

**ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису**

ГАВРИЛОВ МАКСИМ ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 625.113:625.173.2/.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПРАВКИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ
В ПЛАНІ Й ПОЗДОВЖНЬОМУ ПРОФІЛІ**

**Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія
Галузь знань 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

 М. О. Гаврилов

Науковий керівник:
Курган Микола Борисович
Доктор технічних наук,
професор

Дніпро – 2021

АНОТАЦІЯ

Гаврилов М. О. Удосконалення технології виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія (27 – транспорт). – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена розробці шляхів удосконалення технології виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі на підставі модернізації автоматизованої системи колійних машин типу ВПР. У роботі проаналізовано теорію і практику технології виправки залізничної колії з використанням сучасних колійних машин. Розглянуто існуючі концепції щодо виправки залізничної колії в плані і профілі з використанням сучасних ВПР. Перша концепція базується на залученні сучасних супутникових систем для визначення координатного положення колії в трьох проекціях. Саме ця концепція має найбільш інноваційні характеристики. Друга концепція базується на використанні зарубіжної автоматизованої системи з можливістю створення двовимірної моделі колії заснованої на зйомці плану й поздовжнього профілю базовою системою машини, яка використовується в Україні з прив'язкою по довжині, але без прив'язки до координат. В основу третьої концепції покладено використання методу «згладжування» базовою 3-х або 4-х точковою системою вітчизняної машини, без зрівнювання по довжині, прив'язки до координат та створення моделі колії. На підставі проведеного аналізу концепцій зроблено висновок, що наявні засоби автоматизації, які використовуються на вітчизняних залізницях, обмежують можливості модернізації технології виправки колії за третьою концепцією.

Незважаючи на наявність низки досліджень, пов'язаних з впровадженням автоматизованих систем зйомки та виправки колії, поки що відсутні роботи, які б давали комплексне науково-практичне обґрунтування удосконаленню технології виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі шляхом її автоматизації із застосуванням програмного забезпечення на вітчизняних машинах типу ВПР. Аналіз світового та вітчизняного досвіду виправки колії доводить, що невід'ємною складовою цього процесу є зйомка плану й поздовжнього профілю.

В дисертації наведено детальний аналіз одинадцяти існуючих в світовій практиці методів зйомки колії, а саме: мануальні (від лат. manus – рука, дії руками) та автоматизовані. Досліджені методи зйомки плану колії й поздовжнього профілю. Саме існування різних методів, що мають практичне застосування, доводить те, що кожен з них має як позитивні так і негативні якості. На підставі аналізу кожного з методів зроблено висновок, що вибір того чи іншого методу базується на статистичному і математичному обґрунтуванні. Порівняння результатів зйомки кривої різними методами дало можливість встановити на скільки вони відрізняються між собою. Однак визначити результати зйомки відносно абсолютно правильних значень неможливо, тому що точне положення кривої залишається невідомим. Доведено, що точність результатів залежить не тільки від параметрів вимірювальних приладів і кваліфікації виконавців, але й від самої методики, яка визначає технологію вимірювання і наступні математичні перетворення отриманих даних, наприклад, в кривизну кривої.

Показано, що найбільш ефективними є такі методи: зйомка колієвимірювальним вагоном, зйомка виправно-підбивно-рихтувальними машинами, зйомка з використанням GPS датчиків, зйомка з використанням колієвимірювальних візків. При застосуванні вказаних методів одночасно ведеться зйомка плану й поздовжнього профілю залізничної колії. Найбільш

точним методом з найбільшим ступенем автоматизації процесу визначено метод зйомки з використанням GPS датчиків, але для забезпечення зазначеної точності необхідна розвинута мережа базових GPS-станцій на землі. Встановлено, що найбільш надійні результати вимірювань для подальших розрахунків та визначення параметрів кривої дають методи Гонікберга та метод зйомки з використанням GPS датчиків за умови, що обробка результатів вимірювань виконується за програмою RWPlan.

На підставі дослідження автоматизованих систем виправки плану й поздовжнього профілю залізничної колії доведено, що автоматизована виправка залізничної колії в плані може бути застосована тільки на базі використання «однохордової» системи, яка на цей час немає альтернативи. Виявлено, що невід'ємними складовими цієї системи є триточковий, чотириточковий, «згладжування» та прецизійний методи виправки колії, які функціонально взаємопов'язані і дозволяють отримувати досить достовірні дані для автоматизації процесу із застосуванням вітчизняних ВПР.

Аналіз даних випробувань по зйомці плану показав, що автоматизована зйомка плану контрольно-вимірювальною системою машини ведеться асиметричною хордою, що дорівнює довжині машини. Стріли вигину ідентичні, а максимальна різниця між контрольною мануальною зйомкою «методом стріл» дорівнює 9 мм, що укладається в похибку механіки машини.

Аналіз даних експериментальних робіт показав, що автоматизована зйомка профілю контрольно-вимірювальною системою машини ведеться хордою, яка дорівнює довжині машини і унеможливорює врахування більш довгих змін обрису профілю. Така система дозволяє оцінити лише стан колії за показниками яма/бугор по довжині бази машини, тобто може мати місце лише локальне виправлення нерівностей профілю на довжині бази машини.

Автоматизація розрахунків з використанням евольвентної або сплайнової моделей, які описують положення плану існуючої залізничної колії, дозволяють

розрахувати виправку плану колії будь-якого обрису. Оскільки коефіцієнти сплайну дозволяють досить точно розраховувати кривизну, вектори нормалей і координати проміжних точок на плані існуючої ділянки колії, то ця модель більш гнучка для вирішення завдань при проектуванні виправки плану, однак потребує більшого часу для проведення розрахунків та високої кваліфікації інженерів, які їх виконують. Тому для виконання розрахунків з виправки колії машинами типу ВПР прийнята евольвентна модель плану.

Для вирішення задач з удосконалення технології виправки залізничної колії була розроблена математична модель, яка модернізує систему управління машинізованою виправкою колії в поздовжньому профілі. Для встановлення найбільш раціональної розглянуто чотири математичні моделі, які можуть описати положення та дають можливість розрахувати виправку залізничної колії в профілі. Аналіз розглянутих моделей показав, що при розрахунку виправки залізничної колії в профілі вони забезпечують необхідну плавність між суміжними точками.

Доведено, що при контрольній кількості ітерацій з наведеного сімейства моделей найбільший коефіцієнт згладжування 8,05 одиниць отримано при лінійному згладжуванні по п'яти точках. Дана модель забезпечила більш плавний обрис положення рейкової колії ніж інші моделі, результати яких можуть досягнути меншої різниці екстремумів за більшу кількість ітерацій.

Вперше отримані алгоритми розрахунку виправки колії в поздовжньому профілі, які складають логічну послідовність розрахунку у вигляді взаємопов'язаних блок-схем. Вони є основою програмного модуля, який дозволяє здійснити розрахунок підйомок для досягнення плавності обрису колії в поздовжньому профілі та вирішення задачі з підвищення швидкості руху поїздів.

Розроблено модуль для розрахунку виправки колії в поздовжньому профілі, який дає можливість значно збільшити ступінь автоматизації процесу виправки колії вітчизняними машинами типу ВПР для подальшого ефективного

використання їх на залізницях України. Застосування цього модуля на основі комбінаторного принципу в автоматизованій системі управління машинізованою виправкою колії дозволяє значно розширити можливості досягнення стану колії необхідного для впровадження швидкісного руху.

Проведено експериментальні дослідження розробленого математичного інструменту для розрахунку виправки колії в плані й поздовжньому профілі машинами типу ВПР. Проведений експеримент показав адекватність розробленого математичного методу.

Застосування машин типу ВПР з автоматизованою системою виправки колії в плані й поздовжньому профілі та імплементованим в неї математичним інструментом дозволило зменшити вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу, дало можливість збільшити швидкість виконання робіт і, за цей рахунок, зменшити до 17,6% тривалість «вікон».

Порівняння результатів математичної моделі виправки колії у поздовжньому профілі та натурних даних, отриманих в ході експерименту, показало їх відповідність. Розбіжність між теоретичними даними та отриманими в ході експерименту склала: максимальна – 5,4 мм; мінімальна – 1,7 мм; середня – 3,6 мм.

Випробування показали, що система управління та розрахунку виправки колії вітчизняними модернізованими виправно-підбивно-рихтувальними машинами з використанням запропонованого математичного інструмента забезпечує необхідну точність встановлення проектно-оптимального обрису залізничної колії при виконанні реконструкції та поточному утриманні колії.

Впровадження запропонованих заходів щодо виправлення залізничної колії в плані й поздовжньому профілі. дає можливість, підвищити плавність і комфортабельність їзди.

Результати, отримані в ході дисертаційного дослідження, відповідають головним напрямкам, які сформульовані в Транспортній стратегії України на

період до 2030 року (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 № 430-р та Програми оновлення рухомого складу АТ «Укрзалізниця» на період до 2021р.

