баласту коефіцієнт постелі шпал зростає на 40–80 % [185].

Коефіцієнтом вигину шпали прийнято називати [59] відношення середньої за довжиною шпали осідання під дією вертикальних сил до її осідання в підрейковому перерізу. У [59] вказуються значення α для залізобетонних шпал до 1,00–1,05 влітку й 0,81–0,85 взимку, оскільки на залізобетонних шпалах максимальне прогинання шпали знаходиться поблизу торця. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість [64] рекомендують для залізобетонних шпал приймати значення 0,911 для літніх і 0,879 для зимових умов.

Для умов магістральних залізниць значення коефіцієнта постелі залізобетонних шпал рекомендується приймати в межах 180–240 МПа/м – для

літніх і 280–340 МПа/м – для зимових умов[184].

Особливістю конструкції залізничних колій незагального користування, що впливає на коефіцієнт постелі й вертикальну жорсткість шпал, є менша, порівняно з магістральними дорогами, товщина баласту. Товщина двошарового баласту за осьових навантажень від 265 до 294 кН і вантажонапруженості понад 10 млн т/рік і за навантажень на вісь від 294 до 450 кН – 25/20 см. Товщина двошарового баласту під залізобетонною шпалою встановлена рівною від 15/20 см до 30/20 см за осьових навантажень до 294 кН і вантажонапруженості від 1 до 25 млн т /рік і більше [2]. Як основний баласт на металургійних підприємствах часто застосовуються доменні або мартенівські шлаки. Гранулометричний склад шлакового баласту повинен бути близьким до щебеневого. Його механічні характеристики схожі зі щебенем [10].

Експериментальні роботи проводилися на 9 ділянках колії металургійних і гірничодобувних підприємств. Характеристики плану і профілю ділянок, типи рухомого складу, що перебуває в обігу, його осьові навантаження, значення вантажонапруженості й терміни служби колії після капітального ремонту наведені в табл. 2.5.

На кожній дослідній ділянці випробовувалося від 3 до 5 шпал. Вертикальні навантаження на шпали від рухомого складу фіксувалися силомірними підкладками, вертикальні переміщення шпал – відеоцифровою системою вимірювання переміщень [215]. Вертикальні сили й переміщення шпал записувалися безперервно в цифровому вигляді в пам'яті комп'ютера під час проходження всього складу.

Записана інформація копіювалася, переносилася в табличний редактор Excel. За цими даними будувались графіки пружних характеристик шпал для усереднених значень переміщень і навантажень для кожної ділянки. Пружні характеристики для залізобетонних шпал є затухаючими (жорсткими), зі збільшенням навантажень вертикальна жорсткість шпал зростає (рис. 2.17).

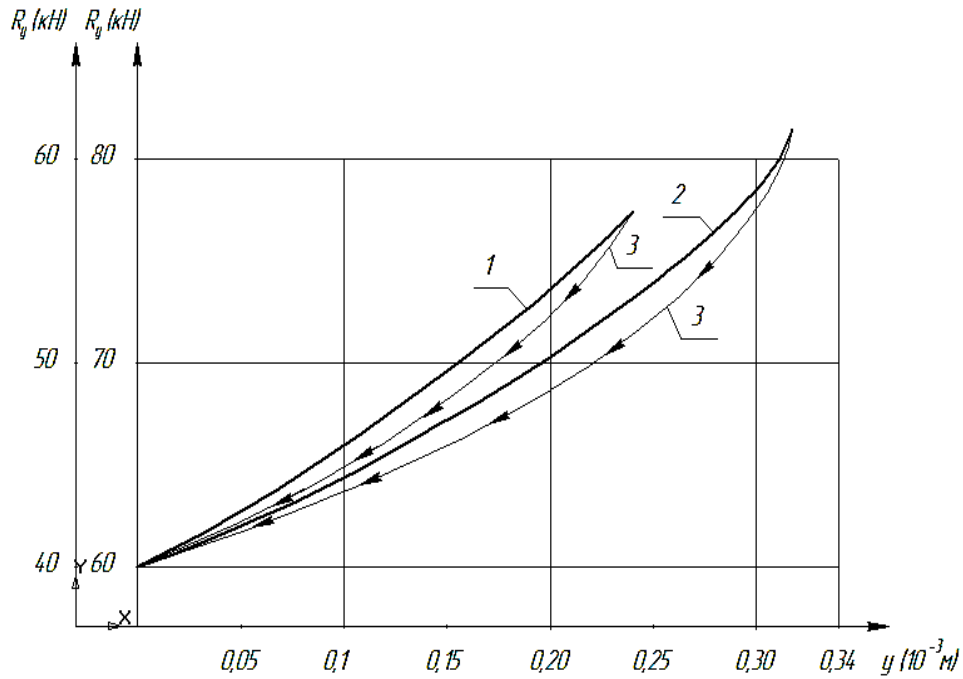


Рис. 2.17. Пружні характеристики залізобетонних шпал при вертикальних навантаженнях: 1 – ділянка №14, чавуновоз 80 т, $P_{oc} = 353$ кН/вісь, термін служби колії років, тоннаж – 60 млн т; 2 – ділянка №19, думпкар 6–ВС–60, $P_{oc} = 215$ кН/вісь, термін служби колії – 5 років, тоннаж – 90 млн т; 3 – пружні характеристики при розвантаженні

Жорсткості шпал при вертикальних навантаженнях однієї рейкової нитки були визначені методом лінеаризації пружних характеристик методом хорд для діапазонів 40–60, 60–80 і 80–100 кН, що відповідає реальним навантаженням на шпалу під час руху екіпажів з осьовими навантаженнями до 265 кН, 265–294 і більше 294 кН на вісь.

Розрахунки коефіцієнтів постелі шпал, виконані за дослідними даними для ділянок із заглибленою баластною призмою (ділянки № 2 і 5), показали, що на залізобетонних шпалах ці величини зменшуються на 4–7 % порівняно зі звичайною конструкцією колії. Це пояснюється, імовірно, змінами механічних властивостей ґрунту в умовах підвищеної його вологості.

На підставі результатів експериментів у роботах [36, 38] одержано залежність змін коефіцієнтів постелі залізобетонних шпал від величини пропущеного по колії тоннажу, з урахуванням діапазонів вертикальних навантажень на шпали й

конструктивних особливостей колії. Для залізобетонних шпал запропонована залежність має вигляд:

$$C_{\sigma} = K_k \cdot K_{oc} \cdot (16.4 \cdot 10^4 + 0.305 \cdot 10^4 \cdot T^{0.724}), (\text{кН/м}^3), \quad (2.56)$$

де K_k – коефіцієнт, який враховує конструкцію колії; для звичайної баластної призми $K_k = 1$, для заглибленої або напівзаглибленої – $K_k = 0,93$;

K_{oc} – коефіцієнт, який враховує рівень осьових навантажень на ділянці; за осьових навантажень до 265 кН $K_{oc} = 1$, за навантажень 265–294 кН – $K_{oc} = 1,31$; за навантажень більше 294 кН – $K_{oc} = 1,59$;

T – пропущений по ділянці тоннаж, (млн т).

Отримана напівемпірична залежність коефіцієнта вигину шпали від коефіцієнта її постелі має вигляд:

– для залізобетонних шпал:

$$\alpha = 1,2727 \cdot (C_{\sigma} \cdot 10^{-4})^{-0,047}$$

Залежність можна використовувати для діапазону коефіцієнта постелі $C_{\sigma} = 16,0 - 43,0 \cdot 10^4$ кН/м³). Роботи з визначення опірності залізобетонних шпал вертикальним переміщенням, виконані в зимових умовах в 2009 році на ділянках № 8 і № 9, показали, що збільшення коефіцієнта постелі в 1,8 разу для залізобетонних шпал взимку для колій незагального користування України є обґрунтованим.

Для вивчення змін сил опору поперечному переміщенню залізобетонних шпал у процесі експлуатації були проведені експериментальні роботи на дослідних ділянках, характеристики яких наведені в таблиці 2.5 [144].

До числа головних задач, які вирішувались під час дослідження роботи шпал під дією динамічних горизонтальних поперечних сил, були віднесені такі:

- визначення горизонтальних поперечних пружних характеристик шпал;
- визначення робочих діапазонів застосовності розрахункових значень горизонтальної поперечної жорсткості шпал;
- вивчення впливу вертикального навантаження на горизонтальну поперечну жорсткість шпал;

Таблиця 2.5

Характеристики досліджуваних ділянок, які обрано для проведення експериментальних робіт

№ ділянки	Тип шпал, епюра	Баласт	План ділянки	Профіль ділянки ‰	Тип рухомого складу	Осьові навантаження кН	Швидкість руху (км/год)	Вантажона- пруженість (млн т/рік)	Термін служби колії (роки)
1	Ш-1-1,1840	щебінь	Пр	0	чавуновоз 80т	353	<5	12	5
2	Ш-1-1,1840	шлак заглибл.	кр R 400м	0	чавуновоз 80т	353	<5	12	9
3	Ш-1-1,1840	шлак	пряма	5 %	шлаковоз 11м ³	211	5-10	5	9
4	Ш-1-1,1840	шлак	кр R 600м	5 %	шлаковоз 11м ³	211	5-10	5	10
5	Ш-1-1,1840	шлак заглибл.	кр R 450м	0	шлаковоз 11м ³	211	5-10	5	10
6	Ш-1-1,1840	щебінь	пряма	0	думпкар 6-ВС-60	216	15-20	18	5
7	Ш-1-1,1840	щебінь	кр R 650м	0	думпкар 6-ВС-60	216	15-20	18	7
8	Ш-1-1,1840	щебінь	пряма	10 %	думпкар 6-ВС-60	216	10-15	18	10
9	Ш-1-1,1840	щебінь	кр R 450м	10 %	думпкар 6-ВС-60	216	10-15	18	10

– дослідження змін горизонтальної поперечної жорсткості шпал у процесі експлуатації колії та встановлення чинників, що впливають на ці зміни.

Під час проведення експериментальних робіт горизонтальні поперечні сили, які діють на шпалу від рейок, фіксувалися за допомогою силомірних елементів, встановлених на підкладках; вертикальне навантаження на шпалу фіксувалося силомірними підкладками. Горизонтальні поперечні переміщення шпал визначалися за допомогою відеоцифрової системи вимірювання переміщень. Мішень закріплювалася на шпалі поблизу краю підкладки проміжного скріплення [215].

Значення горизонтальних поперечних і вертикальних сил та значення викликаних цими силами горизонтальних поперечних переміщень шпал записувалися в цифровому вигляді в пам'яті комп'ютера. Одержана інформація оброблялася за допомогою табличного редактора *Excel* для отримання усередненої залежності горизонтальних, поперечних сил від поперечних переміщень шпал для кожної ділянки.

Графіки залежності горизонтальних поперечних жорсткостей залізобетонних і дерев'яних шпал від величини вертикальних навантажень на шпали наведені на рисунку 2.18.

Ці криві апроксимовані рівняннями виду:

$$C_z = (a + v p_y^c) \times f(T),$$

де p_y^c – вертикальні навантаження від двох рейок на шпалу, (кН);

$f(T)$ – вплив пропущеного по ділянках тоннажу, (млн т);

a, v, c – емпіричні коефіцієнти. Для залізобетонних шпал ця залежність може бути визначена виразом:

$$C_{zш} = K_k \cdot K_3 (0,73 \cdot 10^4 + 0,22 \cdot 10^4 \cdot P_y^{0,519}) (1 + 0,021 T^{0,695}), (\text{кН} / \text{м}), \quad (2.57)$$

де K_k – коефіцієнт, який враховує конструкцію колії (для звичайної баластної призми

$K_k = 1$, для заглибленої або напівзаглибленої – $K_k = 1,2$);

K_3 – коефіцієнт, що для літніх умов дорівнює 1, для зимових умов – 1,8;

P_y – вертикальне навантаження від двох рейок на шпалу, (кН);

T – пропущений по ділянці тоннаж, (млн т).

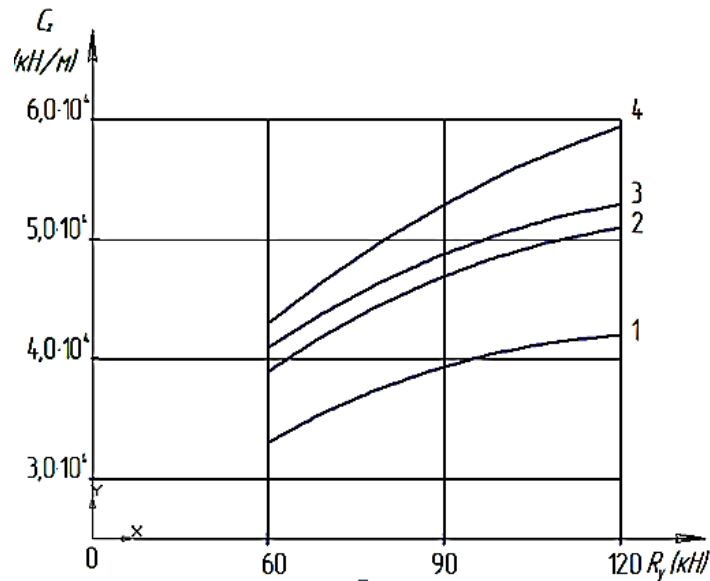


Рис. 2.18. Графіки залежностей горизонтальних поперечних жорсткостей залізобетонних шпал від величини вертикальних навантажень на шпалу при пропущеному по ділянках тоннажу: 1) 45–50 млн т; 2) 108 млн т; 3) 126 млн т; 4) 180 млн т

Зі зростанням пропущеного по ділянках тоннажу від 90 до 180 млн т горизонтальна поперечна жорсткість залізобетонних шпал зростає від рівня $2,85 \cdot 10^4$ кН/м до $3,64 \cdot 10^4$ кН/м, що становить 28 %.

Досліди на колії із заглибленою баластною призмою (ділянки №№ 3 і 6) і результати їх статистичної обробки дозволили встановити, що горизонтальна поперечна жорсткість залізобетонних шпал у таких умовах збільшується в середньому в 1,2 рази порівняно зі звичайними конструкціями колії. У зимових умовах горизонтальна поперечна жорсткість залізобетонних шпал зростає в 1,8 рази.

З урахуванням зазначеного вище було встановлено залежність змін горизонтальної поперечної жорсткості шпал за різного рівня вертикальних навантажень на шпалу і за збільшення пропущеного по ділянках тоннажу.

2.8 Просторова жорсткість рейкових проміжних скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш, жорсткість рейкових опор та її зміни під час експлуатації

Проведені експериментальні дослідження параметрів жорсткості елементів скріплень ТРЕП і ТРЕП–Ш та виконані раніше дослідження опору залізобетонних шпал просторовим переміщенням в умовах залізниць незагального кори стування за різних рівнів навантажень дали можливість виконати розрахунки просторових жорсткостей зазначених типів скріплень (формули (1.13), (1.18), (1.19), (1.22), (1.25), (1.32), (1.33), (1.34), (1.37), (1.38), (1.40), (1.49) та (1.50).

Жорсткість рейкових опор було визначено відповідно до системи рівнянь (1.2) та емпіричних залежностей (1.40), (1.43).

Отримані результати експериментальних досліджень та розрахунків наведені в табл. 2.6. На початку експлуатації пропущений тоннаж дорівнює нулю.

Порівняння результатів для скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш із даними, які були отримані для КБ [146,169], показали, що вертикальна жорсткість скріплень ТРЕП є в 2,4 рази меншою, горизонтально–поперечна є в 1,6 рази меншою, жорсткість при крученні в 4,3 рази меншою порівняно із такими жорсткостями КБ у діапазоні навантажень на рейкову опору 20–30 кН. Для ТРЕП–Ш ці співвідношення 8,2 рази, 7,9 рази, 8,7 рази при такому самому діапазоні.

Зі зростанням навантажень на рейкові опори значення жорсткості опор зростатимуть, але не перевищуватимуть аналогічних параметрів КБ. У табл. 2.7 наведено результати розрахунків просторової жорсткості скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш під час експлуатації колії з урахуванням даних, наведених у табл. 2.2 та 2.4 та залежностей (2.56 та 2.57).

У розрахунках взято середню для умов експлуатації незагальних залізниць вантажонапруженість 10 млн т км/км рік.

При порівнянні отриманих результатів із даними, які були отримані в роботах [146, 147], з'ясувалося, що під час експлуатації рівень просторових жорсткостей не перевищує аналогічних даних для скріплень КБ та КПП–5.

Таблиця 2.6

Просторові жорсткості скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш та жорсткості рейкових опор при застосуванні цих типів скріплень

Діапазон навантажень, кН	ТРЕП						ТРЕП–Ш					
	Скріплення			Рейкової опори			Скріплення			Рейкової опори		
	$C_{зск},$ кН/м	$C_{уск},$ кН/м	$C_{фск},$ кН·м/рад	$C_z,$ кН/м	$C_y,$ кН/м	$C_\phi,$ кН·м/рад	$C_{зск},$ кН/м	$C_{уск},$ кН/м	$C_{фск},$ кН·м/рад	$C_z,$ кН/м	$C_y,$ кН/м	$C_\phi,$ кН·м/рад
20–35	42800	5920	30,52	2229	4879,5	30,5156	38700	4925	22,521	16920	4183	22,521
30–57,5	66100	5920	91,41	3287	4987,2	91,4063	48750	4925	46,7084	26270	4262	46,708
45–87,5	104600	5920	145,5	4059	5140,5	145,547	91950	4925	102,352	36370	4373	102,35
55–105	151000	5920	210,8	4158	5178,6	210,797	99200	4925	119,731	37324	4401	119,73

Таблиця 2.7

Зміни просторової жорсткості рейкових опор під час експлуатації (вантажонапруженість – 10 млн т км/км рік)

Діапазон навантажень, кН	Термін служби в колії, років	ТРЕП			ТРЕП–Ш		
		$C_z,$ Н/м	$C_y,$ кН/м	$C_\phi,$ кН/рад	$C_z,$ кН/м	$C_y,$ кН/м	$C_\phi,$ кН/рад
20–35	0	22990	4879,5	30,52	16920	4183	22,52
	5	58230	9367,69	37,34	32327,2	10051,41	26,23
	10	81250	12010	41,77	42388	13676	28,68
	20	191350	16730,68	49,16	59043,8	19678,66	32,67
30–57,5	0	32870	4987,2	91,41	26272	4262	46,71
	5	97780	9603,03	98,23	54137,6	10439,5	50,42
	10	140180	12454	102,66	72337	14255	52,83
	20	210367,3	17175,4	110,05	10246,7	20573,82	56,86
45–87,5	0	40590	5140,5	145,55	36370	4373	107,35
	5	123487,6	10066,49	152,37	86832,1	11016,6	106,06
	10	177630	13109	156,8	119790	15120	108,46
	20	267263,1	18147,68	164,19	174352,3	21913,57	112,5
55–105	0	41580	5178,6	210,8	37374	4401	119,73
	5	134773,3	10184,27	217,62	93125,6	11164,52	123,41
	10	195640	13276	222,05	139560	15342	125,84
	20	296405,4	18396,19	229,44	189889	22260,22	129,8

2.9 Висновки за розділом

1. Розглянуто формування просторових жорсткостей рейкових опор при застосуванні ТРЕП та ТРЕП–Ш на з/б шпалах. Одержані розрахункові рівняння дозволяють визначати ці жорсткості при динамічній дії спеціального та спеціалізованого рухомого складу. Встановлений перелік параметрів пружних елементів зазначених скріплень цих характеристикактеристик та жорсткостей формує їх просторову жорсткість.

2. Виконано експериментальні дослідження пружних характеристик елементів проміжних ТРЕП та ТРЕП–Ш у лабораторних умовах, встановлено залежності змін жорсткостей пружних елементів у процесі експлуатації для умов залізниць незагального користування.

3. Вертикальні жорсткості проміжних ТРЕП та ТРЕП–Ш, одержані на підставі розрахункових рівнянь та результатів експериментів, перевірено експериментально в лабораторних умовах; розрахункові та експериментальні значення мають добру збіжність.

4. Значення вертикальних жорсткостей ТРЕП та ТРЕП–Ш, зіставлені з жорсткостями КБ та для умов залізниць незагального користування, які одержані іншими дослідниками. Зіставлення показало, що ТРЕП та ТРЕП–Ш мають вертикальну жорсткість, яка в 1,6–2,4 рази є меншою, за жорсткість типу КБ за навантажень на рейкову опору у діапазоні 20–30 кН. Це свідчить про те, що ТРЕП та ТРЕП–Ш, враховуючи описані в розділі переваги, є цілком конкурентоспроможними.

5. Наведені параметри просторових жорсткостей рейкових опор, які залежать від переміщень шпал, було отримано в 2008–2009 роках кафедрою ККГ УкрДУЗТ для умов колій незагального користування.

6. На підставі виконаних автором теоретичних та експериментальних досліджень і наведених даних щодо складових жорсткостей опор, які залежать від роботи шпал, були отримані значення просторових жорсткостей рейкових опор при застосуванні ТРЕП та ТРЕП–Ш та їх зміни під час експлуатації колій.

Матеріали, які викладені в цьому розділі, опубліковані в роботах [214, 217, 218, 219, 220].

РОЗДІЛ 3

ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОЛІЇ Й РУХОМОГО СКЛАДУ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ПРОМІЖНИХ СКРІПЛЕНЬ ТРЕП ТА ТРЕП–Ш

3.1 Теоретичні основи чисельних досліджень

У більшості досліджень, у яких розглядалися питання взаємодії колії й рухомого складу, визначилися вертикальні або горизонтальні поперечні сили, які діють на колію під час руху екіпажів у прямих і кривих ділянках колії. Проте в умовах залізниць незагального користування (криві малого радіуса, особливості спеціального рухомого складу, особливості режимів ведення потягів) необхідно враховувати істотні нелінійні залежності, у тому числі нелінійні залежності розривного типу. Оскільки для нелінійних систем принцип суперпозиції не можна застосувати, дослідження проводились на нелінійній просторовій моделі. Як базову в роботі розглянуто розрахункову схему чотиривісного екіпажа, оскільки основна частина спеціальних вагонів транспорту незагального користування (за винятком думпкарів ВС–100 і 2ВС–105) і значна частина локомотивів, що застосовуються, виконана за такою схемою. Головні допущення, взяті в математичній моделі динамічної системи «екіпаж–колія», зводяться в основному до таких:

1. При розробці математичної моделі кузов екіпажа, обресорені й необресорені частини візка вважаються абсолютно твердими тілами, деформації яких не враховуються.

2. В екіпажі деформованість враховується тільки в підвісках, пружні елементи яких мають лінійні й нелінійні характеристики; маса цих елементів не враховується.

3. При визначенні горизонтальних силових реакцій між колесами і рейками враховується те, що в кожній колісній парі колеса жорстко з'єднані з віссю й тому під час руху екіпажа обертаються з однаковою кутовою швидкістю.

4. Рейки вважаються балками великої довжини незмінного перерізу, що лежать на опорах, які мають пружно–дисипативні властивості у вертикальній та горизонтальній площинах.

5. У вертикальній площині колеса й рейки мають односторонній зв'язок.

3.1.1 Розрахункова схема підсистеми «екіпаж»

З урахуванням наведеного вище, на рис. 3.1 представлена прийнята розрахункова схема чотиривісного екіпажа, що враховує його просторові коливання.

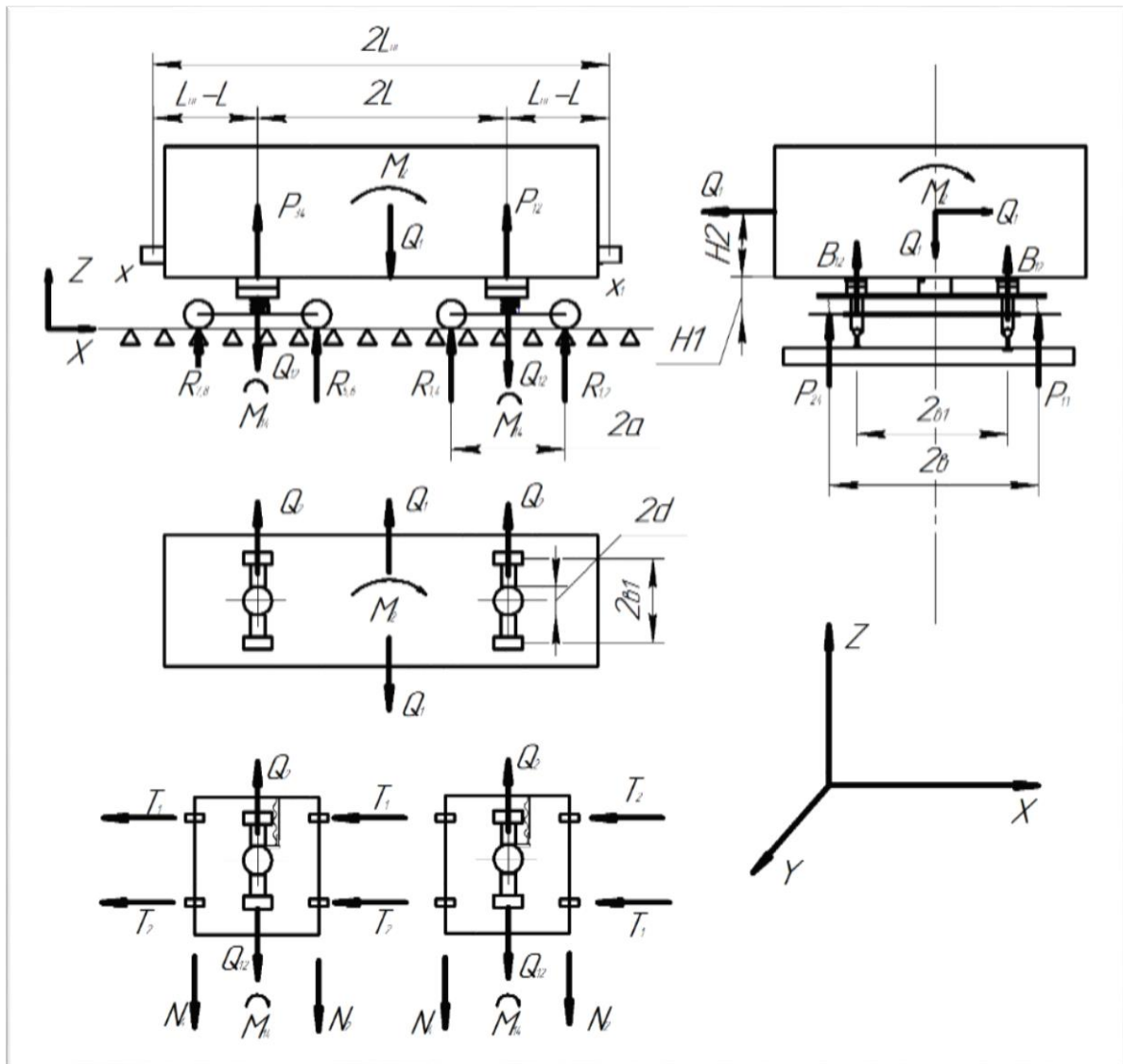


Рис. 3.1. Розрахункова схема чотиривісного екіпажа

За умови, що екіпаж рухається з постійною швидкістю, його коливання за прийнятою розрахунковою схемою описуватимуться такою системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}
& 1) M \cdot \ddot{q}_1 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = M_g \\
& 2) J_{ZK} \cdot \ddot{q}_2 + \ell \cdot (P_1 + P_2) - \ell \cdot (P_3 + P_4) = 0 \\
& 3) m_T \cdot \ddot{q}_3 - P_1 - P_2 = m_T \cdot g - R_1 - R_2 - R_3 - R_4 \\
& 4) J_{ZT} \cdot \ddot{q}_4 + m_T \cdot (\ddot{q}_3 - g) \cdot d \cdot \text{sign}(q_4 - q_2) = a \cdot (R_3 + R_4) - a \cdot (R_1 + R_2) \\
& 5) m_T \cdot \ddot{q}_5 - P_3 - P_4 = m_T \cdot g - R_5 - R_6 - R_7 - R_8 \\
& 6) J_{ZT} \cdot \ddot{q}_6 + m_T \cdot (\ddot{q}_5 - g) \cdot d \cdot \text{sign}(q_6 - q_2) = a \cdot (R_7 + R_8) - a \cdot (R_5 - R_6) \\
& 7) M \cdot \ddot{q}_7 + Q_1 + Q_2 = M \frac{V^2}{\rho_{xoz}} + Q_{ZK} - Q_{hk} \\
& 8) J_{VK} \cdot \ddot{q}_8 + Q_1 \cdot \ell - Q_2 \cdot \ell + M_{TP1} \cdot \text{sign}(\dot{q}_8 - \dot{q}_{10}) + M_{TP2} \cdot \text{sign}(\dot{q}_8 - \dot{q}_{12}) = 0 \\
& 9) m_T \cdot \ddot{q}_9 - Q_1 = m_T \frac{V^2}{\rho_{XT1}} - N_1 - N_2 - Q_{hT1} \\
& 10) J_{YT} \cdot \ddot{q}_{10} + M_{TP1} \cdot \text{sign}(\dot{q}_{10} - \dot{q}_8) = M_{n1} + M_{n2} + (N_2 - N_1) \cdot a \\
& 11) m_T \cdot \ddot{q}_{11} - Q_2 = m_T \frac{V^2}{\rho_{XT2}} - N_3 - N_4 - Q_{hT2} \\
& 12) J_{YT} \cdot \ddot{q}_{12} + M_{TP2} \cdot \text{sign}(\dot{q}_{12} - \dot{q}_8) = M_{n3} + M_{n4} + (N_4 - N_3) \cdot a \\
& 13) J_{\delta X} \cdot \ddot{q}_{13} + P_{T1} \cdot d \cdot \text{sign}(q_{13} - q_{17}) + (B_{1,l} - B_{1,np}) \cdot \epsilon_1 + (P_1 - P_2) \cdot \epsilon = 0 \\
& 14) J_{\delta X} \cdot \ddot{q}_{14} + P_{T2} \cdot d \cdot \text{sign}(q_{14} - q_{17}) + (B_{2,l} - B_{2,np}) \cdot \epsilon_1 + (P_3 + P_4) \cdot \epsilon = 0 \\
& 15) J_{TX} \cdot \ddot{q}_{15} + (P_2 - P_1) \cdot \epsilon - Q_1 \cdot H_1 = R_2 \cdot S_2(t) - R_1 \cdot S_1(t) + R_4 S_4(t) - \\
& \quad - R_3 \cdot S_3(t) - N_1 \cdot r_1(t) - N_2 \cdot r_2(t) \\
& 16) J_{TX} \cdot \ddot{q}_{16} + (P_4 - P_3) \cdot \epsilon - Q_2 \cdot H_1 = R_6 \cdot S_6(t) - R_5 \cdot S_5(t) - R_7 \cdot S_7(t) + R_8 \cdot S_8(t) - \\
& \quad - R_4 \cdot S_4(t) - N_3 \cdot r_3(t) - N_4 \cdot r_4(t) \\
& 17) J_{KX} \cdot \ddot{q}_{17} + M \cdot \ddot{q}_7 \cdot H_0 + P_{T1} \cdot d \cdot \text{sign}(q_{17} - q_{13}) + P_{T2} \cdot d \cdot \text{sign}(q_{17} - q_{14}) + \\
& \quad + (B_{1,np} + B_{2,np} - B_{1,l} - B_{2,l}) \cdot \epsilon_1 = M \frac{V^2}{\rho_{xoz}} \cdot H_0 + Q_{ZK} \cdot H_0
\end{aligned} \tag{3.1}$$

У системі рівнянь (3.1) прийнято такі позначення:

M – маса підресорених елементів вагона, (кг);

m_T – маса непідресорених елементів візка, (кг);

J_{VK}, J_{ZK}, J_{KX} – відповідно моменти інерції підресорених елементів вагона відносно осей Y і Z та момент інерції кузова вагона відносно осі X , яка проходить на рівні п'ятників вагона, (кг·м²);

J_{YT}, J_{ZT}, J_{TX} – моменти інерції непідресорених елементів візків відносно осей Y, Z та X , (кг·м²);

$J_{\delta X}$ – момент інерції надресорної балки відносно осі X , (кг·м²);

$2L$ – відстань між центрами шкворнів, (м);

H_0 – відстань від площини п'ятника до центру мас, (м);

$2d$ – діаметр п'ятника вагона, (м);

$2v_1$ – відстань між ковзунами, (м);

$2a$ – база візка, (м);

$2e$ – відстань між серединами ресорних комплектів, (м);

H_1 – відстань від осі колісної пари до площини п'ятника, (м);

q_{1-17} – незалежні координати підсистеми;

Q_{zk} – горизонтальна бічна результуюча зовнішніх сил, які діють на кузов, (Н);

Q_1 і Q_2 – горизонтальні поперечні реакції ресорних комплектів першого і другого візка, (Н);

Q_{hk} – горизонтальна складова сил ваги кузова, викликана підняттям зовнішньої рейки, (м);

Q_{hT1}, Q_{hT2} – горизонтальні складові сил ваги візка, викликані підняттям зовнішньої рейки, (Н);

P_1, P_2, P_3, P_4 – вертикальні реакції ресорних комплектів першого і другого візків, (Н);

P_{T1} і P_{T2} – реакції, що діють на п'ятники вагона з боку підп'ятників візків, (Н);

$B_{1пр}, B_{2пр}, B_{1л}, B_{2л}$ – вертикальні реакції на правих і лівих ковзунах першого та другого візків, (Н);

$M_{тр 1}, M_{тр 2}$ – моменти сил тертя, що виникають у шворневих перерізах при поворотах першого і другого візків у горизонтальній площині, (Н·м);

R_{1-8} – вертикальні реакції, які діють на колесо з боку колії, (Н);

N_{1-4} – результуючі горизонтальних поперечних сил взаємодії коліс і рейок, (Н);

$M_{n1}, M_{n2}, M_{n3}, M_{n4}$ – моменти поздовжніх складових сил тертя коліс по рейках для 1–4 колісної пари, (Н·м);

$r_{1-8}(t)$ – радіуси кіл кочення коліс у точках контакту колеса і рейки, (м);

$S_{1-8}(t)$ – відстані від середини колісних пар до точок контакту колеса і рейки, (м);

g – прискорення вільного падіння, (м/с²);

V – швидкість руху екіпажів, (км/год);

$\rho_{хо3}$ – радіус кривизни колії, відповідний центру ваги кузова екіпажа, (м);

ρ_{xm1}, ρ_{xm2} – радіуси кривизни колії, відповідні центрам ваги першого зі

другого візків, (м).

Вертикальні й горизонтальні реакції ресорних комплектів визначаються зі співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} P_{1-4B} &= K_B \cdot \left(\Delta_{CT} - \Delta_{1-4B} \right) - F_{1-4B} \cdot \frac{\Delta_{CT} + \Delta_{1-4B}}{\Delta_{CT}} \cdot \text{sign} \Delta_{1-4B} \\ \text{при} \left(\Delta_{CT} + \Delta_{1-4B} \right) &> 0; \\ P_{1-4B} &= 0 \text{ при} \left(\Delta_{CT} + \Delta_{1-4B} \right) \leq 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.2)$$

$$Q_{1-2} = K_2 \cdot \Delta_{1-2\Gamma} + F_{1-2\Gamma} \cdot \Delta_{1-2\Gamma}, \quad (3.3)$$

де Δ_{1-4B} – вертикальні деформації ресорних комплектів візків, (м);

Δ_{CT} – статичне прогинання ресорного комплекту, (м);

K_B – вертикальна жорсткість ресорного комплекту, (Н/м);

K_Γ – горизонтальна жорсткість ресорних комплектів візків, (Н/м);

$\Delta_{1-2\Gamma}$ – горизонтальні поперечні деформації ресор візків, (Н/м);

F_B, F_Γ – відповідно сили сухого тертя, що розвиваються клиновим погашувачем коливань у вертикальній та горизонтальній площинах, (Н).

Вертикальні деформації ресорних комплектів візків визначаються з рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{1B} &= q_1 + q_2 \cdot l + (q_{13} - q_{15}) \cdot B - q_3 + d \cdot \sin(q_{17} - q_{13}) \\ \Delta_{2B} &= q_1 + q_2 \cdot l - (q_{13} - q_{15}) \cdot B - q_3 + d \cdot \sin(q_{17} - q_{13}) \\ \Delta_{3B} &= q_1 - q_2 \cdot l + (q_{14} - q_{16}) \cdot B - q_5 + d \cdot \sin(q_{17} - q_{14}) \\ \Delta_{4B} &= q_1 - q_2 \cdot l - (q_{14} - q_{16}) \cdot B - q_5 + d \cdot \sin(q_{17} - q_{14}) \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Горизонтальні деформації ресор візків можна визначити за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{1\Gamma} &= q_7 + q_8 \cdot l - q_9 \\ \Delta_{2\Gamma} &= q_7 - q_8 \cdot l - q_{11} \end{aligned} \right\}. \quad (3.5)$$

Вертикальні реакції на п'ятниках P_{T1} і P_{T2} за умови, що зазори в ковзунах не вибрані, є рівними:

$$\left. \begin{aligned} P_{T1} &= P_1 + P_2 + m_\delta (\ddot{q}_1 + l \ddot{q}_2 - g) \\ P_{T2} &= P_3 + P_4 + m_\delta (\ddot{q}_1 - l \ddot{q}_2 - g) \end{aligned} \right\}, \quad (3.6)$$

де m_δ – маса непідресореної балки, (кг).

Система диференціальних рівнянь (3.1), спільно з рівняннями силових і кінематичних зв'язків (3.2–3.6), описують просторові коливання екіпажа при параметричному й кінематичному збудженні.

Особливістю руху потягів на залізницях незагального користування, на відміну від магістрального, є широке вживання режимів виштовхування потягів локомотивом. Такий режим широко використовується як на металургійних підприємствах, так і на гірничодобувних; при цьому вагони можуть бути як у навантаженому, так і в порожньому стані.

Горизонтальну поперечну складову поздовжніх сил тяги під час руху складу по кривих ділянках колії або по горизонтальних нерівностях колії можна визначити за формулою:

$$Q_{zk} = \pm \left(\frac{F_{T1} \cdot l_{аз}}{\rho_{xo1}} + \frac{F_{T2} \cdot l_{аз}}{\rho_{xo2}} \right), \text{ (Н)}, \quad (3.7)$$

де F_{T1}, F_{T2} – поздовжні сили, які діють на 1–ше та 2–ге автозчеплення (нумерація здійснюється по ходу руху потягу) з боку сусідніх екіпажів, (Н);

$l_{аз}$ – половина відстані між осями автозчеплень розрахункового екіпажа, (Н);

ρ_{xo1} і ρ_{xo2} – радіуси кривизни колії, відповідні осям 1–ше та 2–ге автозчеплення, (м). Знак (+) у формулі (3.7) показує, що результуюча горизонтальна поперечна сила спрямована назовні кривої.

3.1.2 Вертикальні силові й кінематичні зв'язки підсистем «екіпаж» і «колія»

У загальному вигляді сили взаємодії підсистем «екіпаж» і «колія», з урахуванням прийнятих допущень, можна визначити як:

$$R_{z1-8} = R_{дн1-8} + R_{уд1-8} + R_{1-8}, \text{ (Н)}, \quad (3.8)$$

де $R_{дн1-8}$ – вертикальні динамічні сили, викликані дисбалансом і нерівномірністю прокату колеса, (Н);

$R_{уд1-8}$ – сили ударної дії колеса, що має повзун, або у стиках, (Н);

R_{1-8} – вертикальні реакції вигину рейки під колесами екіпажа, (Н).

Вертикальні динамічні сили, які викликані дисбалансом колеса, його овальністю й нерівномірністю зносу поверхні кочення, можна визначити з виразу:

$$R_{\text{дн1-8}} = m_{\text{кол}} \cdot g \cdot e_{g1-8} \cdot w_{\text{к}}^2, \text{ (Н)}, \quad (3.9)$$

де $m_{\text{кол}}$ – необресорена маса екіпажа на одне колесо, (кг);

g – прискорення вільного падіння, (9,81 м/с²);

$w_{\text{к}}$ – частота обертання колеса, (с⁻¹);

e_{g1-8} – величина дисбалансу, овальності й нерівномірності зносу колеса, (м).

Величину необресореної маси екіпажа, яка припадає на одне колесо, в роботі [59] рекомендовано визначати як

$$m_{\text{кол}} = 0,5 \cdot n \cdot m_{\text{к-1}}, \text{ (кг)},$$

де $m_{\text{к-1}}$ – маса одного колеса екіпажа, (кг);

n – частка участі маси колеса до кінця наростання сили в співударянні, $n=0,4$ [59].

Динамічні сили в контактній рейки й колеса з повзуном можна визначити на підставі теоретичних досліджень [186]. Одержані в [186] результати підтверджуються експериментальними роботами ВНІЗТу [187]:

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{уд1-8}} &= V_{\text{уд}} \cdot \sqrt{C_K \cdot \frac{m_{\text{коп}} \cdot m_{\text{р}}}{m_{\text{коп}} + m_{\text{р}}}} \text{ (М)} \\ \text{якщо } V_t &= 2\pi r_K, \\ R_{\text{уд1-8}} &= 0 \quad \text{якщо } V_t \neq 2\pi r_K \end{aligned} \right\}, \quad (3.10)$$

де $V_{\text{уд}}$ – швидкість співударяння колеса, що має повзун, і рейки, (м/с);

C_K – контактна жорсткість при зіткненні колеса та рейки [190] (рекомендовано $C_K = 10^8$ Н/м);

$m_{\text{р}}$ – маса рейко–шпальної решітки, яка залучається до коливань при співударянні колеса та рейки, (кг).

У розрахунковій схемі системи «екіпаж–колія» прийнято, що залізнична колія

у вертикальній площині має пружно–дисипативні властивості. Тоді вертикальні реакції рейки під колесами, за наявності в колії сил, які демпфуються, тертя й односторонній зв'язок колеса та рейки можна визначити:

$$\left. \begin{aligned} R_{1-8} &= C_B \cdot (\delta_{zct} + \delta_{z1-8}) + \beta_B \cdot (\delta_{z1-8}) \cdot \text{sign} \dot{\delta}_{z1-8} \quad \text{при } (\delta_{zct} + \delta_{z1-8}) > 0 \\ R_{1-8} &= 0 \quad \text{при } (\delta_{zct} + \delta_{z1-8}) < 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.11)$$

де C_B – приведена вертикальна жорсткість рейкової нитки під колесом (пЗ.1.4) (Н/м);

β_B – коеф. дисипації конструкції колії у вертикальній площині, $\left(\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}\right)$;

δ_{zct} – статичне прогинання рейки під колесом, (м);

δ_{y1-8} – динамічні деформації колії під колесами у вертикальній площині, (м).

Деформації колії у вертикальній площині визначаються таким виразом:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{z1} &= q_3 + q_4 \cdot a + q_{15} \cdot S_1(t) + \Delta r_1 - \eta_{\text{нер} \cdot z1} \\ \delta_{z2} &= q_3 + q_4 \cdot a - q_{15} \cdot S_2(t) + \Delta r_2 - \eta_{\text{нер} \cdot z1} \\ \delta_{z3} &= q_3 - q_4 \cdot a + q_{15} \cdot S_3(t) + \Delta r_3 - \eta_{\text{нер} \cdot z1} \\ \delta_{z4} &= q_5 - q_6 \cdot a - q_{15} \cdot S_5(t) + \Delta r_5 - \eta_{\text{нер} \cdot z3} \\ \delta_{z5} &= q_5 + q_6 \cdot a + q_{15} \cdot S_5(t) + \Delta r_5 - \eta_{\text{нер} \cdot z3} \\ \delta_{z6} &= q_5 + q_6 \cdot a - q_{16} \cdot S_6(t) + \Delta r_6 - \eta_{\text{нер} \cdot z3} \\ \delta_{z7} &= q_5 - q_6 \cdot a + q_{16} \cdot S_7(t) + \Delta r_7 - \eta_{\text{нер} \cdot z4} \\ \delta_{z8} &= q_5 - q_6 \cdot a - q_{16} \cdot S_8(t) + \Delta r_8 - \eta_{\text{нер} \cdot z4} \end{aligned} \right\}, \quad (\text{м}) \quad (3.12)$$

де $S_{1-8}(t)$ – відстані від середини колісних пар до точок передачі вертикальних навантажень від коліс на рейки, (м);

Δr_{1-8} – зміна радіуса в точці контакту колеса з рейкою відносно радіуса середнього кола кочення, (м);

$\eta_{\text{нер} \cdot z1-4}$ – вертикальні геометричні нерівності колії під кожною колісною парою, (м).

3.1.3 Силіві й кінематичні зв'язки підсистеми «екіпаж і колія» в горизонтальній площині

Під час руху колісної пари по колії на неї діє, в загальному випадку, напрямна

сила N_n , сумарна сила тертя в поперечному напрямку $N_{тр}$ і пара поздовжніх сил тертя з моментом M_n [145].

Напрямна сила N_n виникає при силовому контакті гребеня колеса з робочою гранню головки рейки. Графік залежності цієї сили від поперечних переміщень колісної пари відносно рейкової колії наведений на рис. 3.2. Аналітично цю залежність можна записати таким чином:

$$N_n = \begin{cases} -C_r (y + \Delta_0) & \text{при } -\infty < y < -\Delta_0 \\ 0 & \text{при } -\Delta_0 \leq y \leq \Delta_0 \\ -C_r (y - \Delta_0) & \text{при } \Delta_0 < y < \infty \end{cases}, \quad (3.13)$$

де Δ_0 – зазори між робочими гранями гребенів коліс і робочими гранями головок рейок;

y – переміщення колісної пари у горизонтально-поперічній площині;

C_r – бічна приведена жорсткість рейки при її горизонтальному вигині та крученні.

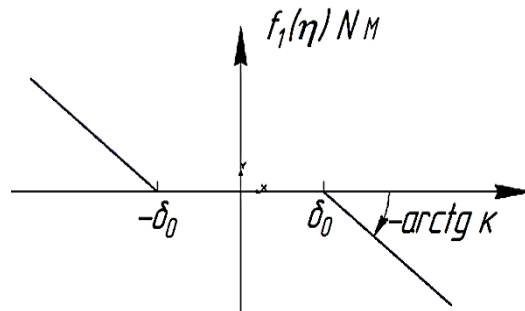


Рис. 3.2. Залежність нелинійної поновлювальної напрямної сили від зсуву колісної пари відносно колії

Функції, що пов'язують поперечні сили тертя $N_{тр}$ і моменти поздовжніх сил тертя M_n , наведені на рис. 3.3. Аналітично ці графіки можна записати як [145]

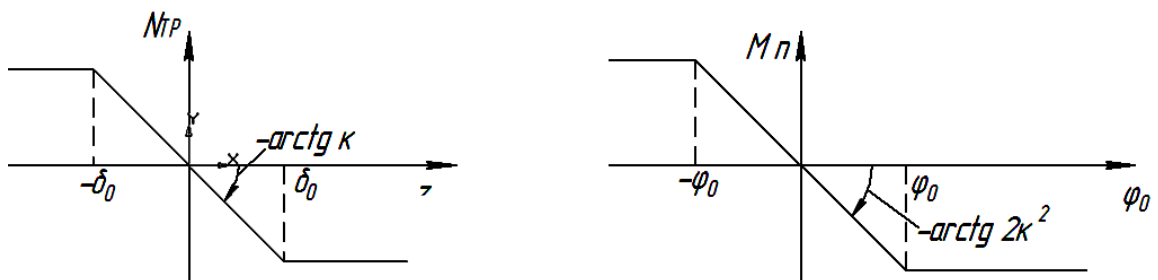


Рис. 3.3. Залежність поперечних складових сил тертя і моментів поздовжніх сил від переміщень колісної пари

$$N_{\text{TP}} = \begin{cases} (R_i + R_{i+1}) \cdot f, & \text{при } -\infty < \frac{\dot{y}}{V} + \theta \leq \frac{(R_i + R_{i+1}) \cdot f}{2R} \\ -2R_i \left(\frac{\dot{y}}{V} + \theta \right), & \text{при } \left| \frac{\dot{y}}{V} + \theta \right| \leq \frac{(R_i + R_{i+1}) \cdot f}{2R} \\ -(R_i + R_{i+1}) \cdot f, & \text{при } \frac{(R_i + R_{i+1}) \cdot f}{2R} \leq \frac{\dot{y}}{V} + \theta < \infty \end{cases}; \quad (3.14)$$

$$M_{\text{II}} = \begin{cases} (R_i + R_{i+1}) \cdot f \cdot S_n & \text{при } -\infty < \left[S_n \frac{\dot{\theta}}{V} - \frac{(\Delta r_1 - \Delta r_2)}{r_K} \right] < \frac{(R_i + R_{i+1}) \cdot f \cdot S_n}{2k} \\ -2kS_n \left[S_n \frac{\dot{\theta}}{V} - \frac{(\Delta r_1 - \Delta r_2)}{r_K} \right] & \text{при } \left[S_n \frac{\dot{\theta}}{V} - \frac{(\Delta r_1 - \Delta r_2)}{r_K} \right] \leq \frac{(R_i + R_{i+1}) \cdot f \cdot S_n}{2k} \\ -(R_i + R_{i+1}) \cdot f \cdot S_n & \text{при } \frac{(R_i + R_{i+1}) \cdot f \cdot S_n}{2k} \leq \left[S_n \frac{\dot{\theta}}{V} - \frac{(\Delta r_1 - \Delta r_2)}{r_K} \right] < \infty \end{cases}, \quad (3.15)$$

де R_i, R_{i+1} – вертикальні навантаження, прикладені до коліс колісної пари, (Н);

θ – кутове переміщення відносно осі z ;

f – коефіцієнт перехресного тертя ковзання.

Решту позначень взято з попередніх формул.

У загальному вигляді горизонтальні поперечні сили, які діють на кожен колісну пару, з урахуванням викладеного вище, можна представити як:

$$N_{\Gamma} = N_{\text{TP}i} + N_{\text{ни}} + N_{\text{поді}} + N_{\text{hi}}, \quad (\text{H}), \quad (3.16)$$

де $N_{\text{TP}i}$ – поперечні складові сил тертя коліс по рейках;

$N_{\text{ни}}$ – напрямні сили;

$N_{\text{поді}}$ – горизонтальні складові вертикальних навантажень на колеса, викликані нахилом рейок;

N_{hi} – горизонтальні складові вертикальних навантажень на колеса, викликані підвищенням рейки.

Поперечні переміщення колісних пар u_{ni} , з урахуванням характеру кінематичного зв'язку підсистеми «екіпаж–колія», можна визначити через узагальнені координати:

$$\left. \begin{aligned} y_{n1} &= q_9 + q_{10} \cdot a \\ y_{n2} &= q_9 - q_{10} \cdot a \\ y_{n3} &= q_{11} + q_{12} \cdot a \\ y_{n4} &= q_{11} - q_{12} \cdot a \end{aligned} \right\}, \text{ (м)}. \quad (3.17)$$

Напрявні сили N_{ni} (3.13) для кожної колісної пари, з урахуванням розсіювання енергії в колії в горизонтальній площині, визначатимуться виразом:

$$N_{n1-4} = C_r \cdot \delta_{y1-4} + \beta_2 \cdot (\delta_{y1-4}) \cdot \text{sign} \dot{\delta}_{y1-4}, \text{ (Н)} \quad (3.18)$$

де C_r – бічна приведена жорсткість рейкової нитки під колесом, (Н/м);

β_2 – коеф. дисипації конструкції колії в горизонтальній площині, $\left(\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}\right)$;

δ_{y1-4} – величина відтискання головки рейки під i -ю колісною парою, (м).

З урахуванням формули (3.13), величини відтискання головок рейок під кожною колісною парою визначаються як:

$$\delta_{y1-4} = \begin{cases} y_{n1-4} + \Delta_{01-4} & \text{при } -\infty < y_{n1-4} \leq -\Delta_{01-4} \\ 0 & \text{при } |y_{n1-4}| < \Delta_{01-4} \\ y_{n1-4} - \Delta_{01-4} & \text{при } \Delta_{01-4} \leq y_{n1-4} < \infty \end{cases}. \quad (3.19)$$

Тут Δ_{01-4} – половина величини сумарних зазорів між робочими гранями головок рейок і гребенів коліс. З урахуванням можливої зміни ширини колії в місці знаходження кожної колісної пари, величини Δ_{01-i} будуть рівними:

$$\Delta_{01-4} = S_{01-4} - t_n, \quad (3.20)$$

де S_{01-4} – ширина колії в місці знаходження кожної пари, (м);

t_n – ширина колісної пари між робочими гранями гребенів коліс у розрахунковій площині, (м).