Основні результати дослідження були використані в чотирьох науково-дослідних роботах, в тому числі в бюджетній фундаментальній НДР «Розробка наукових основ і техніко-економічне обґрунтування етапів впровадження швидкісного й високошвидкісного руху поїздів в Україні» (№ ДР 0114U002549).

Основні наукові положення, висновки й рекомендації, які отримані в ході дисертаційного дослідження, мають обґрунтування і достовірність. Підставами для цього є: коректно поставлені та кваліфіковано виконані експериментальні дослідження за участю технічної служби ТОВ «НВК Дніпроспецмаш», дослідні результати одержані на основі аналізу значного обсягу реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики, а розбіжність теоретичних розрахунків і даних, отриманих в ході практичних експериментів, не перевищує загальноприйнятих значень.

Достовірність наукових результатів ґрунтується на застосуванні методів математичного моделювання з використанням вивіренних на практиці прийомів та допущень, які відповідають фізиці процесів зйомки залізничної колії, статистичним аналізом і натурними спостереженнями для визначення параметрів плану й поздовжнього профілю; кореспондуванням результатів теоретичних досліджень з отриманими в ході практичних експериментів даними, а також з результатами досліджень інших фахівців, позитивними результатами практичного застосування результатів дослідження на залізницях України.

Більшість теоретичних положень, викладених у дисертації, впроваджено в навчальний процес Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна під час викладання дисциплін «Проектування реконструкції залізниць», «Сучасні методи зйомки та розрахунки плану колії», «Сучасні інформаційні технології в будівництві та колійному

господарстві» при підготовці магістрів за спеціальністю 273 – залізничний транспорт за освітньою програмою «Залізничні споруди та колійне господарство».

Ключові слова: верхня будова колії, швидкісний рух, кругова крива, підвищення зовнішньої рейки, перехідна крива, безпека і плавність руху, ВПР, ВПРС, ВПО, автоматизована виправка колії.

ABSTRACT

Havrylov M. O. Improvement of the Technology of Railway Track Alignment in the Plan and Longitudinal Profile.

Dissertation for the degree of Candidate of Engineering Sciences on specialty 05.22.06 - Railway Track (27 - Transport). - Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, 2021.

This dissertation is devoted to the development of ways to improve the technology of railway track alignment in the plan and longitudinal profile on the basis of modernization of an automated system of track renewal trains. The paper analyzes the theory and practice of railway track alignment technology with the use of modern track machinery. The existing concepts for the railway track alignment in the plan and longitudinal profile with the use of modern track renewal trains are reviewed. The first concept is based on the use of modern satellite systems to determine the coordinate position of the track in three projections. It is this concept that has the most innovative characteristics. The second concept is based on the use of a foreign automated system with the ability to create a two-dimensional model of the track based on the plan and longitudinal profile of the basic system of the machine used in Ukraine with reference to length, but without coordinate referencing. The third concept is based on the smoothing method by the 3- or 4-point system of a domestic machine without equalizing on length, coordinate referencing and creating a track model. Based on the analysis of the concepts, it has been concluded that the existing automation tools used

on domestic railways limit the possibilities of modernization of track alignment technology according to the third concept.

Despite the presence of a number of studies related to the introduction of automated track surveying and alignment systems, there are still no academic works that would provide a comprehensive scientific and practical justification for improving the technology of railway track alignment in the plan and longitudinal profile through automation using software on domestic machines such as track renewal trains. Analysis of the international and domestic experience of track alignment proves that an integral part of this process is the survey of the plan and longitudinal profile.

This dissertation provides a detailed analysis of eleven available methods of track surveying in the international practice, namely: manual (from Latin *manus* – hand, hand actions) and automated. Methods of surveying the plan of the track and longitudinal profile are studied. The very existence of various methods that have practical application proves that each of them has both positive and negative qualities. Based on the analysis of each of the methods, it has been concluded that the choice of a particular method is based on statistical and mathematical justification. Comparison of the results of surveying of the curve using different methods made it possible to determine how much they differ from one another. However, it is impossible to determine the results of the survey relatively to absolutely correct values, since the exact position of the curve remains unknown. It has been proved that the accuracy of the results depends not only on the parameters of measuring devices and the qualifications of performers, but also on the methodology itself, which determines the measurement technology and subsequent mathematical transformations of the obtained data, for example, into the curvature of the curve.

It has been shown that the most effective methods are the following: surveying with a track measuring car, surveying with track renewal trains, surveying with the use of GPS sensors, surveying with the use of track-measuring trolleys. When these methods are applied, the plan and longitudinal profile of the railway track are surveyed

simultaneously. The most accurate method with the greatest degree of process automation is the method of surveying using GPS sensors, but to ensure this accuracy, a well-developed network of GPS stations is needed. It has been established that the most reliable measurement results for further calculations and determination of curve parameters are provided by Gonikberg's methods and the survey method using GPS sensors, provided that the measurement results are processed using the RWPlan program.

Based on the study of automated plan alignment systems and the longitudinal profile of the railway track, it has been proved that automated railway track alignment in the plan can only be applied on the basis of a "single-chord" system, which currently has no alternative. It has been revealed that the integral components of this system are three-point, four-point, smoothing and precision methods of track alignment, which are functionally interrelated and allow obtaining sufficiently reliable data to automate the process using domestic track renewal trains.

Analysis of test data for the plan surveying has demonstrated that automated surveying of the plan by the control and measurement system of the machine is carried out by an asymmetric chord equal to the length of the machine. The bending deflections are identical, and the maximum difference between the final manual survey of this method is 9 mm, which fits into the acceptable error of the machine mechanics.

Analysis of the data of test works has shown that the automated survey of the profile by the control and measurement system of the machine is conducted by a chord, which is equal to the length of the machine and makes it impossible to take into account longer changes in the profile outline. This system makes it possible to assess only the condition of the track by the pit/hillock indicators along the length of the machine base, i.e. only local correction of profile irregularities along the length of the machine base can take place.

Automation of calculations using involute or spline models that describe the position of the existing railway track plan allows calculating the alignment of the track

plan of any outline. Since the spline coefficients make it possible to accurately calculate the curvature, normal vectors and coordinates of intermediate points on the plan of an existing track section, this model is more flexible for solving problems when designing a plan alignment, but requires more time for calculations and highly qualified engineers to perform them. Therefore, an involute plan model has been adopted to perform calculations on track alignment by track renewal trains.

To solve the problems of improving the technology of railway track alignment, a mathematical model that modernizes the control system for mechanized track alignment on the longitudinal profile has been developed. In order to establish the most rational one, four mathematical models that describe the position and make it possible to calculate the alignment of the railway track in the profile have been considered. Analysis of the considered models has shown that when calculating the alignment of a railway track in the profile, they provide the necessary smoothness between adjacent points.

It has been proved that for the control number of iterations from the given group of models, the highest smoothing coefficient of 8.05 units is obtained for linear smoothing at five points. This model provides a smoother outline of the track position than other models, the results of which can achieve a smaller difference in extremes for more iterations.

For the first time, algorithms for calculating track alignment in the longitudinal profile, which make up a logical calculation sequence in the form of interconnected flowcharts, have been obtained. They are the basis of a software module that allows calculation of lifts in order to achieve a smooth outline of the track in the longitudinal profile and solve the problem of increasing the speed of trains.

A module for calculating track alignment in the longitudinal profile has been developed, which makes it possible to significantly increase the degree of automation of the track alignment process by domestic track renewal trains for their further effective use on the railways of Ukraine. The application of this module based on the

combinatorial principle in the automated control system of the mechanized track alignment makes it possible to considerably expand possibilities of obtaining the track condition necessary for introduction of high-speed operation.

Experimental studies of the devised mathematical tool for calculating the track alignment in the plan and longitudinal profile by track renewal trains have been carried out. The experiment has shown the adequacy of the devised mathematical method.

The use of track renewal trains with an automated track alignment system in the plan and longitudinal profile and a mathematical tool implemented in it made it possible to reduce the requirements for the qualification of service personnel, to speed up the performance and, at the same time, reduce the duration of gaps by up to 17.6%.

Comparison of the results of the mathematical model of track alignment in the longitudinal profile and full-scale data obtained during the experiment has shown their correspondence. The discrepancy between the theoretical data and those obtained during the experiment: maximum – 5.4 mm; minimum – 1.7 mm; average – 3.6 mm.

Tests have shown that the system of control and calculation of track alignment by upgraded domestic track renewal trains with the use of proposed mathematical tool provides the necessary accuracy in establishing optimal outline of the railway track when performing reconstruction and current track maintenance.

Implementation of the proposed measures for the alignment of the railway track in the plan and longitudinal profile makes it possible to increase the smoothness and comfort of movement.

The results obtained in the course of the dissertation research correspond to the main directions formulated in the Transport Strategy of Ukraine for the period up to 2030 (approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 30.05.2018, No. 430-p and the Rolling Stock Renewal Program of JSC "Ukrzaliznytsia" for the period up to 2021).

The main results of the research have been used in four research works, including the budget-funded fundamental R&D "Development of Scientific Bases and Feasibility

Study of the Stages of Introduction of High-Speed Train Traffic in Ukraine" (research work 0114U002549).

The main scientific provisions, conclusions and recommendations obtained in the course of the dissertation research are valid and reliable. The reasons for this are the following: correctly set and expertly performed experimental studies with the participation of engineering team of LLC «Scientific Industrial Complex Dniprospetsmash», experimental results obtained on the basis of analysis of a significant amount of real factual material with subsequent processing by mathematical statistics methods, and the discrepancy between theoretical calculations and data obtained during practical experiments does not exceed generally accepted values.

The reliability of scientific results is based on the application of methods of mathematical modeling with the use of field-proven techniques and assumptions that correspond to the physics of railway track survey processes, statistical analysis and field observations to determine the parameters of the plan and longitudinal profile; correspondence of the results of theoretical research with the data obtained during practical experiments, as well as with results of studies conducted by other experts, positive results of practical application of research results on the railways of Ukraine.

Most of the theoretical provisions set out in the dissertation are implemented in the educational process at Dnipro National University of railway transport named after academician V. Lazaryan in courses "Railway Reconstruction Design", "Modern Surveying Methods and Track Plan Calculations", "Modern Information Technologies in Construction and Track Management" as a part of master's study plan on specialty 273 – Railway Transport, educational program "Railway structures and track management".

Keywords: upper track structure, high-speed operation, circular curve, elevation of the outside rail, transition curve, operation safety and smoothness, track renewal train, track renewal system, straightening-lining machine, tamping machine, automated track alignment.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

у виданнях, що є фаховими:

1. Курган Д. М. Діагностування та виправка положення залізничної колії колійними машинами / Д. М. Курган, М. О. Гаврилов // *Українські залізниці: Міжнародний техніко-економічний журнал* — 2016. — Випуск 8 (38) — С. 60-64.

у виданнях країн, що є членами Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) та індексуються в наукометричних базах Index Copernicus:

2. Kurhan D. The Mathematical Support of Machine Surfacing for the Railway Track / Dmytro Kurhan, Maksym Havrylov // *Acta Technica Jaurinensis* — 2020 — Випуск 3 — С. 246-267.

у виданнях, що індексовані у Index Copernicus і є фаховими:

3. Курган Д. М. Методика інженерного розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування колеса на рейку / Д. М. Курган, О. В. Губар, М. О. Гаврилов // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту* — 2020 — Випуск 3 (87) — С. 71-80.
4. Курган М. Б. Шляхи зниження аварійності на залізничних переїздах / М. Б. Курган, О. Ф. Лужицький, М. О. Гаврилов // *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті* — 2014 — Випуск 7 — С. 53-62.

Публікації апробаційного характеру:

5. Курган Д. М. Оцінка ефективності використання машинного способу виправки кривих в плані / Д. М. Курган, М. О. Гаврилов // 73 Міжнародної науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» – Дніпро – 2013. — С. 180-181
6. Гаврилов М. О. Современная съёмка плана железнодорожного пути // Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», яка присвячена 100-річчю професора Мойсея Абрамовича Фрішмана, 2013 — Дніпро — 2013. — С. 83

7. Гаврилов М. О. Обеспечение положения пути в плане и профиле в пределах установленных допусков / М. О. Гаврилов, М. Г. Ренгач // 74 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» – Дніпро – 2014. — С. 275-276
8. Гаврилов М. О. Забезпечення точності зйомки кривих при автоматизації колійних робіт / М. О. Гаврилов, О. Ф. Лужицький // 75 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» — Дніпро — 2015. — С. 244
9. Байдак С. Ю. Урахування показників плавності й комфортабельності їзди при проектуванні залізниць / С. Ю. Байдак, М. О. Гаврилов, О. Ф. Лужицький // 78 Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» — Харків — 2016. — С. 94
10. Гаврилов М. О. Забезпечення точності зйомки і виправки кривих при автоматизації колійних робіт / М. О. Гаврилов, О. Ф. Лужицький // 76 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» — Дніпро — 2016. — С. 190-191
11. Гаврилов М. О. Підвищення точності зйомки й виправки кривих при машинізації поточного утримання колії / М. О. Гаврилов, О. Ф. Лужицький // 77 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» — Дніпро — 2017. — С. 221-222
12. Байдак С. Ю. Підвищення безпеки руху поїздів в кривих ділянках залізничної колії / С. Ю. Байдак, О. Ф. Лужицький, М. О. Гаврилов // 79 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» — Дніпро — 2019. — С. 221-222
13. Байдак С. Ю. Встановлення підвищення зовнішньої рейки за умови мінімізації зносу рейок / С. Ю. Байдак, Н. П. Хмелевська, М. О. Гаврилов // 79 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» — Дніпро — 2019. — С. 222-223
14. Курган Д. М. Оцінка профілю колії за допомогою вимірювальних систем колійних машин / Д. М. Курган, М. О. Гаврилов // 79 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» — Дніпро — 2019. — С. 232-233
15. Курган Д. М. Состояние вопроса съёмки пути автоматическими системами путевых машин и высокоточными приборами / Д. М. Курган, М. О. Гаврилов

// IX Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» — Гомель, Беларусь — 2019. — С. 346-348

16. Вплив нерівностей колії на залізничних переїздах на умови взаємодії колії й рухомого складу / М. Б. Курган, О. Ф. Лужицький, М. О. Гаврилов, П. В. Панченко // 80 Міжнародна науково-практична конференція — Дніпро — 2020. — С. 152-153

ЗМІСТ

ЗМІСТ	17
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕОРІЇ І ПРАКТИКИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПРАВКИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ КОЛІЙНИХ МАШИН.....	31
1.1 Аналіз існуючих концепцій щодо виправки залізничної колії в плані і профілі з використанням сучасних ВІР	31
1.1.1 Перша концепція виправки колії.....	33
1.1.2 Друга концепція виправки колії	38
1.1.3 Третя концепція виправки колії	40
1.2 Огляд наукових досліджень з питань автоматизованої виправки залізничної колії в плані і поздовжньому профілі.....	42
1.3 Висновки до розділу 1	46
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ЗЙОМКИ ПЛАНУ ТА ПОЗДОВЖНЬОГО ПРОФІЛЮ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ.....	48
2.1 Загальні положення.....	48
2.2 Мануальні методи зйомки плану колії	50
2.2.1 Метод стріл.....	50
2.2.2 Метод Гофера	53

2.2.3 Модифікований метод І. П. Корженевича.....	53
2.2.4 Метод Гонікберга.....	54
2.3 Мануальні методи зйомки поздовжнього профілю.....	56
2.3.1 Метод технічного нівелювання	56
2.3.2 Метод тахеометричної зйомки	58
2.4 Автоматизовані методи зйомки плану й поздовжнього профілю	60
2.4.1 Метод вимірювання колієвимірювальним вагоном	60
2.4.2 Метод вимірювання виправно-підбивно-рихтувальними машинами.....	66
2.4.3 Метод вимірювання з використанням GPS датчиків	66
2.4.4 Метод вимірювання з використанням колієвимірювальних візків	68
2.4.5 Метод мобільного лазерного сканування.....	72
2.5 Підвищення точності зйомки плану й поздовжнього профілю колії ...	78
2.6 Висновки до розділу 2	81
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВИПРАВКИ ПЛАНУ Й ПОЗДОВЖНЬОГО ПРОФІЛЮ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ.....	83
3.1 Однохордова система автоматизованої виправки залізничної колії в плані. Застосування триточкового та чотириточкового методів виправки залізничної колії в плані.....	83
3.1.1 Триточковий метод	84
3.1.2 Чотириточковий метод	85

3.2 Використання методу «згладжування» та прецензійного методу для приведення залізничної колії	86
3.2.1 Метод «згладжування»	86
3.2.2 Прецензійний метод.....	92
3.3 Оцінка достовірності визначення положення залізничної колії в плані й поздовжньому профілі з використанням існуючих вітчизняних автоматизованих систем і механізмів	94
3.4 Евольвентна та сплайнова модель, які описують положення плану існуючої залізничної колії.....	110
3.4.1 Евольвентна модель.....	110
3.4.2 Сплайнова модель	113
3.5 Висновки до розділу 3	121
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МАШИНІЗОВАНОЮ ВИПРАВКОЮ КОЛІЇ В ПОЗДОВЖНЬОМУ ПРОФІЛІ	123
4.1 Визначення раціональної математичної моделі для описування положення залізничної колії в профілі	123
4.1.1 Згладжування методом ітерацій по п'яти членам ряду	128
4.1.2 Алгоритм лінійного згладжування по трьох точках	129
4.1.3 Алгоритм лінійного згладжування по п'яти точках.....	130
4.1.4 Алгоритм лінійного згладжування по семи точках.....	131
4.2 Оцінка адекватності обраної математичної моделі, яка описує положення залізничної колії в профілі	132