3.1.4 Приведена вертикальна жорсткість рейкової нитки

Вертикальні сили взаємодії підсистем «екіпаж» і «колія», з урахуванням прийнятих допущень про пружно–дисипативні властивості колії, визначаються за формулою (3.11):

$$R_{1-8} = C_B \cdot (\delta_{zct} + \delta_{z1-8}) + \beta_B \cdot (\delta_{z1-8}) \cdot \text{sign} \dot{\delta}_{z1-8}.$$

Перший доданок у правій частині цієї формули є пружною складовою, а другий – дисипативною складовою вертикальних сил взаємодії.

Розрахунки колії та численні експериментальні роботи [56, 59, 106, 124] показали, що осідання опор, які знаходяться на відстані 2,5 м від точки дії вертикальної сили, складають величини третього порядку малості, порівняно з осіданнями опор, які знаходяться ближче ніж на відстані 0,5 м від цієї точки. Тому рейкову нитку розглядаємо як дев'ятипрогонову балку на десяти пружних опорах (рис. 3.4). Відстань X_{pi} від опори 6 до точки прикладення сили R_{zni} кожної колісної пари є змінною й визначається для прийнятої розрахункової схеми співвідношенням:

$$X_p = \ell_{\text{ш}} \left(1 - \left\{ \frac{x_{ni}}{\ell_{\text{ш}}} \right\} \right), \quad (3.21)$$

де $\ell_{\text{ш}}$ – відстань між опорами, (м);

$\left\{ \frac{x_{ni}}{\ell_{\text{ш}}} \right\}$ – дробова частина співвідношення $\frac{x_{ni}}{\ell_{\text{ш}}}$;

x_{ni} – поточна абсциса кожної пари, (м).

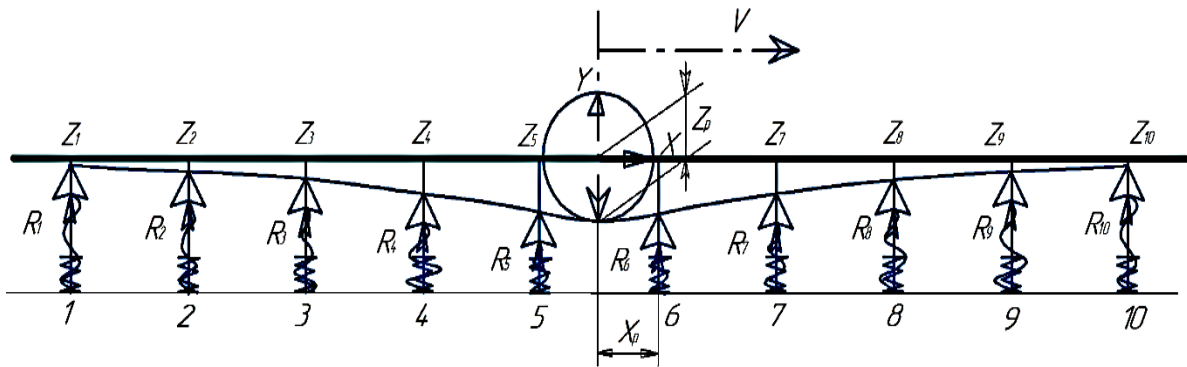


Рис. 3.4. Розрахункова схема рейкової нитки на пружних опорах під дією сили, що рухається: z_i – прогинання рейки на опорах; z_p – прогинання рейки під колесом

Змінна величина приведеної вертикальної жорсткості рейкової нитки в точці контакту колеса і рейки, з урахуванням прийнятих позначень, визначатиметься як:

$$C_{\text{вi}} = \frac{R_{zni}}{z_{pi}}, \quad (\text{Н/м}), \quad (3.22)$$

де z_{pi} – прогинання рейки під колесом.

Для визначення величини z_{pi} використовується методика, показана в [140].

Величину, зворотну до жорсткості, прийнято називати пружністю або податливістю. Пружністю D_e називається просідання балки або опори під дією одиничної сили, яка визначається за формулою:

$$D_B = \frac{1}{c_B} = \frac{z_p}{R_{zn}}.$$

При $R_{zn} = 1$ цей вираз набуде вигляду:

$$D_B = \frac{1}{c_B} = z_{одр}, \quad (3.23)$$

де $z_{одр}$ – прогинання рейкової нитки під дією одиничної сили $R_{одzn} = 1$.

Враховуючи, що моменти M_i залежать від R_{zn} лінійно, опорні моменти під дією одиничної сили можна визначити у матричному вигляді [140]:

$$M_{одi} = \frac{\tilde{\Delta}^j}{\Delta}. \quad (3.24)$$

Обчисливши за цією формулою значення $M_{едi}$ для всіх десяти опор, можна визначити пружні осідання $z_{одi}$ цих опор під дією сили $R_{zn} = 1$; отже, одиничні реакції опор:

$$R_{одi} = z_{одi} \cdot c_z. \quad (3.25)$$

Шукану величину прогинання рейкової нитки в точці контакту колеса і рейки під дією одиничної сили, знаючи опорні одиничні моменти $M_{одi}$ і одиничні опорні реакції, $z_{одi}$ визначимо як [188]:

$$z_{одр} = z_5 \cdot \frac{x_p}{l_{ш}} + z_6 \cdot \frac{(\ell_{ш} - x_p)}{l_{ш}} + \frac{(\ell_{ш} - x_p)^2 \cdot x_p^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot \ell_{ш}}. \quad (3.26)$$

Шукана приведена вертикальна жорсткість колії в точці контакту колеса і рейки дорівнює:

$$c_B = \frac{1}{z_{одр}}. \quad (3.27)$$

Пропонована методика визначення приведеної вертикальної жорсткості рейкової нитки C_B в точці контакту колеса і рейки дозволяє враховувати не тільки

пружні й геометричні характеристики рейок, але й жорсткості опор C_z , а також відстані між ними $\ell_{ш}$. Величина C_{vi} є змінною в часі для кожного колеса й у будь-який момент часу t різна для різних коліс екіпажа.

Ці формули були одержані з використанням допущень $c_z = \text{const}$ і $\ell_{ш} = \text{const}$. Проте в реальних умовах ці величини мають випадкові властивості. Крім того, між рейкою й опорами (шпалами) можуть існувати люфти λ , що також мають статистичні властивості.

Випадкові характеристики приведеної вертикальної жорсткості C_{vi} впливають на роботу системи «екіпаж–колія» у двох напрямках:

- будучи збурювальними чинниками для цієї системи, вони приводять до безперервної зміни сил взаємодії підсистем «екіпаж» і «колія»;
- зміни цих параметрів викликають зміну роботи підсистеми «колія» під дією постійної сили.

Для урахування випадкових властивостей параметрів c , $\ell_{ш}$, і λ було використано метод Монте–Карло — метод статистичних випробувань. Суть методу полягає у використанні зв'язку між характеристиками вірогідності й аналітичним розв'язком задачі [189].

Оскільки між податливістю опори $\frac{1}{c}$, відстанню між осями шпал $\ell_{ш}$ і люфтами λ , з одного боку, і пружними прогинаннями опор y_i – з іншого існує пряма залежність, перехід до статистичної оцінки можна здійснити, використовуючи нормальний закон розподілу пружних одиничних прогинань $z_{од4}$, $z_{од5}$ і $z_{од6}$ у рівнянні (3.26). Формула, яка забезпечує вірогідність неперевищення максимальних значень $z_{од i}$, має вигляд:

$$z_{од i}^{\max} = z_{од i}^{\text{cp}} + 2,5\sqrt{D_z}, \quad (3.28)$$

де D_z – дисперсія розрахункових величин $z_{од i}$.

Диференціюючи в чисельному вигляді систему рівнянь (3.23) за допомогою вбудованої функції програмної системи *Mathcad* у кожній розрахунковій точці колії під час руху j -го колеса екіпажа, можна легко визначити швидкості вертикальних деформацій i -х рейкових опор, які в даний момент часу беруть участь у взаємодії екіпажа і колії:

$$\dot{\delta}_{\text{дин } z_i j} = \frac{dz_{ij}}{dt}.$$

Тоді приведений до точки контакту j -го колеса і рейки коефіцієнт дисипації колії у вертикальній площині можна одержати, використовуючи результати досліджень [190]

$$\beta_{zj} = \sum_1^{n_{ti}} \beta_{\text{еквВ}} \cdot \text{sign } \dot{\delta}_{\text{дин } z_i j},$$

де n_{ti} – кількість рейкових опор у момент часу t , у яких під час руху j -го колеса екіпажа швидкість вертикальних деформацій є відмінною від нуля;

$\beta_{\text{еквВ}}$ – еквівалентний коефіцієнт дисипації рейкових опор у вертикальній площині для заданих умов експлуатації колії;

$\text{sign } \dot{\delta}_{\text{дин } z_i}$ – знак швидкості деформації i -ї опори при вертикальному впливі j -го колеса екіпажа.

3.1.5 Приведена горизонтальна жорсткість рейкової нитки

Напрявні сили N_{ni} , які є складовими горизонтальних сил взаємодії підсистем «екіпаж» і «колія», прийнято визначати як (формули (3.13) і (3.17))

$$N_{ni} = C_y \delta_{yi} + \beta_r (\delta_{yi}) \cdot \text{sign } \dot{\delta}_{yi},$$

де δ_{yi} – бічні пружні відтискання головки рейкової нитки під колісними парами, (м);

C_y – приведена горизонтальна жорсткість рейкової нитки, (Н/м);

β_r – коефіцієнт дисипації колії в горизонтальній площині, (Н·с/м).

Застосовуючи принципи, зазначені в попередньому розділі (формули (3.22)–(3.26)), величину C_y можна визначити:

$$C_{yi} = \frac{1}{Y_{\text{пр од } i}}, \quad (3.29)$$

де $Y_{\text{пр од } i}$ – бічне відтискання головки рейки під дією одиничної горизонтальної поперечної сили $N_{\text{од } i}$.

Під дією горизонтальної поперечної сили $N_{\text{од}}$ відбувається вигин рейки в горизонтальній площині та її кручення. Тоді величина $Y_{\text{од } ri}$ буде дорівнювати (рис. 3.5):

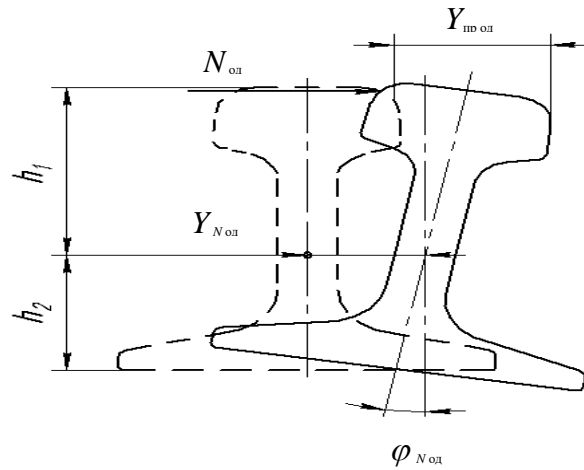


Рис. 3.5. Розрахункова схема для визначення бічного відтискання головки рейки

$$Y_{\text{пр од } i} = Y_{\text{Н од } i} + \varphi_{\text{Н од } i} \cdot h_1, \tag{3.30}$$

де $Y_{\text{Н од } i}$ – бічне відтискання центру кручення рейки в результаті її горизонтального вигину;

$\varphi_{\text{Н од}}$ – кут закручування рейки в точці прикладання горизонтальної сили $N_{\text{од } i}$;

h_1 – відстань від поверхні кочення головки рейки до центру кручення рейки.

Величину бічного відтискання центру кручення рейки можна визначити, розглядаючи горизонтальний вигин рейки як вигин балки на пружних опорах, аналогічно до вертикального вигину рейки. Величини $Y_{\text{Н од } i}$ можна визначити (формула (3.28)) наступним чином:

$$Y_{\text{Н од } i} = Y_{\text{од } 5} \cdot \frac{X_p}{\ell_{\text{ш}}} + Y_{\text{од } 6} \left[\frac{(\ell_{\text{ш}} - y_p)}{\ell_{\text{ш}}} + \frac{(\ell_{\text{ш}} - y_p)^2 y_p^2}{3 \cdot E \cdot J_y \ell_{\text{ш}}} \right], \tag{3.31}$$

де $Y_{\text{од } 5}$, $Y_{\text{од } 6}$, – горизонтальні деформації пружних опор (рис. 3.6);

J_y – момент інерції рейки відносно вертикальної осі.

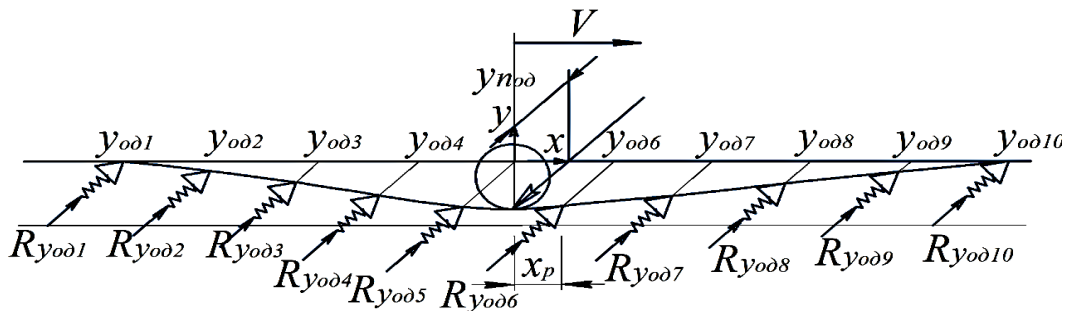


Рис. 3.6. Розрахункова схема рейкової нитки як балки на пружних опорах під дією горизонтальної сили, що рухається

Згинальні моменти в рейці в перерізах над опорами визначаються за формулою Крамера, аналогічною до формулі (3.26) [140]:

$$M_{\text{од } y j} = \frac{\tilde{\Delta}_{yj}}{\Delta_y}, \quad (3.32)$$

де $\tilde{\Delta}_{yj}$ – визначник матриці впливу гориальних сил, відповідний опорі j ;

Δ_y – визначник матриці горизонтальної жорсткості рейкової нитки.

Для визначення кута закручування рейки $\varphi_{N_{\text{од}}}$ в точці прикладання горизонтальної сили $N_{\text{од } i}$ потрібно скористатись методом розрахунку рейки на кручення як балки на багатьох пружних опорах, наведеними в [140].

Кути закручування рейки на опорах будуть дорівнювати

$$\varphi_{\text{оп } 4} = \frac{M_3}{p \cdot \kappa^2} \left(x_{\text{кл}} - \frac{sh \kappa x_{\text{кл}}}{\kappa} \right); \quad (3.33)$$

$$\varphi_{\text{оп } 5} = \frac{M_4}{p \cdot \kappa^2} \ell_{\text{ш}} + \frac{M_3}{p \cdot \kappa^2} x_{\text{кл}} - \left(\frac{M_4}{p \cdot \kappa^2} - \frac{M_3}{p \cdot \kappa^2} \right) \frac{sh \kappa \ell_{\text{ш}}}{\kappa} + \frac{M_3}{p \cdot \kappa^2} \frac{sh \kappa (\ell_{\text{ш}} - x_{\text{кл}})}{\kappa}; \quad (3.34)$$

$$\varphi_{\text{оп } 6} = \frac{M_6}{p \cdot \kappa^2} \ell_{\text{ш}} + \frac{M_7}{p \cdot \kappa^2} x_{\text{кп}} - \left(\frac{M_6}{p \cdot \kappa^2} - \frac{M_7}{p \cdot \kappa^2} \right) \frac{sh \kappa \ell_{\text{ш}}}{\kappa} + \frac{M_7}{p \cdot \kappa^2} \frac{sh \kappa (\ell_{\text{ш}} - x_{\text{кп}})}{\kappa}; \quad (3.35)$$

$$\varphi_{\text{оп } 7} = \frac{M_7}{p \cdot \kappa^2} \left(x_{\text{кп}} - \frac{sh \kappa x_{\text{кп}}}{\kappa} \right), \quad (3.36)$$

де $x_{\text{кл}}$ – відстань від опори 4 до точки, в якій кут закручування рейки $\varphi_{(x)}$ і його похідна дорівнює нулю;

$x_{\text{кп}}$ – відстань від опори 7 до точки, в якій кут закручування рейки $\varphi_{(x)}$ і його похідна дорівнює нулю.

$$x_{\text{кп}} = (\ell_{\text{ш}} - x_p) \ln \left(A_{\text{II}} \pm \sqrt{A_{\text{II}}^2 - 1} \right); \quad (3.37)$$

$$A_{\text{II}} = \frac{M_{5\Pi}}{M_7} \left(ch \kappa x_p + 1 \right) - ch \kappa x_p; \quad (3.38)$$

$$x_{\text{кл}} = x_p \ln \left(A_{\text{II}} - \sqrt{A_{\text{II}}^2 - 1} \right); \quad (3.39)$$

$$A_{\text{л}} = \frac{M_{5\text{л}}}{M_3} \left[ch\kappa(\ell_{\text{ш}} - x_p) + 1 \right] - ch\kappa(\ell_{\text{ш}} - x_p). \quad (3.40)$$

Маючи рівняння (3.33)–(3.40), можна обчислити шуканий кут $\varphi_{N_{\text{од}}}$ в точці прикладання горизонтальної поперечної одиничної сили $N_{\text{од}} = 1$

$$\varphi_{N_{\text{ед}}} = \varphi_{\text{оп5}} \frac{x_p}{\ell_{\text{ш}}} + \varphi_{\text{оп6}} \frac{(\ell_{\text{ш}} - x_p)}{\ell_{\text{ш}}} + \frac{M_5}{\rho\kappa^2} \frac{(\ell_{\text{ш}} - x_p)(x_p)}{\ell_{\text{ш}}}, \quad (3.41)$$

де $M_5 = M_{5\text{п}} + M_{5\text{л}} = N_{\text{од}} \cdot h = h$.

Перехід до статистичної оцінки величини приведеної горизонтальної жорсткості рейкової нитки можна виконати за допомогою рівняння (формула (3.26).

Переміщення головки рейки в перерізах над опорами, що беруть участь у взаємодії екіпажа й колії в горизонтальній площині, можна одержати, знаючи горизонтальні переміщення опор і кути закручування рейки над опорами (3.33)–(3.36):

$$y_{\text{пр}i} = y_i + \varphi_i \cdot h_1, \quad (3.42)$$

де y_i – переміщення підшви рейки під дією горизонтальної поперечної сили

N_{Hj} в перерізах над i -ми опорами;

φ_i – кути закручування рейки в перерізах над опорами;

h_1 – відстані від поверхні кочення до центру кручення рейки.

Розв'язок рівняння (3.42) в програмній системі *Mathcad* зручно виконати в матричній формі:

$$Y_{\text{пр}} = Y + (\Gamma) \cdot h_1,$$

де $Y_{\text{пр}}$ – матриця–стовпець шуканих переміщень рейки над опорами;

Y – матриця–стовпець переміщення підшви рейки над опорами;

Γ – матриця–стовпець кутів закручування рейки над опорами.

Диференціюючи в чисельному вигляді елементи матриці–стовпця $Y_{\text{пр}}$ за допомогою функції системи *Mathcad* за часом, у процесі руху екіпажа, визначаються швидкості горизонтальних деформацій $\dot{\delta}_{\text{дин}Yij}$ та i -х рейкових опор, що беруть участь

у формуванні напрямних сил $N_{\mu j}$ – під час руху по колії колісної пари.

Приведений до точки контакту гребеня колеса j -ї колісної пари і бічної грані головки рейки коефіцієнт дисипації колії в горизонтальній площині можна визначити як:

$$\beta_{yj} = \sum_1^{n_{ti}} \beta_{\text{екв } y} \cdot \text{sign } \dot{\delta}_{\text{дин } y \ i \ j}, \quad (3.43)$$

де n_{ti} – кількість рейкових опор у момент часу t , у яких під час руху j -ої колісної пари швидкість горизонтальних деформацій головки рейки є відмінною від нуля;

$\beta_{\text{екв } y}$ – еквівалентний коефіцієнт дисипації рейкових опор у горизонтальній площині для заданих умов в експлуатації;

$\text{sign } \dot{\delta}_{\text{дин } i \ y}$ – знак швидкості деформації i -ї опори при горизонтальному впливі j -ї колісної пари.

Горизонтальна приведена до точки контакту колеса і рейки жорсткість колії та горизонтальний приведений до тієї ж точки коефіцієнт дисипації, як і аналогічні параметри у вертикальній площині, приймаються в математичній моделі підсистеми «колія» величинами змінними, залежними від часу, місцеположення колісної пари відносно опор та інших характеристик «колії» й «екіпажа», розгляд яких викладено вище.

3.2 Алгоритм і програма розрахунків математичної моделі динамічної системи «екіпаж–колія»

Структурно комп'ютерна програма, виконана в системі *Mathcad*, складається з п'ятнадцяти блоків (рис. 3.7).

Блок 1 – «Формування початкових даних» – організаційно складається з чотирьох масивів параметрів. До першого масиву включено характеристики потяга, до другого – режим його руху. У третьому – прийнято характеристики колії, включаючи місце положення й розміри нерівностей.

Четвертий масив складається з характеристик розрахункового екіпажа. Таким

чином, чотири масиви першого блоку складаються з 67 значень. У першому блоці окремим елементом задається крок розрахунку у вигляді інтервалу часу.

Цей параметр визначає всі подальші розрахунки, включаючи розрахунки геометрії колії, значення параметричних джерел горизонтальних і вертикальних коливань екіпажа й колії.

У блоці 2 алгоритми розрахунків визначають положення характерних точок екіпажа відносно початку відліку осі x . Приймається, що в початковий момент часу $t=0$ початок осі x співпадає з віссю другого за ходом руху автозчеплення.

Блок 3 виконує функції визначення положення кожної осі екіпажа відносно осей найближчих шпал, що необхідно в подальшому для розрахунків значень приведених до точок контактів коліс і рейок жорсткостей та коефіцієнтів демпфірування.

Розрахунок поздовжніх сил у потязі, що виникають під час його руху в режимі тяги, виконується у блоці 4. У блоці 5 виконується розрахунок геометричних характеристик колії, відповідних точкам розміщення на колії колісних пар, центрів важкості кузова і візка, осей автозчеплень. Виконується перевірка розташування цих точок відносно початку перехідної кривої, початку кругової кривої, початку і закінчення вертикальних і горизонтальних нерівностей колії. Значення похідних ординат горизонтальних та аплікват вертикальних нерівностей використовуються у блоці 11. У блоках 6, 7, 8 і 9 визначаються приведена до точки контакту колеса і рейки вертикальна жорсткість колії та приведений до цієї точки коефіцієнт розсіювання енергії у вертикальній площині, виконується перехід до статистичної оцінки значень. Ці розрахунки виконуються для кожного колеса екіпажа. Внутрішні сили, що виникають у підсистемі «екіпаж», розраховуються у блоці 10 з урахуванням набутих у блоці 4 значень поздовжніх сил, значень геометричних характеристик колії (блок 5) для характерних точок екіпажа.

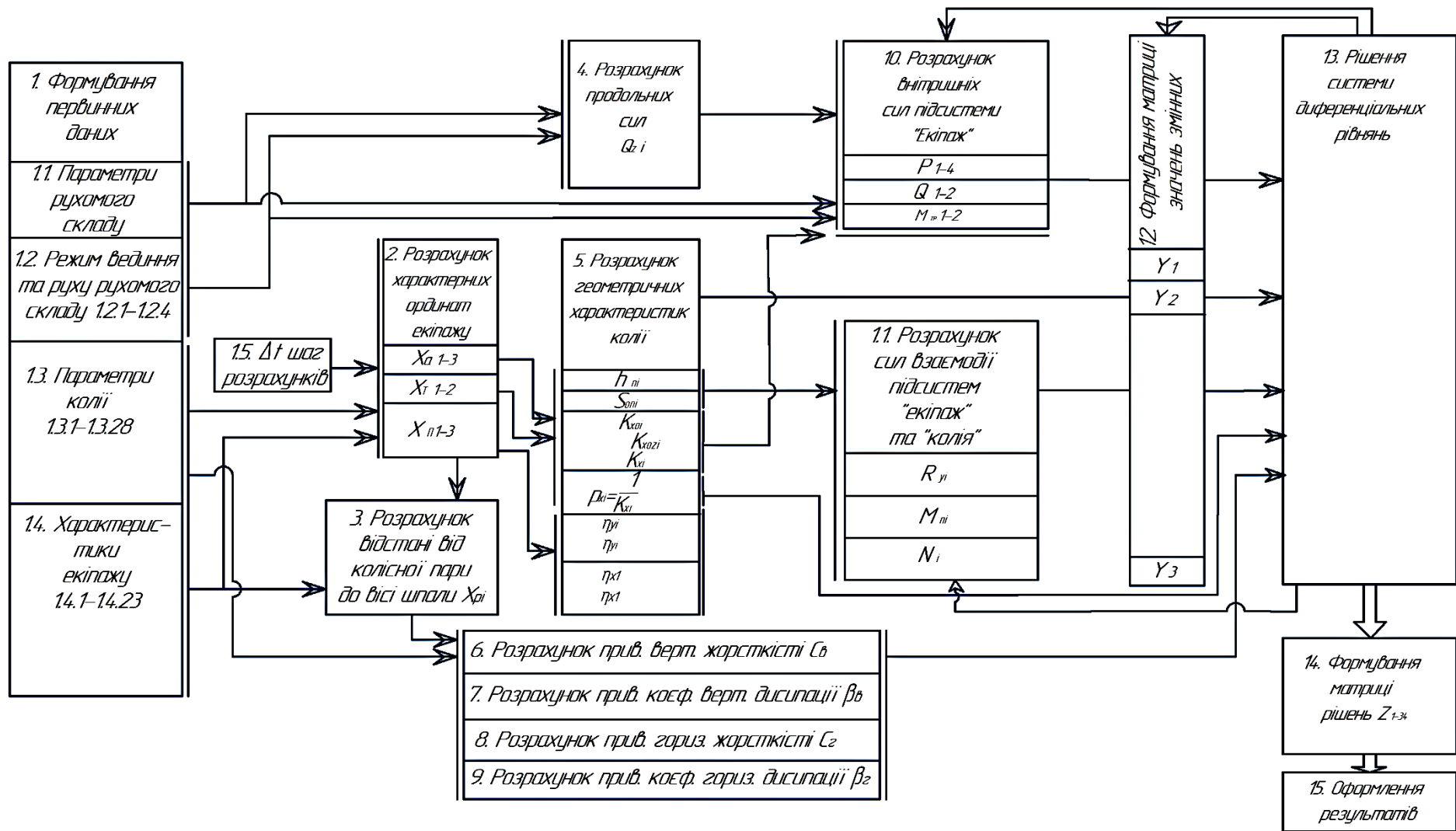


Рис. 3.7. Алгоритм програми розрахунків сил взаємодії екіпажа й колії

У блоці 11 виконується розрахунок силових і кінематичних зв'язків підсистем «екіпаж» і «колія». Вертикальні сили взаємодії екіпажа й колії можуть визначатися з урахуванням дисбалансу коліс і з урахуванням ударних сил під час руху колеса з повзуном.

Наявність коліс в екіпажі з такими дефектами задається в масиві 3 блоку 1 початкових даних. Вбудовані в середовище системи *Mathcad* функції розв'язання диференціальних рівнянь вирішують систему, приведену до нормальної форми Коші $\dot{y}(t) = F(t, y)$. Оскільки будь-яка система n диференціальних рівнянь приводиться до еквівалентної системи $2n$ рівнянь першого порядку, у програмі введено нові змінні y_i ($i=1-34$) таким чином:

$$y_1=q_1, y_2=q_2, y_3=q_3 \dots\dots\dots y_{17}=q_{17}; \quad (3.44)$$

$$\text{тоді} \quad \ddot{q}_1 = \dot{y}_{18}, \quad \ddot{q}_2 = \dot{y}_{19}, \quad \ddot{q}_3 = \dot{y}_{20} \dots\dots \ddot{q}_{17} = \dot{y}_{34}. \quad (3.45)$$

Приведення системи рівнянь (3.1) до нормальної форми виконано з використанням системи *Mathcad* і з застосуванням матеріалів, наведених у блоках 10 і 11 алгоритму розрахунків.

Розв'язок системи в нормальній формі виконується у блоці 13 інтеграцією за методом Рунге–Кутта з фіксованим кроком.

Для цього використовується функція *rkfixed* (Y_0, t_n, t_k, n, F), вбудована в *Mathcad*, де вектор Y_0 містить початкові умови (блок 12), t_n і t_k визначають початкове й кінцеве значення змінної інтеграції,

n – фіксоване число кроків,

F – символічний вектор, який містить праві частини рівнянь.

Результат роботи блоку 13 – матриця Z , яка має розміри $(5 \cdot 10^4 \div 10 \cdot 10^4) \times 35$. Перший стовпець цієї матриці містить координати вузлів сітки – у даному випадку – час, з другого по тридцять п'ятий стовпець подано значення рішень

$$y_i \quad (i=1-17).$$

Вбудовані функції системи *Mathcad* дозволяють ілюструвати одержані результати у вигляді графіків; при цьому можна масштаб осі ординат задавати автоматично або встановлювати його довільно.

Також система дозволяє в автоматичному режимі вибирати максимальні й мінімальні значення результатів, як протягом всієї розрахункової ділянки, так і на певному його відрізку.

3.3 Аналіз розрахунків сил взаємодії колії та рухомого складу при застосуванні проміжного скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш

Для виявлення особливостей дії на колію спеціального та спеціалізованого рухомого складу при застосуванні в коліях незагального користування скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш були виконані багатоваріантні розрахунки з використанням удосконаленої математичної моделі просторової динамічної системи «екіпаж–колія» (підрозділи 3.1 та 3.2). З метою аналізу найширшого спектру експлуатаційних умов залізниць незагального користування як розрахункові було взято такі типи рухомого складу:

- піввагон типу 12–1000; – думпкар ВС–85; – думпкар 6–ВС–60;
- чавуновозну платформу 70 т; –шлаковоз 16,0 м³;
- візки для виливниць І–120–5500; – чавуновоз 140 т.

Вплив на колію локомотивів залізниць незагального користування не розглядався, оскільки величини осьових навантажень не перевищують осьових навантажень зазначеного рухомого складу. Характеристики вказаних вище вагонів, які було взято до розрахунків, наведені в Додатку А.1. Швидкості руху задавалися для спеціальних вагонів — 5–10 км/год, для спеціалізованих— до 20 км/год, що відповідає встановленим швидкостям руху на залізницях незагального користування. Розрахункова схема ділянки колії складалася із прямої довжиною від 40 до 80 м, кругової кривої – від 50 до 80 метрів. Довжина перехідних кривих бралася за нормами, відповідно [11], від 0 до 60 метрів. Таким чином, загальна розрахункова довжина колії складала 100 – 150 метрів.

Як змінні в розрахунках було взято такі параметри колії:

- радіуси кругових кривих – 350–600 метрів;
- довжина вертикальних нерівностей – від 2 м до 6 м;
- глибина вертикальних нерівностей – від 0,005 м до 0,006 м;

- довжина горизонтальних нерівностей – від 2 м до 6 м;
- стріла вигину горизонтальних нерівностей – від 0,005 м до 0,05 м;
- термін експлуатації колії – від 0 до 10 років.

Місце розташування вертикальних та горизонтальних нерівностей за довжиною розрахункової ділянки змінювалось, і нерівності знаходились у прямій, перехідній та круговій кривій.

Розрахункові параметри рейкової колії наведені в Додатку А.2.

Вертикальна й горизонтальна жорсткості рейкових опор приймалися залежно від типу скріплення та терміну експлуатації колії згідно з результатами, які викладені у розділі 2-му роботи.

Таким чином, були виконані розрахунки більш ніж 150 варіантів взаємодії різних типів рухомого складу й колії з різними характеристиками.

Результати розрахунків у вигляді графіків змін вертикальних та горизонтальних поперечних сил наведені в Додатку В.1. Нижче виконано короткий аналіз отриманих результатів.

Вертикальні сили. Оскільки величини вертикальних сил дії на колію різних типів спеціальних та спеціалізованих вагонів можуть відрізнятися більш ніж удвічі й ці сили безперервно змінюються під час руху екіпажа, для порівняльного аналізу було використано не абсолютні значення, а значення коефіцієнтів динаміки:

$$K_y = \frac{P_{\text{дин}}}{P_{\text{ст}}}, \quad (3.46)$$

де $P_{\text{дин}}$ – динамічні сили дії від колеса на рейки;

$P_{\text{ст}}$ – статичне значення дії від колеса на рейки.

На рис. 3.8 наведені одержані графіки змін вертикальних сил, які діють від колеса на рейку під час руху чавуновоза 50 т (осьове навантаження – 20,1 т) зі швидкістю 5 км/год. по прямій ділянці при застосуванні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш. На графіках вісь абсцис – пройдена відстань, вісь ординат – сили дії (Н). Застосування скріплень типу ТРЕП–Ш знижує рівень діючих сил на 0,5 %. При цьому колія не мала нерівностей.

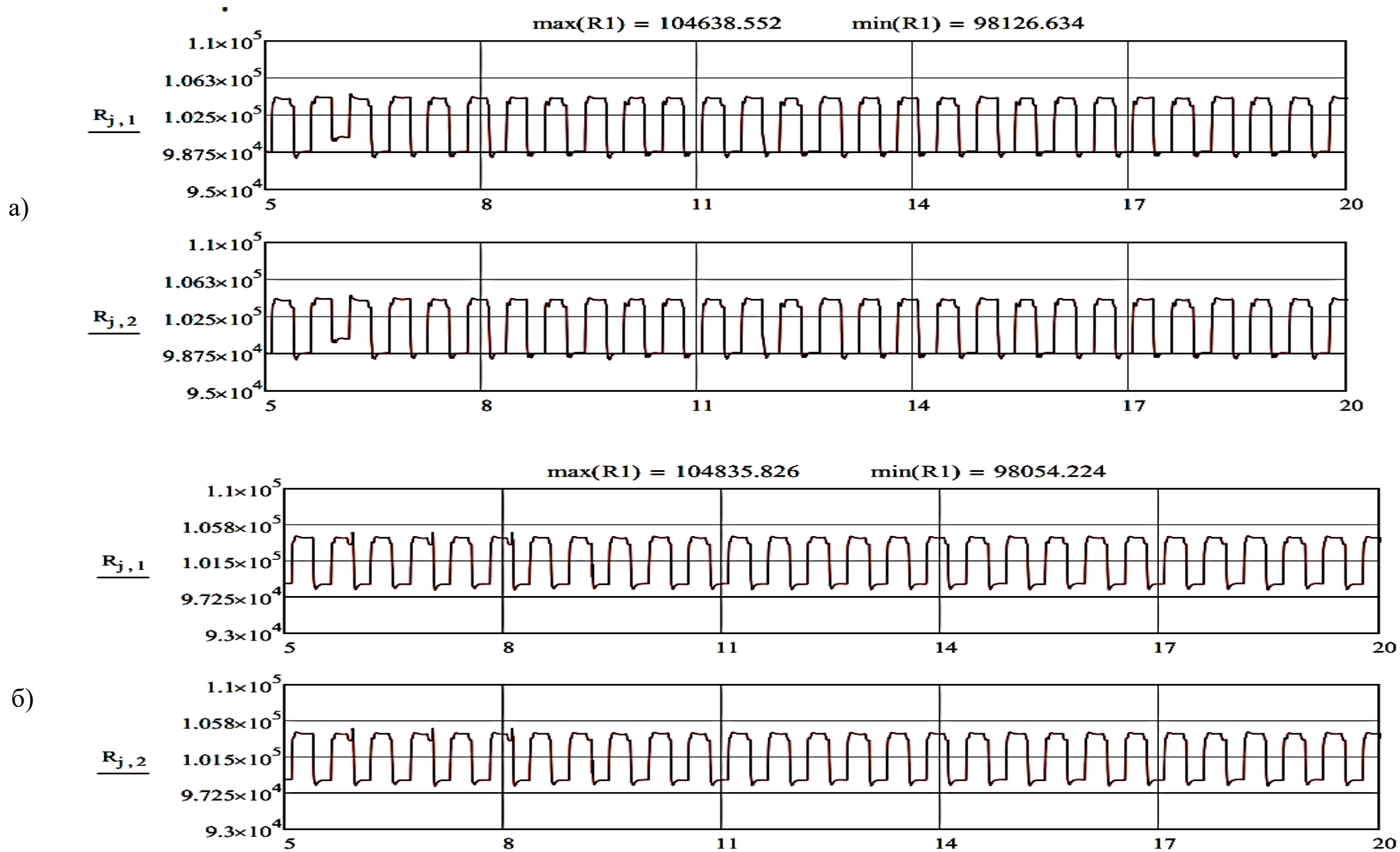


Рис. 3.8. Графік залежностей вертикальних динамічних сил під час руху по колії чавуновоза 50 т: а) під час руху по колії зі скріпленням ТРЕП; б) під час руху по колії зі скріпленням ТРЕП-Ш.

На рис. 3.9 та 3.10 приведено отримані на підставі результатів графіки залежності коефіцієнтів динаміки вагонів із різними осьовими навантаженнями (від 20,1 т до 31,6 т) при застосуванні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш. При швидкостях руху 20 км/год. коефіцієнти динаміки при застосуванні скріплень ТРЕП досягають значень 1,015–1,38, застосування скріплень ТРЕП–Ш знижує коефіцієнти динаміки на 2–7 %. Отже, вплив таких характеристик рухомого складу, як осьові навантаження, жорсткості ресорних комплектів, довжина жорсткої бази та інших під час руху по прямих ділянках колії, яка не має нерівностей, простежується, застосування скріплень ТРЕП–Ш дещо знижує рівень коефіцієнта динаміки.

За швидкостей руху, які реалізуються на коліях залізниць незагального користування, основний вплив на величину вертикальних динамічних сил справляють короткі ізольовані нерівності профілю довжиною до 6 метрів.

На рис. 3.11 та 3.12 наведені графіки змін коефіцієнтів динаміки для деяких типів рухомого складу, що прийняті до розрахунків за вертикальними ізольованими нерівностями довжиною 2 та 4 метрів.

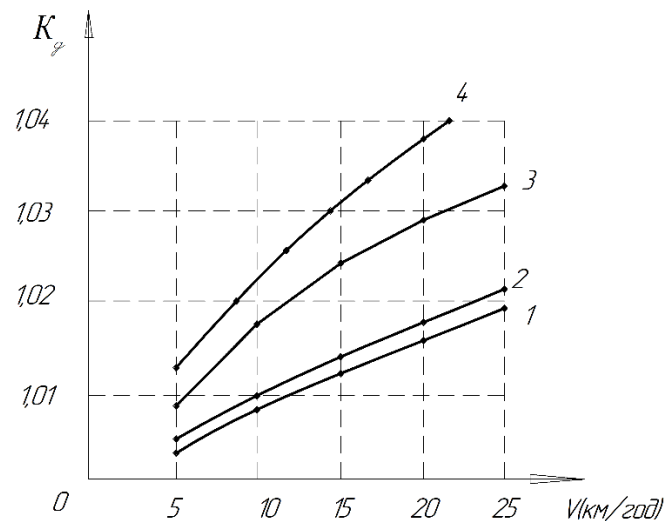


Рис. 3.9. Графіки залежностей коефіцієнтів динаміки вертикальних сил від швидкості руху при застосуванні скріплень типу ТРЕП: 1 – чавуновоз 50 т; 2 – думпкар 6–ВС–60; 3 – чавуновоз 80 т; 4 – чавуновоз 140 т

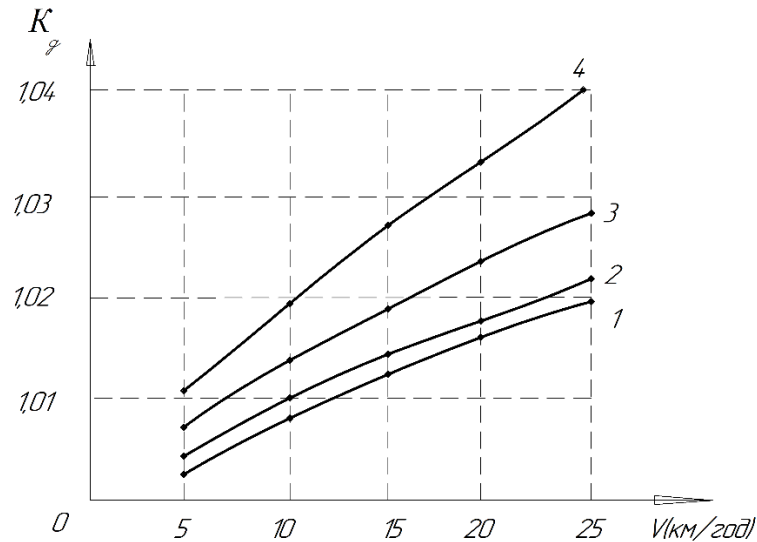


Рис. 3.10. Графіки залежностей коефіцієнтів динаміки вертикальних сил від швидкості руху при застосуванні скріплень типу ТРЕП–Ш: 1 – чавуновоз 50 т; 2 – думпкар 6–ВС–60; 3 – чавуновоз 80 т; 4 – чавуновоз 140 т

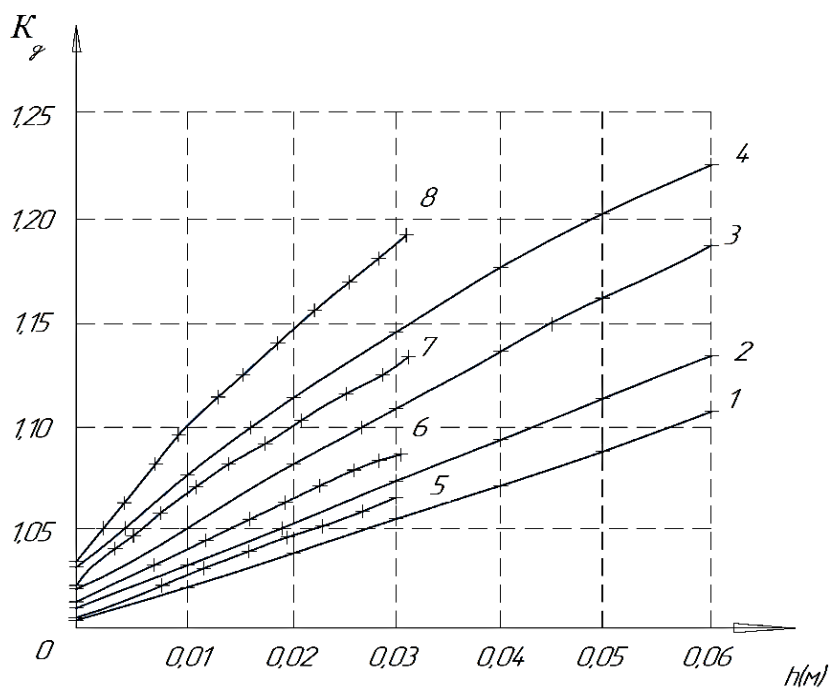


Рис. 3.11. Графіки залежностей коефіцієнтів динаміки вертикальних сил від глибини вертикальних нерівностей колії при застосуванні скріплень ТРЕП: 1, 2, 3, 4 – довжина нерівності 2 м; 5, 6, 7, 8 – довжина нерівності 4 м; 1, 5 – чавуновоз 50 т; 2, 6 – думпкар 6–ВС–60; 3, 7 – чавуновоз 80 т; 4, 8 – чавуновоз 140 т

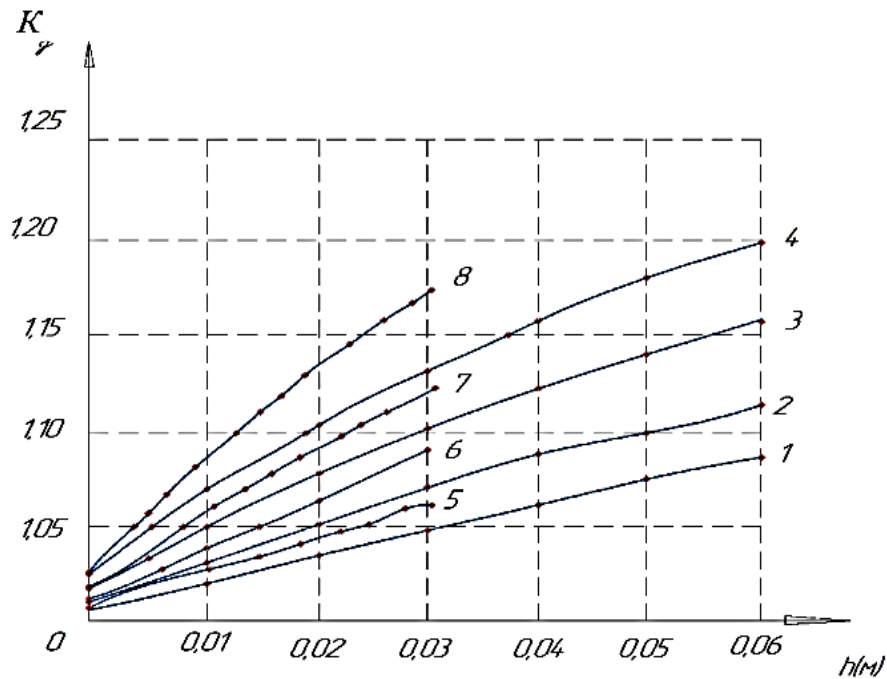


Рис. 3.12. Графіки залежностей коефіцієнтів динаміки вертикальних сил від глибини вертикальних нерівностей колії при застосуванні ТРЕП–Ш: 1, 2, 3, 4 – довжина нерівності 2 м; 5, 6, 7, 8 – довжина нерівності 4 м; 1, 5 – чавуновоз 50 т; 2, 6 – думпкар 6–ВС–60; 3, 7 – чавуновоз 80 т; 4, 8 – чавуновоз 140 т

Швидкість руху при цьому було прийнято 10 км/год.; за такої швидкості коефіцієнт динаміки, залежно від глибини нерівності, досягає рівня 1,11 для чавуновоза 50 т, 1,18 – для думпкара 6–ВС–60, 1,18 для чавуновоза 80 т та 1,22 для чавуновоза 140 т.

При використанні скріплень типу ТРЕП застосування скріплень ТРЕП–Ш знижує рівень коефіцієнта динаміки на 4–7 %.

У табл. 3.1 приведено максимальні розрахункові значення вертикальних динамічних сил, які виникають під час руху розрахункових типів екіпажів, взятих у розрахунках при застосуванні скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш. Також у таблиці наведено, для порівняння, значення вертикальних сил дії на колію при застосуванні скріплень КБ. Швидкості руху для піввагона та думпкарів були в межах 5–20 км/год., для спеціальних вагонів — 5–10 км/год. в межах фактично реалізованих. У табл. 3.1 наведено результати для колії, яка не має нерівностей, та для колії, яка має нерівності, довжиною 2 метри та глибиною 80 мм. Застосування скріплень типу ТРЕП підвищує рівень вертикальних сил на 1,0–3,5 % порівняно зі скріпленнями КБ.

Таблиця 3.1

Максимальне значення вертикальних динамічних сил (кН) (термін служби колії – 10 років, пряма ділянка, рейка Р65 зношення – 6 мм, епюра шпал – 1840 шт./км, коефіцієнт нерівнопружності рейкових опор – 0,15)

Тип екіпажа	Статичне навантаження на колесо (кН)	Скріплення КБ			Скріплення ТРЕП			Скріплення ТРЕП–Ш		
		Швидкості руху екіпажів (км/год)								
		5	10	20	5	10	20	5	10	20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Колія, яка не має нерівностей										
Піввагон моделі 12–1000	108	111,0	114,5	116,4	116,2	116,3	118,2	109,2	11,23	114,7
Думпкар ВС–85	147	155,0	163,2	167,6	157,3	164,6	169,7	151,3	159,3	165,4
Думпкар 6–ВС–60	107,5	111,5	118,25	122,1	118,2	120,5	124,2	109,0	116,4	119,6
Чавуновозна платформа 70 т	122,5	132,3	138,4	–	134,3	140,1	–	126,3	135,4	–
Шлаковоз 16,0 м ³	105,5	114,4	119,2	–	117,4	122,2	–	108,3	119,1	–
Візки для виливниць І–120–5500	223	259,1	263,1	–	262,3	264,5	–	243,3	251,5	–
Чавуновоз 140 т	258	294,6	296,7	–	259,0	299,0	–	277,5	284,3	–

продовження таблиці 3.1

Тип екіпажа	Статичне навантаження на колесо (кН)	Скріплення КБ			Скріплення ТРЕП			Скріплення ТРЕП-Ш		
		Швидкості руху екіпажів (км/год)								
		5	10	20	5	10	20	5	10	20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Вертикальна нерівність колії довжиною 2 м і глибиною 80 мм										
Піввагон моделі 12-1000	108	112,5	116,1	117,1	119,5	118,5	119,5	109,3	111,5	112,7
Думпкар ВС-85	147	158,7	167,6	172,3	163,8	168,3	174,3	154,3	161,7	167,5
Думпкар 6-ВС-60	107,5	114,6	119,1	122,4	121,7	122,7	126,3	112,2	114,3	118,4
Чавуновозна платформа 70 т	122,5	136,6	142,9	–	136,2	144,7	–	130,5	138,5	–
Шлаковоз 16,0 м ³	105,5	117,6	122,8	–	121,5	129,7	–	112,7	117,3	–
Візок для виливниць І-120-5500	223	267,9	274,2	–	270,5	275,8	–	259,6	269,2	–
Чавуновоз 140 т	158	302,5	306,7	–	307,6	309,7	–	296,3	301,3	–

Застосування скріплень ТРЕП–Ш знижує рівень вертикальних сил на 2–4 %. За наявності на колії нерівностей такі співвідношення складають 3–5 % та 4–6 % відповідно.

Горизонтальні поперечні сили. На рис. 3.13–3.15 наведено графіки заміни горизонтальних поперечних сил під час руху деяких типів розрахункового рухомого складу залежно від швидкості руху у кривих ділянках.

Розглядалися варіанти застосування скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш, радіуси кривих змінювались від 350 до 800 метрів. У цих розрахунках колія відповідає існуючим нормам улаштування з підвищенням зовнішньої рейки на 10 мм.

Колія не мала нерівностей. Під час руху чавуновоза 50 т (осьові навантаження – 21,65 т) рівень горизонтальних поперечних сил складав до 11 кН при застосуванні скріплення ТРЕП та 8 кН – при застосуванні скріплення ТРЕП–Ш при радіусі кривих 800 м. При зміні радіуса до 350 м рівень горизонтальних поперечних сил досягав 38 кН та 45 кН відповідно.