4.3 Розробка алгоритмів визначення величини зсувів колії у поздовжньому профілі з урахуванням їх можливих обмежень	135
4.4 Розробка модуля для розрахунку виправки колії в поздовжньому профілі та його застосування на основі комбінаторного принципу в автоматизованій системи управління машинізованою виправкою колії.....	150
4.5 Висновки до розділу 4	159
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОГО ПОЛОЖЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ.....	161
5.1 Підготовка експерименту для дослідження геометричного положення залізничної колії.....	161
5.2 Натурна зйомка залізничної колії в плані й поздовжньому профілі машиною ВПР	168
5.3 Оцінка точності виправки залізничної колії на підставі експерименту	171
5.4 Висновка до розділу 5.....	187
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	189
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	192
ДОДАТКИ.....	212

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЄС – Європейський Союз (Євросоюз)

КЧ – Колійна частина

КМС – Колійна машинна станція

ДБН – Державні будівельні норми

АТ – акціонерне товариство

РФ – Російська Федерація

СНД – Співдружність Незалежних Держав

ОСЗ – Організації співробітництва залізниць

ВПр – виправно-підбивально-рихтувальна машина

ВПрС – виправно-підбивально-рихтувальна машина для стрілочних переводів

ВПО – виправно-підбивально-обробна машина

ПРП – підйомно-рихтувальний пристрій контрольно-вимірювальної системи машини типу ВПр

РШР – рейко-шпальна решітка

АС – автоматизована система

СЦБ – сигналізація, централізація і блокування

КВЛ – колієвимірювальна машина (вагон-колієвимірювач)

ВСТУП

Підвищення швидкостей руху поїздів є одним з основних показників технічного прогресу у сфері залізничного транспорту. Організація швидкісних пасажирських перевезень висуває перед транспортом України додаткові вимоги з надання послуг на якісно новому рівні. В Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року одним з основних завдань є підвищення швидкості руху пасажирських поїздів до 160 (у перспективі до 200) і вантажних - до 100-120 км/год.

Криві ділянки, які складають майже 30% від загальної довжини залізниць, обмежують швидкість руху поїздів та призводять до підвищення експлуатаційних витрат. Контроль за станом плану залізничної лінії і його своєчасне виправлення є однією з найважливіших задач колійного господарства.

Сьогодні, коли з одного боку збільшуються швидкості руху пасажирських поїздів, а з іншого – в умовах економічної кризи необхідно знижувати витратну частину на рух поїздів, актуальним є створення сучасної колійної техніки, що поєднує в собі високу продуктивність, якість та прийнятну вартість.

На шляху машинізації колійного господарства Укрзалізниці була суттєвого збільшена кількість важких машин для виправлення плану залізничної колії. Наявний парк таких машин майже 140 одиниць, а потреба в нових машинах складає майже 70 одиниць.

У цих умовах дуже важливою є оцінка точності зйомки та виправка залізничних кривих високопродуктивними машинами і, в першу чергу, обладнаними системами автоматики. Під системами автоматики розуміються програмно-апаратні комплекси для аналізу й контролю вимірювань стану колії, виконання розрахунків параметрів плану і профілю та керування процесом рихтування колії.

З впровадженням на залізницях України швидкісного руху поїздів необхідно якнайшвидше модернізувати механіку машин з метою застосування координатної зйомки, яка забезпечить більш точні результати автоматизації процесів з виправки колії.

Актуальність теми. У зв'язку з впровадженням на залізницях України прискореного й швидкісного руху поїздів необхідно забезпечувати не тільки безпеку, але й плавність і комфортабельність їзди, особливо в кривих ділянках колії.

Для досягнення цієї мети особливої актуальності набуває проведення реконструкції ділянки з постановкою осі колії в раціонально-проектне положення в профілі й плані з відновленням проектних радіусів. При цьому параметри колії повинні відповідати максимальній швидкості руху, безпеці, плавності і комфортабельності, а витрати на перебудову колії під раціональні параметри повинні окупатись. На сьогодні роботи по утриманню колії за відсутності достатнього фінансування та інших об'єктивних причин не виконуються в повному обсязі, тому актуалізується аналіз проектів капітальних ремонтів і реконструкція колії на підставі удосконалення технології виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі.

Існуюча практика виправки колії, як правило «методом згладжування», а також складнощі утримання колії в кривих, дає підстави для висновку щодо необхідності розробки та впровадження нових, більш сучасних і ефективних технологій з використанням високопродуктивних виправно-підбивно-рихтувальних машин із забезпеченням економічної ефективності автоматизації робіт з виправки колії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до головних напрямків, які сформульовані в Транспортній стратегії України на період до 2030 року (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 № 430-р) та Програми оновлення рухомого складу

АТ «Укрзалізниця» на період до 2021р. Обраний напрямок досліджень пов'язаний також з виконанням у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна 4-х науково-дослідних робіт на замовлення АТ «Укрзалізниця» і МОН України, в яких здобувач був виконавцем і автором окремих розділів у звітах: «Розробка наукових основ і техніко-економічне обґрунтування етапів впровадження швидкісного й високошвидкісного руху поїздів в Україні» (№ ДР 0114U002549), «Визначення основних напрямків реконструкції й розвитку мережі залізниць України для її інтеграції у європейську транспортну систему (№ ДР 0117U006811), Науково-технічне забезпечення сталого розвитку залізничних перевезень в міжнародному сполученні «Україна-Євросоюз» (№ ДР 0117U004391), Техніко-економічна оцінка варіантів перетину кордонів при зміні ширини залізничної колії (№ ДР 0120U102980).

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційного дослідження є удосконалення технології виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі при використанні виправно-підбивно-рихтувальних машин (ВПР). Досягнення цієї мети передбачає розв'язання таких завдань:

1. Проведення аналізу існуючих концепцій щодо виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі з використанням сучасних виправно-підбивно-рихтувальних колійних машин, встановлення причин, що були перешкодою до реалізації відповідних практичних програм впровадження швидкісного руху поїздів на залізницях України.
2. Дослідження методів зйомки плану й поздовжнього профілю залізничної колії та технології виправки залізничної колії з використанням сучасних колійних машин.
3. Розробку математичної моделі для удосконалення системи управління машинізованою виправкою колії в плані й поздовжньому профілі з оцінкою її адекватності.

4. Створення на базі розроблених алгоритмів математичного інструменту та інтегрування його в автоматизований програмний комплекс, який використовується модернізованими вітчизняними машинами типу ВПР.
5. Перевірка результатів теоретичних досліджень експериментальними даними геометричного положення залізничної колії та доведення адекватності розробленої моделі за результатами натурних випробувань.

Об'єктом дослідження є процес машинної виправки залізничної колії

Предметом дослідження є геометричне положення залізничної колії

Методи досліджень. В першому розділі використовувався системний аналіз для визначення існуючих концепцій щодо виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі з використанням сучасних виправно-підбивно-рихтувальних колійних машин та встановлення причин, що були перешкодою до реалізації відповідних практичних програм впровадження швидкісного руху поїздів на залізницях України. В другому розділі використано комплексний метод досліджень методів зйомки плану й поздовжнього профілю залізничної колії з використанням сучасних машин для визначення відповідного з них для подальшого математичного моделювання обрису колії. В третьому розділі виконувались вимірювання системою датчиків ВПР для натурального визначення геометричного положення залізничної колії в плані й поздовжньому профілі та визначення точності зйомки цією системою. В четвертому розділі використовувались принципи математичного моделювання, теорії математичної статистики, методи об'єктно орієнтованого програмування для розробки та практичної реалізації математичного інструменту розрахунку виправки залізничної колії в поздовжньому профілі. В п'ятому розділі виконувались експериментальні вимірювання і обробка отриманих результатів з використанням програмного забезпечення розробленого за участю автора для доведення адекватності розробленого математичного

інструмента та перевірки результатів теоретичних досліджень експериментальними даними геометричного положення залізничної колії.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. *Вперше* розроблена математична модель для управління машинізованою виправкою колії в поздовжньому профілі для вітчизняних колійних машин, яка дає можливість оцінювати й прогнозувати розвиток зсувів залізничної колії в залежності від умов експлуатації.
2. *Набула подальшого розвитку* евольвентна модель виправки кривих, обґрунтування переходу до рекурентної форми розширило межі її застосування для паспортизації та розрахунків ділянок складного плану.
3. *Отримав подальшого розвитку* метод визначення натурного положення залізничної колії з використанням автоматизованих систем, запропоноване удосконалення математичного апарату надало змогу застосовувати результати зйомки машинами з короткою асиметричною хордою для керованої виправки колії в профілі.
4. *Набули подальшого розвитку* задачі математичного моделювання обрису колії в вертикальній площині, запропонований 5-ти точковий поліном дає змогу розрахувати проєктне положення колії в профілі, яке забезпечує більш високу плавність і комфортабельність їзди у порівнянні з існуючими методами згладжування.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Застосування запропонованого методу вирішує задачі підвищення безпеки, плавності руху й комфортабельності їзди за умови мінімізації розладу колії в кривих і на переломах поздовжнього профілю.