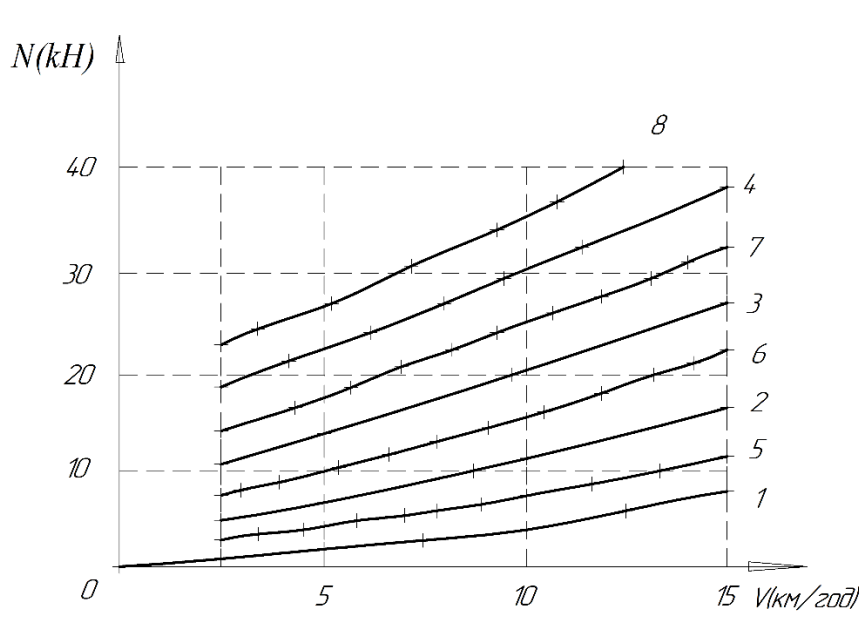


Рис. 3.13. Графіки залежностей горизонтальних поперечних сил від швидкостей руху чавуновоза 50 т: 1, 2, 3, 4 – скріплення ТРЕП–Ш; 5, 6, 7, 8 – скріплення ТРЕП; 1, 5 – $R=800$ м, $h=10$ мм; 2, 6 – $R=600$ м, $h=10$ мм; 3, 7 – $R=450$ м, $h=10$ мм; 4, 8 – $R=350$ м, $h=10$ мм

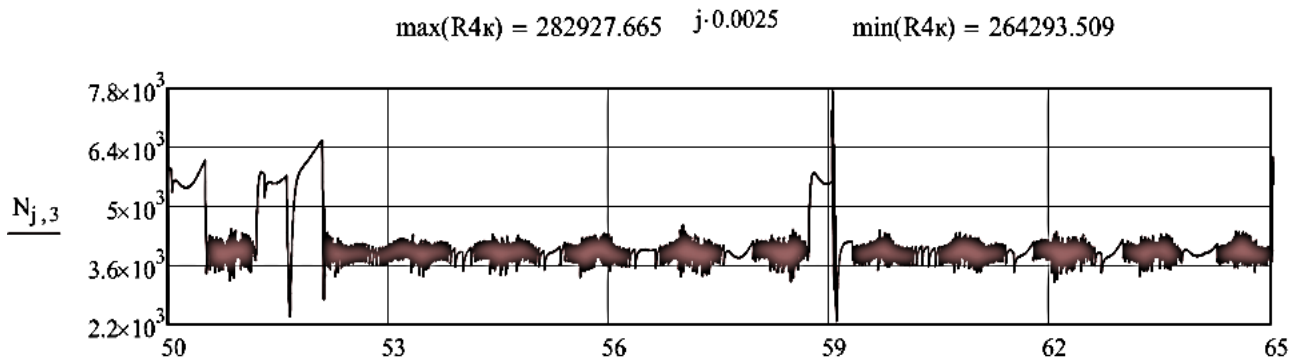


Рис. 3.14. Графік залежності горизонтальних поперечних сил під час руху чавуновоза 140 т по горизонтальній нерівності довжиною 4 м, амплітудою 10 мм у прямій ділянці колії

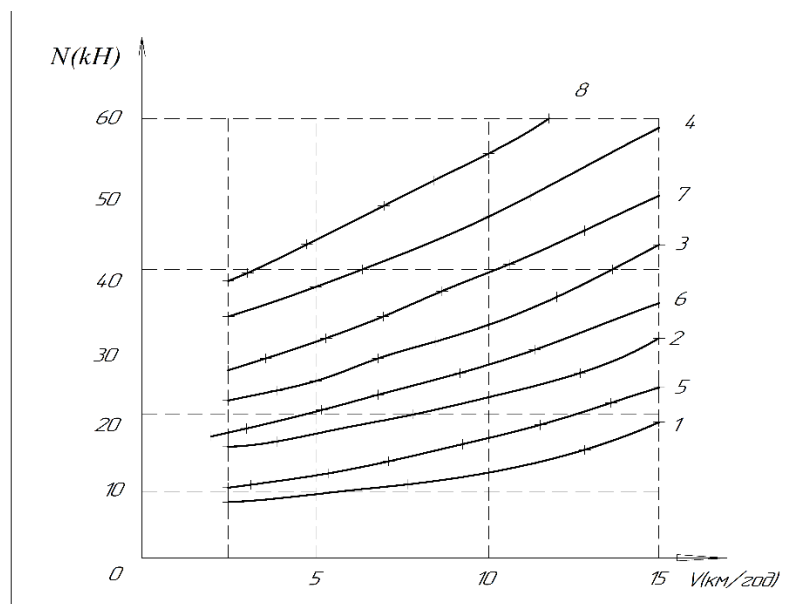


Рис. 3.15. Графіки залежностей горизонтальних поперечних сил від швидкостей руху чавуновоза 80 т: 1, 2, 3, 4 – скріплення ТРЕП–Ш; 5, 6, 7, 8 – скріплення ТРЕП; 1, 5 – $R=800$ м, $h=10$ мм; 2, 6 – $R=600$ м, $h=10$ мм; 3, 7 – $R=450$ м, $h=10$ мм; 4, 8 – $R=350$ м, $h=10$ мм

При зростанні осьових навантажень більш ніж 31,6 т (чавуновоз 140 т) рівень горизонтальних поперечних сил досягає 32 кН – при застосуванні скріплення ТРЕП–Ш та 40 кН – при застосуванні скріплення ТРЕП у кривій радіусом 800 м.

При радіусах 350 м рівень горизонтальних поперечних сил складає 98 кН та 105 кН відповідно. Таким чином за однакових інших умов застосування скріплення ТРЕП підвищує рівень горизонтальних поперечних сил у кривих на 7–12 %. Навіть у кривих, які не мають нерівностей, рівень горизонтальних поперечних сил досягає

значних величин з урахуванням того факту, що моменти інерції та опору рейок відносно вертикальної осі симетрії є значно меншими (в деяких випадках – в 10 разів) порівняно з цими параметрами відносно горизонтальної осі. Особливо несприятлива динаміка взаємодії колії та рухомого складу спостерігається в місцях знаходження горизонтальних нерівностей колії.

Інтенсивні динамічні процеси відбуваються під час руху по коротких (до 6 м) нерівностях. На рис 3.16 наведено графіки горизонтальних поперечних сил під час руху чавуновоза 140 т по горизонтальній нерівності довжиною 4 м з амплітудою 10 мм.

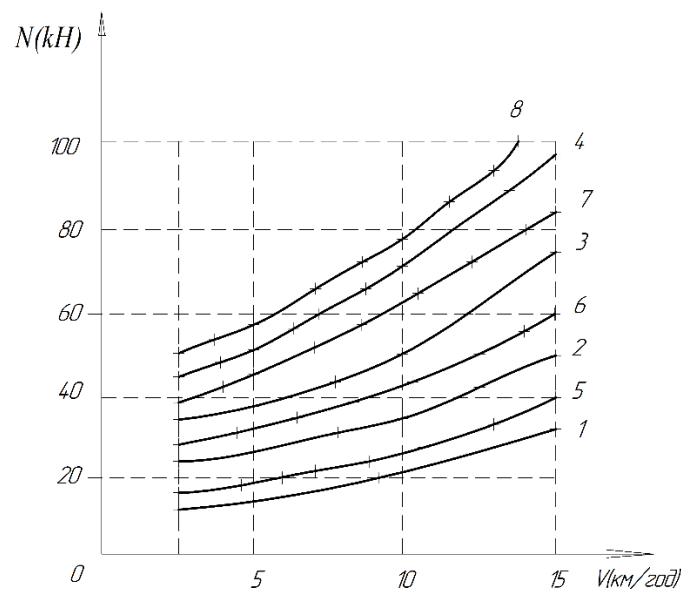


Рис. 3.16. Графіки залежностей горизонтальних поперечних сил від швидкостей руху чавуновоза 140 т: 1, 2, 3, 4 – скріплення ТРЕП–Ш; 5, 6, 7, 8 – скріплення ТРЕП; 1, 5 – $R=800$ м, $h=10$ мм; 2, 6 – $R=600$ м, $h=10$ мм; 3, 7 – $R=450$ м, $h=10$ мм; 4, 8 – $R=350$ м, $h=10$ мм

Розглядалися варіанти використання скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш. Величина таких сил у місцях нерівності колії може перевищувати 15 кН. На рис. 3.17 наведено графіки залежностей горизонтальних поперечних сил від амплітуд нерівностей колії під час руху думпкарів 6–ВС–60 при застосуванні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш. Величини таких горизонтальних сил у прямих можуть перевищувати 42 кН – при застосуванні скріплень ТРЕП–Ш та 48 кН – при застосуванні скріплень ТРЕП.

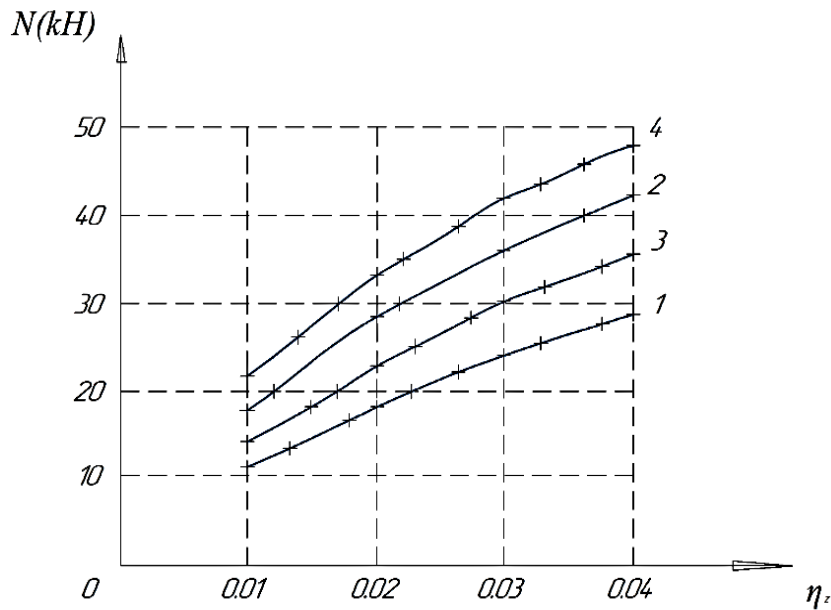


Рис. 3.17. Графіки залежностей горизонтальних поперечних сил від амплітуди горизонтальних нерівностей колії під час руху думпкара 6–ВС–60:1,

2 – скріплення ТРЕП–Ш, 3, 4 – скріплення ТРЕП; 1 – довжина нерівності 4 м; 2 – довжина нерівності 2 м; 3 – довжина нерівності 4 м; 4 – довжина нерівності 2 м

У табл. 3.2 наведено узагальнені дані розрахунків максимальних горизонтальних поперечних сил для деяких найбільш характерних типів рухомого складу залізниць незагального користування. Розглядалась крива ділянка колії з підвищенням зовнішньої рейки 5 мм для випадків, коли колія була у справному стані та мала нерівності 4 мм при амплітуді 30 мм. Наведені при застосуванні скріплень КБ, ТРЕП, ТРЕП–Ш, розрахунки показали, що при застосуванні скріплень типу ТРЕП рівень горизонтальної поперечної сили більше в середньому на 7 % відносно рівня сил, які виникають при застосуванні скріплень КБ. Навпаки, використання скріплень ТРЕП–Ш знижує рівень горизонтальних поперечних сил у середньому на 7–17 %.

Розрахунки показали, що горизонтальні поперечні сили можуть досягати в умовах експлуатації залізниць незагального користування значень, які перевищують 100 кН. Основними чинниками, що впливають на рівень цих сил, є характеристики вагонів, які знаходяться в обігу, характеристики горизонтальних неізолюваних нерівностей колії та радіуси кривих. Конструкції скріплень можуть змінювати рівень горизонтальних поперечних сил на 5–17 %.

Таблиця 3.2

Максимальне значення горизонтальних динамічних сил (кН) (термін служби колії – 10 років, пряма ділянка, рейки Р65 зношення – 6 мм, епора шпал – 1840 шт/км, коефіцієнт нерівнопружності рейкових опор – 0,15)

Характеристика розрахункової ділянки	Типи екіпажів											
	Піввагон моделі 12–1000				Думпкар ВС–85				Візки для виливниць І–120–550		Чавуновоз 140 т	
	Швидкості руху, км/год											
	5	10	20	40	5	10	20	40	5	10	5	10
Скріплення КБ												
Крива R=350 м, підвищення зовнішньої рейки h=5 мм	2,8	7,1	15,5	32,0	4,2	9,2	20,4	42,9	7,1	15,8	8,2	25,4
Крива R=350 м, підвищення зовнішньої рейки h=5 мм, нерівність довжиною l=4 м, $\eta_y=30$ мм	9,6	20,2	42,8	87,3	12,8	24,6	53,2	107,6	28,1	61,3	40,3	79,1
Скріплення ТРЕП												
Крива R=350 м, підвищення зовнішньої рейки h=5 мм	3,3	2,9	16,1	34,5	4,9	10,2	22,3	45,3	8,3	19,8	9,6	27,7

продовження таблиці 3.2

Характеристика розрахункової ділянки	Типи екіпажів											
	Піввагон моделі 12–1000				Думпкар ВС–85				Візки для вилив–ниць І–120–550		Чавуновоз 140 т	
	Швидкості руху, км/год											
	5	10	20	40	5	10	20	40	5	10	5	10
Крива R=350 м, підвищення зовнішньої рейки h=5 мм, нерівність довжиною l=4 м, $\eta_y=30$ мм	10,7	22,4	45,6	53,2	16,7	28,3	59,2	115,6	32,5	63,3	45,7	89,7
Скріплення ТРЕП–Ш												
Крива R=350 м, підвищення зовнішньої рейки h=5 мм	2,2	6,3	14,5	28,0	3,7	8,7	17,5	36,7	6,3	12,5	6,4	22,5
Крива R=350 м, підвищення зовнішньої рейки h=5 мм, нерівність довжиною l=4 м, $\eta_y=30$ мм	8,3	18,4	39,7	85,5	10,2	21,7	49,6	101,2	26,2	57,7	38,2	76,5

3.4 Висновки за розділом

1. Наведено основні положення математичної моделі коливань чотиривісного екіпажа, який рухається по колії з постійною швидкістю. Розглянуто кінематичні та силові зв'язки між елементами системи «екіпаж» та в точці контакту екіпаж–колесо, у тому числі можлива нелінійність зв'язків у випадку, коли суми моментів сил тертя між кузовом та візком більше суми поздовжніх та поперечних сил взаємодії коліс екіпажа з рейками. Математична модель дозволяє визначати вертикальні та горизонтальні сили взаємодії з колією для всіх можливих типів екіпажів, які застосовуються на залізницях незагального користування.

2. Вертикальні силові та кінематичні зв'язки підсистем «екіпаж–колія» представляють з урахуванням однобічного зв'язку колеса та рейки, пружних та динамічних реакцій колії.

3. Одержано розрахункові рівняння, що визначають кінематичні зв'язки екіпажа й колії у вертикальній та горизонтальній площинах у процесі руху екіпажа на ділянках колії, що складається з прямої, перехідної та кривої. Враховано зміни характеристики колії під час експлуатації.

4. Запропоновано методи розрахунку колії на дисипативних опорах при застосуванні залізобетонних шпал зі скріпленнями ТРЕП та ТРЕП–Ш на вертикальний та горизонтальний вигин і кручення рейки.

Методи розрахунків дозволили визначати зміни просторових жорсткостей і коефіцієнтів дисипації колії в точках контакту з кожним колесом екіпажа у процесі руху при застосуванні зазначених скріплень.

5. Зміни, внесені до математичної моделі просторової динамічної системи «екіпаж–колія», дозволяють визначати просторові динамічні сили у прямих та кривих ділянках, за наявності або відсутності нерівностей колії, в якій застосовується скріплення ТРЕП та ТРЕП–Ш.

6. Математична модель просторових сил «екіпаж–колія» з урахуванням використання скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш, реалізована у програмній системі Mathcad. Розроблено алгоритм та програму розрахунку систем взаємодії екіпажа й колії.

7. Отримані дані дозволяють виконувати чисельні дослідження сил взаємодії рухомого складу та колій залізниць незагального користування й надавати обґрунтовані пропозиції щодо сфер застосування скріплень ТРЕП й ТРЕП–Ш.

8. Виконано багатоваріантні розрахунки для найпоширеніших типів спеціальних і спеціалізованих вагонів залізниць незагального користування зі скріпленнями ТРЕП, ТРЕП–Ш і КБ. Визначено вертикальні та горизонтальні поперечні сили під час руху вагонів у прямих та кривих ділянках колій з різними швидкостями. Розглянуто вплив радіусів кругових кривих довжини, перехідних кривих довжини й амплітуди вертикальних та горизонтальних нерівностей колії. Враховано особливості роботи колії при застосуванні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш.

9. Одержано залежності коефіцієнтів динаміки вертикальних сил від швидкості руху вагонів по колії зі скріпленнями ТРЕП, ТРЕП–Ш і КБ. Встановлено, що застосування скріплень типу ТРЕП підвищує рівень динамічних сил у середньому на 4–7 % порівняно з колією, де застосоване скріплення КБ. При застосуванні скріплень ТРЕП–Ш рівень коефіцієнтів динаміки зменшується на 5–12 %. Вертикальні нерівності колії, в першу чергу короткі ізольовані нерівності, збільшують значення вертикальних динамічних сил у 1,08–1,15 разу.

10. Визначено значення горизонтальних поперечних сил під час руху спеціального та спеціалізованого вагонів у колії зі скріпленнями ТРЕП, ТРЕП–Ш та КБ, як для прямої, так і кривої ділянки колії, у тому числі для ділянки з горизонтальними ізольованими нерівностями. Встановлено, що в основному на величину цих сил впливають саме нерівності колії. За швидкості руху, що реалізується на залізницях незагального користування, величини горизонтальних поперечних сил можуть перевищувати 100 кН. При застосуванні скріплення типу ТРЕП рівень горизонтальних поперечних сил підвищується в середньому на 7 % відносно рівня сил, які виникають при скріпленні КБ; при застосуванні скріплення ТРЕП–Ш знижується на 7–17 %.

РОЗДІЛ 4

ЧИСЕЛЬНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ПІДРЕЙКОВОЇ ОСНОВИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ СКРІПЛЕНЬ ТРЕП ТА ТРЕП–Ш В УМОВАХ ЗАЛІЗНИЦЬ НЕЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

4.1 Загальні положення та допущення розрахунків

Математична модель просторової динамічної системи «екіпаж–колія» та її реалізація у програмній системі *Mathcad* дозволяє визначати просторові сили дії рухомого складу на колію, отримувати значення навантажень від рейок на шпали у вертикальній та горизонтальній поперечній площинах.

Проте для визначення працездатності при застосуванні скріплень ТРЕП і ТРЕП–Ш та особистостей викростання на ділянках залізниць незагального використання потрібно знати напружений деформований стан елементів підрейкової основи, оскільки саме її стан визначає в умовах залізниць незагального користування загальну працездатність колій, зокрема рейок [140].

Зараз розроблені теорії розрахунків колії (підрозділ 1.5), які використовуються в інженерній практиці для визначення їх працездатності при високих осьових навантаженнях, обмежуються, як правило, визначенням напружень у підрейковій зоні при вертикальних навантаженнях. Рідше, в основному на стадії конструювання, виконуються розрахунки напружено–деформованого стану залізобетонних шпал із використанням розрахункової схеми у вигляді балки змінного (три ділянки) перерізу, що спирається на суцільну пружну основу Вінклерівського типу. Тертя по нижній постелі й бічним граням, однобічність зв'язків шпал і баласту, нелінійність характеристик основи не враховуються. Дія горизонтальних поперечних сил замінюється дією зосереджених моментів, прикладених до середини підрейкової площадки [191, 192].

При розрахунках напружень при застосуванні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш і деформованого стану елементів підрейкової основи земляного полотна використовується метод пружного клина або пружного напівпростору.

Розрахунки виконуються, як правило, тільки на дію вертикальних сил. Інші

елементи підрейкової основи, як правило, не розраховуються.

Таким чином, прийняті зараз у практиці розрахунків напруженого стану елементів підрейкової основи способи й моделі розрахунків мають високий ступінь ідеалізації та припущень, які можуть істотно викривляти реальний стан, давати занижені результати.

З урахуванням зазначеного, в роботі за основу вибору методу й моделі розрахунку було взято такі основні положення і припущення.

1. Рейки спираються на окремі опори–шпали, просторові сили взаємодії рейок і шпал мають пружно–дисипативний характер, у ряді випадків існує їх одностороння дія.

2. Залізобетонні шпали мають достатньо складну форму, яка може істотно впливати на напруги й деформації, які в них виникають.

3. Залізобетонні шпали виготовляються заздалегідь напруженими. Попереднє напруження арматури становить 1170 МПа, загальна сила напруги всієї арматури – більше 364 кН [192], що необхідно враховувати при розрахунках.

4. Між бічними й нижніми поверхнями шпал і баластом виникають як нелінійні пружні сили, так і сили зчеплення й тертя.

5. Матеріал баласту підкоряється нелінійному закону деформації з різними межами опору розтягуванню й стисненню.

6. Ґрунти основної площадки земляного полотна, як і баласт, мають нелінійні характеристики.

Цим положенням відповідає метод скінченних елементів (МСЕ) [193, 194], що є розвитком енергетичних методів розрахунків інженерних конструкцій.

Для розв'язання задач тривимірного напруженого стану масивних конструкцій найбільш уживаними є скінченні елементи у вигляді тетраедра, призми, паралелепіпеда, що мають по три невідомі вузлові переміщення в кожному вузлі й полілінійну апроксимацію переміщень u_x , u_y та u_z .

Матриці жорсткостей таких елементів наведені в ряді публікацій, наприклад [195–197].

Бібліотека скінченних елементів, вбудована у програмний комплекс [198],

дозволяє виконувати моделювання залізобетонних шпал.

Таким чином, МСЕ відповідає викладеним вище вимогам, положенням і припущенням розрахунків просторового напружено–деформованого стану шпал у нелінійній постановці задачі з урахуванням виниклих односторонніх сил моделі системи «екіпаж–колія».

4.2 Моделювання елементів підрейкової основи методом скінченних елементів

Як комп'ютерну реалізацію методу скінченних елементів у роботі було використано програмний комплекс для розрахунків і проектування конструкцій «ЛІРА», версія 9,6 [199–201].

Рейки моделювалися за допомогою двох типів скінченних елементів (СЕ):

- СЕ 34 – універсальний просторовий тест вузловий ізопараметричний;
- СЕ 36 – універсальний просторовий восьмивузловий ізонариметричний.

Ці СЕ призначені для визначення напружено–деформованого стану контактуальних об'єктів і просторових конструктивів з одновимірною ізотропного лінійно–пружного матеріалу в постановці тривимірної задачі теорії пружності. До параметрів жорсткості цих СЕ входять модуль пружності рейкової сталі, коефіцієнт Пуассона і густини матеріалу для урахування його власної ваги.

Розбиття поперечного перерізу рейки на СЕ показано на рис. 4.1.

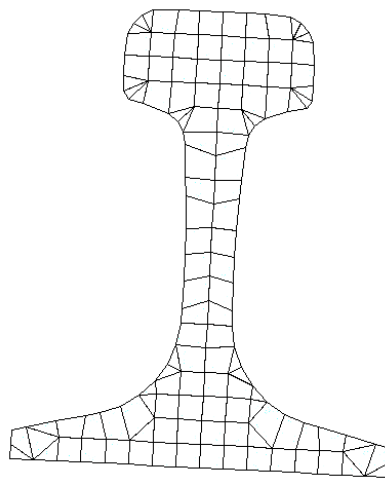


Рис. 4.1. Розбиття поперечного перерізу рейки та СЕ

Контактна задача взаємодії усіх елементів скріплення розв'язана за допомогою СЕ 265. Цей скінченний елемент об'єднує у спільну роботу суміжні вузли по

поверхні підошви рейки і прокладки. За допомогою цього СЕ між вузлами можна призначати 3 лінійні та 3 кутові зв'язки відносно осей X , Y , Z місцевої системи координат. У цьому випадку до параметрів жорсткості СЕ 265 входить одностороння жорсткість (тільки на стиснення) уздовж осі Z , перпендикулярна до площини контакту, і жорсткість у площині контакту XOY , що моделює в цьому випадку тертя між нижньою гранню підошви рейки і підрейковою прокладкою. Значення жорсткостей прокладок визначено в роботі раніше й залежить від рівня напруженого стану конструкції. Три зв'язки (на поворот відносно осей X , Y , Z), що залишилися, задано з «нульовою» жорсткістю, що є аналогічним установці шарнірів. Розміщення ряду СЕ 265 в перерізі при контакті підошви рейки та прокладки показано на рис. 4.2.

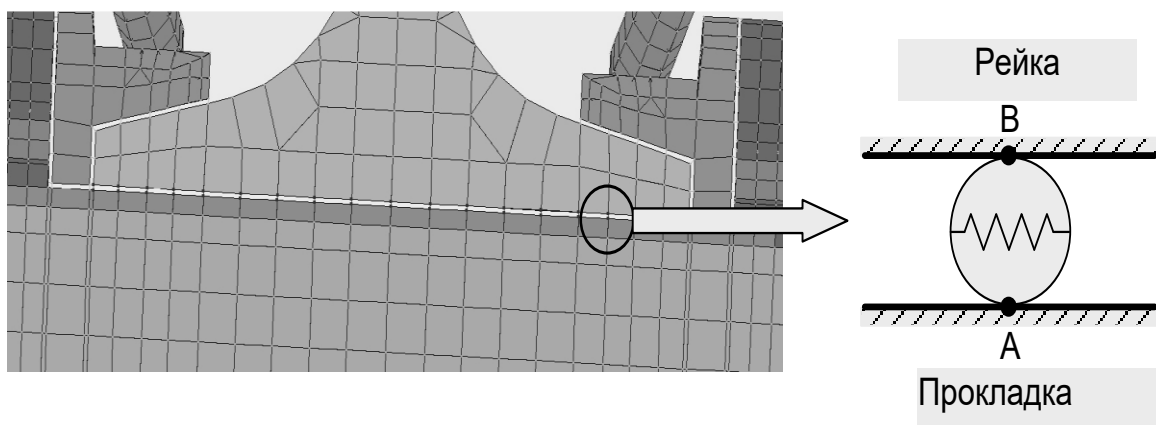


Рис. 4.2. Моделювання контакту підошви рейки з підрейковою прокладкою

У загальному випадку СЕ 265 – це двовузловий скінченний елемент односторонніх пружних зв'язків, що дозволяє враховувати нерівні граничні (прямі та протилежні) зусилля у зв'язках; наприклад, граничне зусилля розтягування у зв'язку можна задавати нерівним зусиллю стиснення. При розрахунках у моделях у цих скінченних елементах визначаються зусилля у зв'язках, накладених уздовж відповідних осей системи. Знаки цих зусиль визначаються знаками різниць відповідних переміщень або поворотів.

Скінченні елементи №265 дозволили також виконати моделювання контакту між бічними гранями підошви рейки й ізолювальними вкладишами та анкерами. При цьому задавалася нескінченна одностороння жорсткість (тільки на стиснення)

із зазором (щоб уникнути ефекту заклинювання підшви рейки при поворотах рейки) у напрямку, перпендикулярному до осі рейки.

Залишені 5 зв'язків (лінійна вертикальна, лінійна горизонтальна у напрямку осі рейки, на поворот відносно осей X , Y , Z) задано з «нульовою» жорсткістю, що є аналогічним установці шарнірів.

Величину зазору було взято рівною 1 мм, що відповідає конструктивному зазору між бічними гранями підшви рейки й анкерами. Тільки після вибірки заданого зазору СЕ включається в роботу.

Підрейкова та нащпальна прокладки (рис. 4.3) моделювались із використанням СЕ 34 і СЕ 36 – універсальних просторових ізопараметричних шести- й восьмивузлових скінченних елементів.

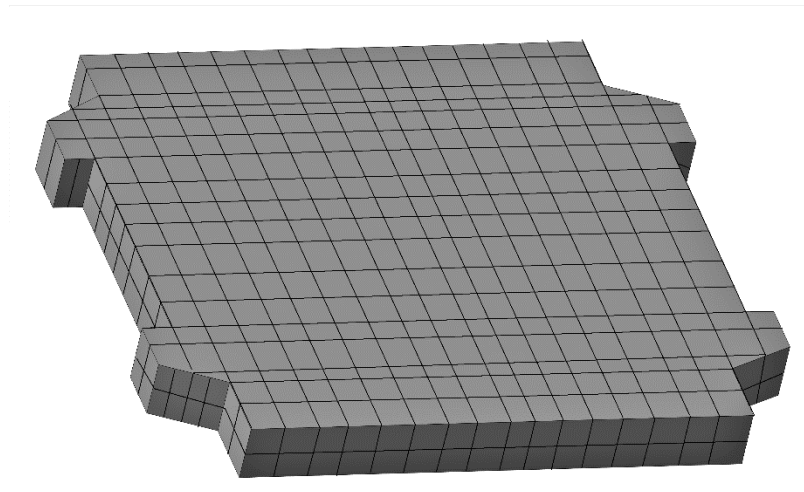


Рис. 4.3. Модель підрейкової прокладки

Коефіцієнт Пуассона, з урахуванням рифлень прокладок, приймався рівним $0,32 \div 0,41$, а приведений модуль пружності прокладки визначався як

$$E = \frac{U_{\text{пр}}^{\text{дин}} \cdot h}{F},$$

де $U_{\text{пр}}^{\text{дин}}$ – жорсткість прокладки при її динамічному стисканні, (Н/м);

F – опорна площа прокладки (м^2);

h – товщина прокладки (м).

Значення жорсткості прокладок при динамічних навантаженнях, прийняті за результатами досліджень, викладені в підрозділі 2.4.1.

Моделювання пружних клем скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш виконано із

застосуванням СЕ 34 та СЕ 36. При цьому модуль пружності, коефіцієнт Пуассона та густину взято для сталі 60С2А, з якої вони виготовляються (рис. 4.4).

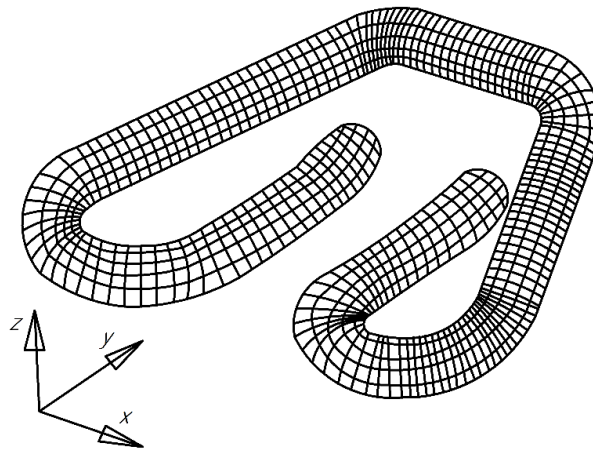


Рис. 4.4. Модель клеми скріплень ТРЕП та ТРЕП – Ш

При моделюванні залізобетонної шпали (рис. 4.5) були використані три типи скінченних елементів: СЕ 34, СЕ 36 і СЕ 10. До параметрів жорсткості СЕ 34 і СЕ 36, про які вже мовилося вище, у цьому випадку були включені модуль пружності, коефіцієнт Пуассона і густина бетону. СЕ 10 – це універсальний стрижневий елемент, який модулює роботу арматури з урахуванням зусиль попереднього натягнення.

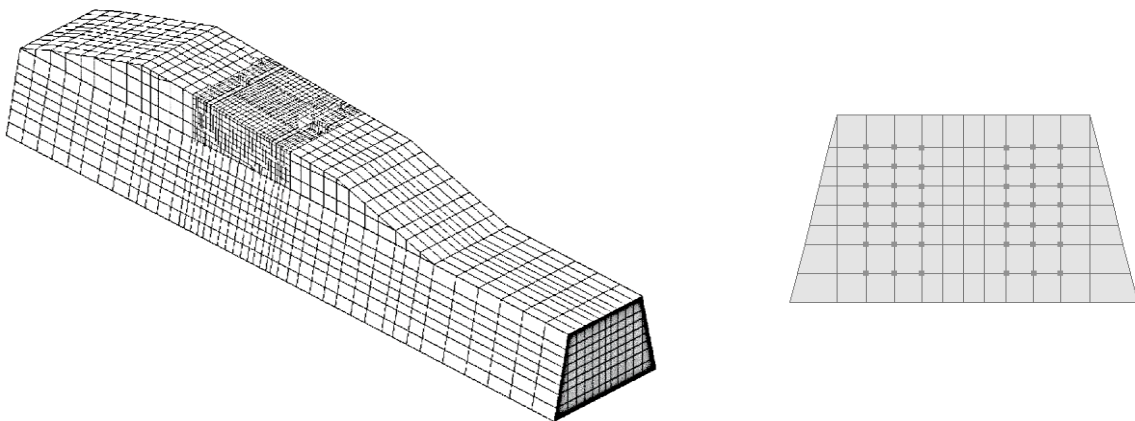


Рис. 4.5. Модель залізобетонної шпали

Баласт моделювався із застосуванням трьох типів СЕ (рис. 4.6):

– СЕ 274 – фізично нелінійний об'ємний шестивузловий ізопараметричний

елемент ґрунту (довільна трикутна призма);

– SE 276 – фізично нелінійний об'ємний восьмивузловий ізопараметричний елемент ґрунту (довільний гексаедр);

– SE 56 – одновузловий скінченний елемент пружних зв'язків (для моделювання земляного полотна).

– SE 274 і SE 276 – призначені для моделювання односторонньої роботи; в цьому випадку, баласту на стиснення з урахуванням зсуву.

У параметрах жорсткості цих SE задаються:

E – модуль деформації баласту за гілкою первинного завантаження (МПа);

ν – коефіцієнт Пуассона;

k_e – коефіцієнт переходу до модуля деформації за гілкою вторинного навантаження;

c – зчеплення баласту (кН/м^2);

R_t – гранична напруга при розтягуванні (МПа);

φ – кут внутрішнього тертя баласту ($^\circ$);

δ_p – гранична напруга стискання (МПа).

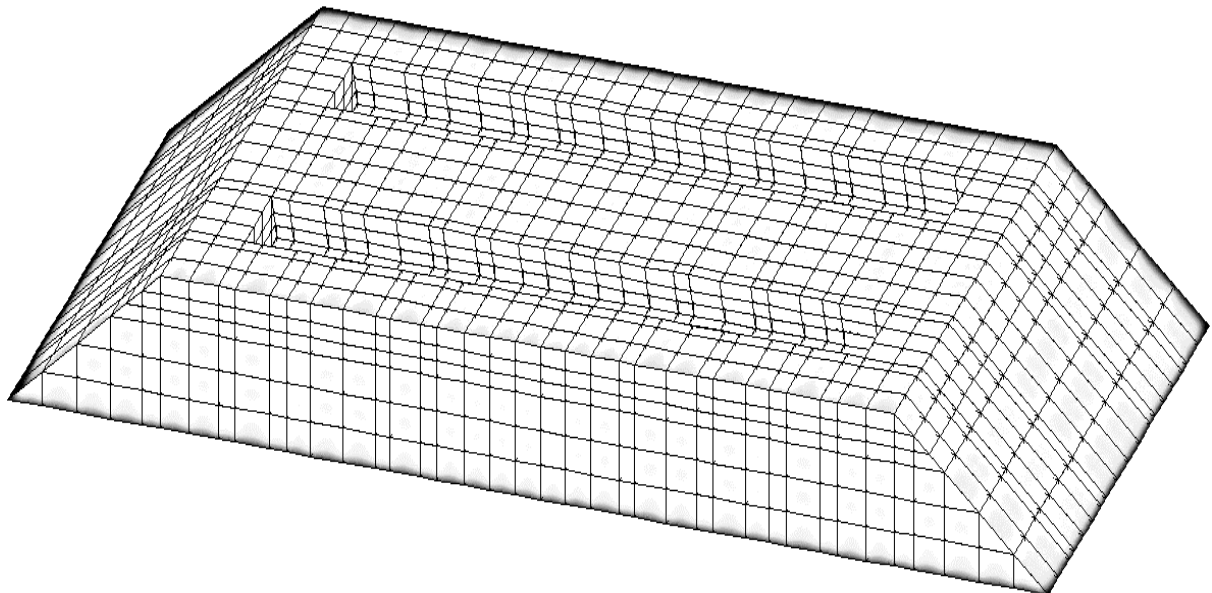


Рис. 4.6. Модель баласту

Контактна задача взаємодії поверхонь шпали (підосви й бічної поверхні) з

баластом також розв'язана за допомогою СЕ 265, властивості якого були розглянуті вище. У цьому випадку до параметрів жорсткості СЕ 265 входить одностороння жорсткість (тільки на стиснення) уздовж місцевої осі Z , завжди спрямованої перпендикулярно до площини контакту, і жорсткість у площині самого контакту XOY , що моделює тертя між поверхнею шпали й баластом. Значення жорсткостей визначено в роботі раніше й залежить від рівня напруженого стану конструкції.

Задача досліджень напружено–деформованого стану земляного полотна промислових залізниць, що є складною і багатоплановою проблемою, яка часто вимагає додаткових досліджень [158, 160, 161], у роботі не ставилася.

Крім того, досвід моделювання ґрунтових масивів методом скінченних елементів у тривимірній фізично нелінійній постановці задачі вимагає збільшення часу для розрахунків, щонайменше в 2,5–3 рази [158, 160, 161]. Тому вплив земляного полотна враховувався одновузловими скінченними елементами пружних зв'язків (опори кінцевої жорсткості). У моделі модуля колії ці СЕ вводяться в усі вузли СЕ баласту по поверхні теоретичного контакту із земляним полотном. У такий спосіб реалізується моделювання реакцій основного майданчика земляного полотна.

У загальному випадку СЕ 56 – це одновузловий скінченний елемент, який застосовується для введення пружних зв'язків уздовж або навколо глобальних або локальних осей координат вузла.

У цьому випадку для визначення жорсткості цих СЕ застосовувалися відомі експериментальні дані, залежні від рівня напруженого стану земляного полотна на межі контакту з баластом [202–203].

Аналіз результатів розрахунків напружено–деформованого стану елементів підрейкової основи [206–213].

Розроблені програми розрахунків колії (перший та другий етапи) для умов промислового транспорту дозволяють розв'язувати широке коло задач, визначати просторові сили, що діють на колію практично в будь–яких умовах експлуатації.

Розрахунки просторових сил, що діють на шпали, виконані для умов експлуатації ділянок колії, на яких у 2008 і 2009 роках були проведені

експериментальні роботи, показали добру збіжність теоретичних та експериментальних даних (розділ. 3).

Для виявлення особливостей впливу спеціалізованих і спеціальних вагонів на напружено–деформований стан елементів підрейкової основи при застосуванні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш у різних умовах плану і профілю колії, у тому числі при вертикальних і горизонтальних нерівностях, були виконані багатоваріантні розрахунки. Нижче наведено, як приклад, результати розрахунків чотирьох варіантів дії на колію деяких видів рухомого складу незагального використання.

Як розрахункові було взято напіввагон моделі 12–1000 (осьове навантаження $P_{oc}=216$ кН), який широко застосовується при перевезенні сировини й готової продукції, думпкар ВС–85 ($P_{oc}=294$ кН), чавуновоз вантажопідйомністю 140 т ($P_{oc}=516$ кН) і візок для перевезення виливниць І–120–5500 ($P_{oc}=446$ кН). Швидкість руху було прийнято рівною 10 км/год.

Розрахунки було виконано для прямих ділянок колії та кругової кривої з радіусом 350 м і підвищенням зовнішньої рейки 5 мм. У прямій ділянці колії було прийнято до розрахунку вертикальну нерівність завдовжки 2 м і з максимальною глибиною 0,03 м, у круговій кривій – горизонтальну нерівність завдовжки 4 м з максимальною стрілою вигину 0,04 м.

Вертикальна жорсткість рейкових опор склала $5,8–13,4 \cdot 10^4$ кН/м; горизонтальна $10,0–11,2$ кН/м при скріпленнях ТРЕП ; $3,2–9,3 \cdot 10^4$ кН/м та $0,93–1,01 \cdot 10^4$ кН/м – при застосуванні скріплень ТРЕП–Ш.

Коефіцієнт нерівнопружності рейкових опор був заданий рівним 1,12 у вертикальній площині та 1,15 – у горизонтальній. Вертикальний знос рейок Р65 у всіх варіантах було взято рівним 3 мм.

У табл. 4.1 наведено максимальні значення вертикальних і горизонтальних поперечних сил, одержані в результаті розрахунків за програмою дії екіпажів на колію.

Таблиця 4.1

Розрахункові сили впливу екіпажів на колію (максимальні значення)

№ варіанта розрахунку	Тип екіпажа	План лінії	Нерівність колії	Вертикальні сили (кН)		Горизонтальні поперечні сили (кН)	
				Скріплення ТРЕП	Скріплення ТРЕП-Ш	Скріплення ТРЕП	Скріплення ТРЕП-Ш
1	Напіввагон мод. 12-1000	Пряма	Вертикальна нерівність $l_{ny}=2$ м $\eta_y=0,08$ м	118,5	111,5	–	–
2	Думпкар ВС-85			168,3	161,7	–	–
3	Чавуновоз вант. 140 т			369,7	301,3	–	–
4	Візок для виливниць I-120-5500			275,8	269,2	–	–
5	Піввагон мод.12-1000	Крива $R=350$ м $h=5$ мм	Горизонтальна нерівність $l_{nz}=4$ м $\eta_z=0,03$ м	116,3	111,2	22,4	18,4
6	Думпкар ВС-85			169,6	139,3	28,3	21,7
7	Чавуновоз гр. 140 т			299,0	284,3	89,7	76,5
8	Візок для виливниць I-120-5500			264,5	251,5	63,3	57,7

Під час руху розрахункових екіпажів по прямих ділянках із вертикальною ізольованою нерівністю зі швидкістю 10 км/год. вертикальні сили склали від 111,5–112,5 кН для напіввагона і до 301,3–309,7 кН – для чавуновоза 140 т.

Максимальні величини горизонтальних поперечних сил під час руху вагонів зі швидкістю 10 км/год. по горизонтальній нерівності у круговій кривій рівні від 18,4 до 22,4 кН для напіввагонів та від 76,5 до 89,7 кН – для чавуновоза.

Результати розрахунків просторових сил, що діють на рейки (розрахунки першого етапу), використовувалися для визначення об'ємного напружено–деформованого стану елементів верхньої будови колії.

Діаграми змін напружень у шпалах і баласті наведені в Додатках В у вигляді діаграм ізополів та еквівалентних напружень за прийнятими осями глобальної сітки координат та, як приклад, на рис. 4.7–4.8.

Узагальнені результати розрахунків у вигляді максимальних еквівалентних значень напружень у пружних клемах (з урахуванням монтажних) у середній зоні шпали (з урахуванням попереднього напруження) та на баласті наведені в табл. 4.2.

Розрахункові монтажні напруження у клемах (максимальні значення) складають 1180 МПа при застосуванні скріплень ТРЕП та 1020 МПа – при застосуванні скріплень ТРЕП–Ш. Під дією рухомого складу у прямих ділянках колії відбувається зменшення монтажного притиснення рейки до шпали (підрозділи 2.2.1 та 2.3.1). За рахунок цього напруження у клемах змінюються до значень 940 МПа (напіввагони 12–1000) – 810 МПа (чавуновоз 140 т) при застосуванні скріплень ТРЕП та до значень 870 МПа (чавуновоз 140 т) – при застосуванні скріплень ТРЕП–Ш.

На напружений стан клем істотно впливає дія горизонтальних поперечних сил. У кривих ділянках колії напруження клемних скріплень ТРЕП можуть досягати значень 1280 МПа та при застосуванні скріплень ТРЕП–Ш 1190 МПа – при різних типах рухомого складу.



літера

Завантаження

1) Ізополля еквівалентних напружень Ne01

Середній шар

Одиниця виміру - МПа



літера

Завантаження

2) Ізополля еквівалентних напружень Ne01

Середній шар

Одиниця виміру - МПа



Рис. 4.7. Ізополля еквівалентних напружень у шпалах:

1 – чавуновоз вантажопідйомністю 140 т, пряма; 2 – чавуновоз, крива $R=350$ м

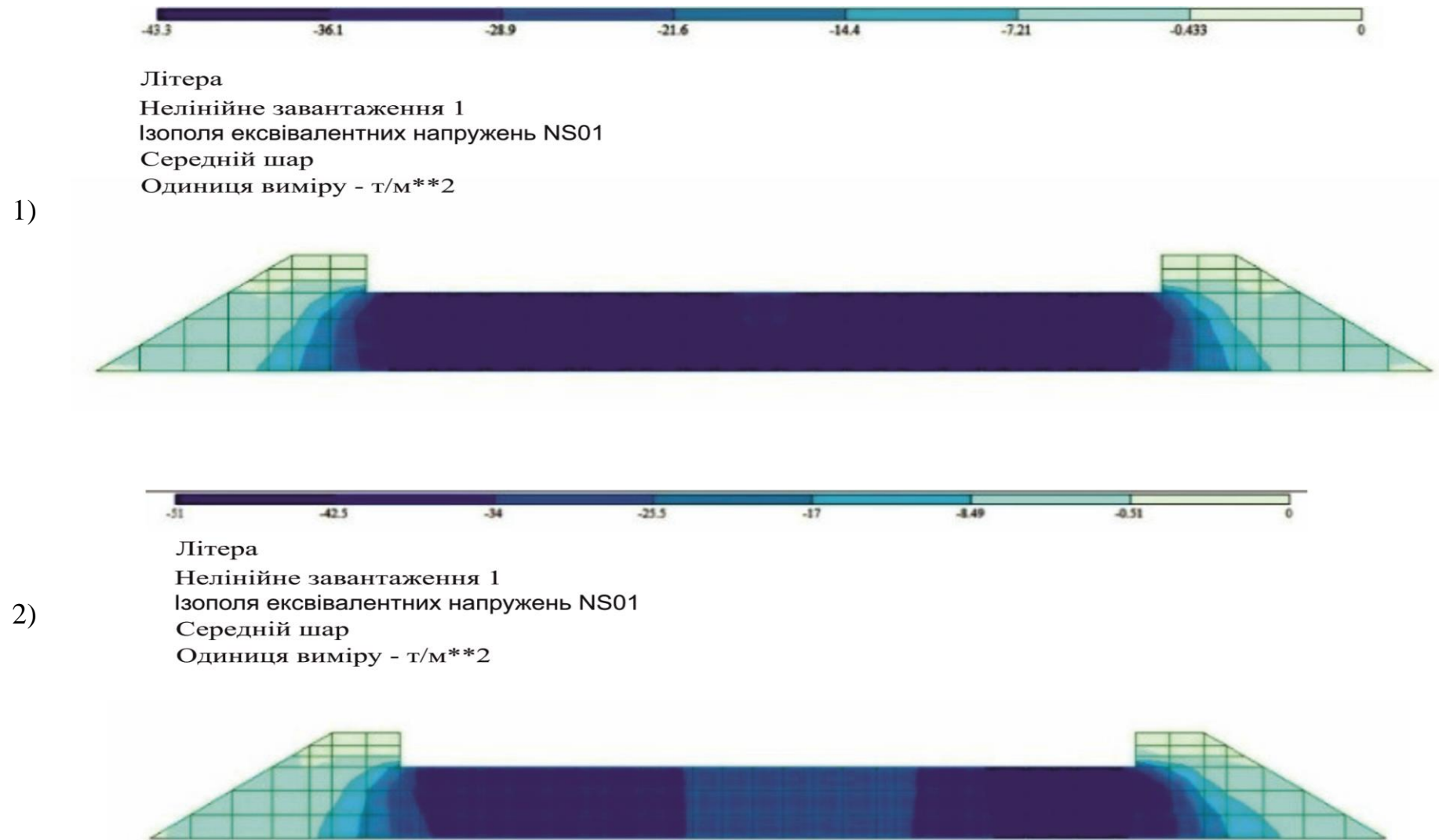


Рис. 4.8. Ізополя еквівалентних напружень у баласті:
 1 – чавуновоз 140 т, пряма; 2 – чавуновоз 140 т, крива $R=350$ м

Таблиця 4.2

Максимальні розрахункові напруження в елементах підрейкової основи (МПа)

№ варіанта розрахунку	Тип екіпажа	План лінії	Напруження в клемах $\sigma_{кл}$		Напруження в середній зоні шпали $\sigma_{шп}$		Напруження в баласті $\sigma_{бал}$	
			ТРЕП	ТРЕП–Ш	ТРЕП	ТРЕП–Ш	ТРЕП	ТРЕП–Ш
1	Напіввагон мод.12–1000	Пряма	–	–	–11,9	–10,92	–0,141	–0,132
2	Думпкар ВС–85		–	–	–12,99	–12,31	–0,182	–0,174
3	Чавуновоз 140 т		–	–	–17,59	–16,97	–0,343	–0,334
4	Візок І–120–5500		–	–	–15,99	–15,52	–0,315	–0,308
5	Напіввагон мод.12–1000	Крива $R=350$ м	–	–	–12,18	–13,17	–0,167	–0,157
6	Думпкар ВС–85		–	–	–13,79	–12,53	–0,234	–0,206
7	Чавуновоз вант. 140 т		–	–	–19,17	–17,57	–0,376	–0,327
8	Візок І–120–5500		–	–	–17,30	–15,87	–0,323	–0,307

Розрахунки показали, що стискальні напруження в залізобетонній шпалі під підкладкою складають від $-3,3$ МПа (напіввагон, пряма) до $-11,02$ МПа (чавуновоз, крива) у клемах змінюються до значень 940 МПа (напіввагони 12–1000) – 810 МПа (чавуновоз 140 т) при застосуванні скріплень ТРЕП та до значень 870 МПа (чавуновоз 140 т) – при застосуванні скріплень ТРЕП–Ш, ТРЕП.

Застосування скріплень ТРЕП–Ш зменшує такі напруження до значень — $1,81$ – $6,06$ МПа. Еквівалентні напруження, з урахуванням напружень попереднього натягнення, досягають рівня $-17,3$ ÷ $-19,17$ МПа під час руху по кривій візка І–120–5500 і чавуновоза 140 т при застосуванні скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш.

На розподіли просторових напружень у шпалі істотно впливає перевантаження зовнішньої рейки у кривій та перерозподіл навантажень на шпалу від прокладки й анкерів у від дії у кривій горизонтальних поперечних сил (рис. 4.6).

Отримані розрахунками значення напружень у баласті досягають рівня $-0,315$ ÷ $-0,323$ МПа для візків І–120–5500 і $-0,343$ ÷ $-0,376$ МПа для чавуновозів при застосуванні скріплень ТРЕП. З урахуванням широкого вживання на коліях промислового транспорту як баласту щебню зі слабких гірських порід або шлаків, такий рівень напружень у баласті явно перевищує його несучу здатність. Для ділянок з осьовими навантаженнями більше 300 кН є можливим застосування скріплень ТРЕП–Ш.

Багато посилювати баластну призму укладанням геотекстилю або георешіток, омонолічуванням баласту в'язучими на бітумній або полімерній основах або укладанням підбаластних плит. Таке посилення баласту позитивно вплине й на роботу шпал.

У табл. 4.3 наведено результати розрахунків еквівалентних (з урахуванням попереднього напруження) значень напружень, що діють у перерізі посередині підрейкової площадки $G_{\text{пс}}$ та в перерізі по середині шпали $G_{\text{шп}}$ під час руху екіпажа по прямій ділянці колії та кругової кривої з радіусом 350 м за швидкості від 5 до 30 км/год. Порівняння цих результатів із розрахунковими значеннями допустимих напружень, за умов витривалості шпал (допустимі напруження стиску – $17,84$ МПа) та за умов тріщиностійкості шпал (допустимі розтягувальні напруження

+1,5 МПа), показує, що підрейкова основа зі скріпленнями ТРЕП є цілком працездатною при обертанні рухомого складу з осьовими навантаженнями до 300 кН у прямих та кривих ділянках колії з радіусами не менше 350 м за швидкості, яка може бути реалізована на коліях незагального користування.

Таблиця 4.3

Розрахункові значення напружень у шпалах при скріпленнях
ТРЕП та ТРЕП–Ш (МПа)

План лінії	Швидкість руху, км/год	Тип рухомого складу							
		Напіввагон модель 12–1000		Думпкар ВС–85		Чавуновоз 140т		Візок І–120–5500	
		Рекомендовані скріплення							
		ТРЕП				ТРЕП–Ш			
		Напруження, що діють у шпалах, МПа							
		$\sigma_{\text{пс}}$	$\sigma_{\text{сш}}$	$\sigma_{\text{пс}}$	$\sigma_{\text{сш}}$	$\sigma_{\text{пс}}$	$\sigma_{\text{сш}}$	$\sigma_{\text{пс}}$	$\sigma_{\text{сш}}$
Пряма	5	-11,46	-6,61	-12,39	-4,71	-16,42	+1,45	-15,03	-0,43
	10	-11,61	-6,52	-12,53	-4,62	-16,69	+1,69	-15,24	-0,22
	15	-11,76	-6,40	-12,68	-4,44	–	–	–	–
	30	-11,91	-5,89	-12,99	-3,82	–	–	–	–
Крива $R=350\text{м}$	5	-11,60	-5,58	-12,87	-3,12	-17,35	+3,84	-15,80	+1,64
	10	-11,79	-5,35	-13,08	-2,27	-17,76	+4,44	-16,14	+2,16
	15	-11,97	-5,09	-13,28	-2,63	–	–	–	–
	30	-12,18	-4,36	-13,79	-1,64	–	–	–	–

При осьових навантаженнях до 450 кН можливе застосування скріплень ТРЕП–Ш за швидкості руху до 15 км/год.

При осьовому навантаженні більше 450 кН не можливе укладання зазначених скріплень.

4.3 Висновки за розділом

1. Виконано аналіз способів розрахунків напруженого стану елементів підрейкової основи, прийнятий в інженерній практиці.

2. Визначено основні положення й допущення розрахунків просторового напруженого стану елементів підрейкової основи, вимоги до методу розрахунків.

3. Як комп'ютерну реалізацію методу скінченних елементів (МСЕ) у роботі взято програмний комплекс «Ліра», версія 9.6. Із застосуванням комплексу «Ліра» розроблено розрахункові моделі рейки елементів проміжних скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш шпал і баласту. При моделюванні зазначених елементів враховувалися конструктивна й фізична нелінійність їх роботи, наявність сил тертя та односторонніх зв'язків між окремими вузлами й деталями.

4. Виконано багатоваріантні розрахунки просторового напруженого стану елементів підрейкової основи зі скріпленнями ТРЕП та ТРЕП–Ш у різних експлуатаційних умовах колій незагального користування.

5. Підрейкова основа зі скріпленнями ТРЕП є працездатною при укладанні у прямі та криві ділянки колії з радіусами 350 м та більше, якими пересувається рухомий склад з осьовим навантаженням до 300 кН за швидкостей, які можуть бути фактично реалізовані. При осьових навантаженнях до 450 кН рекомендується укладати скріплення ТРЕП–Ш тільки у прямі ділянки, швидкість руху на яких до 10 км/год. Укладання зазначених конструкцій на ділянках колії, якими пересувається рухомий склад з осьовими навантаженнями, більшими, ніж 450 кН, не рекомендується.

6. Поява в колії горизонтальних нерівностей викликає збільшення еквівалентних напружень у 1,3–1,6 разу в залізобетонних шпалах та 1,1–1,5 разу – в баласті порівняно з ділянками колії з вертикальними нерівностями при однакових геометричних характеристиках цих нерівностей.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КОЛІЇ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ПРОМІЖНИХ СКРІПЛЕНЬ ТРЕП

5.1 Мета та завдання експериментальних досліджень

Головними цілями експериментальних досліджень в умовах колій незагального користування було прийнято такі: експериментальна перевірка отриманих у лабораторних умовах даних про просторову жорсткість проміжних скріплень ТРЕП; експериментальне визначення вертикальних і горизонтальних поперечних пружних характеристик залізобетонних шпал для розрахунків жорсткості й коефіцієнтів дисипації рейкових опор; експериментальна перевірка даних теоретичних розрахунків напружено–деформованого стану елементів підрейкової основи при застосуванні скріплень типу ТРЕП.

Для досягнення вказаних цілей під час проведення експериментальних робіт були розв'язані такі задачі:

1. Визначено сили, які передаватимуться від рейки на шпалу у вертикальному, горизонтальному поперечному напрямках при динамічному навантаженні колії у прямих і в кривих ділянках колії.

2. Визначено переміщення кромки подошви рейки із зовнішнього боку колії в перерізі по осі шпали та переміщення шпал у вертикальних і горизонтальних поперечних при одночасному фіксуванні навантажень, переданих рейкою на шпалу.

3. Визначено горизонтальні поперечні сили, які діють на рейки під час руху екіпажів у кривих ділянках колії.

4. Визначено напруження, що виникають на верхній постелі шпали при застосуванні скріплень ТРЕП.

5.2 Визначення зусиль і переміщень елементів колії

Напруження у шпалах і в силомірних елементах визначалися електротензометричним методом. Для визначення напружень у рейках використовувалися тензорезистори типу ВЕ 120–20 АА (11) з базою 20 мм і опором $120,1 \pm 0,1$ Ом. Для визначення напружень у шпалах — ВЕ 120–40 з базою 40 мм; як

датчики в силові елементах були застосовані тензорезистори BE 350–10 АА (11) з базою 10 мм і опором $350,6 \pm 0,1$ Ом. Виробник – Zhonghang Electronic Measuring Instruments Co. Ltd.

Для виміру параметрів сигналів використовувався комплект приладів, що складався з попереднього підсилювача, вимірювального модуля й ноутбука.

Попередній підсилювач типу TDA призначався для живлення тензорезисторів через гальванічне розв'язане джерело IT (рис. 5.1) і попереднього посилення входних сигналів. Вхідний сигнал від тензорезисторів (вхід U_{in+} і U_{in-}) передавався на диференціальний підсилювач із коефіцієнтом посилення, що перемикався ($K_U=1, 10, 100, 1000$) з виходу підсилювача; вихідний сигнал надходив на вхід вимірювального модуля.

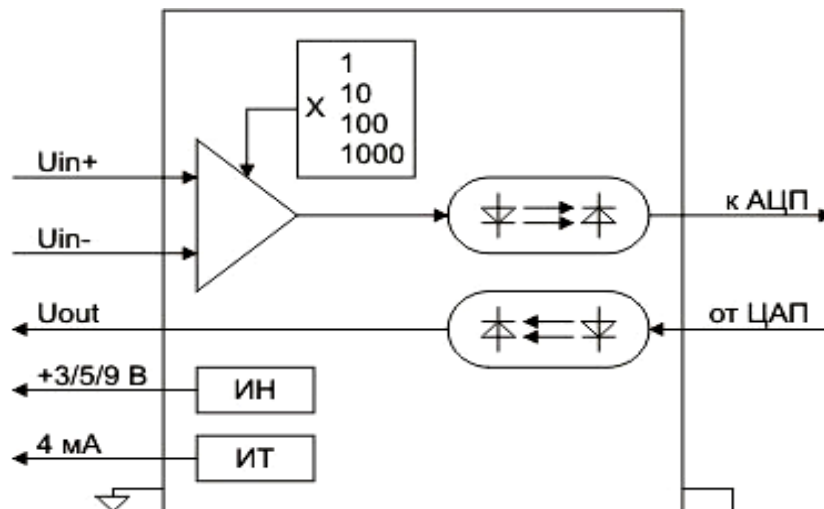


Рис. 5.1. Структурна схема вхідного каналу підсилювача TDA

Вимірювальний модуль типу Sigma USB вимірював параметри сигналів, що надходили від попереднього підсилювача, оцифровував дані з використанням аналого–цифрового перетворювача (АЦП) і безперервно вводив цифрові сигнали до персонального комп'ютера.

Базове програмне забезпечення ZETLab модуля Sigma USB дозволяло виконувати вимір відразу після підключення до персонального комп'ютера.

Під час проведення експериментальних робіт використовувався ноутбук Fujitsu Siemens Computers Gmb, модель Esprimo Mobile V 5535 із процесором Intel P Pentium (R) і оперативною пам'яттю 896 Мб. На комп'ютері встановлено операційну систему Windows XP Professional.

Горизонтальні поперечні сили, передані від коліс рухомого складу на рейки, визначалися методом Шлупфа, що був удосконалений проф. Е.І. Даніленком [204]. Для цього 8 тензодатчиків з базою 20 мм наклеювалися на шийку рейки із зовнішньої та внутрішнього боку колії в одному перерізі рейки (рис. 5.2 а) і з'єднувалися за схемою подвійного мосту (рис. 5.2 б). Горизонтальні поперечні сили, що діють на рейку, розраховувалися комп'ютером в автоматичному режимі за формулою:

$$P_{\text{ц}} = \frac{cg}{2E} \left(\frac{M_Q}{W_Q} - \frac{M_P}{W_P} \right), \quad (5.1)$$

де c – коефіцієнт пропорційності;

g – коефіцієнт тензочутливості;

E – модуль пружності;

M_Q, M_P – згинальні моменти відповідно в перерізах Q і P ;

W_Q, W_P – моменти опору цих перерізів.

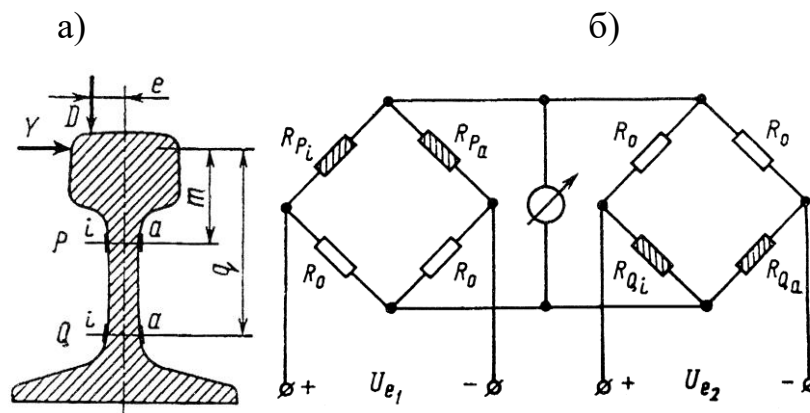


Рис. 5.2. Визначення горизонтальних поперечних сил: а) наклеювання тензодатчиків на шийку рейки; б) схема з'єднання тензодатчиків

Тарування тензодатчиків виконувалося за допомогою балки рівних опорів безпосередньо перед початком вимірювань.

Напруження посередині верхньої постелі шпали ША–Т визначалися за допомогою тензодатчиків з базою 40 мм, які наклеювалися уздовж поздовжньої осі шпали. Тензорезистори для температурної компенсації наклеювалися поперек

шпали. Датчики з'єднувалися за напівмостовою схемою.

Тарування тензодатчиків виконувалося за допомогою гідравлічного преса в лабораторних умовах на стандартних кубічних зразках класу бетону С32/40.

Вертикальні сили, передані від рейки на шпалу, визначалися за допомогою силомірних підкладок, які являли собою сталеві пластини 170×165 мм товщиною 4 мм, на нижню поверхню яких наклеювалися два тензодатчики. Один з них був робочим, другий – для температурної компенсації (рис. 5.3). Датчики з'єднувалися за напівмостовою схемою.

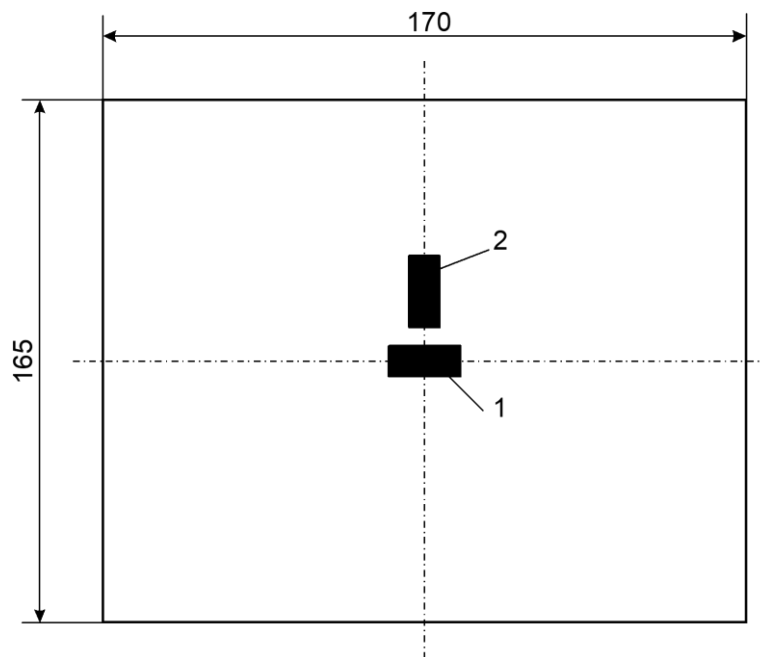


Рис. 5.3. Розміщення тензодатчиків на нижній поверхні силомірної підкладки:

1 – робочий датчик; 2 – датчик для температурної компенсації

Для захисту датчиків від механічних пошкоджень і осідання пилу на них зверху був наклеєний по контуру лист спеціальної захисної полімерної плівки розміром 40×60 мм. На нижню поверхню підкладок було приклеєно поліуретанову нащпальну прокладку каучуковмісним клеєм. У місці розташування датчиків рифлення на прокладці зрізалися для одержання виїмки розміром 45×65 мм.

Тарування силомірних підкладок виконувалася в лабораторних умовах. Для тарування силомірної підкладки відрізки залізобетонної шпали довжиною 500 мм розміщувалась на траверсі преса ГРМ-2. Силомірна підкладка встановлювалася на шпалі, на підкладку встановлювався темплет рейки Р65 довжиною 300 мм.

Ізолювальні втулки та клеми не встановлювалися.

Після підключення вимірювальної апаратури та відліку нульового показання темплет рейки навантажувався пресом статично, поступово по 1,0 кН до досягнення величини 50 кН. Навантаження на темплет рейки визначалися за манометром преса. Тарувальні показання заносилися до комп'ютера.

Під час проведення вимірів вертикальних сил у польових умовах силомірна підкладка встановлювалася в колію. Клеми та ізолювальні втулки не встановлювалися.

Горизонтальні поперечні сили визначалися за допомогою силомірних датчиків, які були виконані у вигляді балки на двох опорах. Для передачі навантажень на балку у вигляді зосередженої сили на балці була встановлена упорна планка (рис. 5.4). Деформації балки сприймалися тензодатчиками з базою 10 мм, наклеєними на її нижню поверхню. Тензодатчики були з'єднані за напівмостовою схемою.

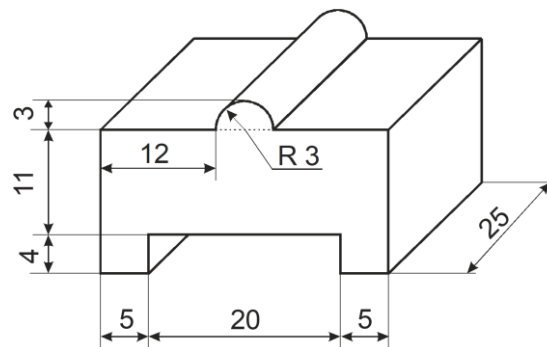


Рис. 5.4 – Силовірний датчик

Тарування силомірних балок було зроблено в лабораторних умовах з використанням гідравлічного преса ГРМ–2 і зразкового динамометра ДОСМ–3, що має похибку $\pm 0,5\%$. Навантаження на силомірний датчик прикладалися поступово по 1 кН до величини 20 кН. Тарувальні показники кожної балки були занесені до комп'ютера.

Горизонтальні поперечні сили, передані від рейки на залізобетонну шпалу, визначалися за допомогою силомірного датчика, встановленого у профрезований паз анкера шпали. Для запобігання зсуву опорної планки силомірного датчика приклеювалися до бічної поверхні паза реборди каучуковмісним клеєм.

Для визначення переміщення елементів колії під час проведення експериментальних робіт було використано відеоцифрову систему виміру переміщень [221, 222].

Суть роботи системи полягає в тому, що на елемент колії, переміщення якого потрібно було визначити, наклеювалася мішень у вигляді чорного кола на білому фоні, діаметр якого чітко фіксувався. На відстані 4–6 м від колії на віброзахисній стабілізованій платформі встановлювалася відеокамера з 60–кратним оптичним збільшенням. Переміщення мішені записувалися відеокамерою в цифровому форматі, оброблялися комп'ютерною програмою й визначалися переміщення місця колії у трьох площинах [205].

Оскільки силові параметри переміщення фіксувалися одним комп'ютером, була можливість точного суміщення масивів даних для одержання інформації про пружні й дисипативні характеристики рейкових опор зі скріпленнями ТРЕП і залізобетонними шпалами.

Відеоцифрова система дозволила виключити вплив вібрацій баласту й земляного полотна на вимірювання переміщень, має добру електромагнітну сумісність і високу точність вимірів 0,03–0,05 мм.

5.3 Результати експериментальних досліджень роботи залізобетонних шпал ША–Т в умовах колій незагального користування

Експериментальні дослідження роботи залізобетонних шпал в умовах колій незагального користування були виконані у два етапи.

Роботи першого етапу, в яких автор брав участь як виконавець, були проведені у 2008–2009 роках на діючих коліях металургійних і гірничодобувних підприємств. Метою цих досліджень було отримання інформації для визначення пружних і дисипативних характеристик рейкових опор у вигляді залізобетонних шпал. З цією метою було вибрано 9 дослідних ділянок, характеристики яких наведено в табл. 2.5. Ділянки добирались таким чином, щоб отримати інформацію про роботу залізобетонних шпал у різних експлуатаційних умовах: рівень осьового навантаження, швидкість руху, термін експлуатації колій.

Ділянки 1–ша та 2–га були розташовані на коліях ЗАТ «Донецьксталь–МЗ», 3, 4 та 5 – на коліях Алчевського металургійного комбінату; 6–9 – та на коліях Полтавського гірничозбагачувального комбінату.

Визначалися вертикальні й горизонтальні (поздовжні та поперечні) сили, що діють на шпалу, та відповідні цим силам просторові переміщення шпал.

На кожній ділянці випробування проводились на 3–5 шпалах, на кожній шпалі результати вказаних параметрів фіксувались при проходженні 2–3 потягів.

Ця інформація була використана для отримання пружних характеристик рейкових опор (підрозділ 2.6).

Графіки надано для однієї шпали під час руху одного потяга, швидкість якого вказано на графіках. Узагальнені результати вимірювання сил, що діють на шпалу, наведені в табл. 5.1 (столбці 2–6). Рівень вертикальних сил, які були зафіксовані під час проведення експериментів, склав від 75,4 до 105,3 кН – під час руху чавуновозів вантажопідйомністю 80 т; 40,8 – 50,2 кН – для шлаковозів з ємністю ковша 11 м³; 40,3–53,2 кН – для думпкарів ВС–60.

Вертикальні пружні переміщення залізобетонних шпал знаходилися в межах 0,27–0,52 мм.

Середні значення горизонтальних поперечних сил, що діють на шпалу, складала від 6,8 до 15,0 кН; максимальні сили були зафіксовані під час руху чавуновоза вантажопідйомністю 80 т по кривій радіусом 400 м зі швидкістю 1,38 м/с – 23,2 кН.

Для експериментальної перевірки результатів, які були отримані з використанням математичної моделі динамічної системи «екіпаж–рейкова колія», розрахунками були визначені сили дії рейки на шпали для експлуатаційних умов дослідних ділянок 1–9.

Отримані значення вертикальних і горизонтальних поперечних сил наведені в табл. 5.1, столбці 6 та 7. Порівняння теоретичних і експериментальних даних показує, що ці значення мають задовільну збіжність, відмінність знаходиться в межах 4–8 %.

Метою експериментальних робіт другої серії була перевірка даних розрахунків напруженого стану залізобетонних шпал типу ША–Т в умовах

залізниць незагального користування.

Експериментальні роботи другого етапу були проведені на діючих коліях Харківської філії «ПрАТ Київ – Дніпровське МППЗТ». У 2012 році для проведення робіт були закладені дві дослідних ділянки: одна у прямій, друга – у круговій кривій радіусом 420 мм і підвищенням зовнішньої рейки 10 мм.

На ділянках була укладена ланкова колія з рейками Р65, знос до 9 мм на залізобетонних шпалах типу Ш–1–1 зі скріпленням КБ.

У скріпленні КБ застосовувалися поліетиленові підрейкові прокладки типу ЦП–7 і гумові нашпальні прокладки ЦП–5 товщиною 5 мм.

На дослідній ділянці було замінено 7 шпал Ш–1–1 на шпали ША–Т зі скріпленнями ТРЕП.

Після заміни шпал вирізаний баласт був повернутий у шпальні ящики, утрамбований, і колія експлуатувалася протягом двох місяців для стабілізації баластової призми з метою зменшення кількості факторів, що впливають, і за для можливості подальшого узагальнення результатів.

Вертикальні й горизонтальні нерівності колії на дослідних ділянках були усунуті. Експериментальні роботи проводилися під час руху на ділянках спеціального потяга, що складався з локомотива ТГМ–4 з паспортним осьовим навантаженням 200 кН, двох платформ моделі 13–401 на візках 18–100 і двох думпкарів ВР–85 з візками ДВС–30.

Платформи й думпкари були завантажені щебенем до вагової норми, розмір осьових навантажень контролювався на вагонних вагах підприємства.

Швидкості руху потяга по дослідних ділянках складали від 3 до 35 км/год. (0,83–9,72 м/с). Локомотив і вагони знаходилися в технічно справному стані.

Під час проведення експериментальних робіт вимірювались вертикальні й горизонтальні поперечні сили, які діють на шпалу, та напруги, що виникають на верхній постелі шпали при її навантаженні.

Крім того, у кривій ділянці колії були визначені із застосуванням методу Шлупфа горизонтальні поперечні сили дії на колію рухомого складу за різних швидкостей руху.

Таблиця 5.1

Експериментальні й розрахункові значення сил, що діють на шпалу (кН)

№ ділянки	Дані експерименту				Розрахункові дані	
	Вертикальні		Горизонтальні поперечні			
	Середні значення, $R_{зп}$	Максимальні значення	Середні значення, $R_{уш}$	Максимальні значення	Вертикальні значення, $R_{зп}$	Горизонтальні значення, $R_{уш}$
1	75,4	89,1			72,9	
2	92,7	105,3	19,0	23,2	89,9	17,31
3	40,8	50,2			41,2	
4	41,2	44,4	7,4	9,3	43,3	6,53
5	42,4	46,3	8,1	10,5	43,7	8,86
6	45,9	49,7			43,7	
7	47,1	53,2	6,8	8,6	45,3	7,05
8	40,3	46,1			42,9	
9	46,4	51,8	8,7	11,3	45,4	9,50

Оскільки головною метою проведення експериментальних робіт другого етапу було визначено експериментальну перевірку даних теоретичних розрахунків, для експлуатаційних умов дослідних ділянок були розраховані теоретичні значення горизонтальних поперечних сил взаємодії рухомого складу і колії у кривій з радіусом 420 м, вертикальні $R_{зп}$ і горизонтальні поперечні $R_{уш}$ сили, які діють на шпалу при застосуванні скріплень ТРЕП, а також згинальні напруження посередині верхньої постелі шпали, викликані цими силами.

На рис. 5.5 наведені розрахункові значення горизонтальних поперечних сил дії на колію спеціального потяга під час його руху по кривій ділянці з радіусом 420 м. Ці сили становили від 4,9 кН до 8,35 кН – для думпкара ВС–85 та від 3,7 кН до

6,82 кН – для платформи моделі 13–401 залежно від швидкості руху.

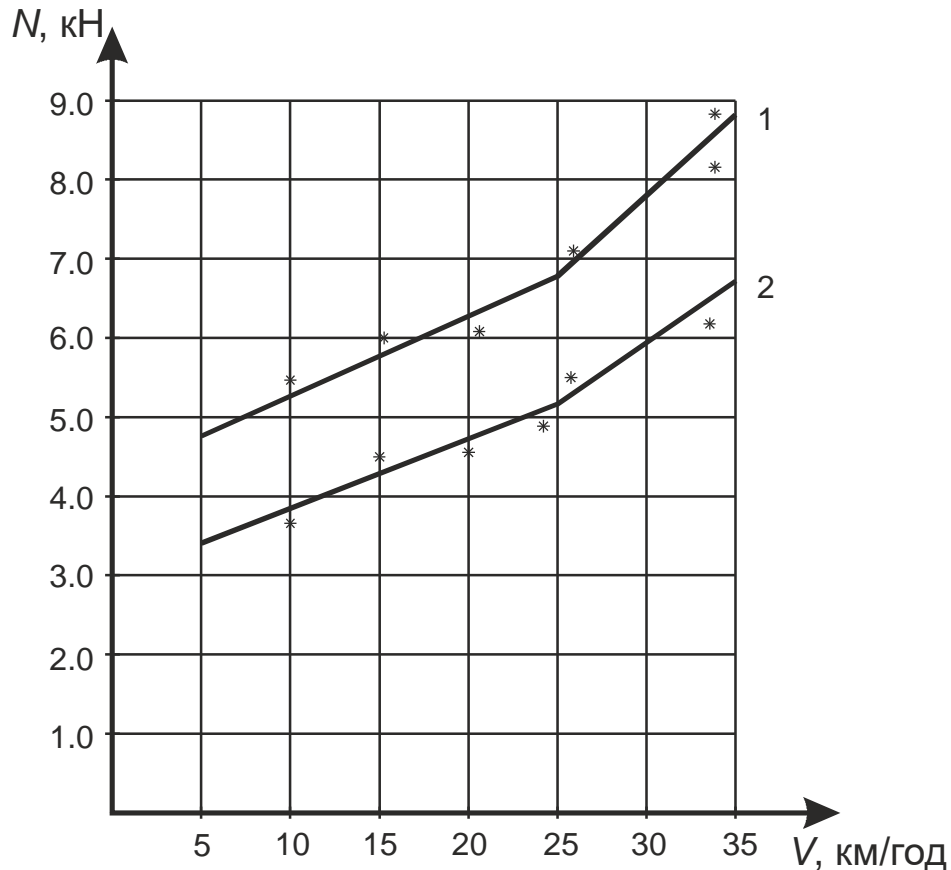


Рис. 5.5. Графіки залежностей зміни горизонтальних поперечних сил дії вагонів на колію: 1 – дуппкар ВС–85; 2 – платформа 13–401; * – експериментальні значення

Розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями знаходиться в межах 8,5 %. Теоретичні та експериментальні значення вертикальних і горизонтальних поперечних сил, які діють на шпалу, наведені на рис. 5.6 та 5.7. Максимальні розрахункові значення вертикальних сил $R_{\text{зш}}$ досягають 65,8 кН під час руху дуппкара ВС–85 і швидкістю 35 км/год. (9,7 м/с); для платформи 13–401 ці величини склали до 50 кН під час руху по кривій ділянці колії.

Максимальні значення горизонтальних поперечних сил, які діють на шпалу, становили до 4,2 кН – для дуппкара ВС–85 та 3,2 кН – для платформи 13–401. Дані цих розрахунків достатньо добре узгоджуються з даними експериментів. Максимальна розбіжність становить 9,4 %. Значення згинальних напружень, які виникають посередині верхньої постелі шпали під дією вертикальних $R_{\text{зш}}$ та горизонтальних поперечних $R_{\text{уш}}$ сил, наведені на рис. 5.8. Розрахункові значення

були отримані із застосуванням моделі шпали МСЕ.

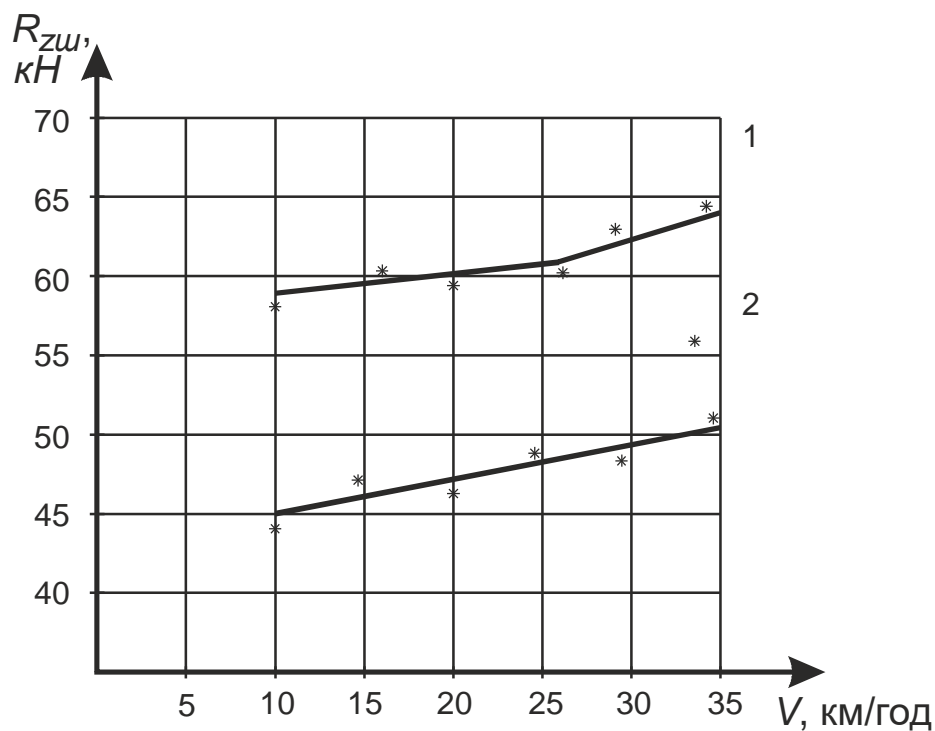


Рис. 5.6. Графіки залежностей зміни вертикальних навантажень на шпалу зі скріпленнями ТРЕП: 1 – думпкар ВС–85; 2 – платформа 13–401;

* – експериментальні значення

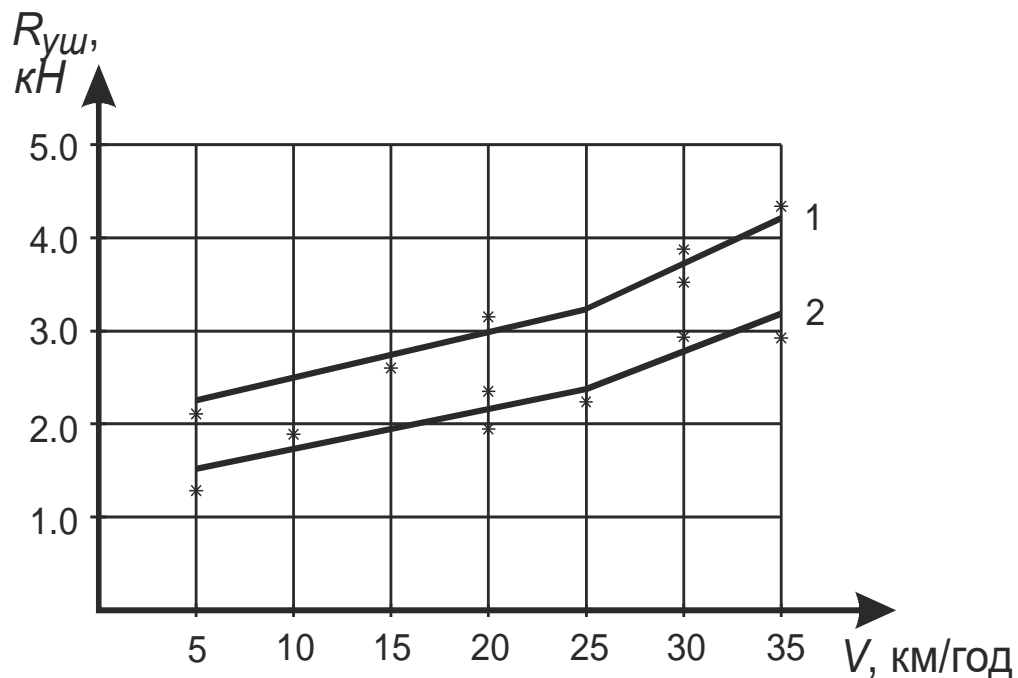


Рис. 5.7. Графіки залежностей горизонтальних поперечних навантажень на шпалу: 1 – думпкар ВС–85; 2 – платформа 13–401; * – експериментальні

значення

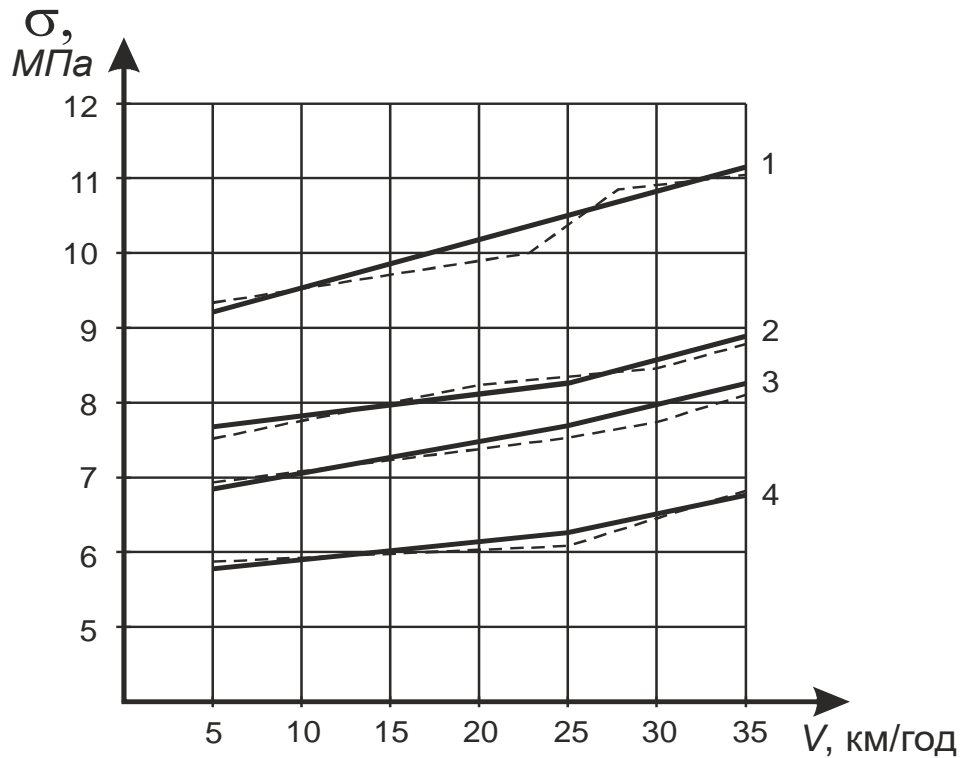


Рис. 5.8. Згинальні напруження, які діють у шпалі: 1 – думпкар ВС–85, крива; 2 – думпкар ВС–85, пряма; 3 – платформа 13–401, крива; 4 – платформа 13–401, пряма

Згинальні напруження, які діють у шпалі, змінюються в межах між 5,88 МПа (платформа 13–401, пряма ділянка колії, швидкість руху – 5 км/год.) до 11,1 МПа (думпкар ВС–85, крива радіусом 420 м, швидкість руху – 35 км/год.). Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними знаходилась у межах 9,6 %.

5.4 Висновки за розділом

1. Головними цілями, проведення експериментальних досліджень роботи залізничної колії в умовах промислового транспорту, було прийнято такі:

- одержання інформації для визначення пружних характеристик рейкових опор, виявлення впливу особливостей експлуатації й термінів служби колії на ці характеристики;

- експериментальна перевірка результатів розрахунків напруженого стану шпал із застосуванням пропонованого програмного комплексу розрахунків.

2. Під час проведення експериментальних робіт були визначені горизонтальні поперечні сили дії на колію від рухомого складу, просторові переміщення шпал під

дією цих сил, напруги, що виникають на верхній постелі шпал.

3. Сили й напруження визначалися із застосуванням сучасної ефективної апаратури, комп'ютерної техніки та програмного забезпечення, які дозволяли визначати досліджувані параметри з високою точністю в цифровому вигляді, точно фіксувати зміни параметрів у часі, зберігати, передавати й обробляти великі обсяги інформації в електронній формі.

4. Для визначення просторових переміщень елементів колії було застосовано відеоцифрову систему вимірювань переміщень.. Система виключає, на відміну від найбільш застосовуваних систем, вплив коливань баласту і земляного полотна при проведенні вимірювань. Розроблене програмне забезпечення системи дозволяє фіксувати зміни переміщень у часі, зберігати й обробляти інформацію в електронному вигляді.

5. Для проведення експериментальних робіт було обрано 9 дослідних ділянок із різними характеристиками плану й профілю колії, рівнями осьових навантажень, вантажонапруженістю, термінами експлуатації колії.

6. Результати експериментальних робіт дозволили уточнити значення жорсткостей рейкових опор на залізобетонних шпалах ША–Т. Уперше було встановлено вплив експлуатаційних характеристик колії й термінів її експлуатації на пружні характеристики рейкових опор в умовах колій незагального користування.

7. Порівняння даних про силові параметри та напружений стан залізобетонних шпал зі скріпленнями, які були отримані в результаті розрахунків із використанням розробленої математичної моделі й комплексу програм, з результатами експериментальних робіт показало, що ці результати мають добру збіжність. Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними знаходиться в межах до 9,5 %.

Матеріали, які викладені в цьому розділі, захищено патентами на корисну модель [221, 222].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана важлива задача дослідження напружено–деформованого стану підрейкової основи з проміжними рейковими скріпленнями з урахуванням сил взаємодії спеціального та спеціалізованого рухомого складу та колії в умовах залізниць незагального користування. Проведені дослідження дають підстави зробити такі висновки:

1. Розроблені математичні моделі для визначення просторових жорсткостей проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш дозволили встановити перелік параметрів конструктивних елементів для визначення просторової жорсткості вузла зазначених скріплень, а саме:

– жорсткість підрейкових та нашпальних прокладок при стисканні та її зміна у процесі експлуатації;

– жорсткість підрейкових і нашпальних прокладок при зсуві в поперечному та подовжньому напрямках і залежності цієї жорсткості від величини стисканні прокладок вертикальними силами;

– жорсткість пружних клем КПТ;

– жорсткість вкладиша.

Одержані розрахункові рівняння дозволяють визначати ці жорсткості при динамічній дії на колію спеціального та спеціалізованого рухомого складу.

2. Проведено експериментальні дослідження, які дозволили встановити жорсткості пружних елементів проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш. Зроблено прогнозну оцінку змін жорсткостей під час експлуатації. Встановлено, що для умов залізниць незагального користування проміжні рейкові скріплення типів ТРЕП та ТРЕП–Ш мають просторові жорсткості які в 1,6 – 2,4 рази менші, ніж жорсткості проміжного рейкового скріплення типу КБ.

3. Адаптовано математичну модель просторової динамічної системи «екіпаж–колія», яка враховує особливості роботи рейкових опор при застосуванні проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш. В основу моделі просторової динамічної системи «екіпаж–колія» покладено загальну розрахункову схему колії у вигляді балок на дискретних рейкових опорах із нелінійними пружно–

дисипативними характеристиками, що враховує додаткові динамічні сили, викликані саме нерівнопружністю підрейкової основи.

4. Багатоваріантні числові дослідження просторових сил взаємодії залізничної колії та спеціального, спеціалізованого рухомого складу залізниць незагального користування при застосуванні проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП, ТРЕП–Ш та КБ показали, що при застосуванні проміжних рейкових скріплень типу ТРЕП рівень динамічних сил підвищується, в середньому, на 4–7 %, у порівнянні з проміжними рейковими скріпленнями типу КБ, а при застосуванні проміжних рейкових скріплень типу ТРЕП–Ш рівень таких сил зменшується на 5–12 %.

5. Для визначення напружено–деформованого стану підрейкової основи розроблено комплекс моделей рейок, елементів проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш, шпал та баласту на основі використання методу скінченних елементів. Виконано багатоваріантні числові розрахунки просторового напруженого стану елементів підрейкової основи з проміжними рейковими скріпленнями типів ТРЕП та ТРЕП–Ш в умовах експлуатації колій незагального користування. Встановлено, що у кривих ділянках колії напруження у клемах проміжного рейкового скріплення типу ТРЕП може досягати значення 1280 МПа, а при застосуванні проміжного рейкового скріплення типу ТРЕП–Ш 1190 МПа при різних типах рухомого складу. Напруження в залізобетонних шпалах змінюється в межах від –12 МПа до 3,3 МПа при проміжних рейкових скріпленнях типу ТРЕП, а при застосуванні проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП–Ш від –6,06 МПа до 1,81 МПа. Еквівалентні напруження в середній зоні залізобетонної шпали з урахуванням напружень попереднього натягу струнної арматури досягають 19,17 МПа при проміжних рейкових скріпленнях типів ТРЕП та ТРЕП–Ш. На розподіл просторових напружень у шпалі істотно впливає перевантаження зовнішньої рейки у кривій та перерозподіл навантажень на шпалу від прокладки та анкерів внаслідок дії горизонтальних поперечних сил. Отримані розрахунками напруження в баласті досягають рівня 0,376 МПа при проміжних рейкових скріпленнях типу ТРЕП.

6. Здійснено верифікацію розрахунків сил взаємодії колій та рухомого складу, виконаних на підставі комплексу математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж–колія» та оцінки напружено–деформованого стану підрейкової основи з проміжними скріпленнями типів ТРЕП та ТРЕП–Ш при статичному та динамічному навантаженнях. Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними становить 9,5 %.

7. Розроблено рекомендації щодо використання проміжних рейкових скріплень типів ТРЕП та ТРЕП–Ш в умовах колій залізниць незагального користування. Проміжні рейкові скріплення типів ТРЕП рекомендується використовувати у прямих та кривих ділянках з радіусами 350 м та більше, де обертається рухомий склад з осьовими навантаженнями до 300 кН. Проміжні рейкові скріплення типів ТРЕП–Ш рекомендується використовувати у прямих ділянках колії з осьовими навантаженнями до 450 кН та швидкістю руху до 10 км/год. При осьових навантаженнях більше 450 кН застосувати зазначені скріплення не рекомендовано.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.3–19–2008. Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування (укр).– Чинний від 2008–08–01. Київ: *Міністерство регіонального розвитку та будівництва України*. 2008. 168 с.
2. СНиП:2.05.07–91*. Промышленный транспорт. Чинний від 1992–07–01. Москва: *Проектный научно–исследовательский институт промышленности транспорта (Промтрансшиппроект)*, 1992. 68 с.
3. СНиП:32.01.95. Железные дороги колеи 1520 мм. Москва: *Стройиздат*, 1987. 72 с.
4. Правила технічної експлуатації міжгалузевого промислового залізничного транспорту України. Чинний від 2009–10–01. Київ: *Міністерства транспорту та зв'язку України*. 2009. 65 с.
5. ЦП–0150. Технічні вказівки з використання староприсадибних матеріалів верхньої будови колії на залізницях України. Чинний 2006–03–24. Київ: *Держ. адмін. залізн. транспорту України*, 2006.– 56 с.
6. Яковлев В. Ф. Специальные конструкции пути промышленных железных дорог. Ленинград: *ЛИИЖТ*, 1981. – 43 с. – (монографія)
7. Железнодорожные пути металлургических заводов/ М. А. Фришман та інші. Москва: *Металлургия*, 1975. – 272 с.
8. Железнодорожный путь и станции промышленных предприятий / В. И. Ангелейко та інші. Киев: *Вища школа*, 1988. – 320 с. (учебник для ВУЗов)
9. Содержание и ремонт железнодорожных путей в черной металлургии / А. Н. Перцев та інші. Москва: *Металлургия*, 1986.– 228 с. (учебное пособие)
10. Путь и путевое хозяйство промышленных железных дорог./ В. Ф. Яковлев та інші. Москва: 1990.– 341с. (уч. пособие)
11. Бидер А. В., А. В. Глазов, В. П. Нетусов Анализ находящихся в эксплуатации железобетонных шпал. Москва: *Промтранспорт*, 1974– 130 с.
12. Вагоны. Конструкция, теория и расчет / под ред. Л. А. Шадура. Москва: *Транспорт*, 1973– 439 с. (учебник)

13. П.В. Шевченко, А. П. Горбенко. Вагоны промышленного железнодорожного транспорта. Киев.: *Вища школа*, 1980.– 224 с.
14. Вагоны СССР [каталог–справочник К7–68]. М.: *НИИИнф–ш*, 1969.–176 с.
15. Вагоны СССР [каталог–справочник 18–8–74]. М.: *НИИИнф.*, 1975.–198 с.
16. Вагоны СССР [каталог–справочник 2–6–84]. М.: *НИИИнф.*, 1985.–212 с.
17. Дерибаса А. Т. Промышленный транспорт. М.: *Тр–рт*, 1974.– 559 с.
18. Скиба И. Ф. Вагоны. М.: *Транспорт*, 1979.– 302 с. (мон.)
19. Даренський О. М. Розвиток теоретичних основ і методів дослідження: дисертація д.т.н: 05.22.06/УкрДАЗТ.Харків, – 2012. 550 с.
20. Холодецкий А. А. Исследование влияния внешних сил на верхнее строение железнодорожного пути. Киев: *Тип. Литогр. И.Н. Кушнеров и Ко*–1896.– №12.– С.507–517, 1897.–№ 1.– С.8–22, №2.– С.66–76, №3.–С.124–131, №4.– С.183–193. (*Журнал инженер*)
21. Смирнов С. Н. Курс подвижного состава и тяги. С–Петербург: *Институт инженеров путей сообщения*, 1895. – 439 с. (*монография*)
22. Цеглинский К. Ю. Железнодорожный путь в кривых. Москва:1903.– 155 с. (*монография*).
23. Инженерный совет / Журнал комиссии подвижного состава, тяги и мастерских. Москва:1910.–№8.– С.12–24; № 26.– С.34–45,1911; № 11.– С.64–85.
24. Хейман Х. Графическое определение центра трения. *Organ f.d.F.* 1913.– №6.– С.22–31; №7.– С.17–29; №9.– С.45–58.
25. Матюшин Н. Т. Динамические напряжения железнодорожного пути в кривых. Москва:1917.– 127 с. (*монография*)
26. Петров Н. П. Влияние поступательной скорости на напряжения в рельсе. С–Петербург: *Записки РТО*, книга 2–я. 1903.– 89 с. (*монография*)
27. Петров Н. П. Постепенное развитие и современное состояние вопроса о напряжениях, вызываемых в рельсе вертикальными силами. С–Петербург: *Железнодорожное дело*.– 1904.–№5.–С.43–51.

28. Петров Н. П. Напряжения в рельсах от изгибов в вертикальной плоскости и вероятность определения этих напряжений опытами. С–Петербург: 1906.– 107 с. (*монография*)

29. Петров Н. П. Напряжения в рельсах от вертикальных давлений катящихся колес. Влияние скорости и неправильного вида колес. С–Петербург: 1907.– 120 с. (*монография*).

30. Петров Н. П. К вопросу о прочности рельс. С–Петербург: 1912.– 84 с. (*монография*).

31. Васютынский А. Л. Наблюдения над упругими деформациями железнодорожного пути. *Сборник института инженеров путей сообщения*. С–Петербург: 1899.– 130 с.

32. Тимошенко С. П. К вопросу о вибрации рельсов. Известия электротехнического института. Москва: 1905–т.ХІІІ,– С.21–37.

33. Тимошенко С. П. О динамических напряжениях в рельсах. *Вестник инженера*. Москва: 1915.–№4.– С.22–32.

34. Гордыцкий–Цвирко А. М. О динамических расчетах верхнего строения пути. *Журнал МПС*. Москва: 1905.–№1.– 20 с.

35. Method of analysis of statical and Dinamical stresses in Rail. S.P.Timoshenko. Congress for applicd Mechanis Zurich, 1926–26p., Proccedings of the 2 nd International.

36. Гордыцкий–Цвирко А. М. Взаимодействие пути и подвижного состава железных дорог. Москва: *Гострансиздат*, 1931.– 215с. (*монография*)

37. Степкин С. А. О местных напряжениях в рельсах при кручении. *Сборник трудов ЛИИЖТ*. Ленинград: 1937.–№127.– С.47–69.

38. Шахунянц Г. М. Расчеты элементов верхнего строения пути на прочность. Москва: *МИИТ*,1939.– 154 с. (*учебник*)

39. Голованов Д. Г. Работы рельсов в кривых. Л.: ЛИИЖТ,1941.– 86 с. (мон.)

40. Королев К. П. Вписывание паровозов в кривые участки пути. *Труды ЦНИИ*. Москва: 1950.–№ 37.– С.47–76.

41. Снитко Н. К. Расчет рельса на горизонтальные силы с учетом скручивания методом начальных параметров. *Информационный бюллетень Военно-транспортной академии*. 1950.– №26.– С.54–88.

42. Ангелейко В. И. О предпосылках для разработки наставления по расчету верхнего строения пути. *Техника железных дорог*.– 1949.– №6.– С.12–24.

43. Ангелейко В. И. К вопросу о влиянии поперечных горизонтальных сил на напряжения в рельсе. Харьков: ХИИТ, 1953.– 131 с.

44. Ангелейко В. И. О влиянии поперечных горизонтальных сил на напряжения в рельсе. Харьков: *Труды ХИИТ, Трансжелдориздат*.– 1956.–№26. – С.112–142.

45. Ангелейко В. И. Вывод основных уравнений для расчета рельса в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Харьков: *ХИИТ*,1958.– 38 с. (монография)

46. Ершков О. П. Изгиб и кручение рельса под действием горизонтальных поперечных сил. *ЦНИИ МПС*.– 1951.– 26 с. (автореферат диссертация на соискание ученой степени к.т.н.)

47. Ершков О.П. Характеристики пространственной упругости рельсовой нити. *Труды ВНИИЖТ*.–М.:*Трансж–издат*.– 1960.–№192.– С.59–101.

48. Ершков О. П. Установление коэффициентов, учитывающих боковой изгиб и кручение рельсов. *Труды ЦНИИ*.– М.: *Трансж–здат*.–1955.–№97.– С.31–59.

49. Ершков О. П. Расчет рельса на действие боковых сил в кривых. *Труды ВНИИЖТ*.– М.: *Трансжелдориздат*.– 1960. №192.– С.59–101.

50. Ершков О. П. Определение боковых давлений вагонов на путь в кривых / О. П. Ершков // *Вестник ВНИИЖТа*,– 1961.– №8.– С.14–22.

51. Ершков О. П. Построение графиков удельных характеристик и графиков паспортов вписывания железнодорожных экипажей (теоретическая часть). *Труды ЦНИИ*.– М.: *Трансжелдориздат*.– 1963.– №268.–215с.

52. Ершков О. П. Расчет поперечных горизонтальных сил в кривых. *Труды ВНИИЖТ*.– М.: *Транспорт*.– 1966.–№301.

53. Петров Н. П. Влияние поступательной скорости на напряжения в рельсе. *Записки РТО*, книга 2-я. С-Петербург: 1903.– 89 с. (монография)
54. Петров Н. П. Напряжения в рельсах от вертикальных давлений катящихся колес. Влияние скорости и неправильного вида колес. С-Петербург: 1907.– 120 с. (монография)
55. Петров Н. П. К вопросу о прочности рельс. С-Петербург: 1912.– 84 с. (монография)
56. М. Бромберг, М. Ф. Вериго, В. Н. Данилов Взаимодействие пути и подвижного состава: навч. посіб / под ред. М. А. Фришмана. Москва: *Трансжелдориздат*.–1956.–280 с.
57. Шахунянец Г. М. Устройство железнодорожного пути, т. III. Москва: *Трансжелдориздат*, 1944.– 420 с. (монография)
58. Шахунянец Г. М. Расчеты верхнего строения пути. Москва: *Трансжелдориздат*, 1951.– 264 с. (монография)
59. Шахунянец Г. М. Железнодорожный путь. Москва: *Транспорт*, 1987.– 479 с. (монография)
60. Вериго М. Ф. Определение динамического модуля пути. *Техника железных дорог*.– 1949.– №12.– С.23–24.
61. Вериго М. Ф. О сопротивлении движению колеса по рельсу, обусловленному рассеянием энергии в железнодорожном пути. *Техника железных дорог*.– 1950.– № 8.– С.13–15.
62. Вериго М. Ф. Метод определения массы пути и сил трения в его основании, взаимодействующих с движущимся по рельсу колесом. *Техника железных дорог*.– 1951.– №6.– С.17–18.
63. Вериго М. Ф. Вертикальные силы, действующие на путь при прохождении подвижного состава. *Труды ВНИИЖТ*.– М.: *Трансжелдориздат*.– 1955.– №97.– С.25–288.
64. Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін Правила розрахунків залізничної колії на міцність в стійкість. Київ: *Транспорт України*.– 2006.– 168 с.