2. Запропоновані напрямки розвитку вимірювальних засобів сучасних колійних машин на прикладі застосування комп'ютерної системи виправки колії для машин типу ВПР.
3. Отримані результати будуть корисні для планування ремонтно-колійних робіт з метою підвищення плавності руху поїздів, комфортабельності їзди, зменшення витрат на колійні роботи, та при впровадженні прискореного й швидкісного руху поїздів.
4. Більшість викладених у дисертації теоретичних положень та практичних рекомендацій впроваджено в навчальний процес в Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці магістрів спеціальності 273 «Залізничний транспорт» за освітньою програмою «Залізничні споруди та колійне господарство», що підтверджується актом про впровадження результатів дисертації.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Основні наукові положення, висновки й рекомендації, які отримані в ході дисертаційного дослідження, мають достатнє обґрунтування і достовірність. Підставами для цього є: коректно поставлені та кваліфіковано виконані експериментальні дослідження за участю технічної служби ТОВ «НВК Дніпроспецмаш», одержані на основі аналізу значного обсягу реального фактичного матеріалу дослідні результати з подальшою обробкою методами математичної статистики з розбіжністю теоретичних розрахунків і даних, отриманих в ході практичних експериментів, що не перевищує загальноприйнятих значень.

Достовірність наукових результатів ґрунтується на застосуванні методів математичного моделювання з використанням вивірених на практиці прийомів та

допущень, які відповідають фізиці процесів зйомки залізничної колії; підтверджується статистичним аналізом і натурними спостереженнями для визначення параметрів плану й поздовжнього профілю, кореспондуванням результатів теоретичних досліджень з отриманими в ході практичних експериментів даними, а також з результатами досліджень інших фахівців; позитивними результатами практичного застосування результатів дослідження.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети й завдань досліджень виконано разом з науковим керівником. Усі наукові положення, розробки й результати досліджень, що виносяться на захист, отримані особисто автором. У наукових працях, що опубліковані в співавторстві, особистий внесок автора наступний: У [1] надані рішення щодо оцінки та відновлення стану колії за її геометричним положенням на прикладі модернізації комп'ютерних систем для колійних машин. У [2] створено математичний інструмент для забезпечення роботи колійних машин обладнаних системами автоматизованої зйомки та виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі. У [3] на основі наведеної методики досліджено фактори, що впливають на безпеку руху поїздів в кривих ділянках залізничної колії. У [4] розглянута проблема виконання робіт по виправці кривих із заміною переїзного настилу у місцях перетину залізничної колії та автомобільної дороги. У [5] проведено експериментальні дослідження, обробка результатів та оцінка ефективності використання машинного способу виправки кривих в плані. У [7-8, 10-11, 14, 15] описано технологію автоматизованої виправки залізничної колії машинами типу ВІР та можливі напрямки підвищення точності зйомки та виправки цими машинами. У [9, 12] досліджена величина розбіжностей кривизни й підвищення в межах перехідних кривих. У [13] проведено аналіз результатів числових досліджень коефіцієнту запасу стійкості колеса проти наповзання на головку рейки. У [16] проведено статистичний аналіз нерівностей залізничної колії за стрічками колієвимірювальних вагонів.

Апробація результатів дисертації. В рамках апробації практичних результатів частини дисертаційного дослідження, яка стосується польових випробувань розрахункових модулів математичних моделей виправки залізничної колії в плані та профілі були здійснені вимірювальні та виправні заїзди на машинах типу ВПР на ділянках Придніпровської, Південно-Західної, Донецької залізниць. Результати цих випробувань відображені в додатках А-Є. Основні положення та результати дисертації доповідались і отримали схвалення на 13 конференціях: 73-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, травень 2013 р.), VI міжнародної науково-практичної конференції «Техніка, технологія» (Київ, 2013), Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», яка присвячена 100-річчю професора Мойсея Абрамовича Фрішмана (Дніпропетровськ, жовтень, 2013), 74-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, травень 2015 р.) 75-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, травень 2015 р.), 78-й Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Харків, травень, 2016 р.), 76-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, травень 2016 р.), 77-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, травень 2017 р.), 79-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, травень 2019 р.), IX Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми безпеки на транспорті» (Беларусь, Гомель, листопад, 2019р), 80-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, червень 2020 р.).

В повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на науково-практичному міжкафедральному семінарі кафедр «Транспортна інфраструктура», «Безпека життєдіяльності», «Фізика» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, (Дніпро, 26 лютого 2021 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації опублікований у 16 наукових працях і матеріалах конференцій: з них: 2 — статті у виданнях, що індексуються в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus і є фаховими, 1 — стаття, що опублікована в періодичному виданні і є фаховою, 1 — стаття, що опублікована в періодичному виданні, яке видається в країні, що є членом Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) та індексується в наукометричних базах Index Copernicus; а також 12 публікацій апробаційного характеру.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг становить 275 сторінок, з них основний текст на 160 сторінках, 114 рисунків і 8 таблиць, у тому числі 12 на повну сторінку, список використаних джерелі з 145 найменувань подано на 20 сторінках, 8 додатків на 63 сторінках.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕОРІЇ І ПРАКТИКИ ПО ВИПРАВЦІ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ КОЛІЙНИХ МАШИН

1.1 Аналіз існуючих концепцій щодо виправки залізничної колії в плані і профілі з використанням сучасних ВПР

Транспортна стратегія України прийнята на період до 2030 року вже сьогодні вимагає підвищення швидкостей для залізниць України та подальшої інтеграції у європейську транспортну мережу [1, 2].

В процесі експлуатації на залізничну колію впливають поїзні навантаження, які передаються на баластний шар і викликають його пружні залишкові деформації. З плином часу деформації накопичуються, як правило, нерівномірно на всьому протязі ділянки, починають спостерігатися розлади колії, що викликають експлуатаційні обмеження, які безпосередньо впливають на швидкість та безпеку руху. Для усунення експлуатаційних обмежень та забезпечення плавного і безпечного руху поїздів періодично потрібно встановлювати колію в проектне положення і одночасно фіксувати її ущільненням баластного шару. У колійному господарстві ці операції, в основному виконуються машинами і механізмами для виправки колії та ущільнення і стабілізації баластної призми [3].

Виправка колії — один з найбільш трудомістких процесів і в той же час найбільш значимий, тому що від якості виправки колії залежать експлуатаційні характеристики (плавність, швидкість та інші), безпека руху, витрати на поточний ремонт та утримання. Виправка колії проводиться при всіх видах ремонту, реконструкції та новому будівництві. Виправка колії характеризується як технологічний процес переміщення рейок рейко-шпальної решітки (РШР) в поперечних по відношенню до осі колії горизонтальному і вертикальному напрямках з натурального положення, що характеризується відступами від допусків і

норм утримання, в інше натурне положення, що характеризується відсутністю цих відступів (рис 1.1.), при цьому натурне положення колії можна охарактеризувати:

- наявністю нерівностей, які плавно змінюються вздовж колії у вертикальній і горизонтальній площинах від якогось усередненого геометрично правильного положення (пряма, перехідна або кругова крива);
- наявністю загального відхилення положення рейок щодо їх проектного положення.[17]

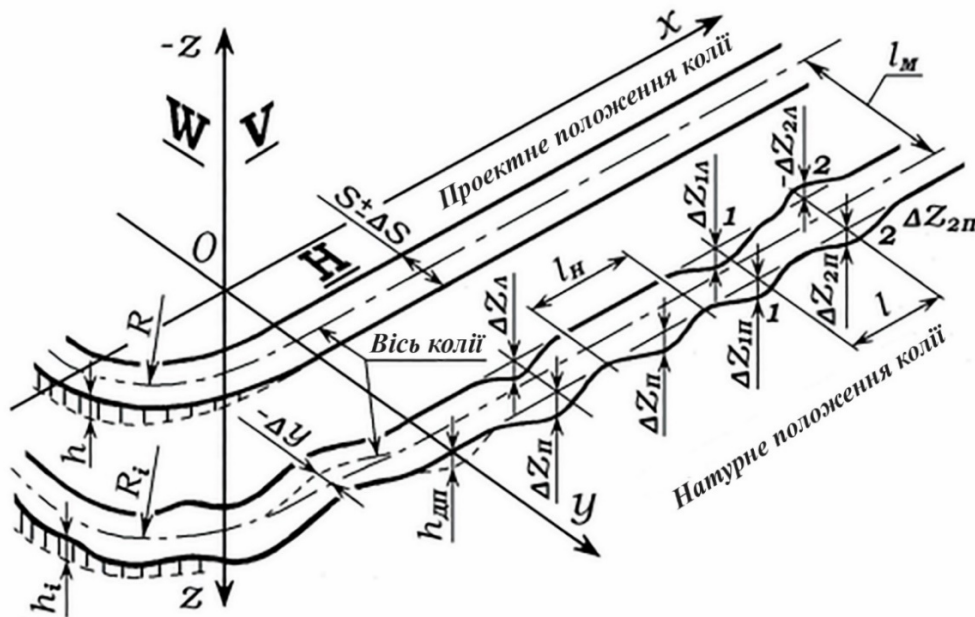


Рис. 1.1 Схема деформації колії.