65. Е. І. Даніленко, М. Д. Костюк, О. М. Жученко Сучасні рейкові пружні скріплення і особливості вимог до вітчизняних скріплень на залізобетонних шпалах. *Залізничний транспорт України*. Київ: 2002.–№6.– С.3–12.

66. Е. І. Даніленко, М. Д. Костюк, О. М. Жученко Вибір раціональних параметрів пружності для вітчизняних скріплень на залізобетонних шпалах. *Збірник наукових праць КУЕТТ, «Трансп–тні системи і технології»*. К.:КУЕТТ:– 2003.–№1–2.– С.4–17.

67. Даніленко Е. І. Дослідження проміжних рейкових скріплень для залізобетонних шпал на витривалість при впливі циклічного навантаження . *Збірник наукових праць КУЕТТ, серія “Транспортні сис. і тех.”*. К.:КУЕТТ:– 2005.–С.26–38.

68. Даніленко Е. І. Забезпечення поперечної стійкості колії проти розпирання при сучасних конструкціях проміжних рейкових скріплень. *Збірник наукових праць ДЕГУТ, серія “Техніка, технології”*. К.:КУЕТТ:– 2008.–№12.– С.40–41.

69. Неровности на крестовинах Р65 1/11 с непрерывной поверхностью катания и обоснование норм износа / Э. И. Даниленко та інші, за ред. Э. И. Даниленко. *Межвузовский сборник научных трудов*. Днепропетровск: ДИИТ,– 1995,–№6,– С.63–75.

70. Е. І. Даніленко, В. М. Молчанов Сучасний підхід до визначення сил взаємодії колії та рухомого складу в зоні стрілочного переводу. *Вістник Дніпроп. Нац. Унів. залізничного транспорту*. Д.: 2003.– №2.– С.6–10.

71. Е. І. Даніленко, В. Д. Бойко, В. Г. Вербицький Графоаналітичний метод визначення динамічних сил взаємодії в зоні нерівностей на хрестовинах з залізобетонними брусами на основі аналізу їх параметрів. *Збірник тез доповідей 3–ої Науково–практичної конференції КУЕТТ, “Техніка, технол.”*– К.: КУЕТТ:– 2005, 6 с.

72. Е. І. Даніленко, В. Г. Бойко Вертикальні нерівності на хрестовинах у зоні перекочування за різних умов експлуатації. *“Проблеми та перспективи розвитку транспортних: техніка, технологія, економіка і управління”*. *Тези доповідей 2–ої науково–практичної конференції КУЕТТ*,– К.:КУЕТТ– 2004.– 24 с.

73. Э. И. Даниленко, С. Д. Тараненко, А. П. Кутах Стрелочные переводы железных дорог Украины (Технология производства, эксплуатации в пути, расчета и проектирования). К.: Киевский институт инженеров железнодорожного транспорта.– 2001.– 296 с.

74. Дослідження повздожньої стійкості рейкошпальної решітки при різних конструкціях проміжного рейкового скріплення / Е.І. Даніленко та інші, за ред. Е.І. Даніленко. *Збірник тез доповідей 2-ої науково-практичної конф. КУЕТТ.*– К.: КУЕТТ– 2004.– 34 с.

75. Э. И. Даниленко, В. О. Демченко, В. Г. Вербицкий. Анализ влияния профиля поверхности катания на устойчивость движения колесной пары. *“Проблеми та перспективи розвитку транспортних: техніка, технологія, економіка і управління”.* Тези доповідей 2-ої науково-практичної конференції КУЕТТ.– К.: КУЕТТ– 2004.– 24 с.

76. Даниленко Э. И. Об оптимизации размерных соотношений в паре “колесо-рельс”. *Залізн. Транс. України.*– 2006.– №6.– С.58–59.

77. Даниленко Э. И. О разработке новой редакции “Правил инженерных расчетов пути на прочность, устойчивость и долговечность для железных дорог Украины”. *“ Проблеми та перспективи розвитку транспортних технологій: техніка, технологія, економіка і управління”.* Тези доповідей 2-ої науково-практичної конференції КУЕТТ.– .:КУЕТТ– 2004.– 30 с.

78. Влияние осевой нагрузки вагонов на динамические показатели напряженно-деформированного состояния элементов пути. В. В. Рыбкин та інші під ред. В. В. Рыбкина. *Труды ДИИТа*–1990.–№278/31– С.9–15.

79. Инженерний розрахунок залізничної колії на міцність. В.В. Рибкін та інші під ред. В.В. Рибкін. *Залізничний транспорт України.*– 2005.– №2.– С.40– 44.

80. В. В. Рыбкин, Н. П. Сысын Методика экспериментального определения вертикальной упругости пути под фактически действующими динамическими нагрузками от подвижного состава. *Тезисы 65 Международной научно-практической конференции “Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта”* – Днепропетровск.: КУЕТТ.2005.– №2,– 183 с.

81. Теоритичні дослідження впливу пружності проміжних рейкових скріплень на деформативну роботу колії. В. В. Рибкін та інші. *Тези XVI Міжнародної науково–практичної конференції “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту”*, – Дніпроп. – 2006,–№1.– 188 с.

82. В.В.Рыбкин, А.М.Патласов Математическая модель отказа рельсов по усталостным дефектам. *Труды ДИИТа*– 1990.– №278/31– С.52–58.

83. Рыбкин В. В. Влияние изменения спектра осевых нагрузок на усталостную прочность рельсов. *Труды ДИИТа*– 1991.– №282/32.– С.4–10.

84. В. В. Рибкін, М. А. Арбузов Вимірювання нейтральної температури рейкової пліті безстикової колії. *Вістник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.*– 2005.–№2.– С.78–80.

85. В. В. Рибкін, М. А. Арбузов Порівняльний аналіз методів контролю за повздовжніми напруженнями в рейкових плітях безстикової колії. *Вістник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.*– 2007.№17.– С.107–109.

86. В. В. Рибкін, М. П. Сисин, О. С. Набоченко Моделювання роботи безстикової колії у поперечному напрямку під дією повздовжніх температурних сил. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ* – 2008.–№91.– С.33–43.

87. В. В. Рибкін, В. А. Лисак Особливості математичної моделі при розрахунку стійкості безстикової колії. *Тезиси 69 Международной научно–практической конференции “Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта”* .– Днепропетровск.: КУЕТТ.2009,– №2.– 159 с.

88. В. В. Рибкін, В. А. Лисак Розробка математичної моделі для розрахунку стійкості безстикової колії чисельними методами. *Тезиси 70 Международной научно–практической конференции. “Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта”*. – Днепропетровск.: КУЕТТ, 2010.– №5,– С.191–192.

89. Н. В. Иволча, В. И. Климов Об инерционных свойствах пути при движении по нему постоянной силы. *Тр. ДИИТа.*–1975.–№167/16.–С.73–81.

90. Р. С. Липовский, В. Д. Данович Определение динамических параметров пути по экспериментальным частотным характеристикам. *Труды ДИИТа.*–1979.–№207/21.– С.70–77.

91. В. Н. Поньрко, Н. А. Пономаренко Оценки статистических характеристик приведенной массы пути. *Труды ДИИТа.*– 1979.– №204/21.– С.117–122.

92. Иволга Н. В. Запаздывание максимального прогиба рельса от точки приложения нагрузки как результат проявления неупругих сопротивлений пути. *Труды ДИИТа.*– 1982.– №223/24.– С.82–86.

93. Поньрко В. Н. К вопросу определения приведенной массы пути при нелинейной жесткости пути. *Тр. ДИИТа.*–1982.–№223/24.–С.86–92.

94. В. И. Климов, В. В. Рыбкин Статический расчет пути как балки на опорах с нелинейной жесткостью. *Тр. ДИИТ.*–1984.–№235/26.–С.3–8.

95. В. В. Рыбкин, А. К. Васильев Динамические вертикальные силы, действующие на рельс в зоне крестовины. *Труды ДИИТа.*– 1982.–№223/24.– С.69–74.

96. Рыбкин В.В. Моделирование сил трения в расчетах пути / В. В. Рыбкин, В. Н. Недашковский// *Труды ДИИТа.* – 1989.– №268/30– С.56–61.

97. В. В. Львовский, М. А. Фришман Математическая модель подрельсового основания для исследований взаимодействия пути и подвижного состава. *Труды ДИИТа.*– 1977.– №188/18.– С.69–81.

98. В. М. Львовский, Н. П. Настечин Колебания балки лежащей на двухслойном неравножестком основании, под действием сосредоточенных подвижных грузов. *Труды ДИИТа.*– 1977.– №188/18.– С.44–48.

99. Шульман З. А. Исследование силового воздействия движущейся вертикальной нагрузки на путь. *Труды ДИИТа.*– 1980.– №209/22.–С.54–68.

100. В. Д. Данович, В. Н. Поньрко Колебания рельса как балки бесконечной длины, лежащей на упругом основании, с учетом неупругих сопротивлений. *Труды ДИИТа.*– 1984.– №235/26.– С.59–65.

101. Вериго М. Ф. Расчет напряжений в балластном слое и на основной площадке земляного полотна. *Труды ВНИИЖТ.* – М.: Трансжелдориздат.–1955.– №97.– С.326–353.

102. Вериго М. Ф. Основные принципиальные положения разработки новых правил расчета железнодорожного пути на прочность с использованием ЭВМ. *Труды ВНИИЖТ.*– М.–1967.– №343,– С.106–150.

103. Коган А. Я. Колебания рельса при движении по нему переменной нагрузки. *Вестник ВНИИЖТ.*– 1968.–№1.– С.7–12.

104. Коган А. Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь. *Труды ЦИИТ МПС.*– М.:Транспорт.– 1969.– 206 с.

105. Расчеты железнодорожного пути на вертикальную динамическую нагрузку / под ред. А. Я. Когана. – *Труды ВНИИЖТ.*–1973.– №502.– 80 с.

106. М. Ф. Вериго, А. Я. Коган Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: *Транспорт.*– 1986.– 599 с.

107. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М.: *Транспорт.*– 1997.– 326 с. (монография)

108. А. Я. Коган, Г. И. Матусовский Влияние конструкции и состояния пути на устойчивость колеса. *Вестник ВНИИЖТ.*– 1982.–№8.– С.42–44.

109. А. Я. Коган, В. М. Гаврилов Математическая модель расчета контактно–усталостной долговечности рельсов. *Вестник ВНИИЖТ.*– 1983.– №2.– С.46–48.

110. А. Я. Коган, А. А. Верхоткин Исследование спектральных характеристик нестационарных процессов в верхнем строении пути. *Вестник ВНИИЖТ.*– 1984.– №с.– С.45–48.

111. Определение поперечных сил, действующих на вагоны в случае возникновения в поезде значительных продольных сил / Е. Н. Блохин та інці под ред. Е. Н. Блохин. *ВНИИЖТ.*–1987.– № 6.С.34–36.

112. А.Я.Коган, М.А.Левинзон Метод решения задачи определения параметров вписывания в круговую кривую грузового вагона, сжатого продольными силами в поезде. *Тр. НИИЖТ.*–Новосибирск,–1988.–С.83–87.

113. А. Я. Коган, А. А. Львов, М. А. Левинзон Характеристики подвижного состава и спектральных неровностей пути для скоростей до 350 км/ч. *Вестник ВНИИЖТ.*– 1991.– №3.– С.10–14.
114. А. Я. Коган, Ю. Л. Пейч Расчет нестационарного напряженно–деформированного состояния элементов конструкции пути в зоне стыка рельсов. *Вестник ВНИИЖТ.*– 2002.– №с.– С.31–39.
115. А. Я. Коган, И. В. Полищук Об основных параметрах, определяющих устойчивое движение экипажей. *Вест. ВНИИЖТ.*–2005.–№2.– С.4–6.
116. Коган А. Я. Некоторые особенности воздействия на путь подвижной нагрузки. *Вестник ВНИИЖТ.*– 2005.– №3.– С.16–19.
117. А. Я. Коган, Э. Д. Загитов Определение относительной скорости неупругого скольжения колеса по рельсу. *Вестник ВНИИЖТ.*–2006.– №6.– С.19–21.
118. А. Я. Коган, Е. В. Филатов Определение сил продольного трения скольжения в контакте колесо–рельс на базе программного комплекса “ВЭИП”. *Проблемы путевого хозяйства Восточной Сибири. Сборник научных трудов ИрГУПС*– Иркутск, вып.2.– 2004. С.19–29.
119. Вериго М.Ф. Динамика вагонов. –М.:ВЗИИТ,1971.–175с. (конс. лекц.)
120. М. М. Соколов, В. Д. Хусилов, В. Д. Минкин Динамическое нагружение вагонов. М.: Транспорт.– 1981.– 207 с.
121. В. Д. Хусидов, Г. И. Петров.–. Разработка математического и программного обеспечения расчетов движения четырехосного и восьмиосного вагонов в кривых. М.: *МИИТ.*– 1991.– 46 с.
122. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колёс. М.: *ПКТБ ЦП МПС.*– 1997.– 207 с.
123. Волошко Ю. Д. Расчет рельса как балки на дискретных упругих опорах со случайными характеристиками. *Труды ДИИТ.*– 1977–№196/19.– С.93–98.
124. Першин С. П. Вертикальная жесткость пути и его надежность. *Путь и путевое хозяйство.*– 1996.– №8.– С.8–10.

125. Клименко Л. В. Расчет пути с учетом неравноупругости подрельсового основания. *Путь и путевое хозяйство.* – 2005. – №6. – С.34–35.

126. А. Керр, А. Зарембски Новые уравнения для реакции пути на шпалах в поперечной плоскости. *Железные дороги мира.* – 1987. – №10. – С.52–58.

127. В. Ф. Яковлев, И. И. Семенов Исследование сил взаимодействия колеса и рельса с учетом нелинейных односторонних связей и переменных масс. *Труды ЛИИЖТ.* – 1964. – №238. – С.46–95.

128. В. Ф. Яковлев, И. И. Семенов Исследование упруго–динамических характеристик пути и определение динамических вертикальных сил в крестовине. *Труды ЛИИЖТ.* – 1967. – №222. – С.17–29.

129. В. Ф. Яковлев, И. И. Семенов, Н. С. Никеров Расчет рельсошпальной решетки железнодорожного пути как пространственной системы. *Труды ЛИИЖТ.* – 1969. – №296. – С.3–15.

130. Никеров Н. С. К вопросу о пространственной работе рельсошпальной решетки. *Труды ЛИИЖТ.* – 1969. – №296. – С.15–29.

131. К. Д. Белых, П. П. Гонтаровский Вариационный метод расчета рельса как пространственной конструкции верхнего строения пути. *Труды ДИИТ.* – 1972. – №138. – С.129–138.

132. Белых К. Д. К вопросу расчета рельса по методу предельных состояний на базе пространственной расчетной схемы в условиях промтранспорта. *Труды ДИИТ.* – 1975. – №167/16. – С.113–119.

133. К. Д. Белых, М. К. Уманов, Г. Н. Малышко О нагрузках от колёс при расчете железнодорожного пути. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 1976. №5. – С.78–79.

134. К. Д. Белых. Теория расчета и исследование напряженно–деформированного состояния железнодорожного пути на металлургических заводах. Ленинград: ЛИИЖТ, 1979. 41с., *автореферат диссертация на соискание ученой степени д. т. наук.*

135. Яковлев В. Ф. Измерение деформаций и напряжений деталей машин. М.: Машгаз, 1963. – 192 с. (*монография*)

136. Яковлев В. Ф. Исследование контактных напряжений в элементах колеса и рельса при действии вертикальных и касательных сил. *Труды ЛИИЖТ.*– №187.– С.3– 89.

137. Яковлев В. Ф. О применимости теории Герца–Беляева к расчету контактных напряжений в боковых выкружках головки рельса и гребня колеса. *Труды ЛИИЖТ.*– 1963.– №210.– С.121–123.

138. В. Ф. Яковлев, И. А. Кудрявцев Влияние схемы приложения нагрузок на контактную выносливость рельсов. *Вест. ВНИИЖТ.*– 1977.–№1.– С.33–36.

139. Смирнов М. П. Напряжения в зоне перехода головки в шейку рельса при действии боковой силы. *Тр.ЛИИЖТ.*–1968.– №280.– С.49–62.

140. Даренський О. М. Теоретичні та експериментальні дослідження роботи залізничних колій промислового транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2011.– 204с. (монографія)

142. В. И. Англеико, А. Н. Даренский, Ю. Т. Ерофеев Определение возможностей укладки бесстыкового пути на уклонах более 30‰ на путях предприятий Минчермета СССР . Отчеты о НИР N ГРО 1870087056 . *ХИИТ*, Харьков,1990– 90с.

143. О. М. Даренський, Н. В. Бугаець Оцінка впливу на колію поздовжніх сил, які виникають в поїзді в умовах промислового транспорту. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ.*– 2006–№72.– С.119–124.

144. О. М. Даренський, Н. В. Бугаець Експериментальне визначення коефіцієнтів постілі шпал в умовах промислового залізничного транспорту. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ.*– 2011.– №127.– С.34–36.

145. Даренський О. М. Умови контактування коліс і рейок в горизонтальній площині. Силкові і кінематичні зв'язки екіпажа і колії. *Зб.наук. праць УкрДАЗТ.*– 2010.– №113.– С.171–177.

146. О. М. Даренський, В. Г. Вітольберг Експериментальне визначення пружних характеристик прокладок проміжних скріплень КБ. *Зб.наук. праць УкрДАЗТ.*– 2007.– №87.– С.172 – 178.

147. О. М. Даренський, В. Г. Вітольберг Експериментальне визначення пружних характеристик елементів проміжного скріплення КПП –5. *ДонНІИЖТ Збірник наукових праць.*– 2008.– №13.– с.139–143.

148. Визначення сил опіру поперечному переміщенню залізобетонних шпал у баласті. О. М. Даренський та інші. *Зб.наук.праць УкрДАЗТ.*– 2008.– №91.– С.89–96.

149. О. М. Даренський, В. Г. Вітольберг Сопротивление промежуточных скреплений КБ и КПП–5 перемещениям рельсов в продольной плоскости. *ДонНІИЖТ Збірник наукових праць.*–2008. – №14. – С.142 – 152.

150. О. М. Даренський, В. Г. Вітольберг Экспериментальное определение сопротивлений скреплений КБ и КПП–5 перемещениям рельсов в продольной плоскости. *ДонНІИЖТ Збірник наукових праць.* – 2008.–№15.– С.112 – 124.

151. О. М. Даренський, В. Г. Вітольберг Метод оценки надежности противоугольных систем. *Державний економіко–технологічний університет транспорту.* – 2009. – №14. – С.35 – 40.

152. О. М. Даренський, В. Г. Вітольберг, Н. В. Бугаєць Результати експериментальних робіт по визначенню сил опору залізобетонних шпал продольним переміщенням. *ДонНІИЖТ Зб.наук.пр.* 2009. – №17. – с.157 – 171.

153. О. М. Даренський, Н. В. Бугаєць, В. Г. Вітольберг Визначення приведеної вертикальної жорсткості рейкової нитки при використанні розрахункової схеми як балки на пружних опорах з випадковими характеристиками. *Зб.наук.праць УкрДУЗТ.*– 2010,№115– с.151–161.

154. Вітольберг В. Г. Особливості опору залізобетонних шпал СБ 3–0 поздовжнім зсувам на коліях промислових залізниць. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім.В.Даля.*–2012.–№4(175).–С.53–58.

155. Darenskiy A., Vitolberg V. Results of researches by the numeral methods of vertical influences on the way of carriages of industrial transport at the railroad ties SB 3–0. 4, *ТЕКА*–Vol.12. –, с.36–40.

156. О. М. Даренський, Н. В. Бугаєць, В. Г. Вітольберг Розрахунок рейки як балки на пружних опорах під дією рухомого навантаження. *ДІПТ, тези доповідей.*– 2010.– №14.– С.171.

157. О. М. Даренський, Н. В. Бугаєць Оцінка рівня впливу на колію поздовжніх сил, які виникають в поїзді в умовах промислового транспорту. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ.*– 2006 – №72.– С.119 –124.

158. Бугаєць Н. В. Результати експериментальних робіт з визначення напружень у баластному шарі і на основній площадці земляного полотна в умовах промислового залізничного транспорту. *Зб.наук.праць УкрДАЗТ №119, 2010р.*

160. Бугаец Н. В. Экспериментальные исследования виброускорений основной площадки земляного полотна в условиях промышленного транспорта. *Сб.научных трудов, SWorld (РИИЦ SCIENCE INDEX).*– Том№3. – 2013. – С.77 – 81.

161. Бугаєць Н. В. Вплив експлуатаційних характеристик промислових залізниць на змінення коефіцієнта постілі шпал. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім.В.Даля.*–2012.–№9(180)Ч.2–С.254–257.

162. Даренский А. Н., Клименко А.В. Моделирование взаимодействия пути и подвижного состава при дискретном подрельсовом основании в зоне рельсовых стыков. *Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті, №4, 2013, с.15 – 22.*

163. Клименко А.В. Особенности расчетов взаимодействия пути и подвижного состава в зоне рельсовых стыков при дискретном подрельсовом основании. *Вісник Східно–українського національного університету імені Володимира Даля, №9 (198) Луганськ, 2013.*

164. Ржевский В. В. Открытые горные работы: В 2т.. – М.: Недра, 1985.–т.1 – 510с.2 – 550 с. (*монографія*)

165. Л.И. Иванова, Н. И. Карпущенко/Экспериментальные исследования перемещений элементов рельсошпальной решетки под поездной нагрузкой. *Труды НИИЖТ–1971 №129.–С.61–67.*

166. Взамен ГОСТ 252–75. Резина. Метод определения относительного гистерезиса и полезной упругости при растяжении. Введ. 01.01.77 до 01.01.87–М.: *Изд–во стандартов*, 1976.–5с.

167. Взамен ГОСТ 11053–75. Резина. Метод определения условно–равновесного модуля. Введ.01.01.78 до 01.01.88– М.:*Изд–во стандартов*, 1976.– 3с.

168. Даренский А. Н. Результаты лабораторных испытаний скрепления типа КБ. *ЦНИИТЭИ МПС.*– 1983.№2145.– С.11.

169. Ю. Д. Волошко, А. М. Микитенко Рельсовый путь с блочными железобетонными опорами. М.:Транспорт, 1980.– 176 с.

170. Купцов В. В. Современные конструкции и параметры промежуточных рельсовых скреплений для железобетонных шпал. Повышение надежности работы верхнего строения пути.М., 2000.– С.100 –129.

171. В. И. Дырда, А. В. Мазнецова, Т. Е. Твердохлеб Расчет силовых резинотехнических изделий, используемых в горном машиностроении. М.: *ЦНИИТ Энефтехим*, 1991. – 64 с.

172. В. И. Дырда, Е. Ф. Чижик Резиновые детали в машиностроении. Днепропетровск: *Полиграфист*, 2000. – 584 с.

173. Карпущенко Н. И. Надежность связей рельсов с основание. М.: Транспорт, 1986.–150с. (*монография*)

174. Н. И. Карпущенко Н. И. Антонов Совершенствование рельсовых скреплений.. – Новосибирск: *Изд–во СГУСа*, 2003.– 300с.

175. Ю. Н. Ладыгин, Ю. М. Стойда Лабораторные испытания рельсовых скреплений. *Путь и путевое хозяйство.* – 2005.– №12.– С.8 –12.

176. «Розробка теорії та методів оптимізації несучих конструкцій транспортних споруд», 2008-2010 р ДР № 6110U002127

177. «Розробка теоретичних основ та експериментальні дослідження впливу струмів на бетон та розчин бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій», 2010 р ДР № 0110U002128

178. «Розробка єдиного технологічного процесу роботи під'їзної колії ЗАТ «Донецьксталь» - металургійний завод» та станції Донецьк ДП Донецька залізниця 2010 р ДР № 0108U003761).

179. Васютынский А. А. Наблюдения над временными деформациями верхнего строения пути на Варшаво–Венской железной дороге. *Труды XV съезда инженеров сл. пути.* – М.: 1858. С. –12 – 17.

180. Стецкевич И. Р. Об опытах над устойчивостью верхнего строения пути при проходе поездов. *Протоколы XII совмещенного съезда инженеров службы пути русских железных дорог.* – М.:1894. – С.– 65 – 72.

181. Варызгин Е. С. Расчет сопротивления поперечному сдвигу по торцам шпал. *Вестник ВНИИЖТ.* 1970.– №8.– С.35 – 37.

182. В. И. Новикович, В. В. Ершов Определение сопротивления рельсо–шпальной решетки перемещениям поперек оси пути. *Вестник ВНИИЖТ.*– 1982.– №8.– С.48 – 50.

183. М. С. Боченков, В. А. Грищенко Определение стыковых и погонных сопротивлений температурным деформациям рельсовых плетей. *Железнодорожный путь на грузонапряженных участках* . Новосибирск: 1976. С.51 – 56.

184. В. Ф. Яковлев, И. И. Семенов, В. И. Абросимов Определение расчетных параметров пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях с помощью вибромашины. *Труды ЛИИЖТа,*– Л.:ЛИИЖТ.–1971.–выпуск 326.– С.66 – 85.

185. Влияние эксплуатации и работ по содержанию бесстыкового пути на поперечное сопротивление балластного слоя / *Бюллетень технико–экономической информации / ЦНИИТЭИ МПС.*– М., 1972 №3.– С.55 – 58.

186. Кудрявцев Н. Н. Исследование динамики необрессоренных масс вагонов. М.:*Труды ВНИИЖТ.*–1965 – №287, – 168с.

187. Исследование неровностей колесных пар пассажирских вагонов / М.: *Труды ВНИИЖТ.* – 1979 – №608, –118 с.

188. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. учебник для вузов–9–е изд., перераб.– М.: Наука,–1996 – 512с.
189. Н. П. Бусленко, Ю. А. Шрейдер. Метод статических испытаний (Монте–Карло). М.: ГИФМЛ, 1961. – 216 с.
190. Даренский А. Н. Результаты определения пространственных неупругих сопротивлений железнодорожного пути деформациям для условий промышленного транспорта. ИКСЗТ.– 2010. – №6. – С. 78 – 82с.
191. Исследование работ железобетонных шпал на промышленном железнодорожном транспорте. под. ред. Б. А. Евдокимова. сб.трудов. М.: *Стройиздат*,1982 – 132 с.
192. Золотарский А. Ф. Железобетонные шпалы для рельсового пути : Золотарский А. Ф и др под ред. А. Ф. Золотарского. – М.: *Транспорт*, 1980. – 270 с.
193. А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров Компьютерные модели конструкций. Киев: *Факт*, 2005. – 343 с.
194. С. Ф. Клованич, Д. И. Безушко Метод конечных элементов в нелинейных расчетах пространственных железобетонных конструкций. ОНМУ, 2009. – 89 с.
195. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике.М.: *МИР*,1975.– 541 с.
196. А. С. Городецкий Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений. А. С. Городецкий и др. М.: *Транспорт*, 1981. –142 с.
197. Шайдуров В. В. Многосеточные методы конечных элементов. – М.: *Наука*, 1989. – 349 с.
198. Программный комплекс“ ЛИРА – Windows” III1 – 8 / –К. : *НИИАС*, 1997. – 254 с.
199. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций ЛИРА версия 9.0: Книга1. Основные теоретические и расчетные положения /–К.: *НИИАС*, 2002.– 147с. (*руководство пользователя*)
200. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций ЛИРА версия 9.0:Книга 2.Путеводитель /– К.: *НИИАС*, 2002. – 189с. (*руководство пользователя*)

201. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций ЛИРА версия 9.0: Книга 3. Примеры расчета и проектирования / – К.:НИИАС, 2002. – 99с. (руководство пользователя)
202. Фадеева Г. Д., Паршина К. С., Родина Е. В. Железнодорожные шпалы: настоящее и будущее // Молодой ученый. — 2013. — №6. — С. 161-163.
203. В. Ф. Яковлев, Н. А. Шашков, Е. П. Дукин Исследования напряженного состояния верхнего строения пути от воздействия слитковозных платформ. *Труды ЛИИЖТ.* – 1973. – №360. – С.69 – 75.
204. Даниленко Э. И. Влияние вертикальной нагрузки при измерении горизонтальных сил в пути / Э. И. Даниленко и др. *Вестник ВНИИЖТ*, М.: 1979. – Вып.І. – С.41 – 44.
205. О. М. Даренський, Н. В. Бугаєць, В. Г. Вітольберг Видеоцифровая система элементов измерения перемещений железнодорожного пути. *Зб.наук.праць УкрДАЗТ.* – 2009. – №109 – с.222 – 231.
206. Членов М. Т. Длинные рельсы. – М.: Трансжелд., 1950. – 203 с. (монография)
207. Коган А. Я. Продольные силы в железнодорожном пути. *Тр. ВНИИЖТ*, вып. 332, – М.: *Транспорт*, 1967 – 166 с.
208. Львовский В. В., Фришман М. А. Математическая модель подрельсового основания для исследования взаимодействия пути и подвижного состава // Исследования взаимодействия пути и подвижного состава: Сб. научн. тр. *Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп.*, вып. 188/18. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1977. – С. 69–74.
209. Новосельцев В.П., Новосельцев П.В., Гордеева А.А. Влияние продольной жесткости рельсового пути на проскальзывание колесной пары локомотива по рельсу // *Мир Транспорта*. 2013. № 4 (38) С. 34-38.
210. Новосельцев В.П., Новосельцев П.В., Гордеева А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния бесстыкового рельсового пути под действием осевой силы // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2014. № 4 (44). С. 69-73.

211. Клинов С. И. Метод определения погонного сопротивления по характеру продольных перемещений в бесстыковой рельсовой плети. *ТР МИИТ*: вып. 318:– М., 1969.– С.136 – 144.

212. М. А. Фришман, Л. Я. Воробейчик, Р. С. Липовской Экспериментальные определения жесткостей и неупругих сопротивлений пути. *Вестник ЦНИИ МПС.* – 1970.– №8.– С.31 – 35.

213. Даренский А.Н. Результаты экспериментальных исследований работы железнодорожного пути промышленного транспорта. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ* – 2011. – №125. – С.39 – 45.

214. Даренський О.М., Беліков Е.А. Аналіз вертикальної просторової жорсткості скріплення типу КППТ–7. *Зб. наук. Праць УкрДУЗТ.* Харків, УкрДУЗТ. 2015. Вип. 155. С. 190–195.

215. Даренський О.М., Беліков Е.А. Перспективні конструкції проміжних скріплень для умов промислового залізничного транспорту. *Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті.* Харків, УкрДУЗТ. 2015. Вип. 2. С. 57 – 61.

216. Даренський О.М., Беліков Е.А. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничних колій. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ.* Харків, УкрДУЗТ. 2015. Вип. 154. С. 149–155.

217. Беліков Е.А. Жорсткість скріплень ТРЕП–Ш та ТРЕП при крученні рейки. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ.* Харків, УкрДУЗТ. 2016. Вип. 162. С. 81–86.

218. Даренський О.М., Беліков Е.А. Експериментальне визначення жорсткостей прокладок скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ.* Харків, УкрДУЗТ. 2017. Вип. 169. С. 150 – 156.

219. Даренський О.М. Беліков Е.А. Жорсткість скріплень ТРЕП під дією горизонтальних поперечних сил. Тези доповідей 80–ї міжнародної науково–технічної конференції 24 — 26 квітня 2018 року «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» УкрДУЗТ. Харків, УкрДУЗТ. 2018. Вип. № 177. – С. 107–108.

220. Беліков Е.А. Жорсткість пружних клем скріплень ТРЕП, ТРЕП–Ш. Тези доповідей VI міжнародної науково–технічної конференції: 19–21 квітня 2018 року «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті». Харків. УкрДУЗТ. 2017. с.187

221. Патент на корисну модель №70477. Україна МПК(2006): G01B 11/14, реєстраційний номер заявки № u2011 14788. Система для вимірювання переміщень в елементі інженерних конструкцій і споруд під дією навантажень / Даренський О.М., Астахов В.М., Вітольберг В.Г., Бугаєць Н.В., Беліков Е.А.; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. Заява 13.12.2011; опубліковано 11.06.2012 року, Бюл.№ 11/2012.

222. Патент на корисну модель № 74779 від 12.11.2012 року. Україна, МПК(2012.01): G01D 5/00, E01B 35/00, номер заявки № u201205038. Пристрій для вимірювання переміщень елементів інженерних конструкцій або споруд під дією навантажень / Даренський О.М., Астахов В.М., Клименко А.В., Беліков Е.А., Вітольберг В.Г., Бугаєць Н.В. заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. заявл. 23.04.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21, власник УкрДУЗТ.

ДОДАТОК А. ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕКІПАЖІВ І КОЛІЇ
А.1 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕКІПАЖІВ І КОЛІЇ, ПРИЙНЯТІ
В РОЗРАХУНКАХ

Таблиця А.1

Технічні характеристики спеціальних і спеціалізованих вагонів

Параметр	СИМВОЛ	Розмірність	Піввагон моделі 12–1000	Платформа чавуновозна 70 т
			1–Э	2– Э
Маса кузова $\frac{2P_{гр}}{пор}$	M	кг	$\frac{76,5 \cdot 10^3}{13,3 \cdot 10^3}$	$\frac{89,9 \cdot 10^3}{19,9 \cdot 10^3}$
Маса візка	m_T	кг	$4,3 \cdot 10^3$	$5,0 \cdot 10^3$
Моменти інерції кузова	I_{zk}	кг·м ²	$10,55 \cdot 10^5$	$7,77 \cdot 10^5$
	I_{yk}		$10,82 \cdot 10^5$	$16,2 \cdot 10^5$
	I_{xk}		$1,03 \cdot 10^5$	$1,24 \cdot 10^5$
Моменти інерції візка	I_{zm}	кг·м ²	$3,1 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$
	I_{ym}		$4,62 \cdot 10^3$	$5,37 \cdot 10^3$
	I_{xm}		$2,17 \cdot 10^3$	$2,52 \cdot 10^3$
Відст. за авто/сцепками	$2L_{ac}$	м	13,92	11,22
Відст. за шкворнями	$2L$	м	2,65	6,32
База візка	$2a$	м	1,85	1,85
Відст. між ресор. компл.	$2b$	м	2,036	2,036
Діаметр п'ятника	$2d$	м	0,3	0,3
Відст. від п'ятника до центру ваги	H_0	м	1,225	0,85
Відст. від осі кол.п. до п'ятника	H_1	м	0,420	0,420
Відст. між повзунами	b_1	м	1,530	1,53
Коеф. тертя в гасн. колиб.	ζ	–	0,1	0,1
Коеф. тертя на ковзуні	μ	–	0,5	0,5
Кут нахилу фр. плану	α_k	рад	1,047	1,047
Радіус колеса	r_k	м	0,475	0,475
Відст. між кр. катання	$S(t)$	м	1,58	1,58
Верт. жорсткість ресор	K_B	Н/м	$8,85 \cdot 10^5$	$10,21 \cdot 10^5$
Горизонтальна жорсткість ресор	K_T	Н/м	$4,2 \cdot 10^5$	$4,84 \cdot 10^5$
Тип візка	–	–	ЦНИИ Х–3–0	ДВЗ–30
Осьове навантаження	P_{oc}	кН	216	245

продовження таблиці А.1

Параметр	СИМВОЛ	Розмір- ність	Чавуновоз	Шлаковоз
			140 т	16 м ³
			6-Э	8-Э
Маса кузова $\frac{2P_{гр}}{пор}$	M	кг	$\frac{193 \cdot 10^3}{53 \cdot 10^3}$	$\frac{105 \cdot 10^3}{54,7 \cdot 10^3}$
Маса візка	m_T	кг	$7,75 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^3$
Моменти інерції кузова	I_{zk}	кг·м ²	$5,83 \cdot 10^5$	$2,61 \cdot 10^5$
	I_{yk}		$5,95 \cdot 10^5$	$2,68 \cdot 10^5$
	I_{xk}		$3,44 \cdot 10^5$	$2,02 \cdot 10^5$
Моменти інерції візка	I_{zm}	кг·м ²	$5,0 \cdot 10^3$	$5,2 \cdot 10^3$
	I_{ym}		$8,33 \cdot 10^3$	$8,06 \cdot 10^3$
	I_{xm}		$3,91 \cdot 10^3$	$3,78 \cdot 10^3$
Відст. за а/сц	$2L_{ac}$	м	9,0	7,85
Відст. за шкворнями	$2L$	м	5,0	4,1
База візка	$2a$	м	1,5	1,3
Відст. між ресорн. компл.	$2b$	м	2,05	2,05
Діаметр п'ятника	$2d$	м	0,4	0,4
Відст. від п'ятника до ц. ваги	H_0	м	0,3	1,85
Відст. від осі кол. п. до п'ятника	H_1	м	0,475	0,475
Відст. між повзунами	b_1	м	1,5	1,5
Коеф. тертя в гасн. колив.	ζ	—	0,1	0,1
Коеф. тертя на повзуні	μ	—	0,5	0,5
Кут нахилу фр. плану	α_k	рад	1,047	1,047
Радіус колеса	r_k	м	0,42	0,42
Відст. між кр. катання	$S(t)$	м	1,58	1,58
Верт. жорсткість ресор	K_B	Н/м	$40,8 \cdot 10^5$	$16,53 \cdot 10^5$
Горизонтальна жорсткість ресор	K_T	Н/м	$19,36 \cdot 10^5$	$8,85 \cdot 10^5$
Тип візка	—	—	УЗТМ	БМЗ
Осьове навантаження	$P_{ос}$	кН	516	211

продовження таблиці А.1

Параметр	СИМВОЛ	Розмірність	Думпкар 6–BC–60	Думпкар 8C–85	Візки для виливниць I–120–5500
			9–Э	10–Э	12–Э
Маса кузова $\frac{2P_{гр}}{пор}$	M	кг	$\frac{80,4 \cdot 10^3}{20,4 \cdot 10^3}$	$\frac{109,8 \cdot 10^3}{35,0 \cdot 10^3}$	$\frac{142 \cdot 10^3}{22 \cdot 10^3}$
Маса візка	m_T	кг	$4,3 \cdot 10^3$	$5,46 \cdot 10^3$	$6,08 \cdot 10^3$
Моменти інерції кузова	I_{zk}	кг·м ²	$7,03 \cdot 10^5$	$10,43 \cdot 10^5$	$4,25 \cdot 10^5$
	I_{yk}		$7,66 \cdot 10^5$	$11,47 \cdot 10^5$	$4,78 \cdot 10^5$
	I_{xk}		$0,75 \cdot 10^5$	$1,34 \cdot 10^5$	$1,07 \cdot 10^5$
Моменти інерції візка	I_{zm}	кг·м ²	$3,1 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^3$
	I_{ym}		$4,62 \cdot 10^3$	$5,87 \cdot 10^3$	$6,63 \cdot 10^3$
	I_{xm}		$2,17 \cdot 10^3$	$2,75 \cdot 10^3$	$3,07 \cdot 10^3$
Відст. за а/сц	$2L_{ac}$	м	11,83	12,17	6,22
Відст. за шкворнями	$2L$	м	9,6	7,75	3,1
База візка	$2a$	м	1,85	1,85	1,4
Відст. між ресор. компл.	$2b$	м	2,036	2,036	2,04
Діаметр п'ятника	$2d$	м	0,3	0,3	0,4
Відст. від п'ятника до ц. ваги	H_0	м	1,2	1,625	0,9
Відст. від осі кол. п. до п'ятника	H_1	м	0,426	0,426	0,266
Відст. між ковзунами	b_1	м	1,53	1,53	1,6
Коеф. тертя в гасн. колив.	ζ	–	0,1	0,1	0,1
Коеф. тертя на ковзуні	μ	–	0,5	0,5	0,5
Кут нахилу фр. плану	α_k	рад	1,047	1,047	1,043
Радіус колеса	r_k	м	0,475	0,475	0,325
Відст. між кр. катання	$S(t)$	м	1,58	1,58	1,58
Верт. жорсткість ресор	K_B	Н/м	$8,85 \cdot 10^5$	$12,75 \cdot 10^5$	$96,7 \cdot 10^5$
Горизонтальна жорсткість ресор	K_T	Н/м	$4,2 \cdot 10^5$	$5,81 \cdot 10^5$	$45,9 \cdot 10^5$
Тип візка	–	–	ЦНИИ X–3–0	ДВС–30	ДЗМ–0
Осьове навантаження	$P_{ос}$	кН	215	294	446

А.2 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕКІПАЖІВ І КОЛІЇ, ПРИЙНЯТІ В РОЗРАХУНКАХ

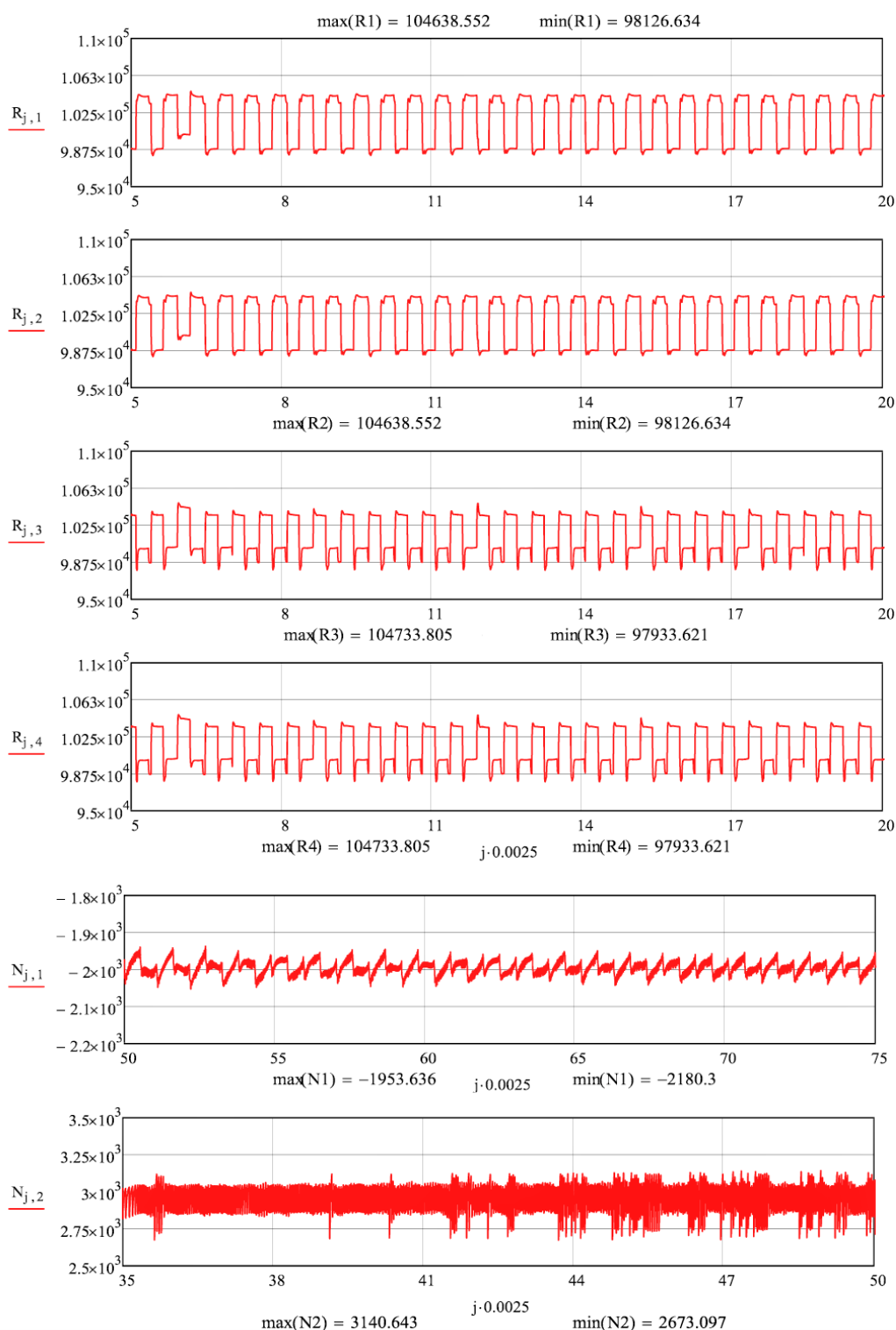
Таблиця А.2

Характеристики рейок

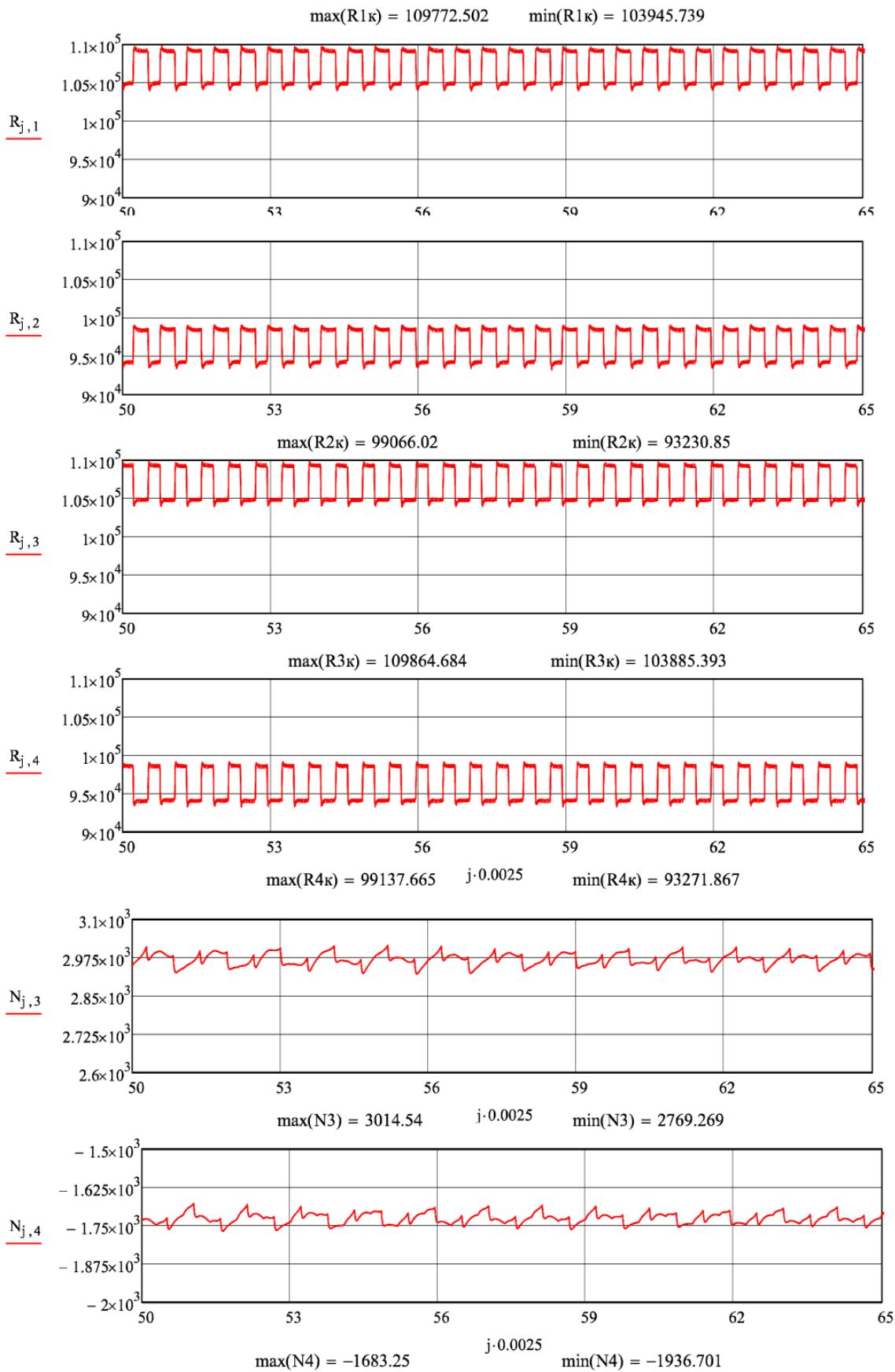
Термін служби t (років)	P_{oc}	Параметри					
		$I_z, \text{м}^2$	$I_y, \text{м}^4$	$K, \text{м}^{-1}$	$PH, \text{м}^4$	$h, \text{м}$	$h_1, \text{м}$
0	<25						
	25–35	$3548 \cdot 10^{-8}$	$565 \cdot 10^{-8}$	0,579	$6,9 \cdot 10^3$	0,18	0,0987
	>35						
10	<25	$3405 \cdot 10^{-8}$	$560 \cdot 10^{-8}$	0,574	$6,57 \cdot 10^3$	0,177	0,0976
	25–35	$3208 \cdot 10^{-8}$	$550 \cdot 10^{-8}$	0,573	$6,24 \cdot 10^3$	0,174	0,0971
	>35	$2948 \cdot 10^{-8}$	$541 \cdot 10^{-8}$	0,572	$5,94 \cdot 10^3$	0,171	0,0968

**ДОДАТОК Б. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ СИЛ ВЗАЄМОДІЇ
Б.1 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ СИЛ ВЗАЄМОДІЇ
СПЕЦІАЛЬНОГО ТА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ТА
КОЛІЇ, ЩО МАЄ ГОРИЗОНТАЛЬНІ ГЕОМЕТРИЧНІ НЕРІВНОСТІ
ПЛАНУ ТА ПРОФІЛЮ (ПОЧАТОК 40 М). ЕПЮРА – 1840, ШПАЛИ –
ЗАЛІЗОБЕТОННІ, ПОЧАТОК ПЕРЕХІДНОЇ КРИВОЇ – 15 М, ДОВЖИНА
ПЕРЕХІДНОЇ КРИВОЇ – 15 М**

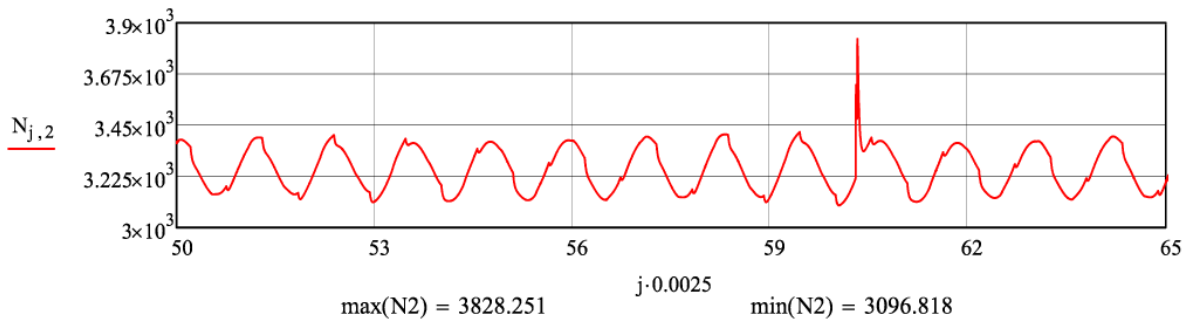
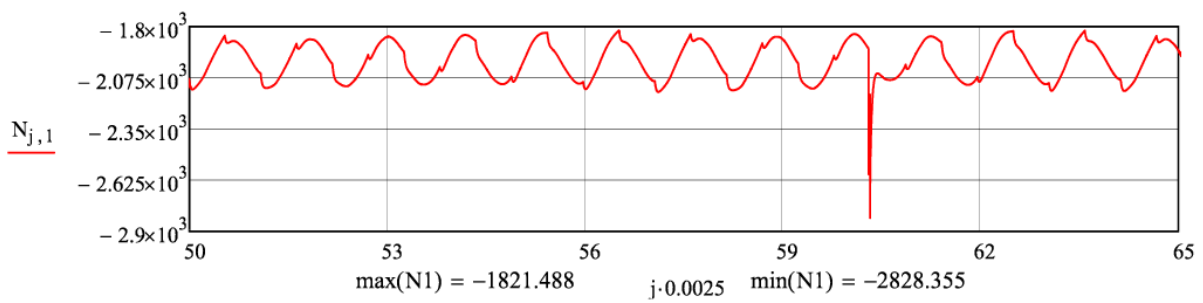
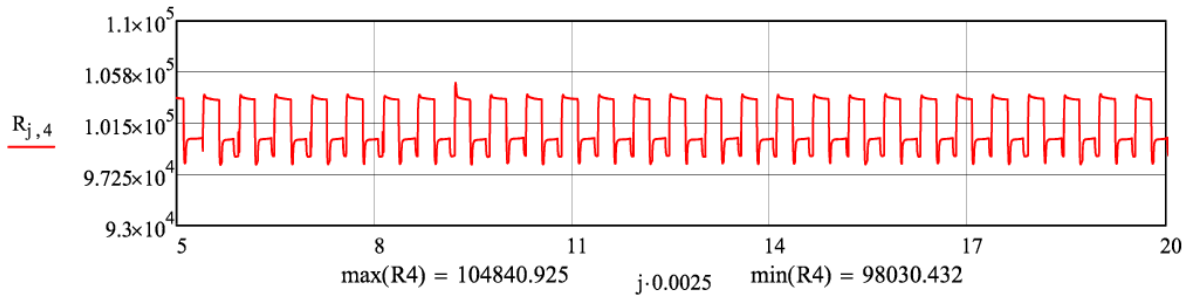
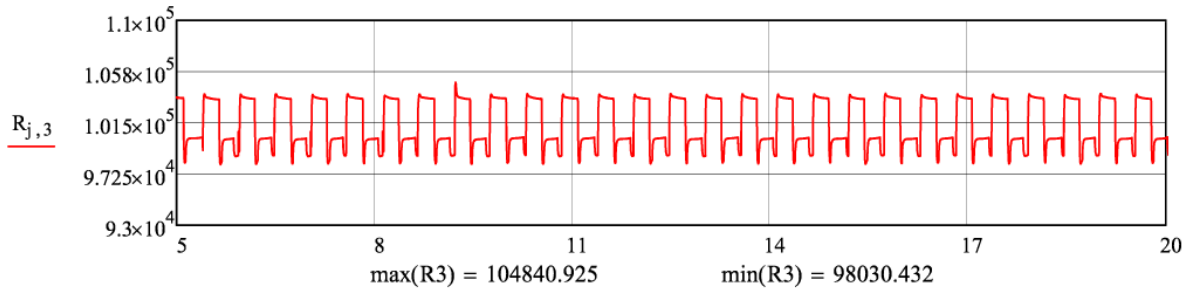
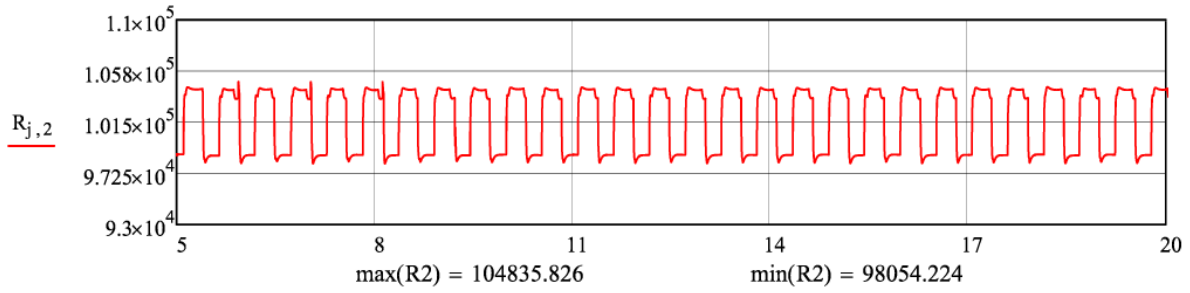
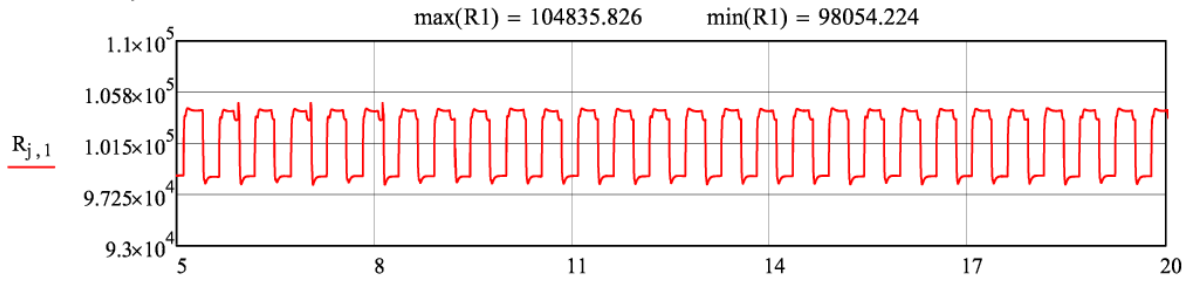
Б.1.1



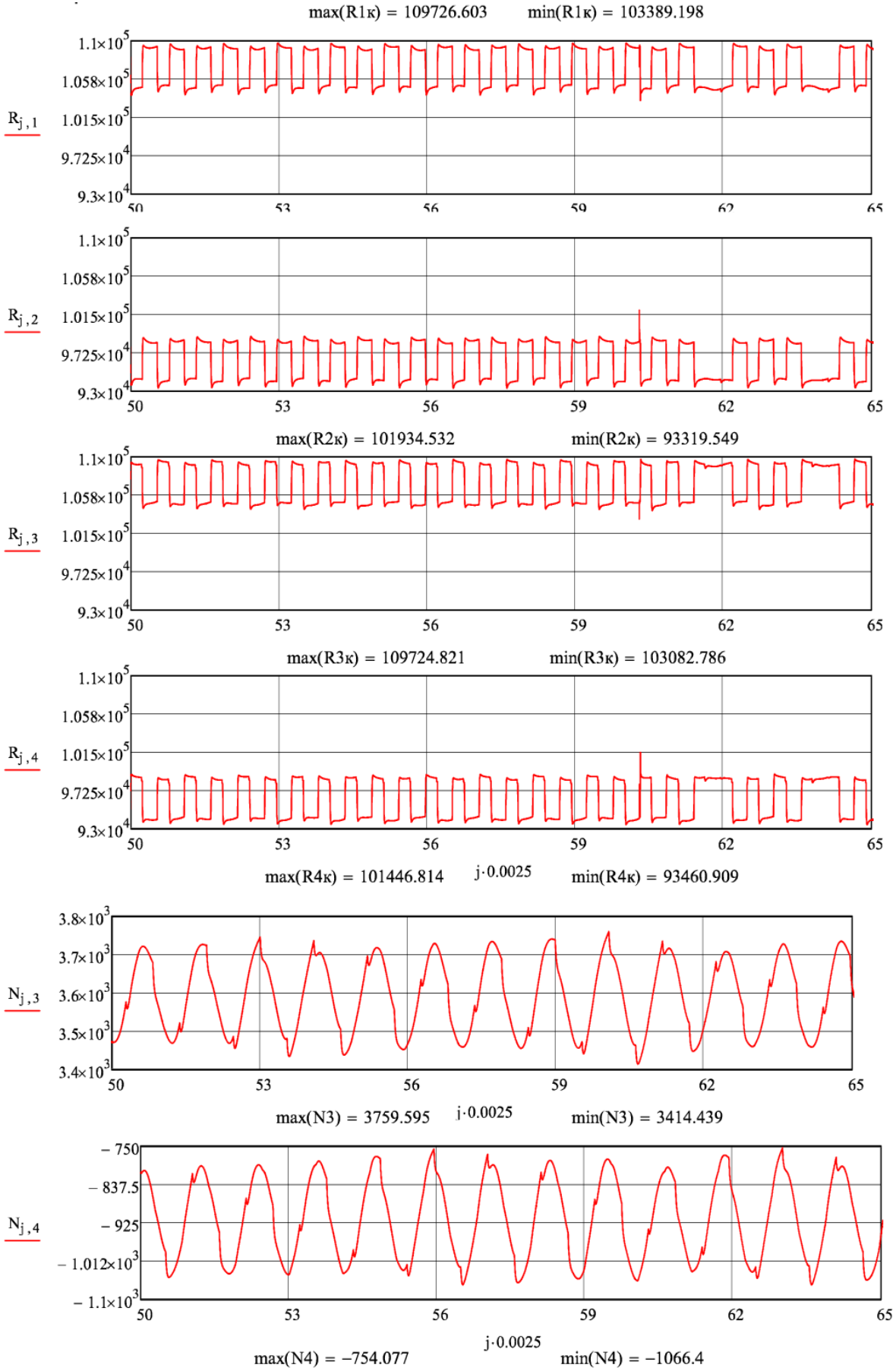
Б.1.2



Б.1.3

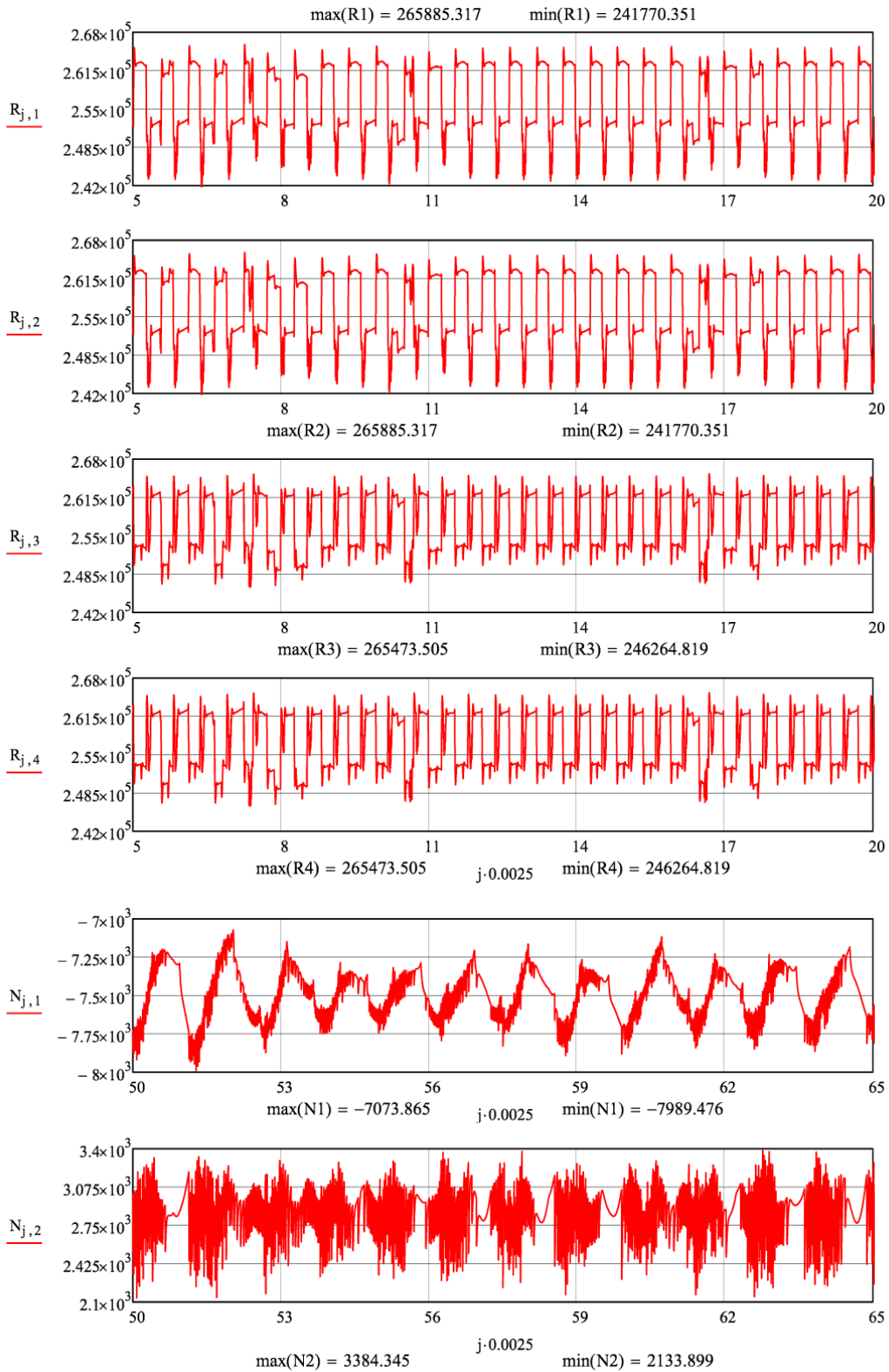


Б.1.4

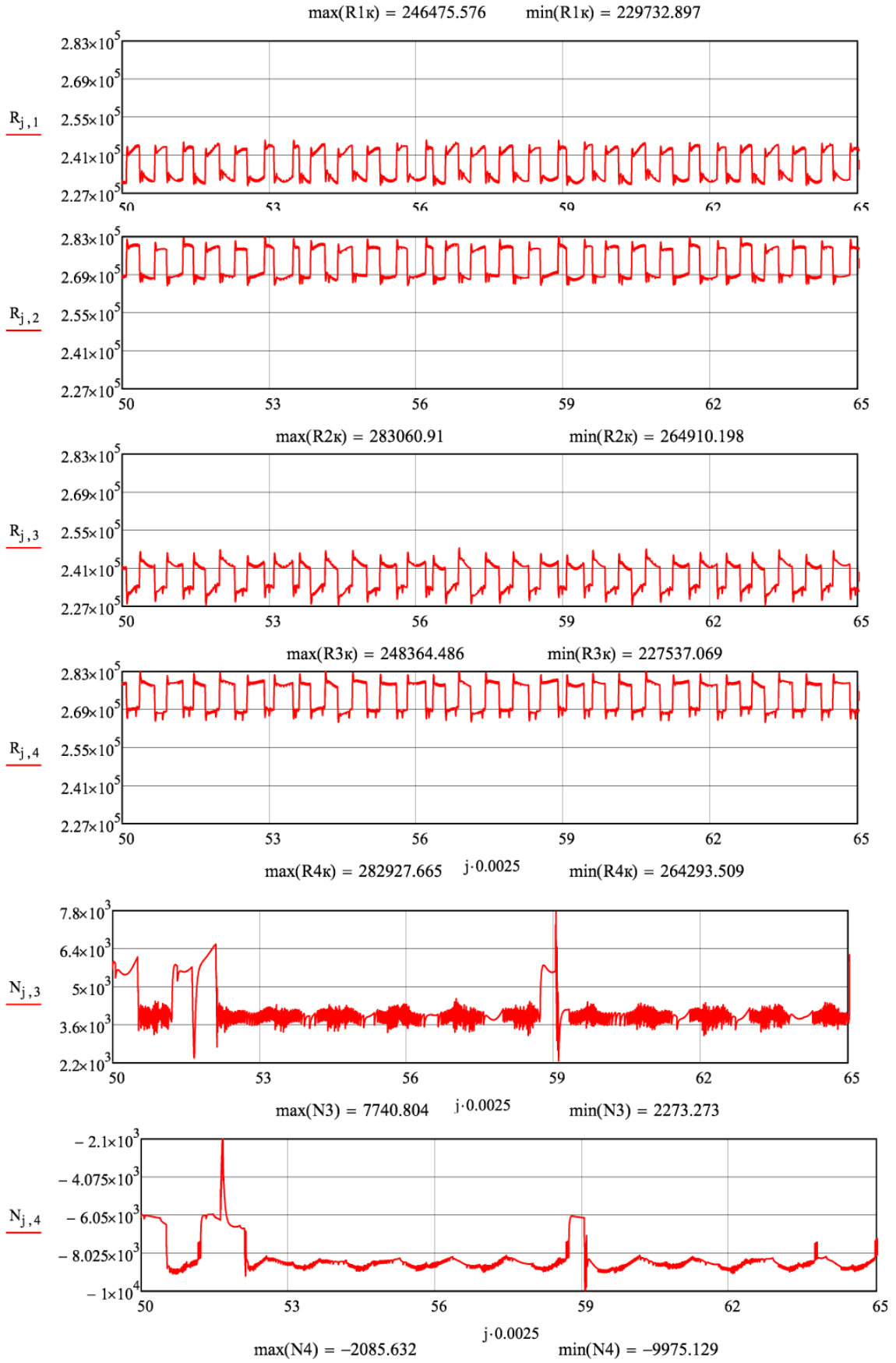


Б.2 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ СИЛ ВЗАЄМОДІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ Й КОЛІЇ, ЩО МАЄ ГОРИЗОНТАЛЬНІ ГЕОМЕТРИЧНІ НЕРІВНОСТІ (ПОЧАТОК 40 М). ЕПЮРА – 1840, ШПАЛИ – ЗАЛІЗОБЕТОННІ, ПОЧАТОК ПЕРЕХІДНОЇ КРИВОЇ – 15 М, ДОВЖИНА ПЕРЕХІДНОЇ КРИВОЇ – 15 М

Б.2.1



Б.2.2



ДОДАТОК В. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ СИЛ ВЗАЄМОДІЇ
В.1 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ СИЛ ВЗАЄМОДІЇ
СПЕЦІАЛЬНОГО ТА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ТА
КОЛІЙ НЕЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

Таблиця В.1

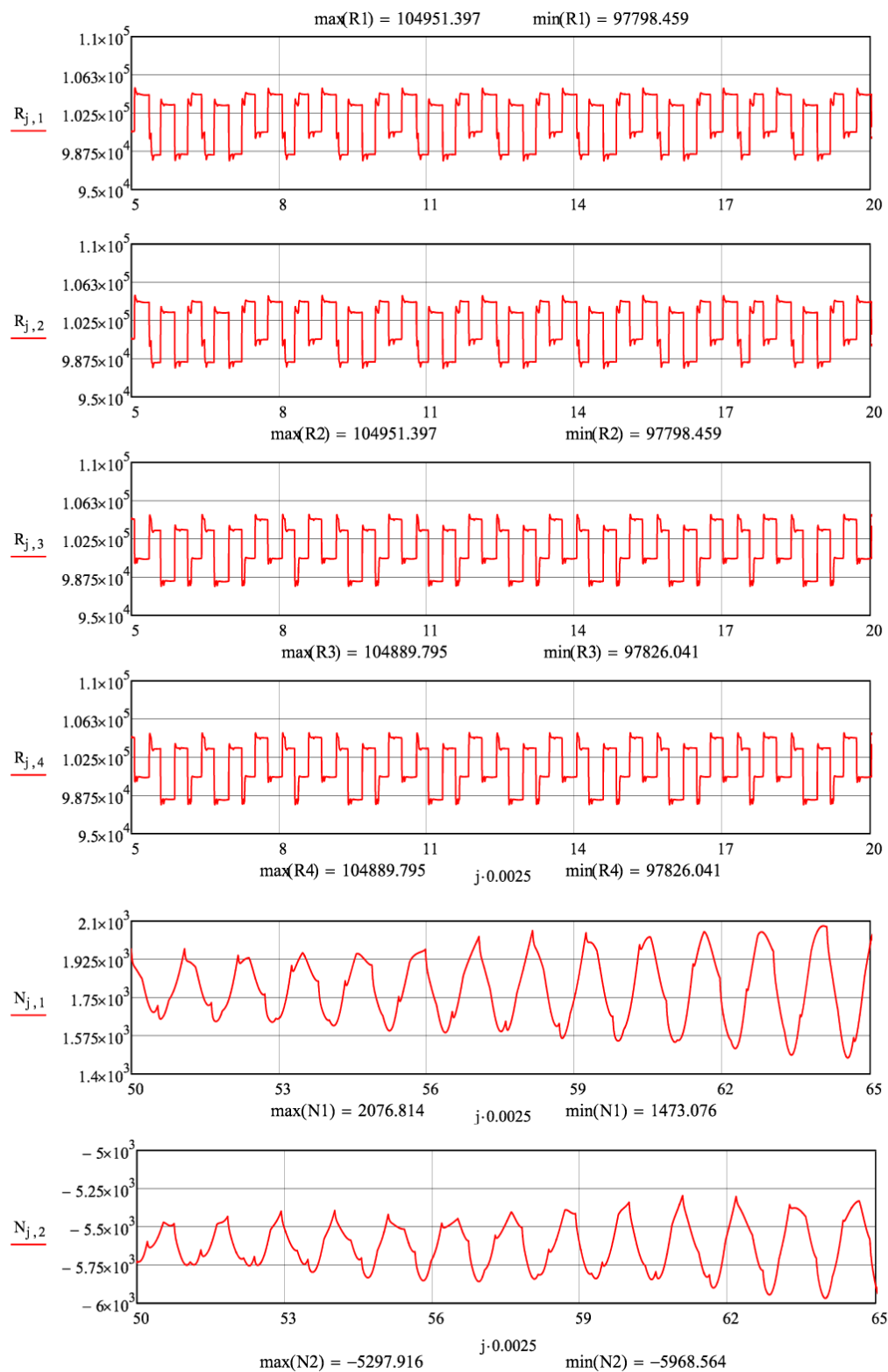
Характеристика розрахунків варіантів при скріпленні ТРЕП

		Осьове навантаження	Швидкість	Термін служби	План	Вв	Вг	Сz верт	Су гор
1	Чавуновоз 50 т (6)	20,1	5	0	Пряма	287	185	2299	4879,5
					350, h=0				
2				10	Пряма	402	219	8125	12010
					350, h=0				
3	Чавуновоз 80 т (7)	35,3	5	0	Пряма	295	232	3287	4987,2
4				10	Пряма	413	272	21036,73	17175,4
					350, h=0				
5	Чавуновоз 140 т (9)	51,6	5	0	Пряма	301	258	4158	5178,6
6				10	Пряма	420	301	19564	13276
					350, h=0				
7	Думпкар 6-BC-60 (13)	21,6	30	0	Пряма	287	185	2299	4879,5
8				10	Пряма	402	219	8125	12010
					350, h=35				

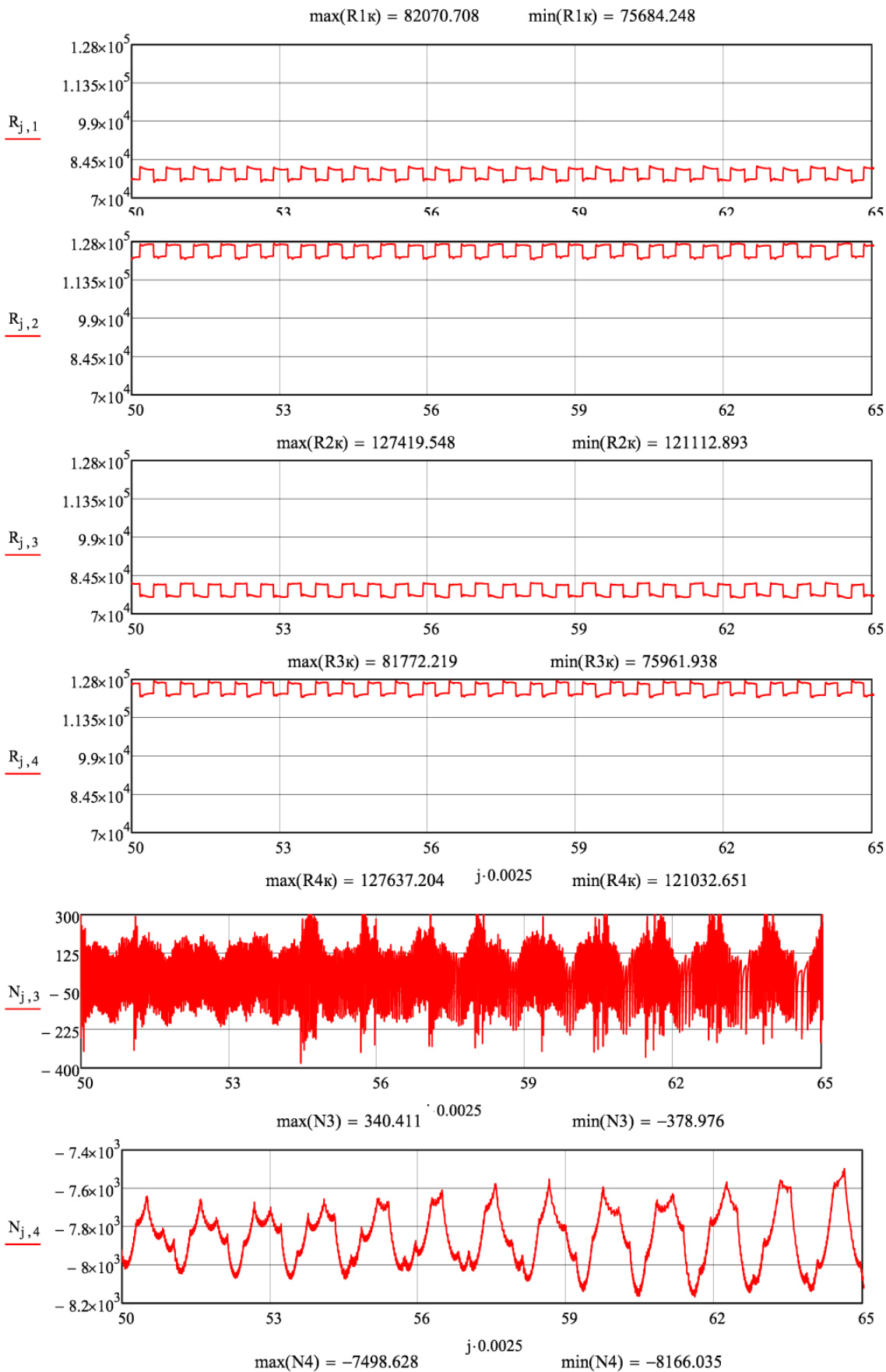
Крок 0,0025 м

**В.2 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ СИЛ ВЗАЄМОДІЇ
СПЕЦІАЛЬНОГО ТА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ Й
КОЛІЇ, ЩО МАЄ ГОРИЗОНТАЛЬНІ ГЕОМЕТРИЧНІ НЕРІВНОСТІ
ПЛАНУ ТА ПРОФІЛЮ (ПОЧАТОК 40 М). ЕПЮРА-1840, ШПАЛИ –
ЗАЛІЗОБЕТОННІ, ПОЧАТОК ПЕРЕХІДНОЇ КРИВОЇ – 30 М, ДОВЖИНА
ПЕРЕХІДНОЇ КРИВОЇ – 50 М**

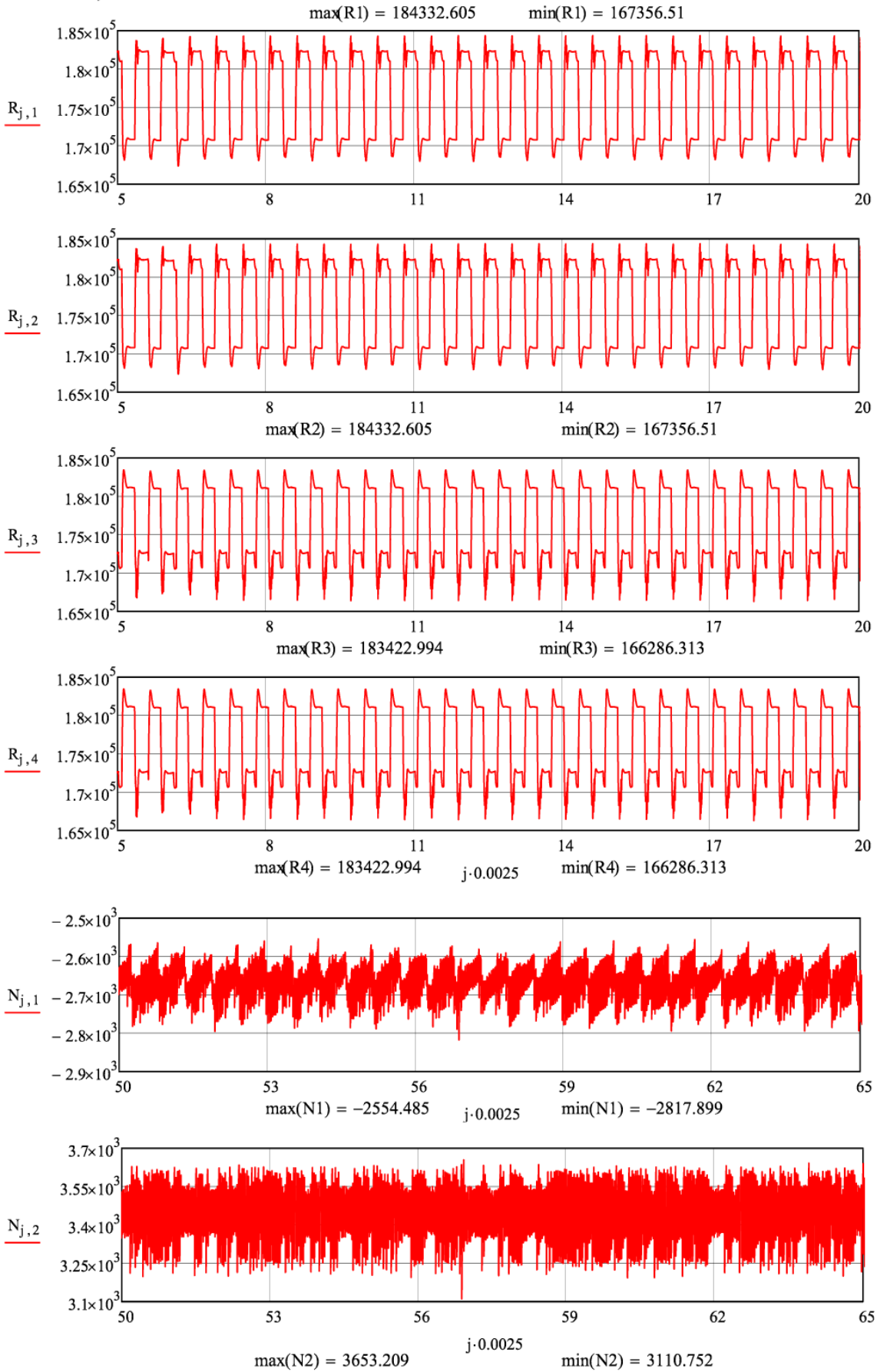
В.2.1



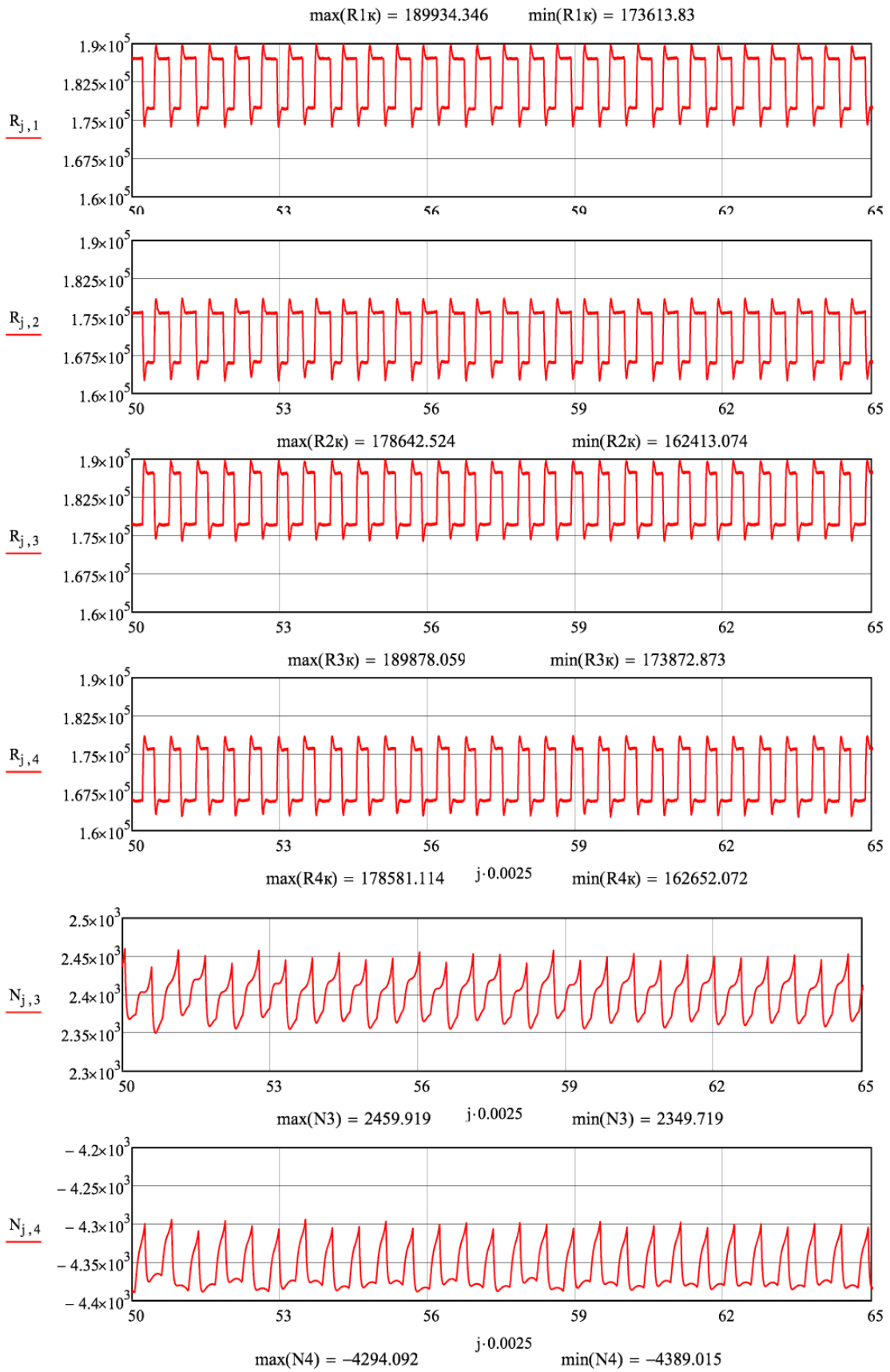
B.2.2



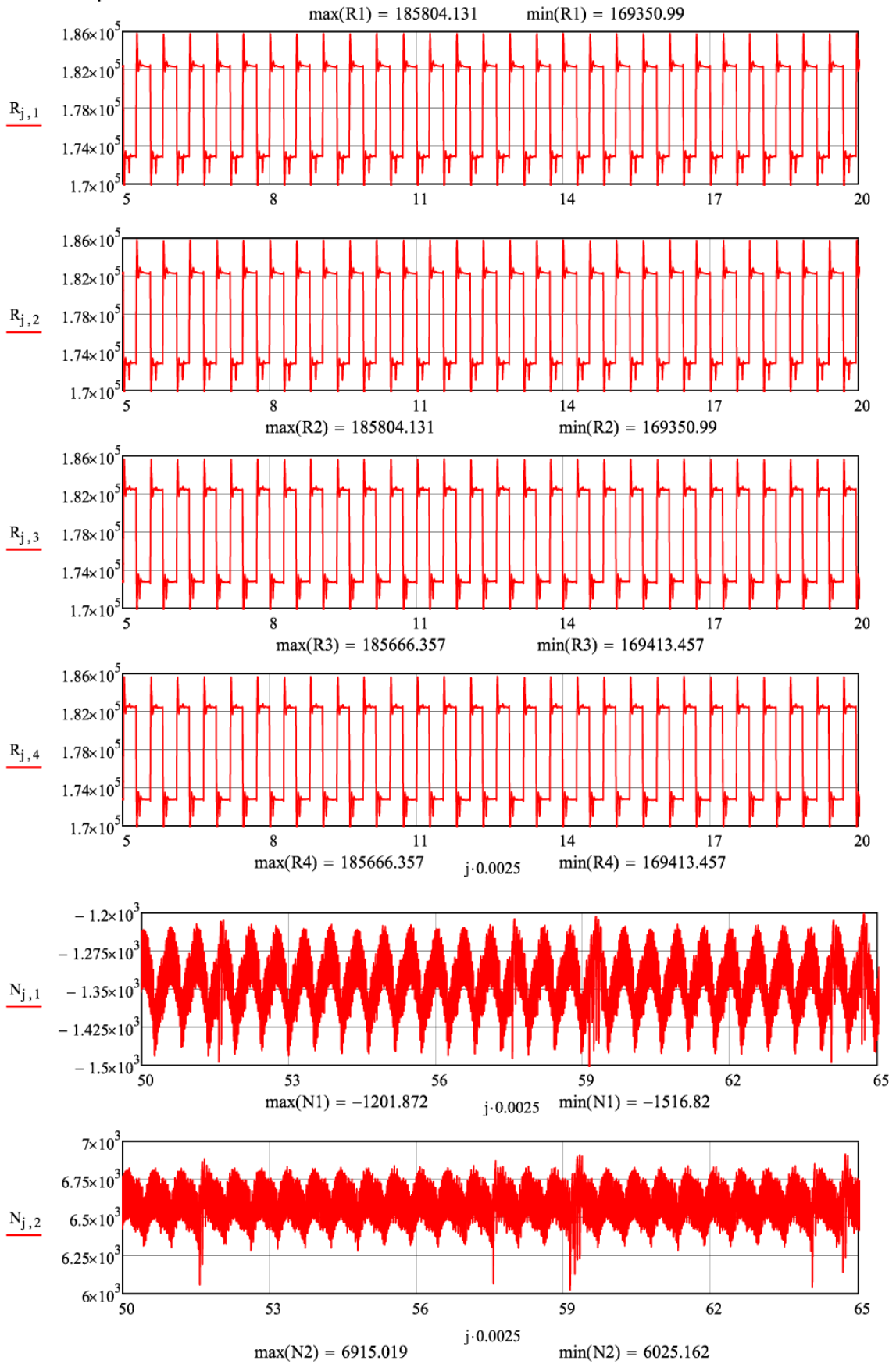
B.2.3



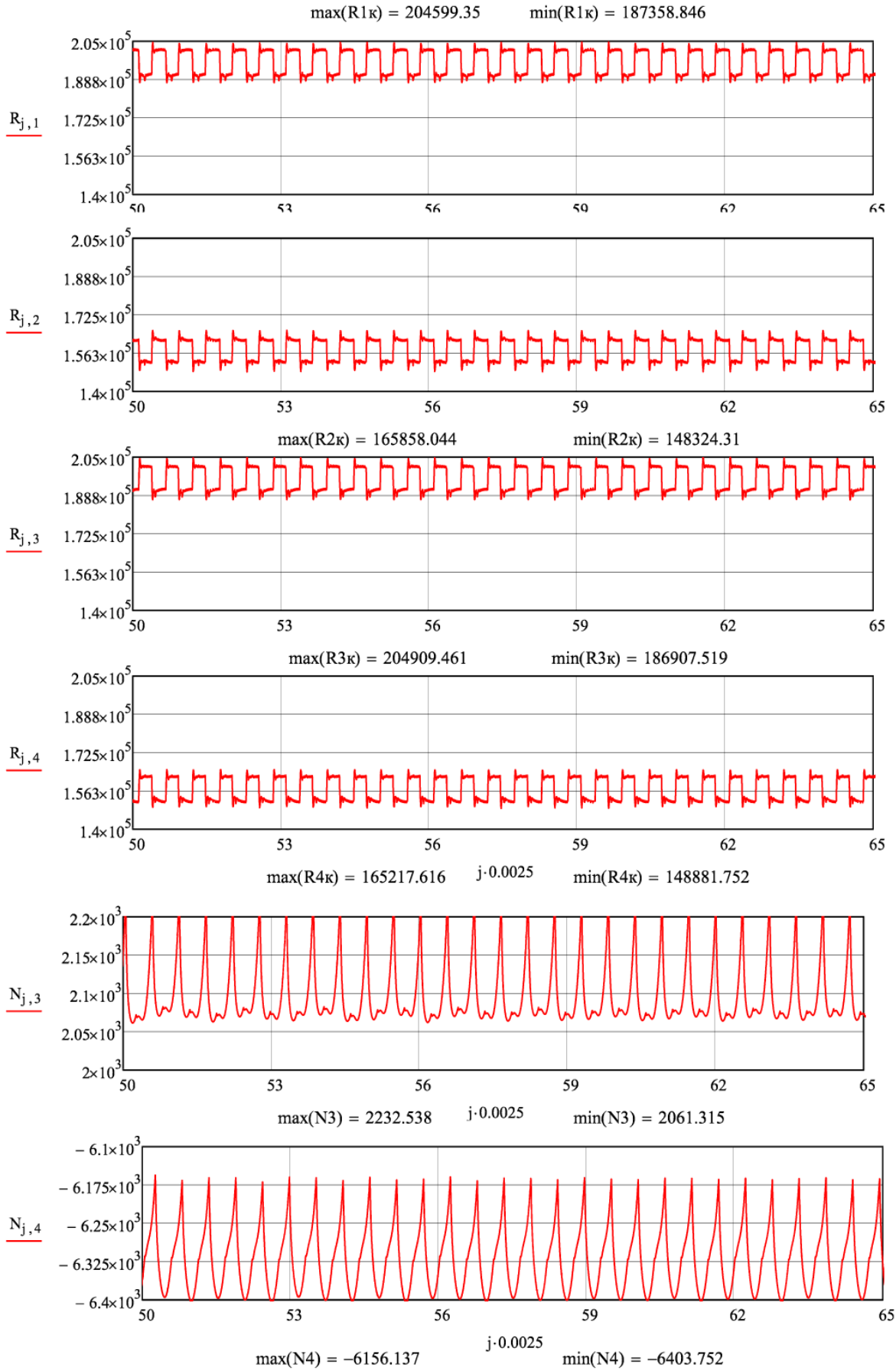
B.2.4.



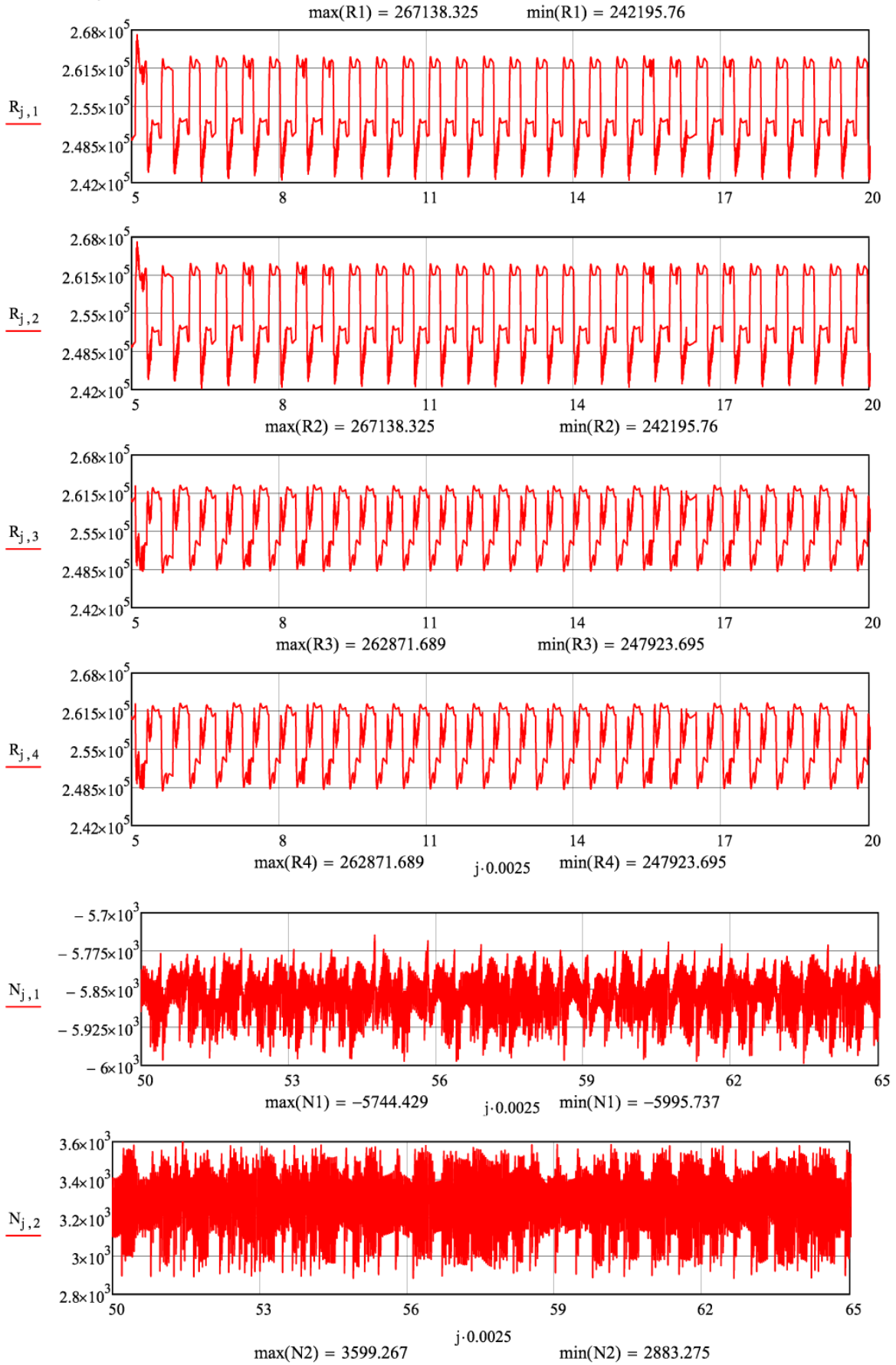
B.2.5



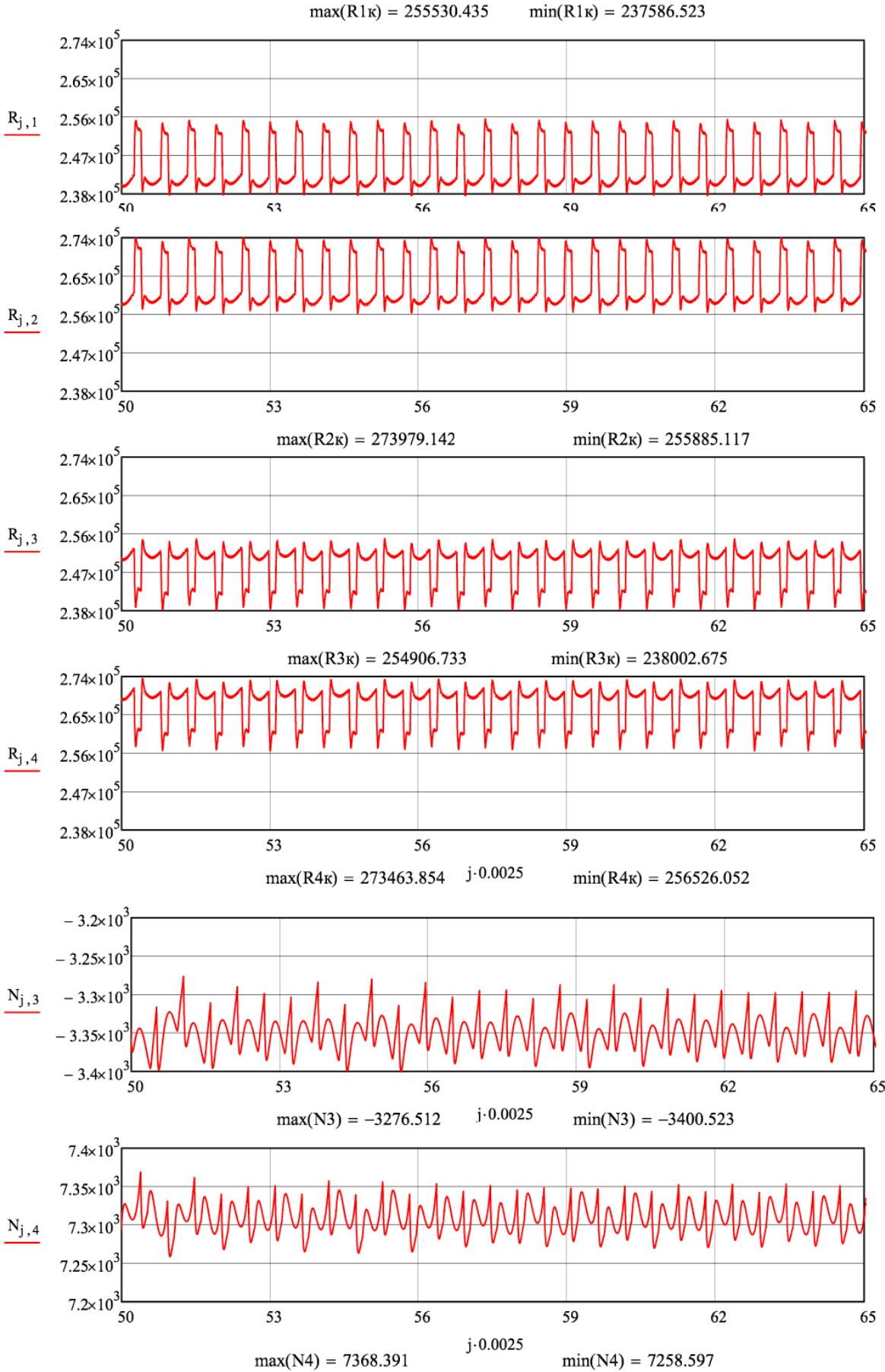
B.2.6



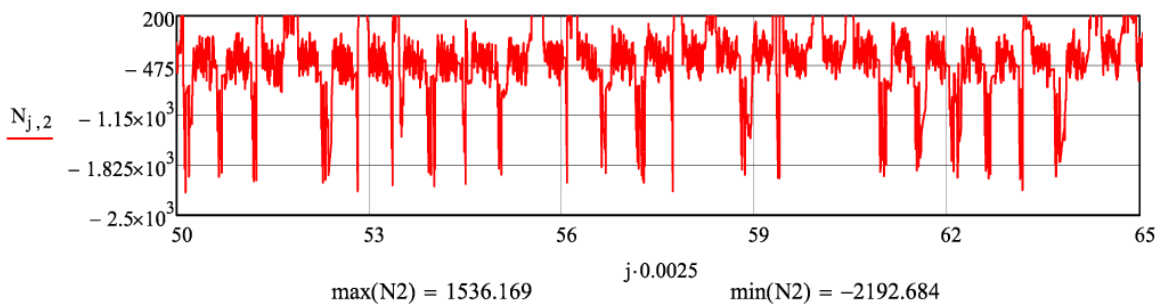
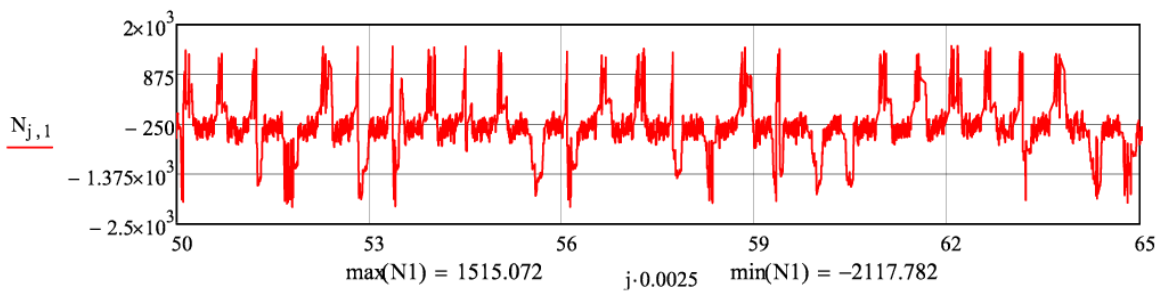
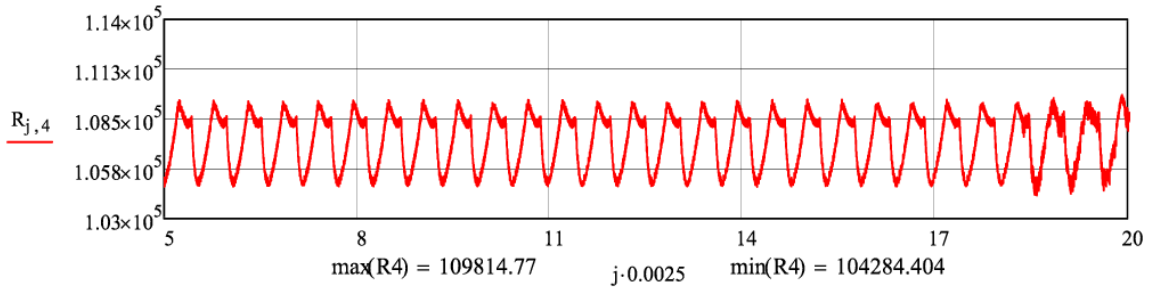
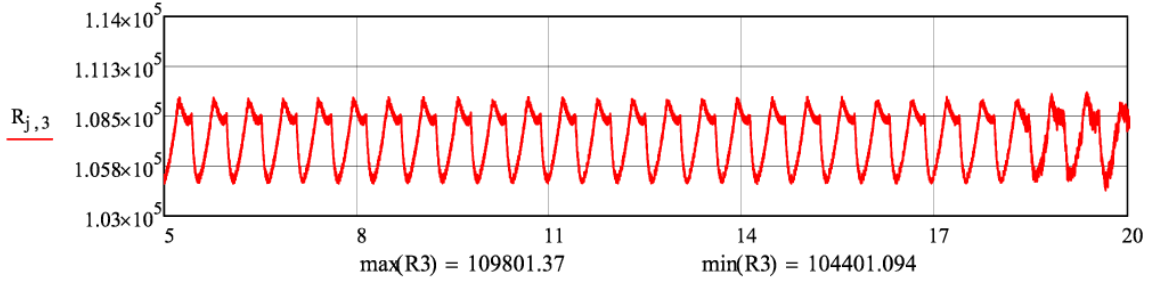
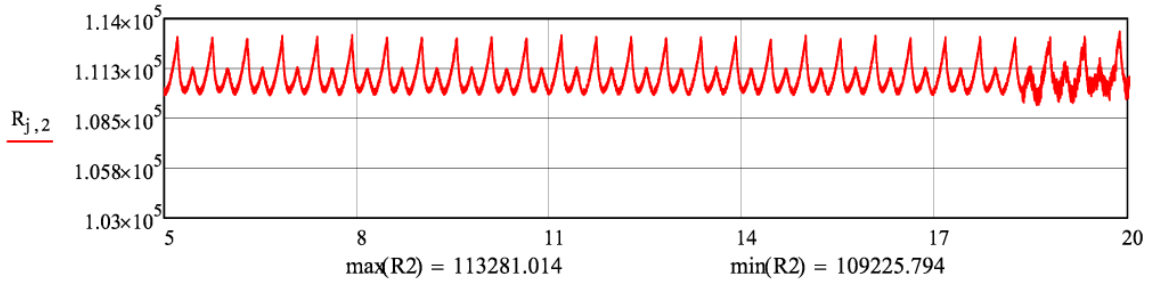
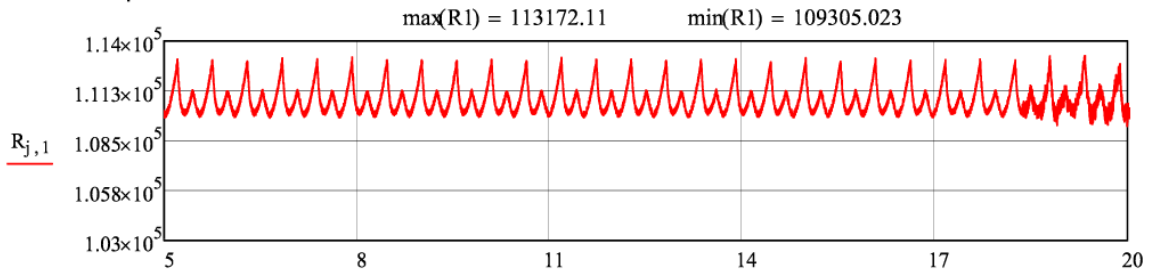
B.2.7