Сьогодні на залізницях України працюють два види машин, які виконують виправку колії. Умовно їх можна поділити на рихтувальні та виправно-підбивно-рихтувальні. У зв'язку з тим, що рихтувальні машини не ущільнюють баласт під шпалами, а відповідно не фіксують рейко-шпальну решітку — їх використання суттєво обмежено і в майбутньому малоперспективне. Таким чином, на шляху модернізації колії для підвищення швидкостей, виправно-підбивно-рихтувальні

машини є безальтернативними для виконання робіт по виправці колії в плані й поздовжньому профілі.

Аналіз вітчизняної та закордонної практики виправки колії з використанням машин дозволив виділити три основні концепції виправки колії, а саме:

Перша концепція. Виправка колії з використанням зарубіжної автоматизованої системи з можливістю створення тривимірної моделі колії заснованої на зйомці плану й поздовжнього профілю базовою системою машини та прив'язкою цієї зйомки до координат системи супутникового позиціонування посиленою базовими станціями на землі

Друга концепція. Виправка колії з використанням зарубіжної автоматизованої системи з можливістю створення двовимірної моделі колії заснованої на зйомці плану й поздовжнього профілю базовою системою машини, яка використовується в Україні з прив'язкою по довжині, але без прив'язки до координат.

Третя концепція. Виправка колії з використанням методу «згладжування» базовою 3-х або 4-х точковою системою вітчизняної машини, без зрівнюванням по довжині, прив'язки до координат та створення моделі колії.

Розглянемо ці концепції докладніше.

1.1.1 Перша концепція виправки колії.

Виправка колії з використанням автоматизованої системи з можливістю створення тривимірної моделі колії заснованої на зйомці плану й поздовжнього профілю базовою системою машини та прив'язкою цієї зйомки до координат системи супутникового позиціонування посиленою базовими станціями на землі (Deutsche Bahn Reference System) була заснована на базі об'єднання існуючої системи лазерного вимірювання хорди по технології EM-SAT із супутниковою технологією SurVer компанією Plasser & Theurer у співпраці з Австрійською

Федеральною залізницею і DB Netz і з січня 2006 року поетапно впроваджувалася на залізницях Німеччини (DB). (рис. 1.2)

Перевага системи в тому, що лазер бере на себе вимірювання хорди у випадках, коли прийом із супутника недоступний через топографічні особливості. Всі роботи виконуються в безпечних умовах, що не потребує додаткових витрат щодо захисту персоналу, необхідних для звичайної зйомки.

Використовуючи супутникові вимірювання, координати геометрії колії можна визначити з точністю до $\pm 10\text{мм}$, а у поздовжньому профілі з точністю до $\pm 12\text{мм}$. Фактичне положення колії за рівнем і планом визначається по лазерній опорній хорді. Зміни супутникового вимірювання записуються протягом всього часу роботи.

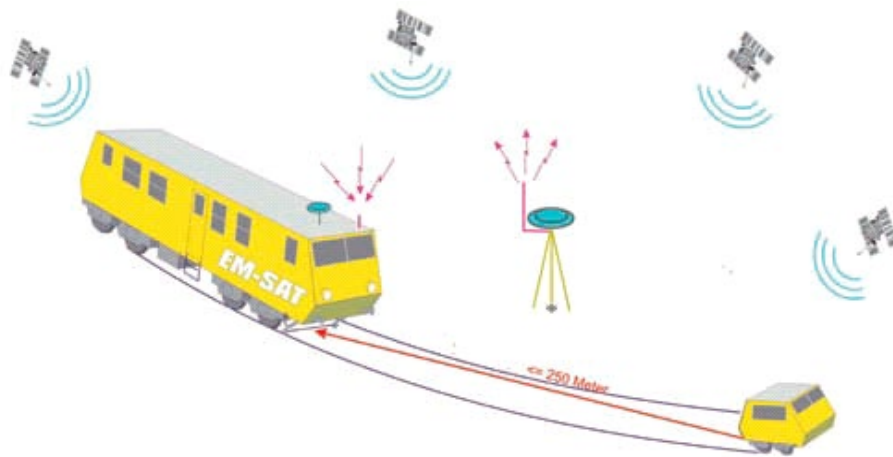


Рис. 1.2 Графічне представлення вимірювального процесу

Супутникові вимірювання порівнюються з вимірюною опорною хордою для розрахунку оптимальних відповідних значень. Після або протягом цих вимірювань існує можливість перетворення точки кінця лазерної хорди в координати DB-Ref використовуючи спеціально створену трансформаційну модель (GN-Trans GEO++).

Вимірювання лазерною опорною хордою дозволяє визначити геометрію колії з точністю до $\pm 1\text{мм}$. Комбінуючи із супутниковим вимірюванням, позицію хорди можна експортувати як координати DB-Ref з високим рівнем точності (рис. 1.3).

Таким чином, значення підйомки чи виправки для виправно-підбивно-рихтувальної машини можна визначити порівнюючи абсолютні і виміряні координати.

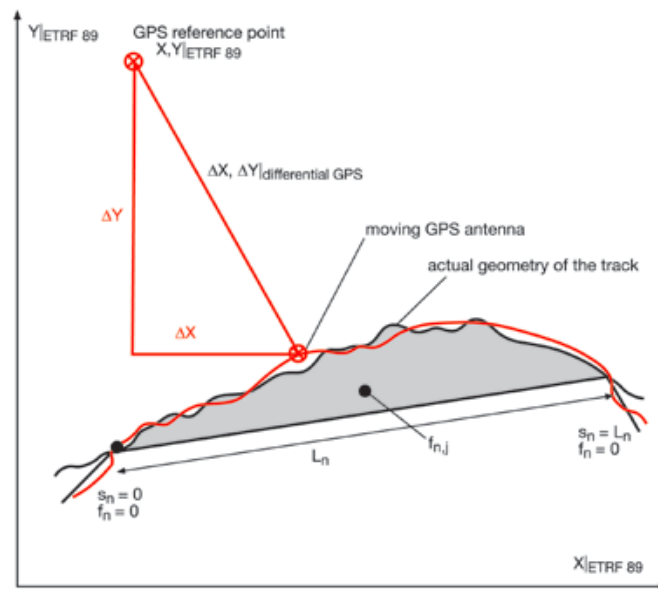


Рис. 1.3 Супутникова підтримка для встановлення точної геометрії колії

Дана система впевнено витісняє ручні методи геодезичних вимірювань, які використовувалися на німецькій залізниці більш ніж 30 років. У порівнянні з попереднім методом вишукування колії, вигоди від супутникового вишукування наступні:

- одна опорна точка максимум на 4 км, що потребує менше 7000 каліброваних опорних точок;
- вимірювання до 10 км колій за зміну замість 1 км за зміну;
- усуваються помилки при застосуванні старої системи вишукування колій;
- значно менші витрати на утримання опорних точок;
- простота відновлення опорної точки, навіть при її втраті.

Проте, основною вимогою, крім сумісних даних, є функціонування супутникової навігаційної системи. На додаток до американського GPS та

російського Glonass, які присутні на ринку, планується використовувати супутникову мережу Galileo, що в даний час розробляється в Європі.

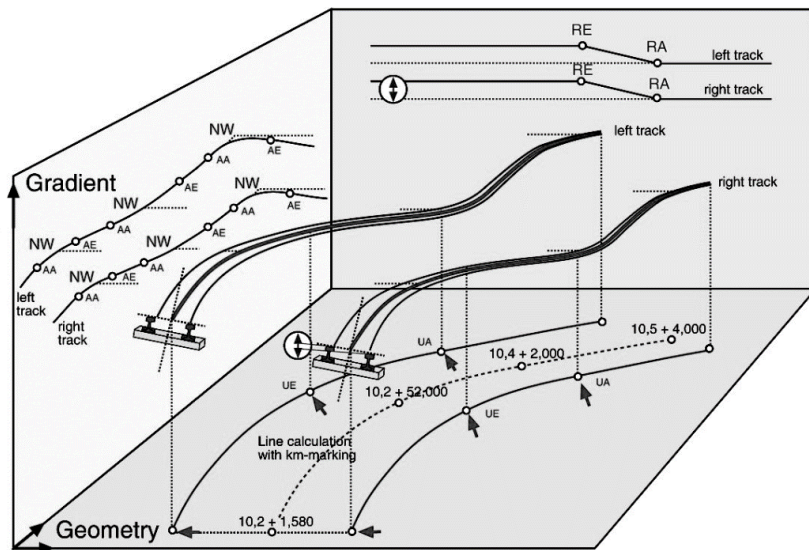


Рис. 1.4 Відображення положення колії DB Reference System (DB- Ref)

Антенна прийому із супутника розташована на даху головної машини. Але при тому, що корпус машини змінює своє положення стосовно колії (як при повороті, так і при бічному нахилі), повинні бути визначені відхилення і позиція антени корегується математично.

Супутниковий приймач розрахунку абсолютних координат знаходиться в головній кабіні. Він з'єднаний з блоком передачі даних через супутниковий приймач, який стоїть в контрольній точці. Координати розраховуються в режимі «реального часу» і виводяться на окремий монітор для того, щоб водій міг контролювати функціонування системи.