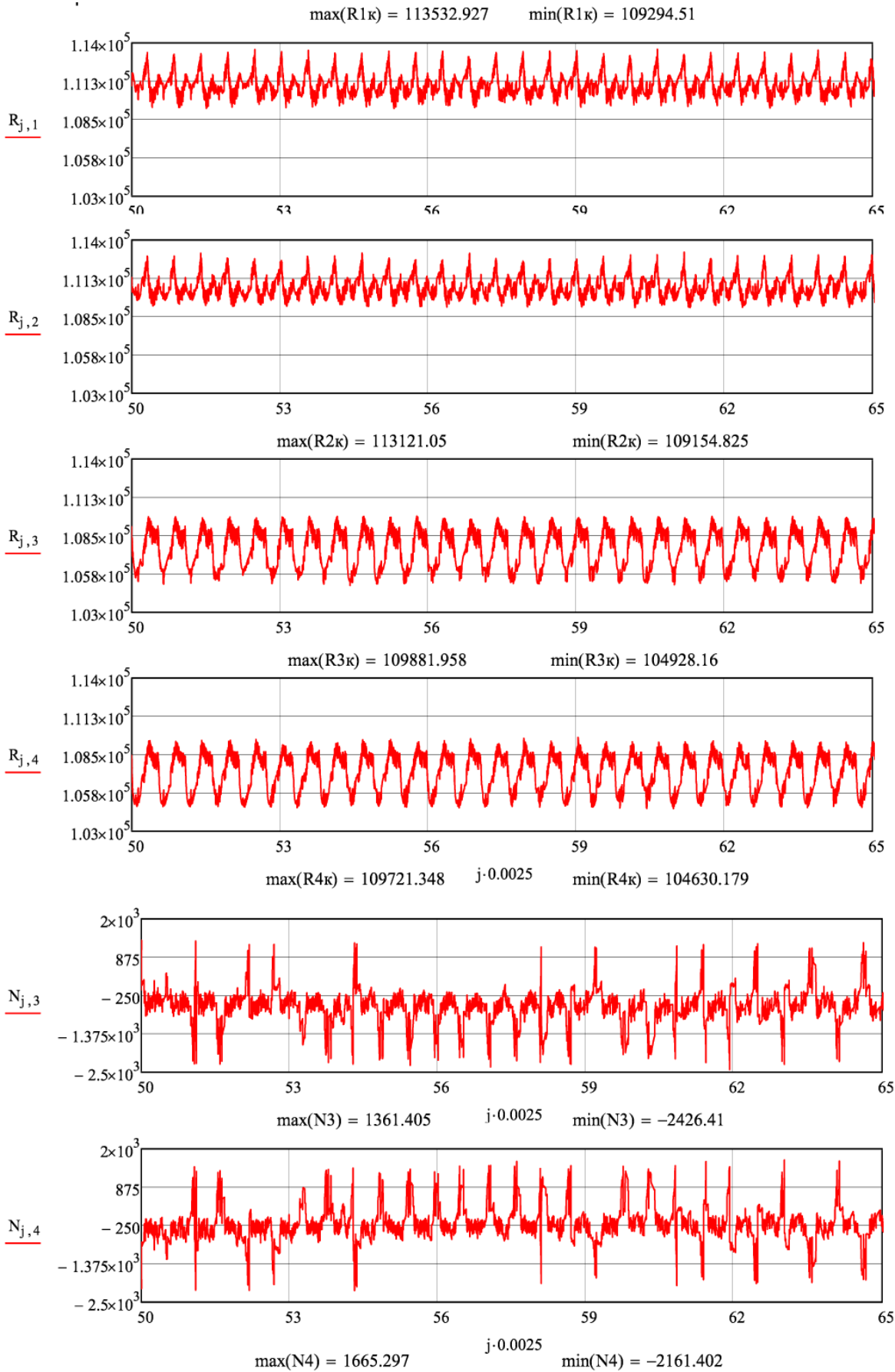
B.2.8



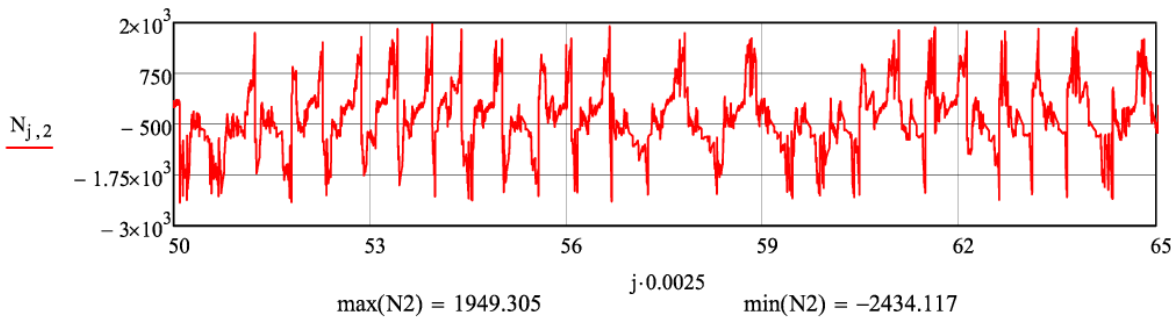
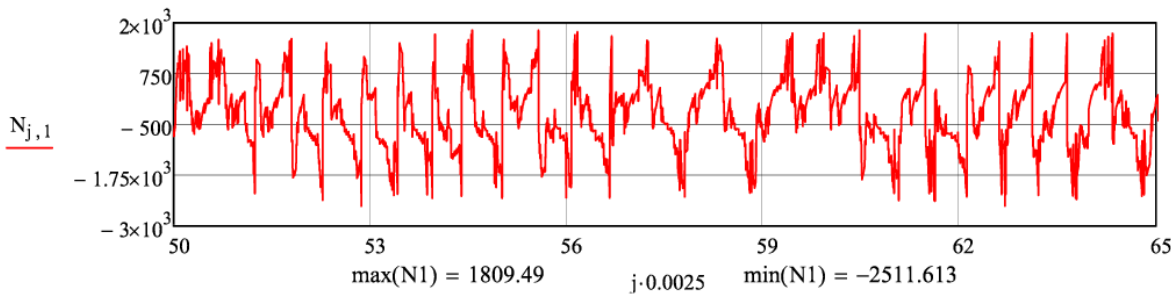
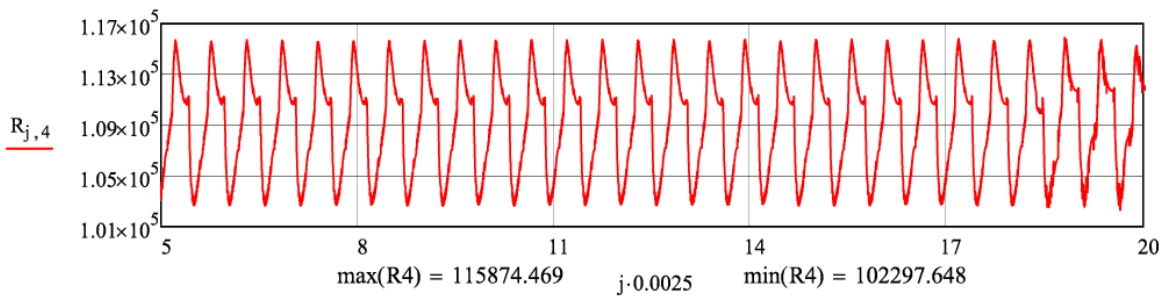
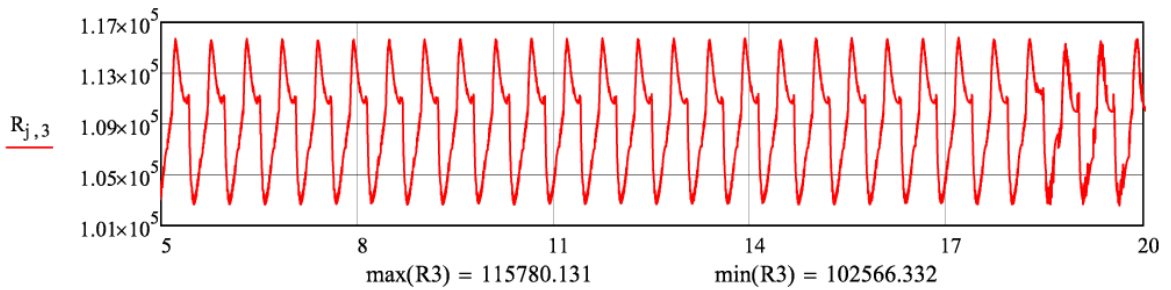
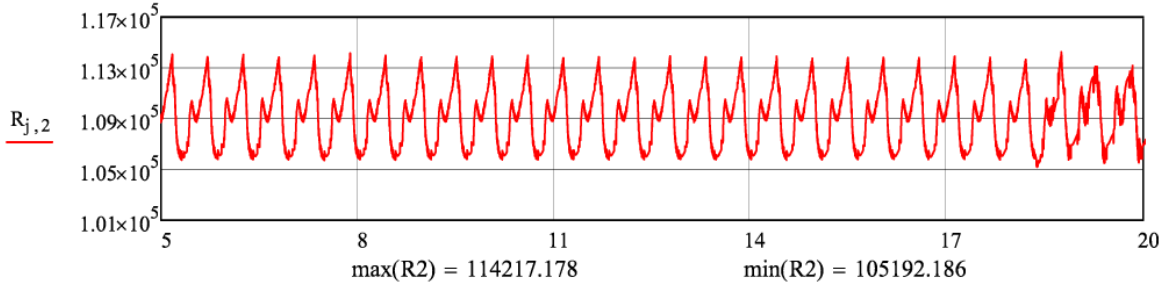
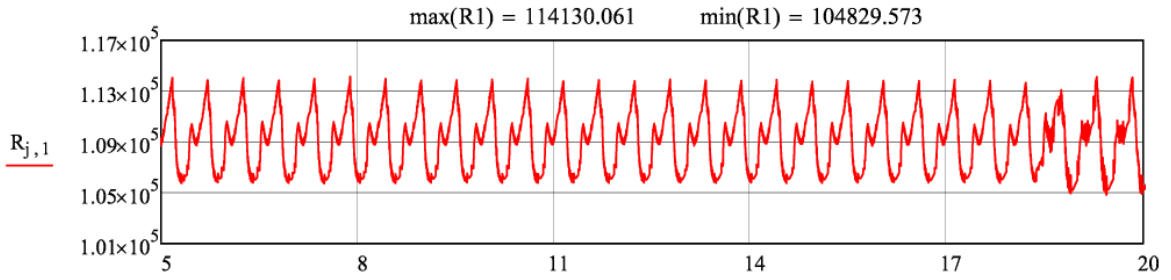
B.2.9



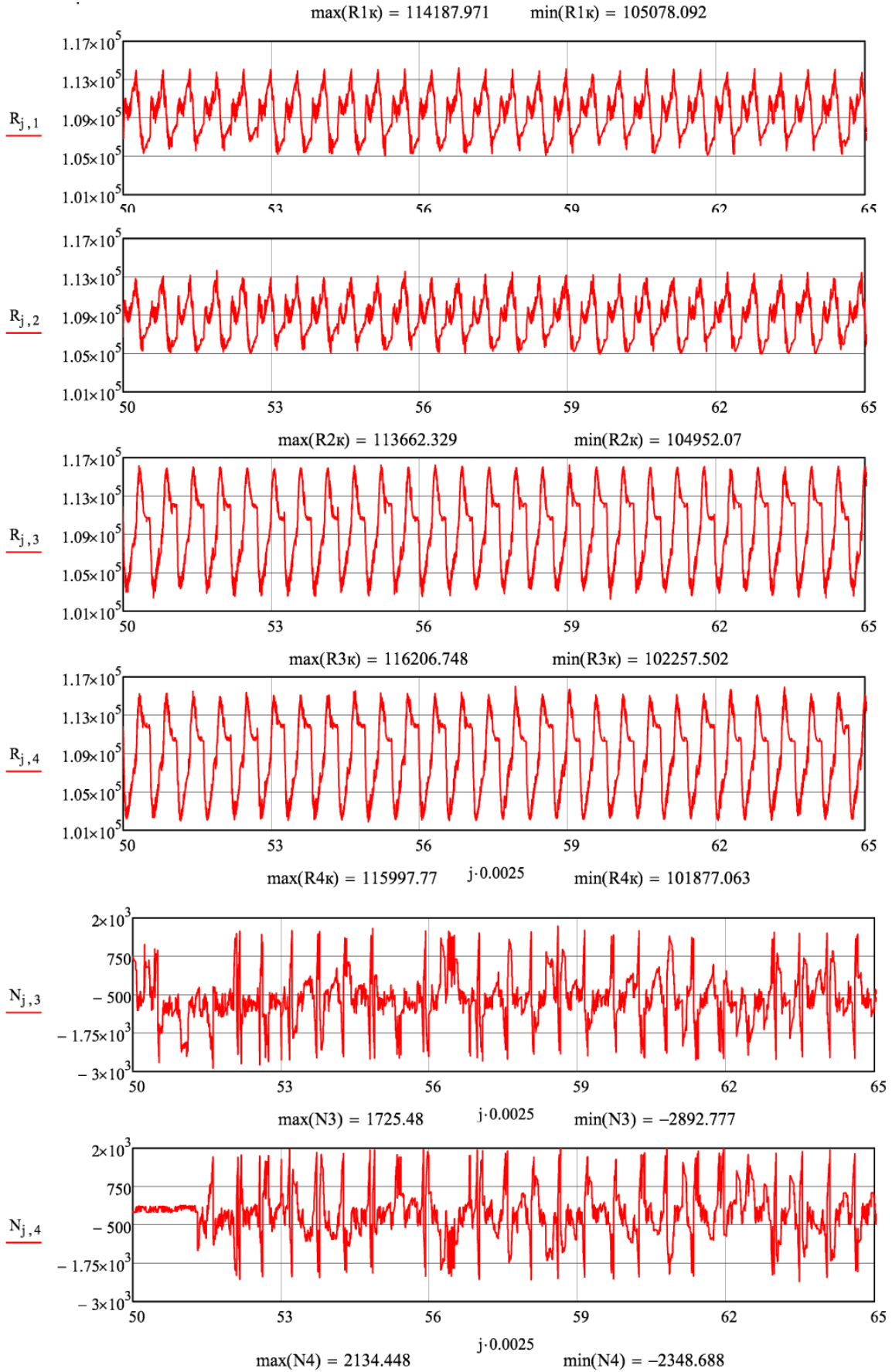
B.2.10



B.2.11



B.2.12



ДОДАТОК Г. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ СИЛ ВЗАЄМОДІ
Г.1 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ СИЛ ВЗАЄМОДІЇ
СПЕЦІАЛЬНОГО ТА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ТА
КОЛІЙ НЕЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

Таблиця Г.1

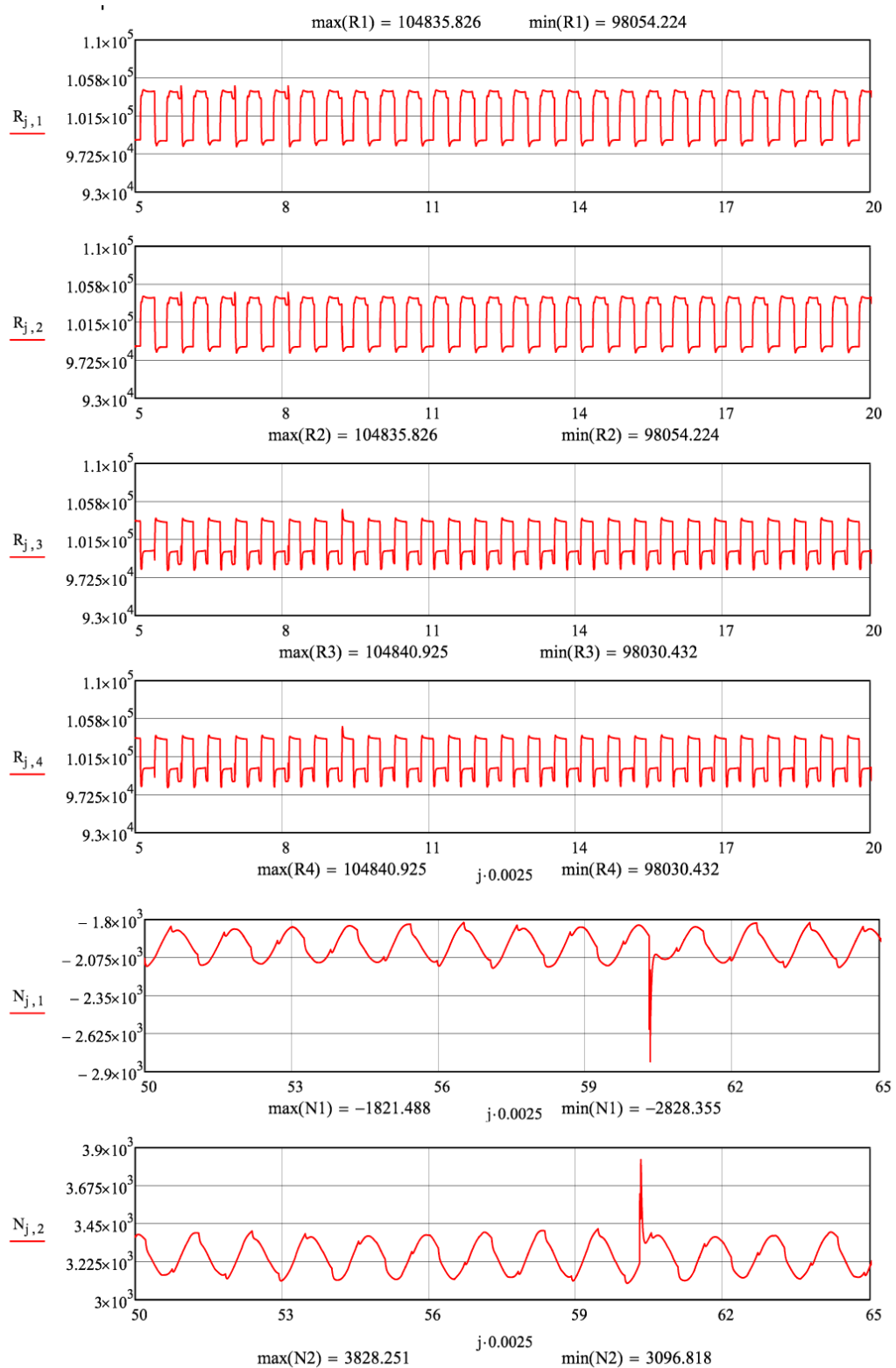
Характеристика розрахунків варіантів при скріпленні ТРЕП–Ш

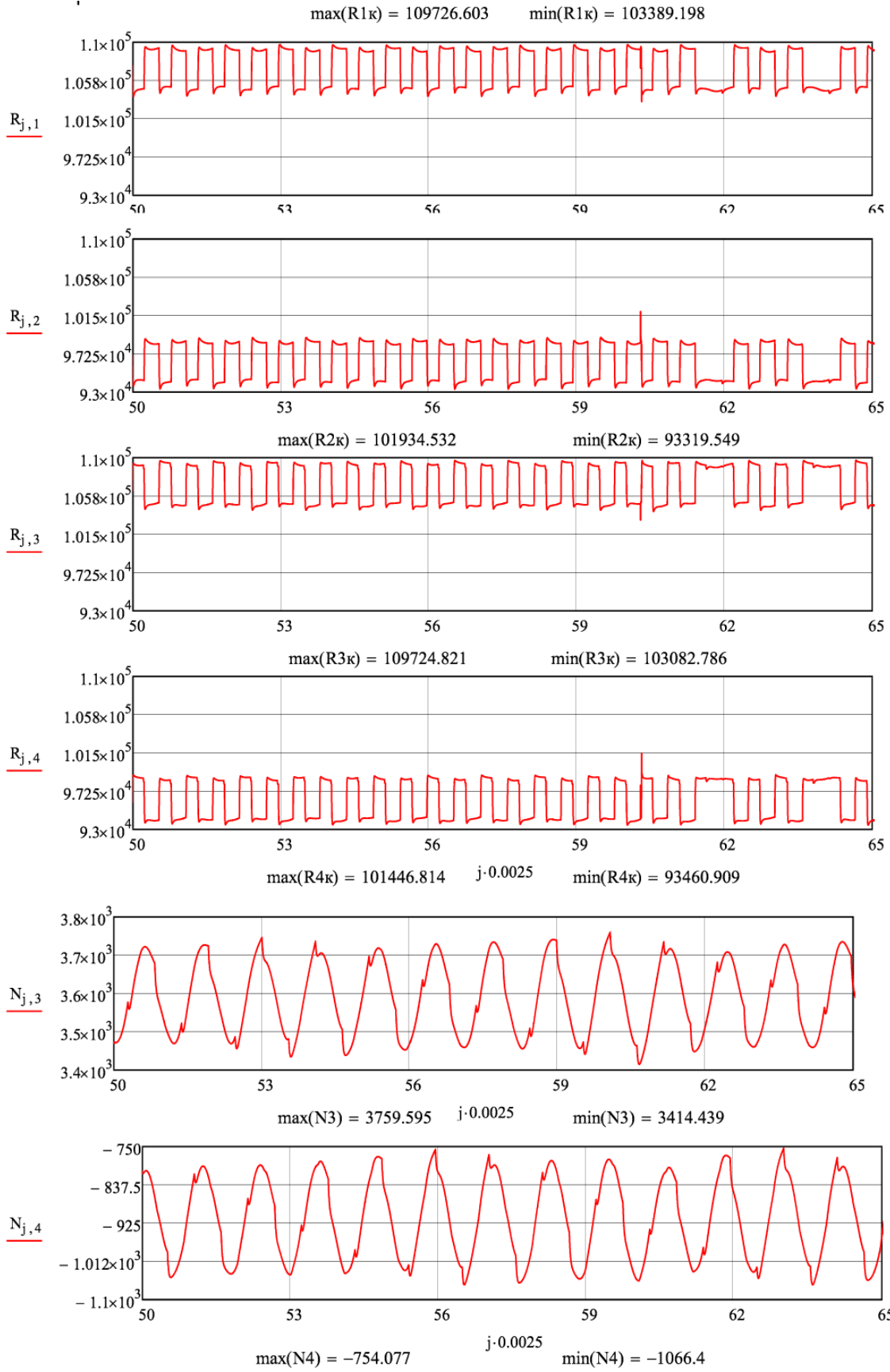
		Осьове навантаження	Швидкість	Термін служби	План	Вв	Вг	Сz верт	Су гор
11	Чавуновоз 50 т (6)	20,1	5	0	Пряма	287	185	1692,3	4183
					350, h=0				
12				10	Пряма	402	219	4238,8	13676
					350, h=0				
13	Чавуновоз 80 т (7)	35,3	5	0	Пряма	295	232	2627,2	4262
14				10	Пряма	413	272	7233,7	14255
					350, h=0				
15	Чавуновоз 140 т (9)	51,6	5	0	Пряма	301	258	3637	4373
16				10	Пряма	420	301	11979	15120
					350, h=0				
17	Думпкар 6–ВС–60 (13)	21,6	30	0	Пряма	287	185	1692,3	4183
18				10	Пряма	402	219	4238,8	13676
					350, h=35				

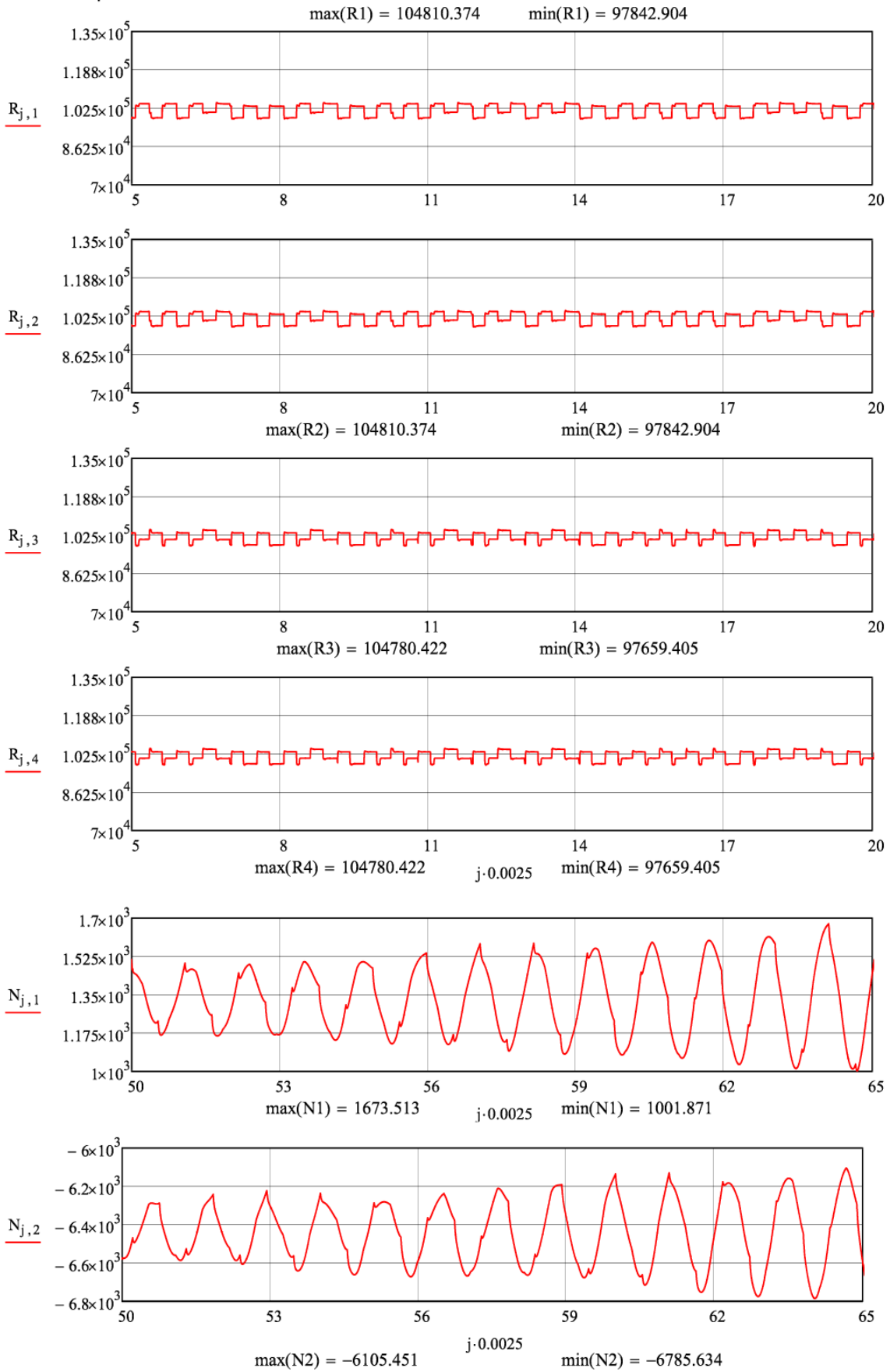
Крок 0,0025 м

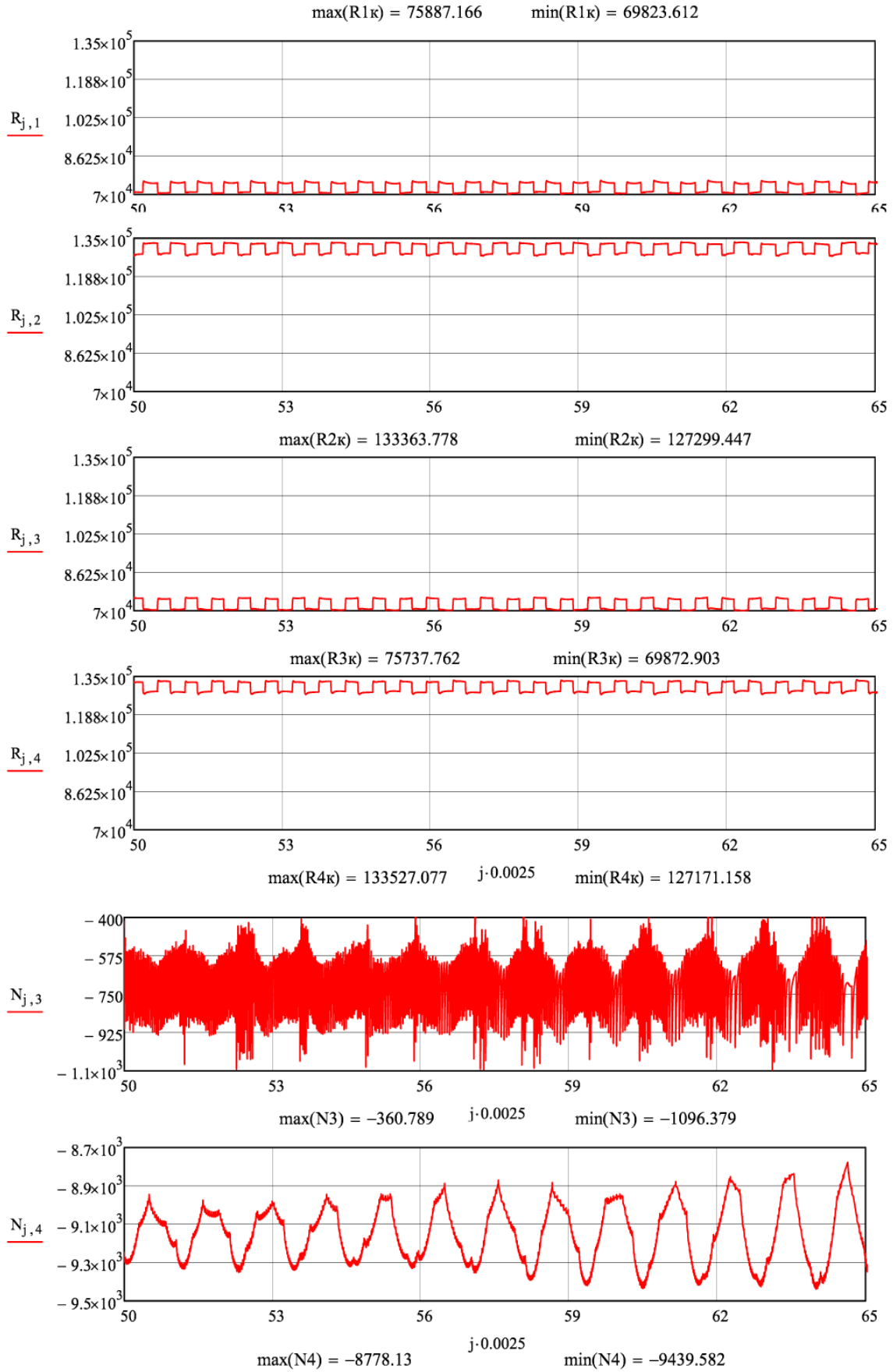
**Г.2 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ СИЛ ВЗАЄМОДІЇ
СПЕЦІАЛЬНОГО ТА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ Й
КОЛІЇ, ЩО МАЄ ГОРИЗОНТАЛЬНІ ГЕОМЕТРИЧНІ НЕРІВНОСТІ
ПЛАНУ ТА ПРОФІЛЮ (ПОЧАТОК 40 М). ЕПЮРА – 1840, ШПАЛИ –
ЗАЛІЗОБЕТОННІ, ПОЧАТОК ПЕРЕХІДНОЇ КРИВОЇ – 30 М, ДОВЖИНА
ПЕРЕХІДНОЇ КРИВОЇ – 50 М**

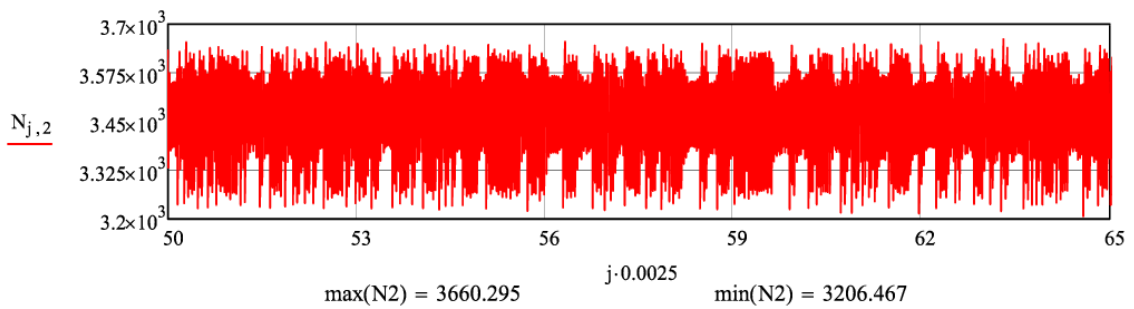
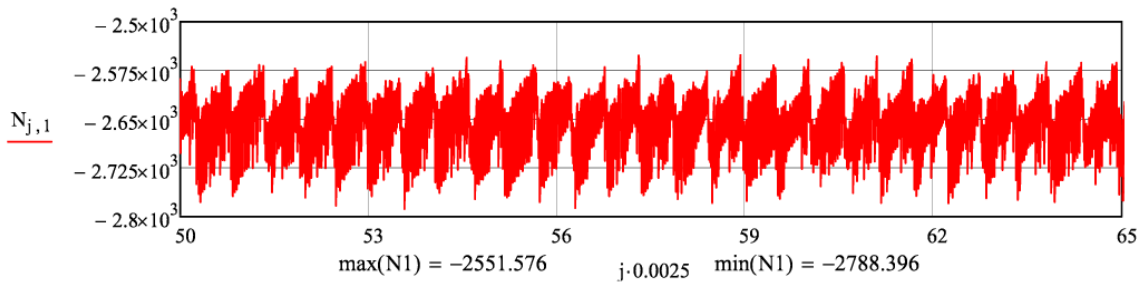
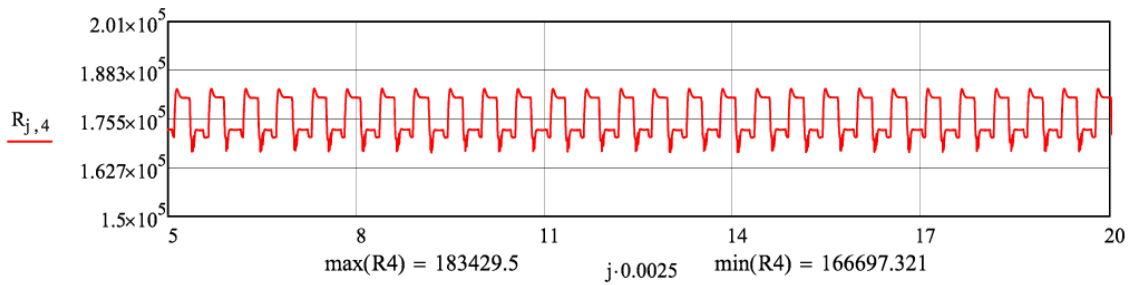
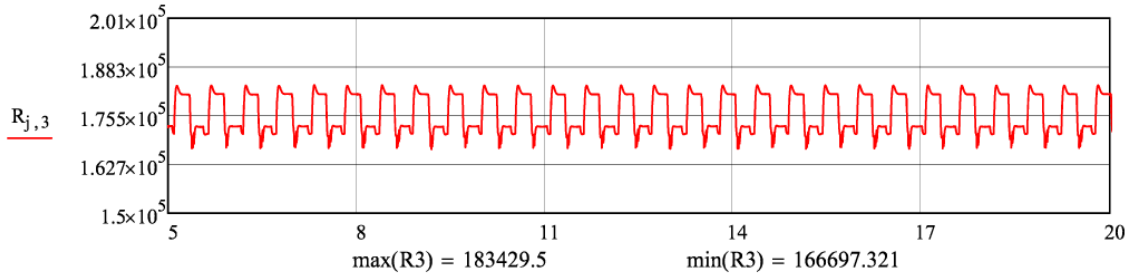
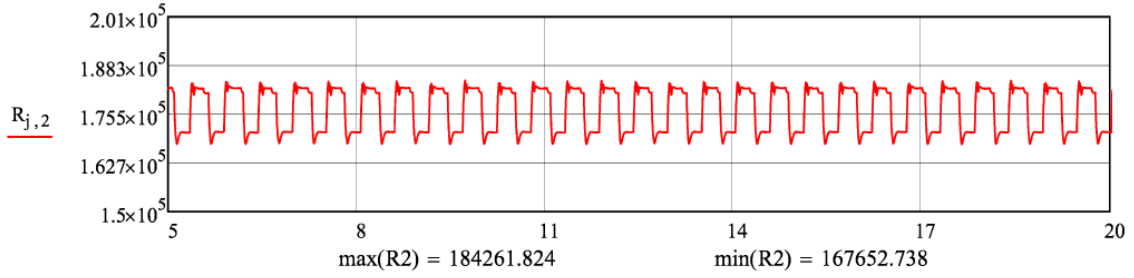
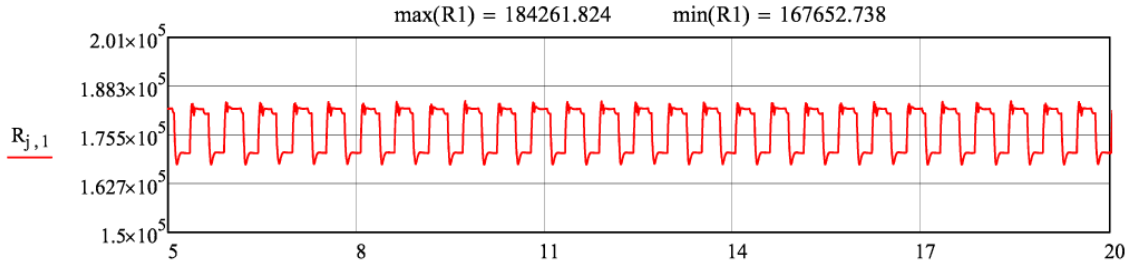
Г.2.1

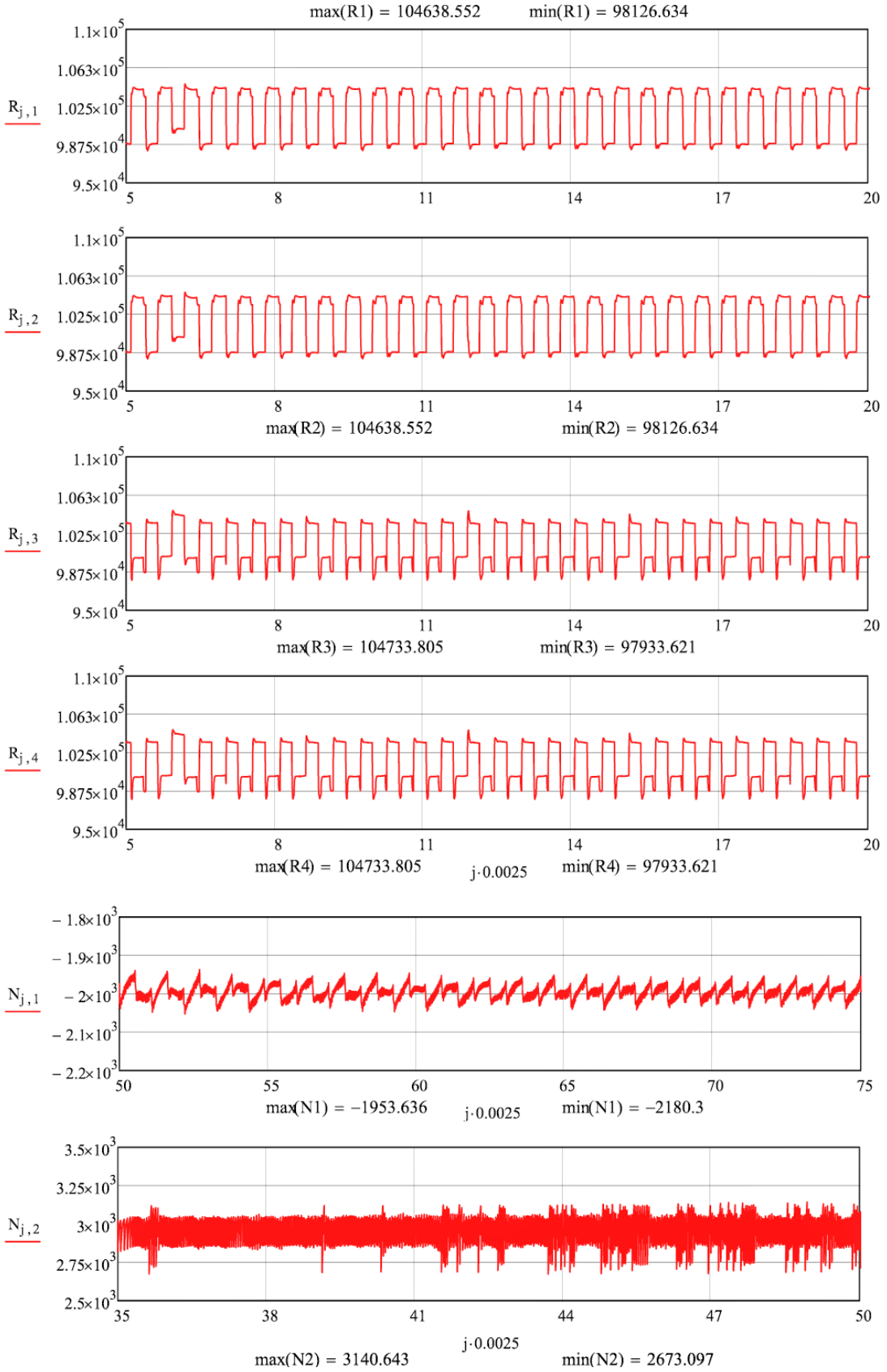




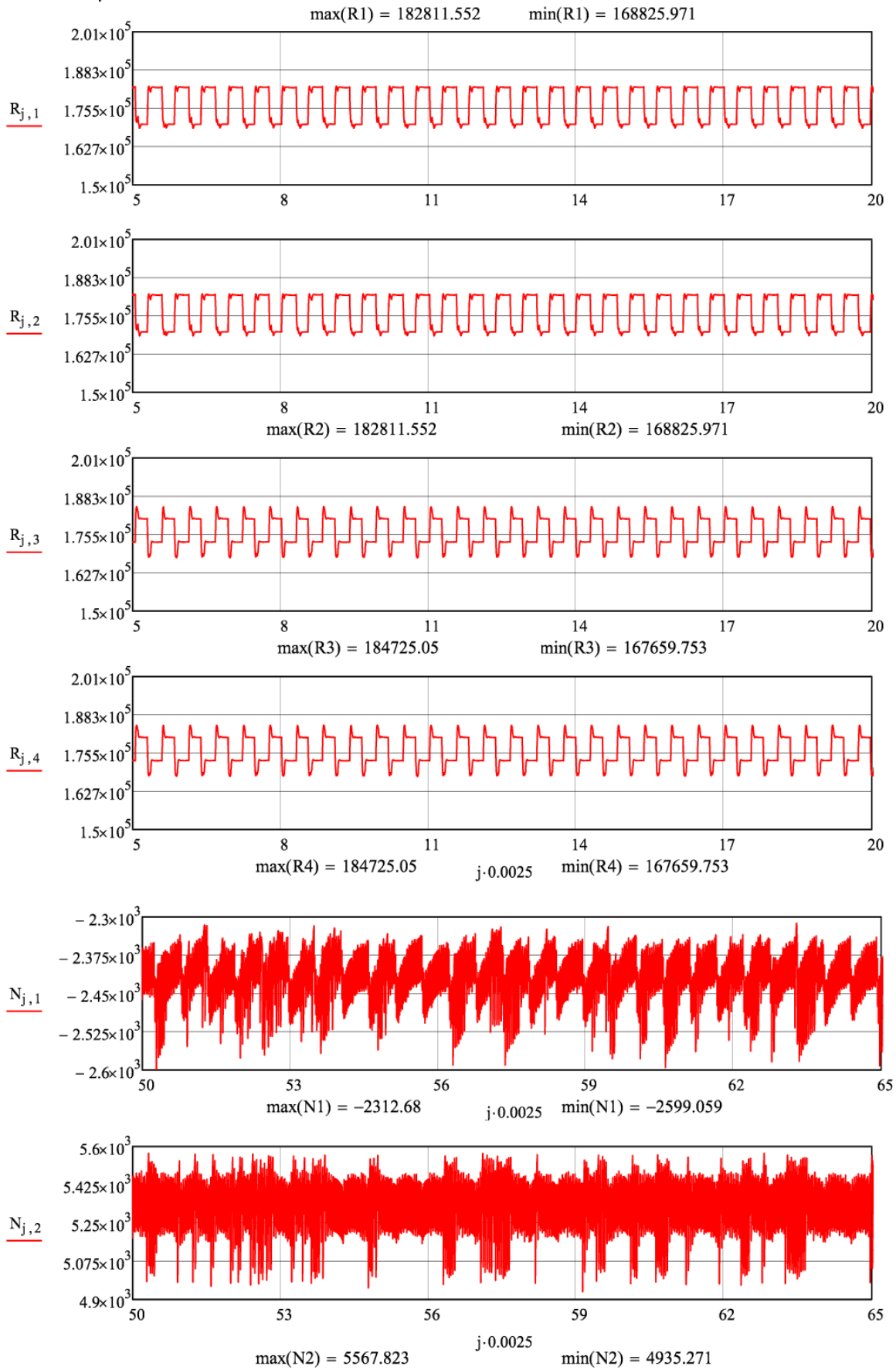


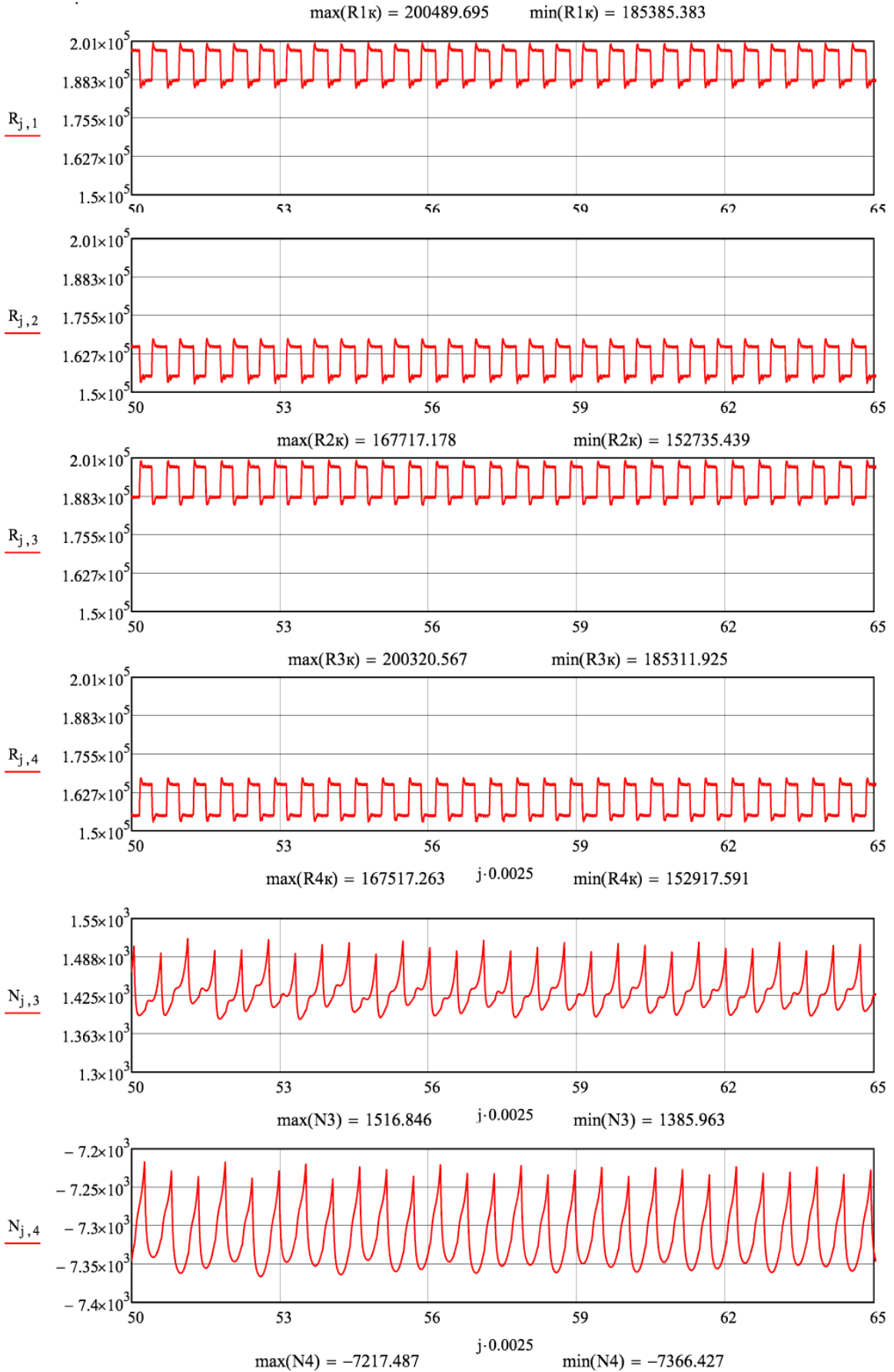




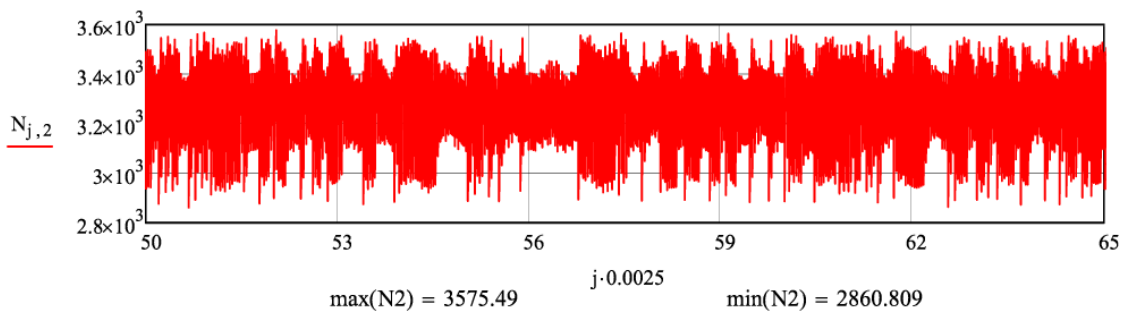
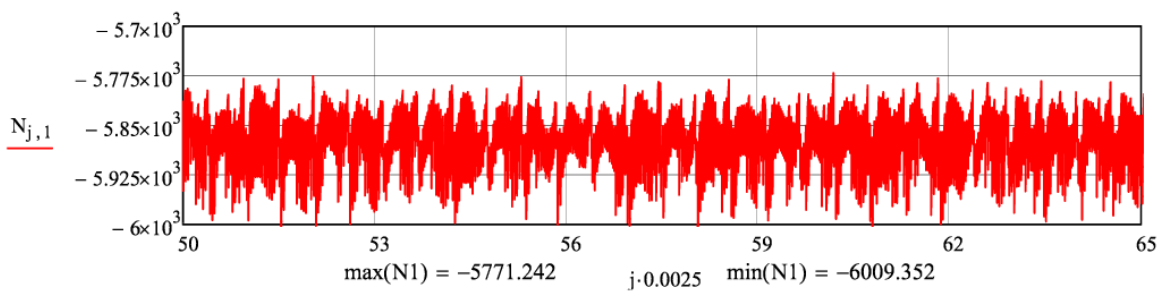
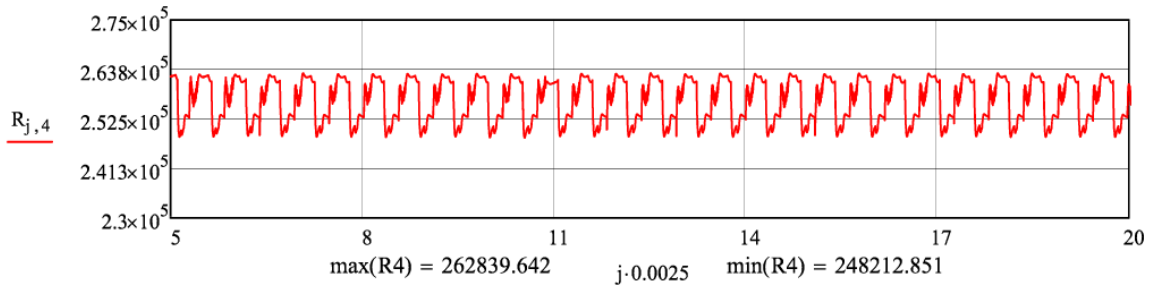
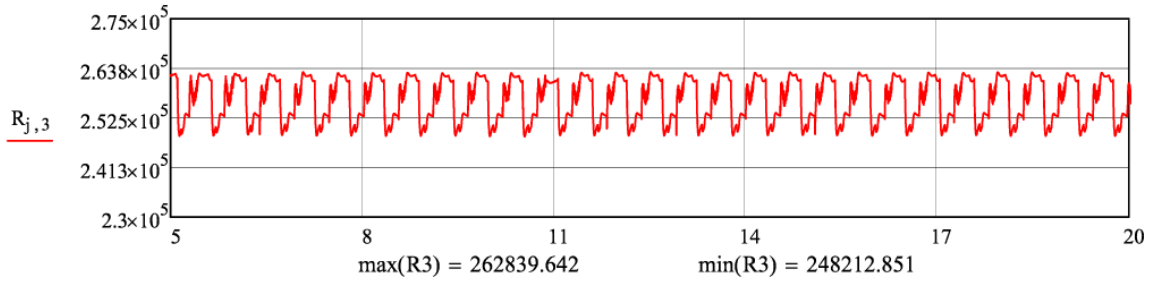
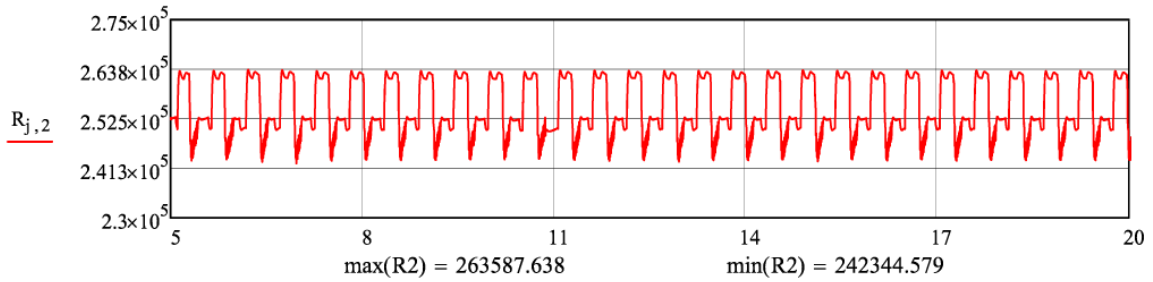
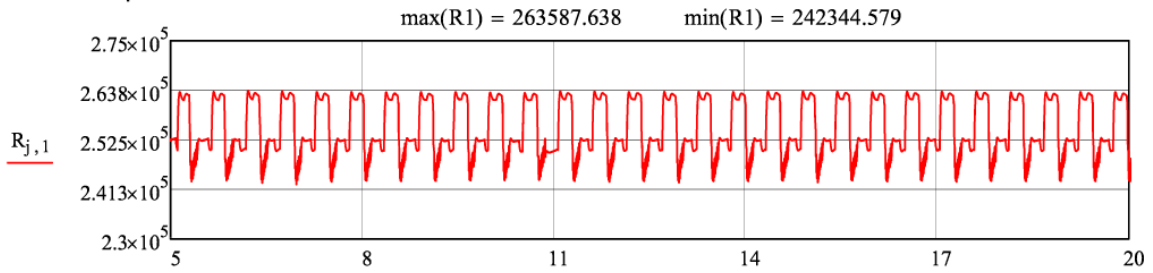


Г.2.7

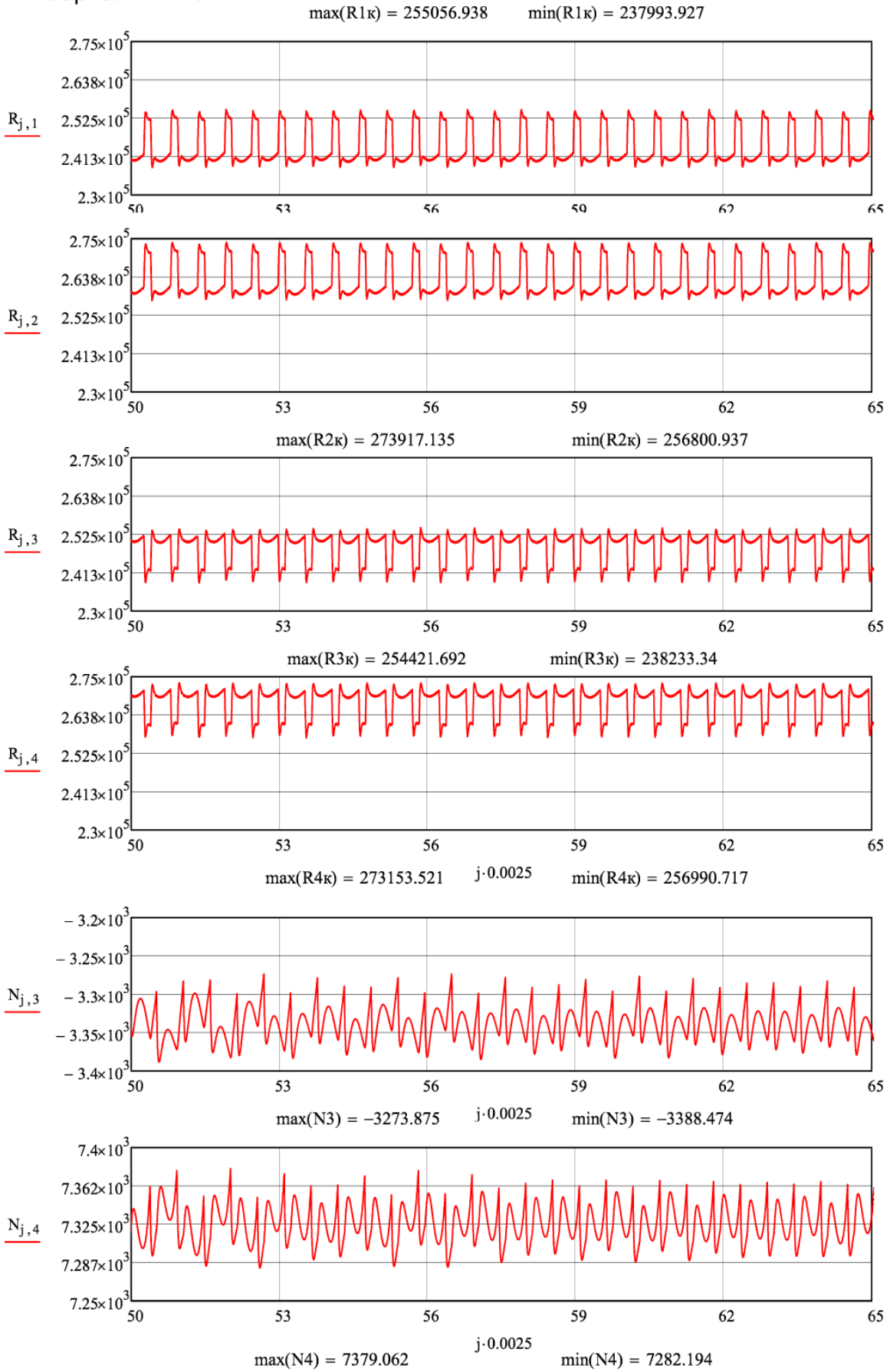




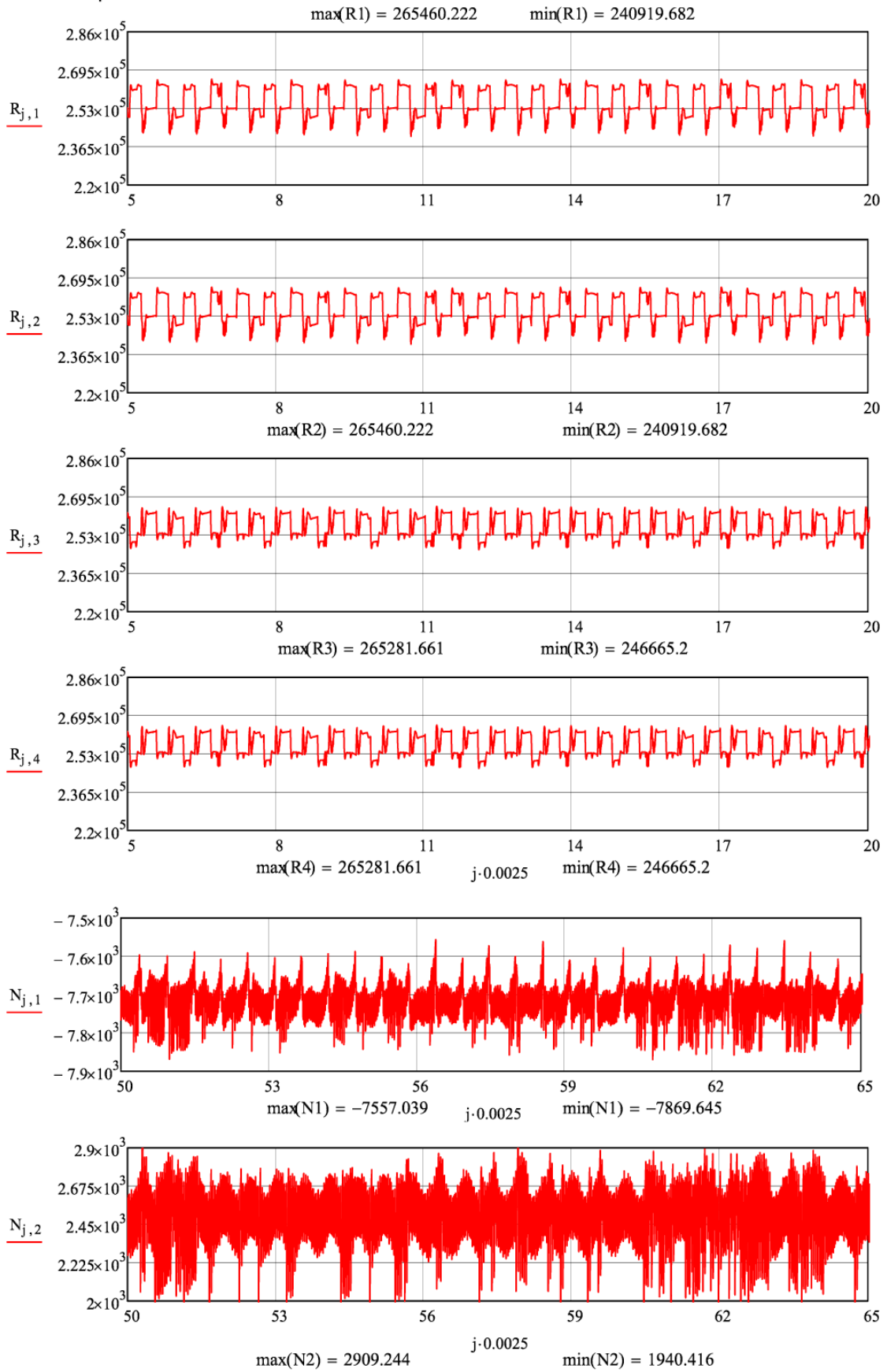
Г.2.9



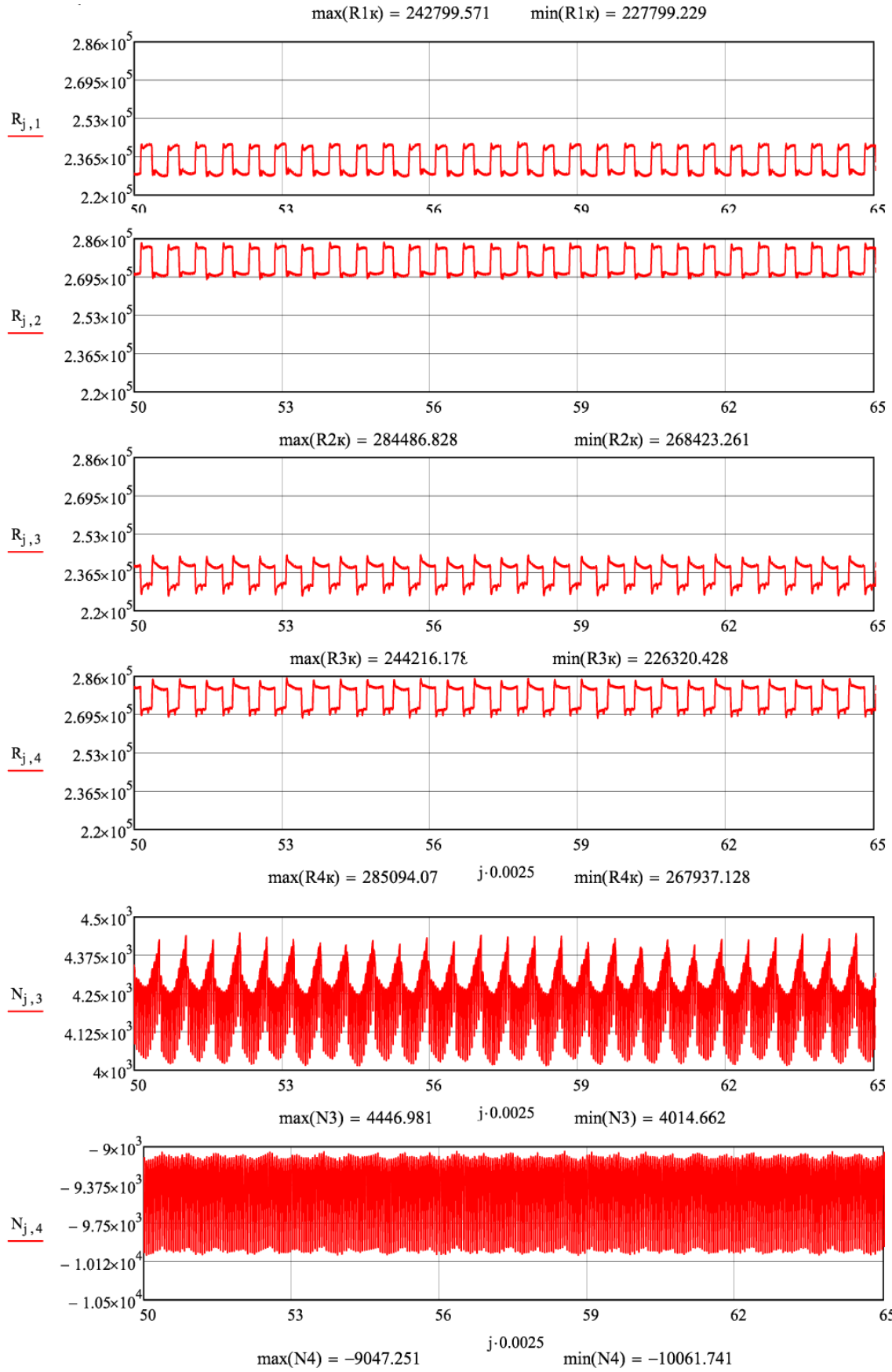
Г.2.10



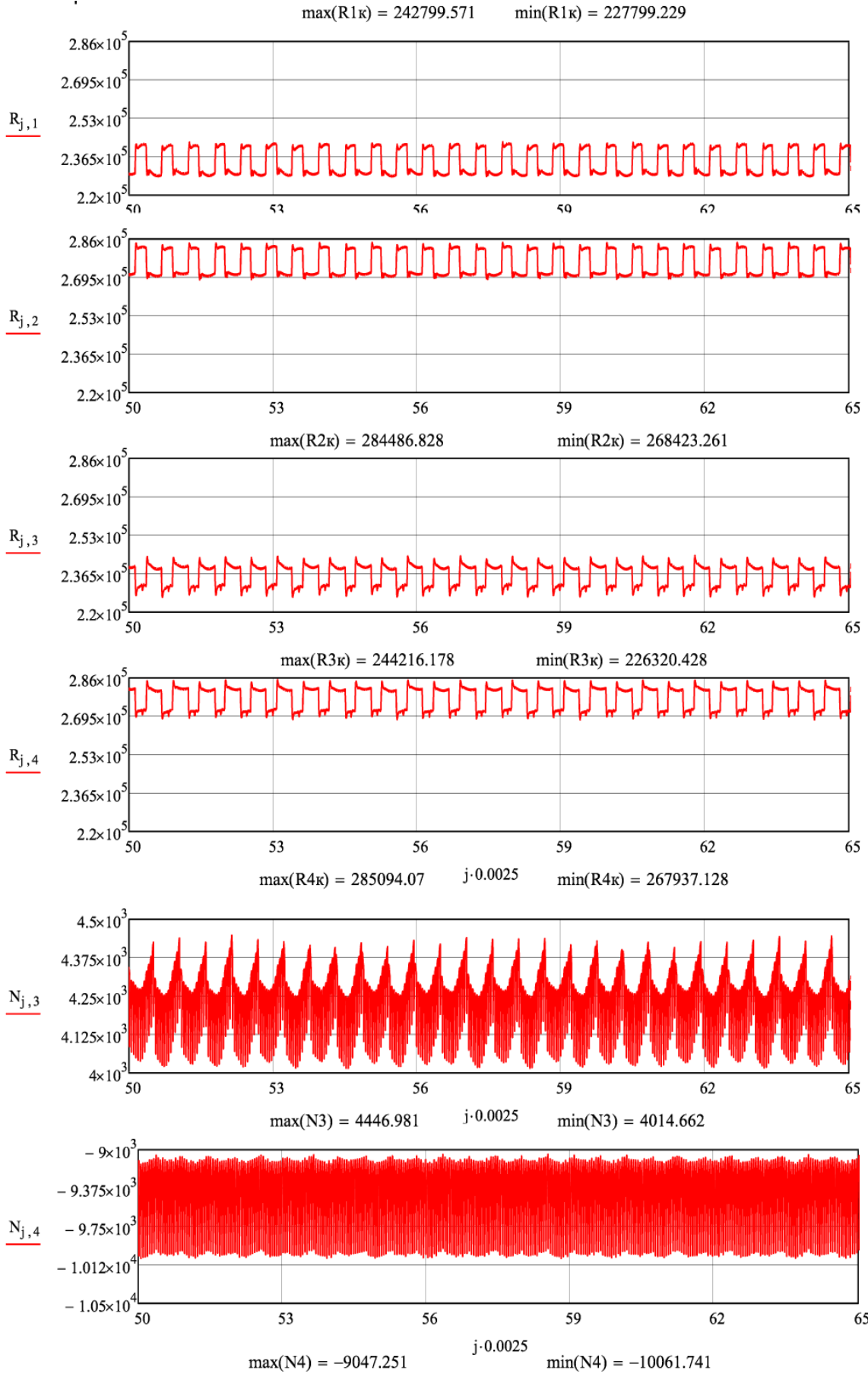
Г.2.11



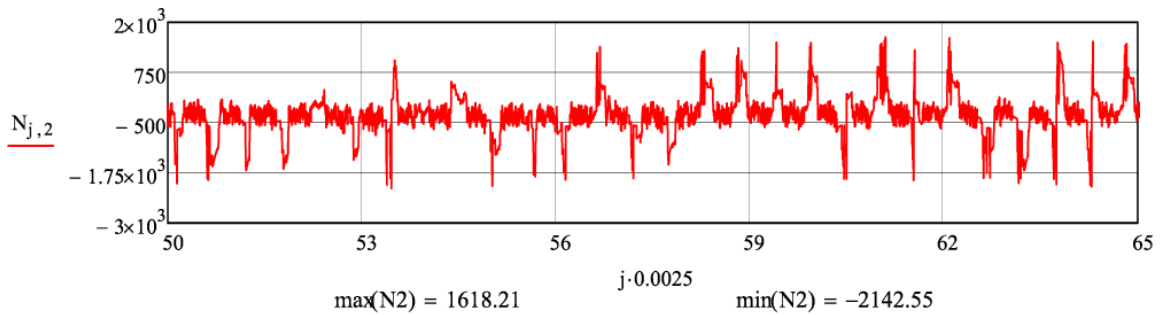
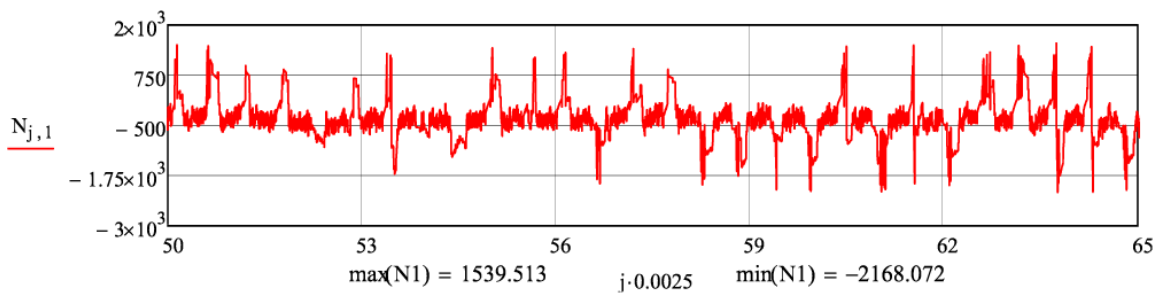
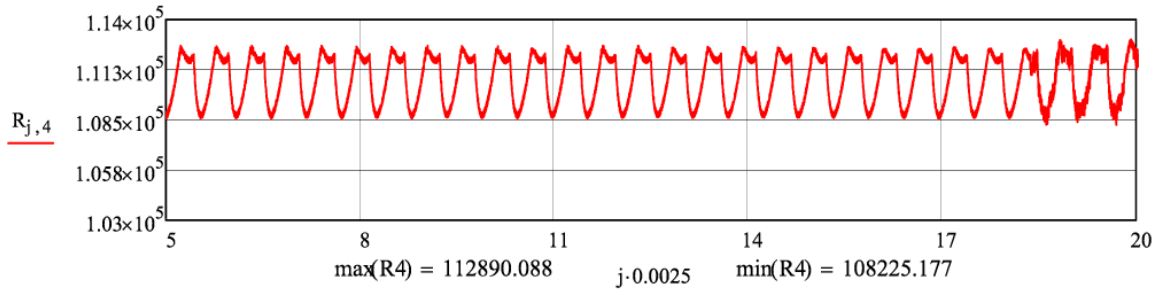
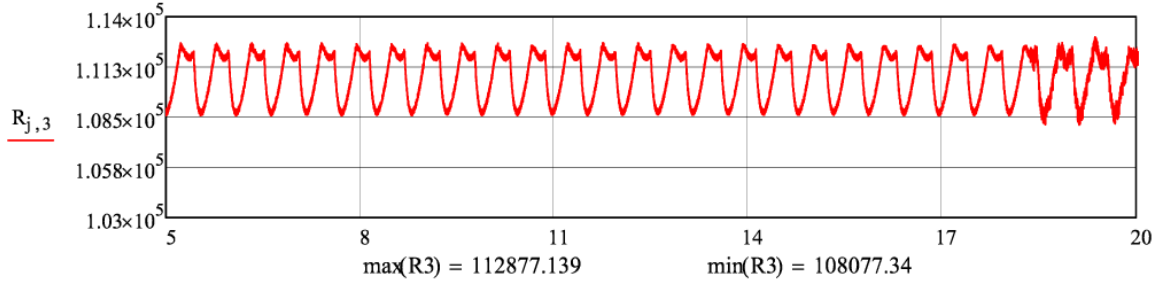
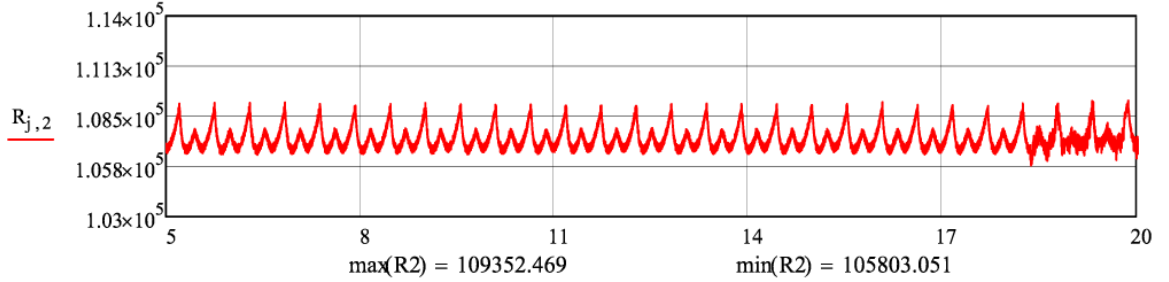
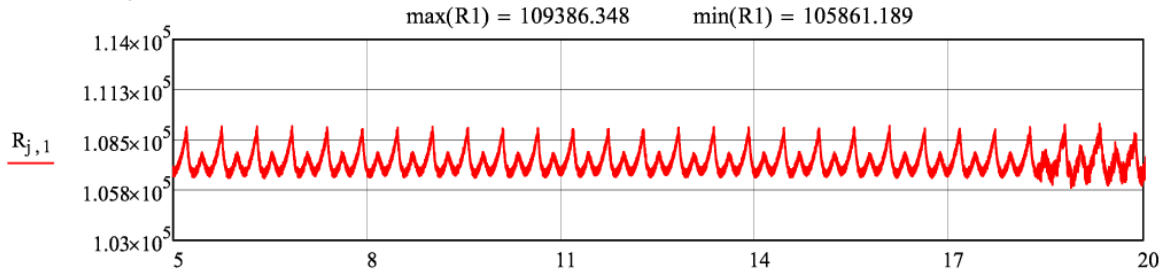
Г.2.12



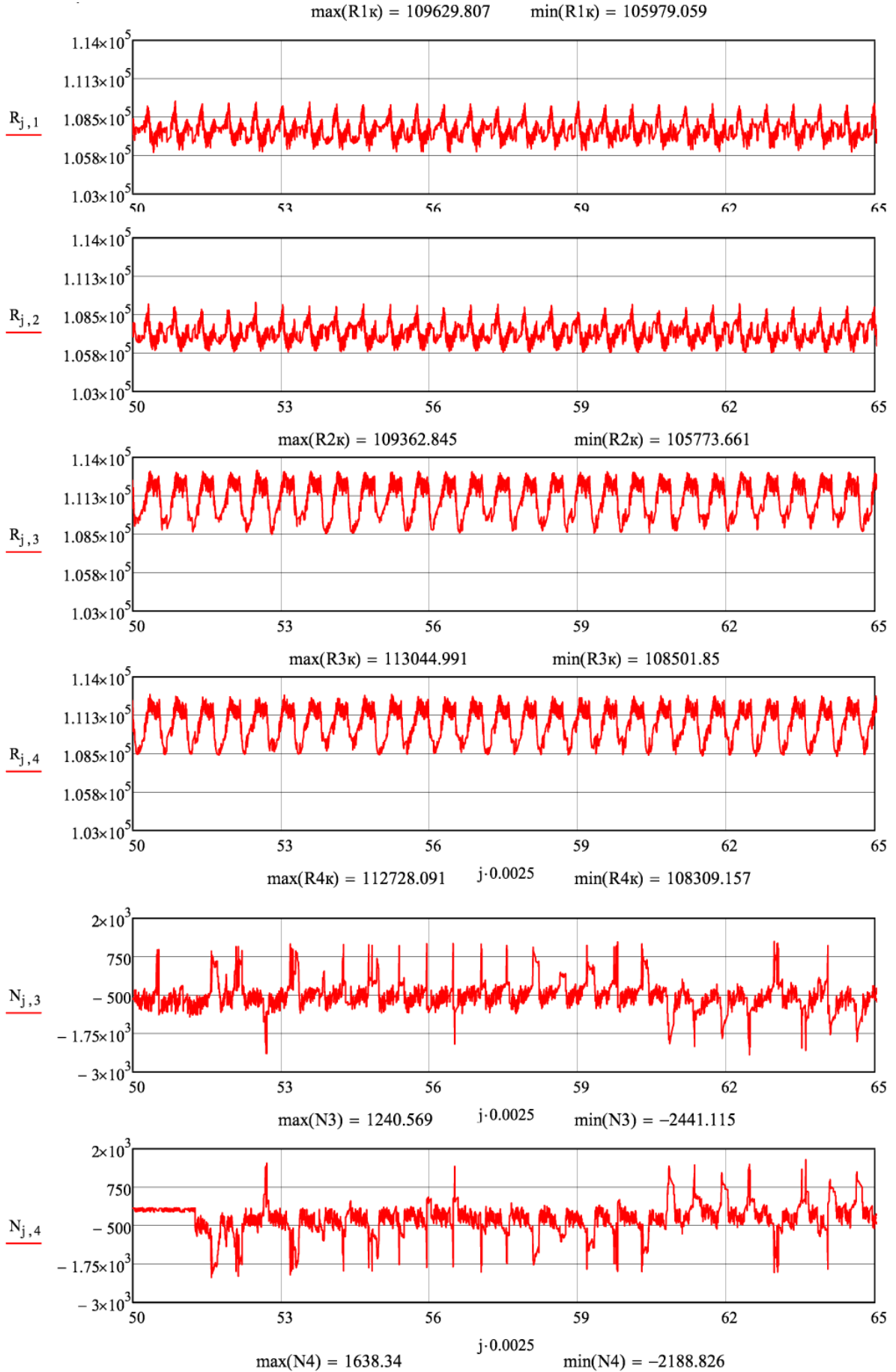
Г.2.13



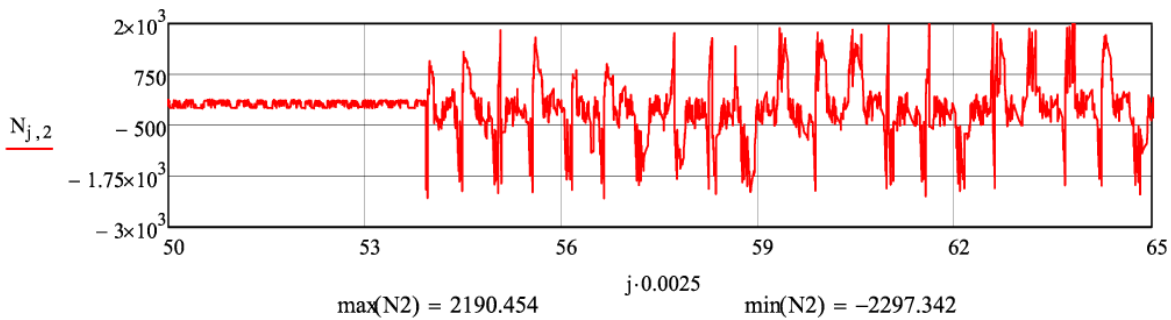
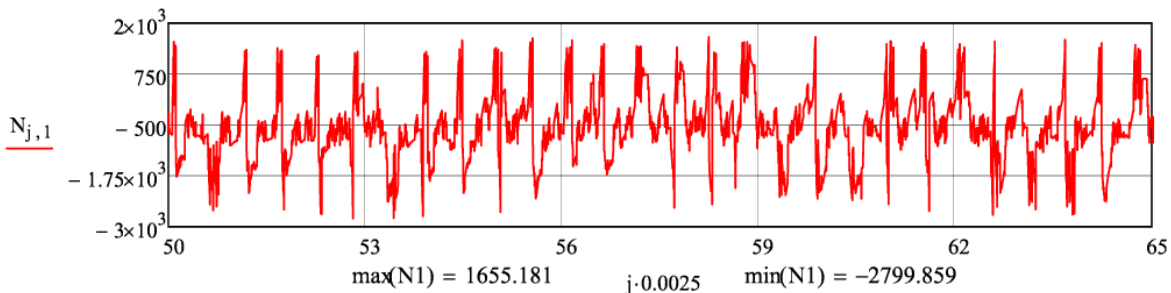
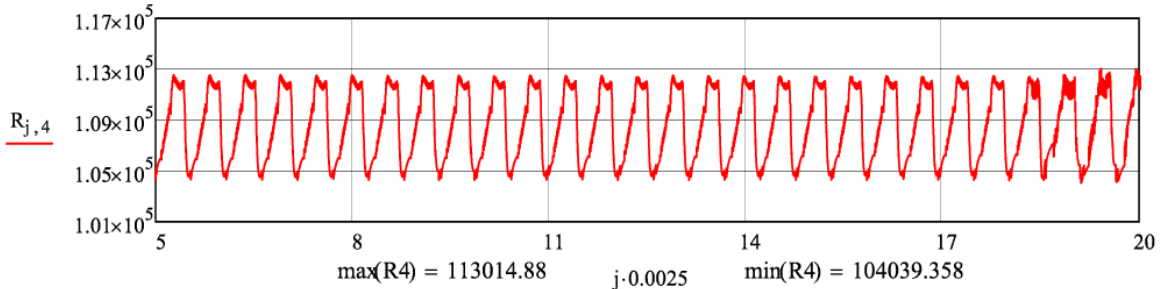
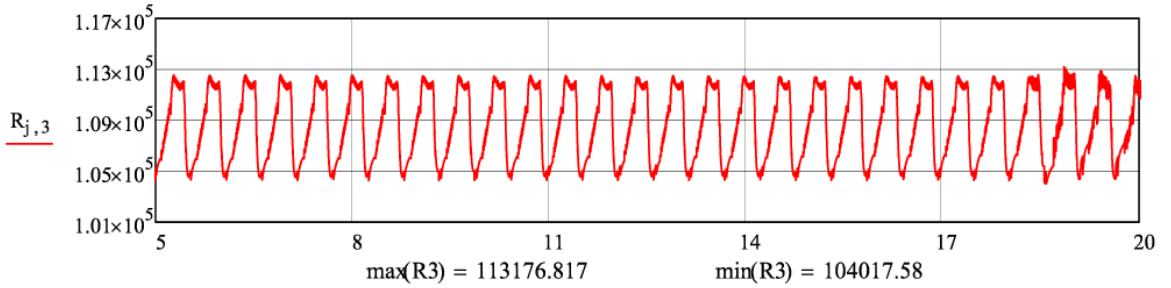
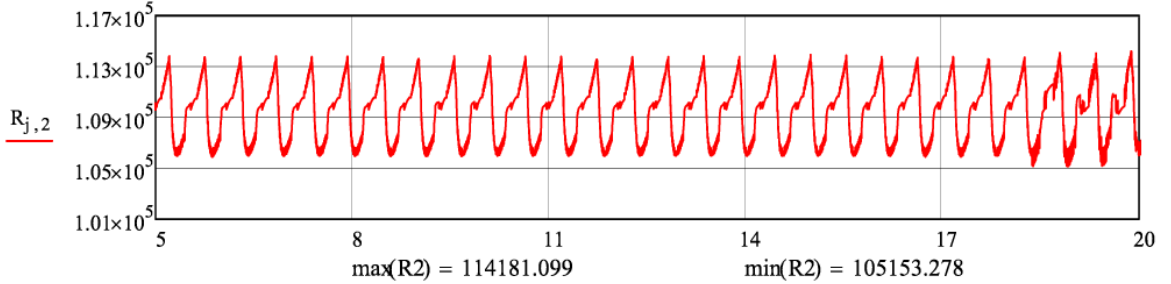
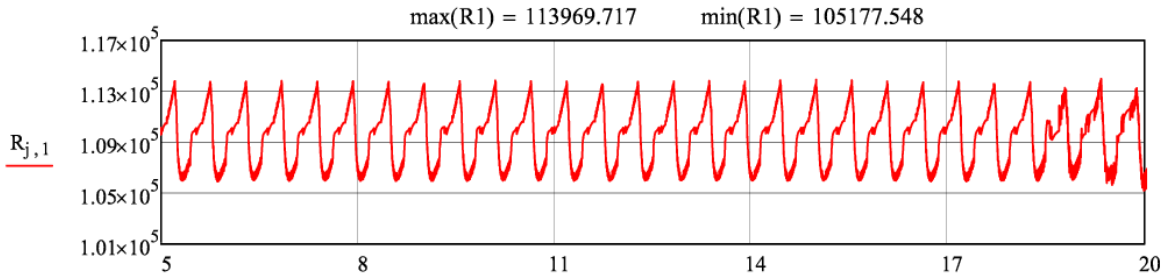
Г.2.14



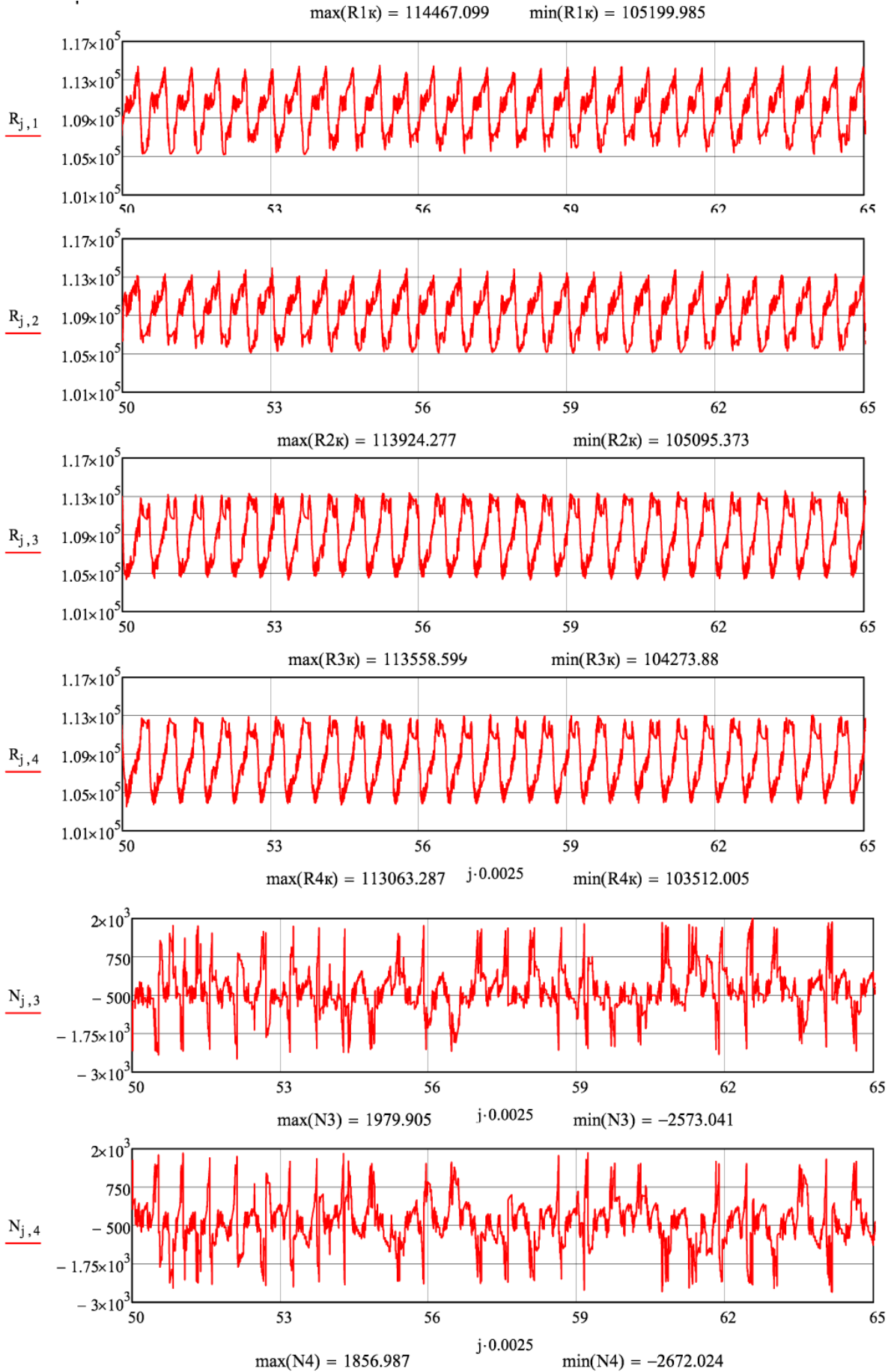
Г.2.15



Г.2.16



Г.2.17



Додаток Д. Акти впровадження та патенти України на корисну модель

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор

Українського державного університету
залізничного транспорту

В.М. Астахов

2018 року

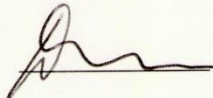
ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : «Особливості роботи проміжних скріплень типів ТРЕП та ТРЕП-Ш в умовах колій незагального користування» , яка виконана Беліковим Едуардом Анатолійовичем

Головні результати, які отримані Беліковим Е.А. в дисертаційній роботі на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Особливості роботи проміжних скріплень типів ТРЕП та ТРЕП-Ш в умовах колій незагального користування» використовується в навчальному процесі в курсах дисциплін «Улаштування та експлуатація колії» для студентів з освітньою програмою «Організація перевезень та управління на залізничному транспорті»; а також «Залізнична колія» та «Організація та планування ремонтно-колійних робіт в умовах обмежених ресурсів» для студентів за освітньою програмою «Залізничні споруди та колійне господарство»; в курсовому та дипломному проектуванні.

Крім того, матеріали досліджень використані у навчальному посібнику «Улаштування та експлуатація залізничної колії» (Харків, 2015 р., автори О.М. Даренський, Н.В. Бугаєць, Ю.Г. Козицький, А.В. Клименко, Д.О. Потапов), і конспекту лекцій «Основи наукових досліджень» (Харків, 2016 р., автори О.М. Даренський, Д.А. Фаст, Д.О. Потапов).

Завідувач кафедри
«Колія та колійне господарство»
Д.т.н., професор

 О.М.Даренський

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

**Начальник залізничного цеху №127
ДП «ЗАВОД "ЕЛЕКТРОВАЖМАШ"»**



_____ **К.І. Гетьман**

АКТ

**Впровадження результатів науково-дослідної роботи
«Особливості роботи проміжних скріплень типів ТРЕП та ТРЕП-Ш в умовах
колій незагального користування»**

Ми, що нижче підписалися, склали цей акт про наступне:

1. В період з травня 2016 року по грудень 2016 року науковими співробітниками кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту, була виконана науково-дослідна робота, в межах якої передано дані багатоваріантних чисельних досліджень, за допомогою розробленої математичної моделі просторової системи «екіпаж-колія», для умов колій підприємства ДП «ЗАВОД "ЕЛЕКТРОВАЖМАШ"», були визначені раціональні сфери застосування шпал ША-Т зі скріпленнями ТРЕП та ТРЕП-Ш.

2. Результати досліджень дисертаційної роботи Белікова Е.А. використовуються при плануванні ремонтно-колійних робіт колій ДП «ЗАВОД "ЕЛЕКТРОВАЖМАШ"».

Механік залізничного цеху №127

Заступник начальника

залізничного цеху № 127

Інженер

М.В. Загайло

В.М. Тверітінов

Е.А. Беліков

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

ТОВ «БУЧКО ТРЕК СИСТЕМС»

Генеральний директор



Бучко І.В.

2018р.

АКТ

Впровадження результатів науково-дослідної роботи
«Особливості роботи проміжних скріплень типів ТРЕП та ТРЕП-Ш в умовах
колій незагального користування»

Ми, що нижче підписалися, склали цей акт про наступне:

1. Результати дисертаційних досліджень Белікова Едуарда Анатолійовича, які були виконані у 2015 році стосовно експериментальних лабораторних даних «Результати експериментальних досліджень просторових жорсткостей скріплень ТРЕП та ТРЕП-Ш та рейкових опор при цих скріпленнях для умов колій незагального користування».

Проведені лабораторні експериментальні дослідження параметрів жорсткостей елементів скріплень ТРЕП та ТРЕП-Ш та виконані дослідження опору залізобетонних шпал просторовим переміщенням в умовах залізниць незагального користування при різних рівнях навантажень, дали можливість розрахувати просторові жорсткості зазначених типів скріплень.

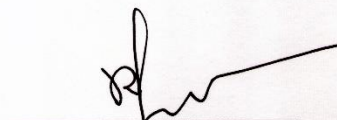
Порівняння отриманих в лабораторних умовах експериментальних даних для скріплень ТРЕП та ТРЕП-Ш с даними, які були отримані для поширених в умовах колій залізниць незагального користування скріплень типу КБ, показали, що вертикальна жорсткість скріплення типу ТРЕП в 2.4 рази менша, горизонтально-поперечна в 1.6 рази менша, при крученні менша в 4.3 рази в порівнянні зі скріпленням типу КБ при діапазоні навантажень на рейкову опору 20-30 кН.

Для скріплень типу ТРЕП-Ш ці співвідношення – 8.2 рази, 7.9 рази, 8.7 рази при такому самому діапазоні. З ростом навантажень на рейкові опори значення жорсткості опор зростатимуть, але не перевищують аналогічних параметрів скріплень типу КБ.

2. На основі експериментальних даних проведених досліджень внесено зміни до паспортних технічних характеристик скріплень типів ТРЕП та ТРЕП-Ш для залізобетонних шпал, здійснено відповідні поліпшення та коректування до технологічних процесів виготовлення пружних прокладок типів ППТ і ПНТ.

Це дозволило обґрунтовано рекомендувати вище зазначені скріплення для умов колій залізниць незагального користування.

Головний інженер



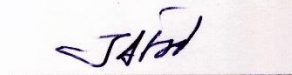
Кривенко В.М.

Керуючий виробництвом



Дикун І.П.

Інженер



Е.А. Беліков



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 74779

**ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ ЕЛЕМЕНТІВ
ІНЖЕНЕРНИХ КОНСТРУКЦІЙ АБО СПОРУД ПІД ДІЄЮ
НАВАНТАЖЕНЬ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **12.11.2012.**

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

M.V. Koviya
М.В. Ковія



ДОДАТОК Е. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Беліков Е.А. Аналіз вертикальної просторової жорсткості скріплення типів КППТ–7 / О.М. Даренський, Е.А. Беліков// Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків, 2015. – Вип. № 155. – С. 190–195.

Особистий внесок: розробка математичної моделі вузла проміжних рейкового скріплення.

2. Беліков Е.А. Перспективні конструкції проміжних скріплень для умов промислового залізничного транспорту / О.М. Даренський, Е.А. Беліков// Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті. Українська державна академія залізничного транспорту. – Харків, 2015. – Вип. № 2. – С. 57–61.

Особистий внесок: визначення конструктивних особливостей проміжних рейкових скріплень типів КБ, ТРЕП, ТРЕП–Ш.

3. Беліков Е.А. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничних колій / О.М. Даренський, Е.А. Беліков // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків, 2016. – Вип. № 154. – С. 149–155.

Особистий внесок: збір даних щодо існуючих теорій та методів розрахунків.

4. Беліков Е.А. Жорсткість скріплень ТРЕП–Ш та ТРЕП при крученні рейки/ Е.А.Беліков//Збірник наукових праць УкрДАЗТ.–Харків,2016.–Вип.№ 162.– С.81–86.

5. Беліков Е.А. Експериментальне визначення жорсткостей прокладок скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш / О.М. Даренський, Е.А. Беліков // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків, 2016. – Вип. № 169. – С. 150 –156.

Особистий внесок: проведення експериментальних робіт пружних елементів скріплень ТРЕП та ТРЕП–Ш.

Публікації апробаційного характеру:

6. Беліков Е.А. Жорсткість скріплень ТРЕП під дією горизонтальних поперечних сил / О.М. Даренський, Е.А. Беліков // Збірник наукових праць УкрДУЗТ: Тези. – Харків, 2015. – Вип. № 5. – С. 107.

Особистий внесок: проведення експериментальних робіт.

7. Беліков Е.А. Жорсткість пружних клем скріплень ТРЕП, ТРЕП–Ш / Е.А. Беліков // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: 6–а Міжнародна науково–технічна конференція– 2017. – С. Збірник тез та доповідей VI міжнародної науково–технічної конференції: 19–21 квітня 2018 року: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ; 2017. – с.187

Патенти України на корисну модель:

8. Патент на корисну модель. Україна МПК(2006): G01B 11/14, реєстраційний номер заявки № u2011 14788. Система для вимірювання переміщень в елементі інженерних конструкцій і споруд під дією навантажень / Даренський О.М., Астахов В.М., Вітольберг В.Г., Бугаєць Н.В., Беліков Е.А.; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. заява 13.12.2011; опубліковано 11.06.2012, Бюл.№ 11/2012.

9. Патент на корисну модель № 74779 від 12.11.2012 року. Україна, МПК(2012.01): G01D 5/00, E01B 35/00, номер заявки № u201205038. Пристрій для вимірювання переміщень елементів інженерних конструкцій або споруд під дією навантажень / Даренський О.М., Астахов В.М., Клименко А.В, Беліков Е.А., Вітольберг В.Г., Бугаєць Н.В. заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. заявл. 23.04.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21, власник УкрДУЗТ.

Особистий внесок: конструюванні елементів відеоцифрової системи вимірювання переміщень елементів інженерних споруд конструкцій.

Відомості про апробацію результатів дисертації.

Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на:

- 77–ї міжнародної науково–технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 21–23 квітня 2015 року) (Особиста участь)

- 6–а Міжнародна науково–технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 19–21 квітня 2017 року) (Особиста участь)