Вимірювання компенсаційних значень повинно виконуватись з високою точністю, для чого і був розроблений компенсаційний лазерний сканер (рис. 1.5).

При підготовці до початку вимірювань, EM-SAT розташовується на початку ділянки, опускається візок з лазером і вмикається. Блоки супутника і та передачі

даних налаштовуються на супутникову опорну точку. Для початку довготривалих вимірювань доцільно також іноді налаштувати другу супутникову опорну точку.

Оцінка розрахункових значень підйомки чи зміщення і передачі даних на баластувальну машину проводиться таким же чином, як і раніше.

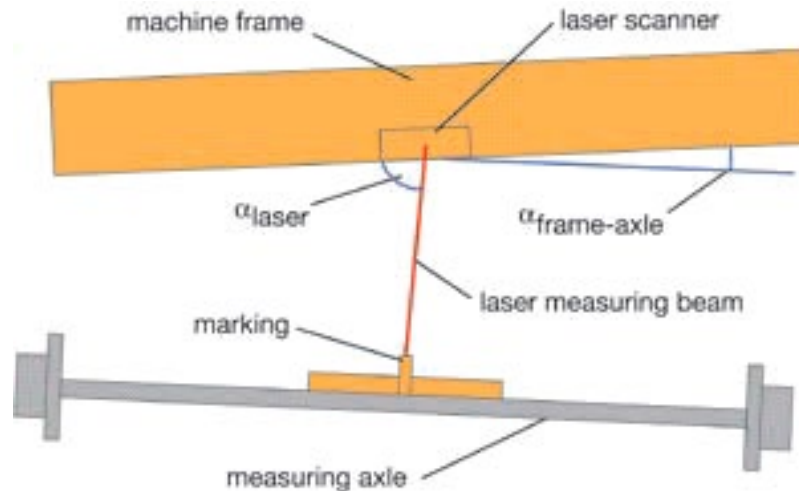


Рис. 1.5 Функціонування компенсаційного лазера-сканера

Розробники такої складної і безумовно не дешевою системи стверджують, що досягли абсолютної точності положення колії в межах ± 10 мм, що в свою чергу дозволило баластерам і укладальникам забезпечити геометрію шляху з точністю близько ± 1 мм від розрахункової [3-10].

Така концепція на сьогодні є передовою, але не може бути застосованою без системи посилення базовими станціями позиціонування на землі на кшталт німецької системи Deutsche Bahn Reference System.

Сьогодні на території України вже працює та активно розгалужується комерційна мережа станцій посилення позиціонування на землі TNT GNSS Network (рис. 1.6), яка надає користувачам доступ до GNSS-даних через Internet, також можливий доступ до корегувальної інформації в форматі RTCM по протоколу NTRIP, а в межах зони дії станцій можливе виконання робіт в режимі RTK (Кінематика в реальному часі) з точністю до 1мм. [11]

Хоча служби колії Укрзалізниці не використовують цю мережу, вже сьогодні, не суттєво модернізувавши техніку для зйомки і виправки колії, можна почати паспортизацію та виправку колії використовуючи глобальну систему координат. Надалі при використанні та розвитку цієї мережі відкриваються перспективи повної паспортизації колії в глобальній системі координат, створення віртуальної реперної системи, а також виправка колії машинами важкого типу за проектними координатами без попередніх вимірювальних заїздів.

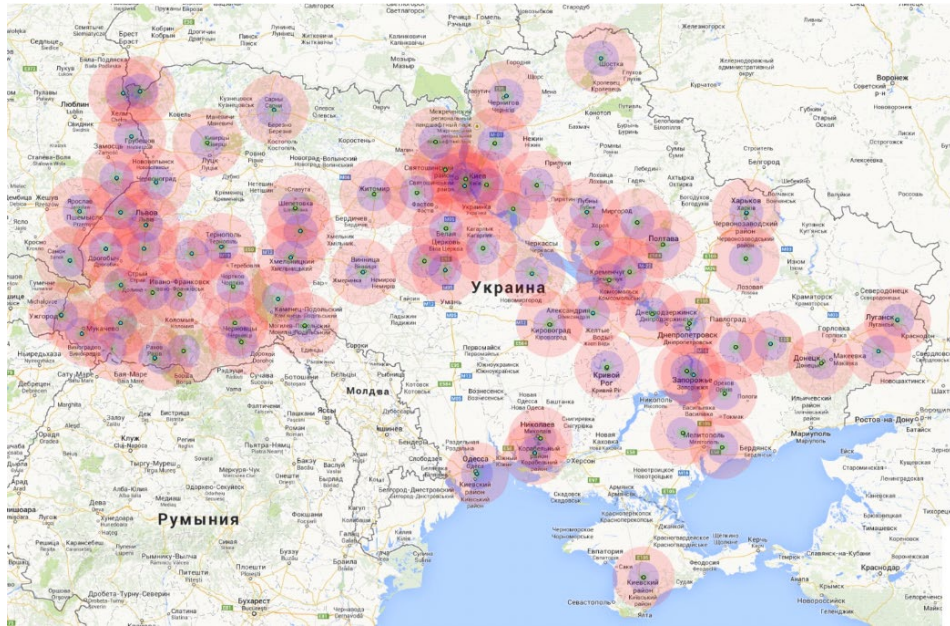


Рис. 1.6 Існуюча мережа TNT GNSS Network на території України

1.1.2 Друга концепція виправки колії

Виправка колії з використанням зарубіжної автоматизованої системи з можливістю створення двовимірної моделі колії заснованої на зйомці плану й поздовжнього профілю базовою системою машини, яка використовується в Україні з прив'язкою по довжині, але без прив'язки до координат. Системи цього класу, які з'явилися в середині 90-х років мають можливість роботи у двох режимах. Перший — використання принципу згладжування нерівностей, але з збільшеним коефіцієнтом згладжування, забезпечуючи необхідну плавність виправленої колії,

без використання вимірювальної поїздки. Другий — з використанням вимірювальної поїздки для визначення просторового положення колії, введенням до роботи обмежень на зсуви і піднімання колії, та прив'язкою по довжині колії що виправляється. В обох режимах для контролю і управління системою використовується комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням (рис.1.7).



Рис. 1.7 Комп'ютер управління системою виправки колії

Вказані системи можуть працювати як без так і з вимірювальною поїздкою. І в тому і в іншому випадку вони дозволяють задавати програмні завдання проектних параметрів перехідних кривих: початок, кінець і довжину, автоматично формувати величини поправки в плані по рівню і по довжині перехідної кривої. Однак ці системи не дозволяють виявляти і виправляти довгі нерівності колії, так як працюють за принципом зменшення нерівностей колії в межах своєї геометричної довжини. Для виправки нерівностей довжиною більшою ніж їх геометрична довжина необхідно використовувати метод «фіксовані точки» з проведенням геодезичної зйомки та відповідними розрахунками, або з використанням лазерного візка, який дає змогу подовжити вимірювальну хорду [12].

До вказаних систем відносяться системи типу АС «Навігатор», МС «ВНИИЖТ-МАТЕСС», МС «КОМПАС» (Росія), які встановлювались на модернізовані машини радянського виробництва ВПР - 02, ВПРС, ВПО та інші, а також система АЛС виробництва компанії Plasser & Theurer (Австрія), яка встановлювалась виключно на машини власного виробництва — Duomatic 09-32, Dynamic Stop Express 09-3X, Dynamic Stop Express 09 - 4X, Unimat 08-275/3S та інші.

1.1.3 Третя концепція виправки колії

Виправка колії з використанням методу «згладжування» базовою 3-х або 4-х точковою системою вітчизняної машини, без зрівнюванням по довжині, прив'язки до координат та створення моделі колії. Ці системи використовуються ще з 90-х років за принципом «згладжування» і до сьогодні в своїй конструкції не мали суттєвих змін (рис.1.8). Система базується на 3-х або 4-х точковому методі рихтування в залежності від кількості датчиків стріли вигину (1 або 2 відповідно), встановлених на виправно-підбивно-рихтувальній машині.



Рис. 1.8 Машина ВПР-02 радянського виробництва

Система рихтування може бути використана для роботи методами «згладжування» або «фіксованих точок». Єдина вірна технологія використання

методу «згладжування» в криволінійних ділянках колії передбачає введення поправок, які визначаються проектними параметрами кривої. Для цього на машинах типу ВПР-1200 використовувались відповідні таблиці поправок, на машинах ВПР-02 — автоматизовані системи формування поправок для виправки колії в плані, за рівнем, в поздовжньому профілі, аналогічні системам UVA, RVA, які застосовувалися на австрійських машинах серії 08. Проте, як показав аналіз результатів роботи цих машин в кривих ділянках колії при використанні 4-точкових систем згладжуючого типу, необхідні поправки не вводилися, а при роботі 3-точкових систем найчастіше поправки вводилися вручну — «приблизно». Для виправки довгих (30 м і більше) нерівностей колії на зазначених машинах передбачалося застосування методу «фіксованих точок», при використанні якого необхідно було зробити попередньо геодезичну зйомку колії, визначити необхідні зсуви і підйомки для кожної 3-й - 4-й шпали і реалізувати їх при робочому проході машини. Ці роботи через відсутність кваліфікованих кадрів і великих трудовитрат так-же не проводилися [12].

Сьогодні, в складних фінансових умовах ці, застарілі системи досі використовуються в підприємствах Укрзалізниці, але ані кваліфікація обслуговуючого персоналу, ані складна система керування виправкою не відповідає сучасним вимогам до виправки колії. Дисертаційна робота присвячена розробці сучасній математичній моделі виправки колії та імплементації її у автоматизовану систему виправки модернізованої машини типу ВПР радянського виробництва, яка замінить застарілі методи виправки колії викладені у третій концепції.

1.2 Огляд наукових досліджень з питань автоматизованої виправки залізничної колії в плані і поздовжньому профілі

Підвищення швидкостей є широкою проблемою, яку намагаються вирішити багато років в Україні та за кордоном. Найефективніший захід по підвищенню швидкостей є перевлаштування кривих. Без сумніву, основним параметром, який дозволяє значно підвищити швидкості є радіус кривої. На ряду з багатьма вітчизняними вченими одним з перших на необхідність збільшення радіусу кривих звернув увагу М. А. Чернишов [13-14]. Неодноразово на цю проблему звертали увагу М. Б. Курган, Д. М. Курган, І. П. Корженевич, А. А. Босов. В своїх роботах вони неодноразово розглядали питання про необхідність проведення робіт по перевлаштуванню кривих в плані та профілі [15-20].

Перші наукові розробки з автоматизації виправки залізничної колії з'явилися після другої світової війни з появою у 1945 році першої комерційної трамбувальної машини розробленої австрійськими інженерами. На початку 50-х років ними було розроблено парк будівельних машин [21-24], а вже на початку 70-х років австрійська компанія «Plasser & Theurer» впевнено розповсюджувала колійну техніку власного виробництва по всьому світу [25].

В цей же час з'явилися перші результати досліджень І. П. Корженевича, пов'язані з розробкою математичної моделі плану залізничної колії, які набули розвиток в подальших роботах в співавторстві з Курганом М. Б., Курганом Д. М., Кірпою Г. М., Ренгачем М. Г., Дьоміним Ю. В., Рибачком П. І. [26-32].

Можливості автоматизації проектування та реконструкції плану залізничної колії, а також застосування методів математичного визначення допустимих швидкостей руху досліджувались І. П. Корженевичем в 2000 році. [33-34]

В цей же період ця проблема знайшла обговорення серед інших вітчизняних авторів. Наукові праці за цією тематикою були видані фахівцями-колійниками Халипова Н. В., Уманов М. И., Воробейчик Л. Я., які розглядали проблему з точки

зору дії на колію в перехідних кривих за наявністю відсутності співпадінь відводів кривизни та підвищення [35].

Цей контекст залишався основним в дослідженнях вітчизняних фахівців, наприклад Рибкіна В. В., Циганенка В. В., і попередніх авторів, які звертали увагу в своїх працях саме на вплив параметрів колії перехідних кривих на динаміку та комфортабельність їзди [36]. Згодом до досліджень проблеми стану колії в плані та поздовжньому профілі долучаються фахівці-проектувальники, наприклад: В. І. Харлан, М. Б. Курган аналізують обґрунтування параметрів плану лінії для ліквідації бар'єрних місць при реконструкції залізниці [37].

Про подальшу актуалізацію проблеми автоматизації виправки колії свідчать дослідження до яких залучаються фахівці суміжних спеціальностей, представники наукових шкіл з проблем рухомого складу та енергопостачання. Наприклад, Теоретичні та експериментальні дослідження по встановленню допустимих швидкостей руху поїздів по ділянці колії, відремонтованому із застосуванням сучасних колійних машин присвячена спільна робота Халипова Н. В., Уманова М. И., Цыганенко В. В., Рейдемейстера А. Г., Ковальова В. В., Сисіна Н. П. [38].

При цьому не втрачає актуальності тема технології ремонту колії як така [39]. В дослідженнях цього періоду основна увага приділяється залежності допустимих швидкостей руху поїздів і застосування сучасних колійних машин [40].

На цей час вже була опублікована низка робіт І. П. Корженевича, які містили дослідження саме автоматизації розрахунку виправки колії в плані [41-43]. Значний внесок в дослідження за цією тематикою був зроблений Д. М. Курганом та М. Б. Курганом [44-47].

Удосконаленням методів зйомки та виправки кривих присвячені спільні дослідження І. П. Корженевича та М. Г. Ренгача [48-52].

Автоматизація зйомки і виправки колії знайшли подальший розвиток також в працях Босова А. А., Кірпи Г. М., пшінька О. М., Мямліна С. В., Блохіна Б. Є., Піха Б. П., Соколана А. А. [53-57].

В 2007 році І. П. Корженевичем була розроблена математична модель плану існуючої залізничної колії і створена комп'ютерна програма RWPlan [58-59].

У цьому ж році Д. М. Курганом та іншими було запропоновано вирішення задач вибору раціональних швидкостей руху поїздів за допомогою математичного моделювання процесу експлуатації залізничної ділянки [60].

Знайшло подальший розвиток дослідження швидкості руху в кривих після ремонту авторів Халипової Н. В., Уманова М. І., Рейдемейстера О. Г., Циганенко В. В., Сисіна Н. П., Кургана Д. М. [61].

Застосуванню сучасних колійних машин при ремонті участків колії і дозволеним при цьому швидкостям була присвячена праця авторів Халипової Н. В., Уманова М. І., Рейдемейстера О. Г., Набоченко О. С. [62]. Також пропозиції щодо технології виконання модернізації колії були сформульовані М. И. Умановим, В. В. Циганенко, А. Г. Редмейстером, Н. В. Халіповою [63]. На основі аналізу результатів теоретичних і експериментальних досліджень авторами сформульовані рекомендації зі встановлення допустимих швидкостей руху поїздів у кривих після виконання модернізації на довгостроково закритому перегоні.

Подальшому розвитку застосування автоматизованих систем в колійному господарстві сприяли дослідження таких авторів, як В. Г. Вербицький, І. М. Вікулін, П. П. Воробієнко, В. М. Годованюк, В. Б. Каток, Ш.Д. Курмашев, В. І. Осінський, І. П. Панфілов, В. В. Рюхтін, Г. О. Сукач [64-66].

Актуальність поточного утримання колії з використанням новітніх технологій з урахуванням проблем підсилення земляного полотна знайшла освітлення в роботі В. Д. Петренка, В. Т. Гузченко, А. Л. Тютькіна, А. Алхдура [67-68].

На цей час розроблена І. П. Корженевичем комп'ютерна програма RWPlan почала застосовуватися в практиці автоматизованої розрахунку виправки колії в плані на залізницях України та за кордоном. Теоретичне обґрунтування її застосування було наведено в ряді публікацій [69-79].

На цьому етапі дослідження автоматизації виправки колії набули особливої актуальності у зв'язку з впровадженням швидкісного руху. Наприклад, перебудова кривих для впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів аналізується в роботі М. Б. Кургана, М. А. Гусак, Н. П. Хмелевської [80].

Подальші дослідження проблеми автоматизації зйомки і виправки колії набули комплексного характеру в роботах [81-84].

Заслужують на особливу увагу роботи іноземних фахівців Б. Ліхтеберга, Ф. Пеха, М. Центер-Маннера, Г. Вубенна, М. Солінгера, Р. Вогеля, А. Вілка, В. Коца, Я. Скібіцького, П. Дабровського, А. Кампчіка, Ц. Аха, які присвячені окремим аспектам удосконалення технології та практики виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі [85-95], але ці роботи можуть слугувати теоретичними орієнтирами стосовно подальшого розвитку досліджень за цією тематикою, тому що на цей час технологічний інструментарій застосування найбільш інноваційних методів автоматизації виправки залізничної колії запропонований ними відсутній на залізницях України.

Безпеці виправки колії на переїздах присвячена публікація О. Ф. Лужицького, М. О. Гаврилова, в якій розглядаються ефективні способи забезпечення повної безпеки руху через улаштування транспортних ліній в різних рівнях [96].

Розглядаючи питання автоматизації виправки залізничної колії неможливо оминати увагою питання міцності і стійкості колії. В Україні вітчизняними науковцями під керівництвом проф. Є. І. Даніленка були розроблені сучасні «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» ЦП-0117 [97], які на сьогодні є діючим офіційним документом. Основи теорії взаємодії залізничної колії з рухомим складом, питання надійності роботи залізничної колії при її експлуатації висвітлені в підручнику для вищих навчальних закладів «Залізнична колія» (2010 р.), який є першим фундаментальним виданням в Україні під авторством проф. Е. І. Даніленка [98]. В підручнику наведені сучасні методики проектування інженерних розрахунків рейкової колії в прямих і кривих ділянках, в тому числі для ділянок

швидкісного (161-200 км/год) руху поїздів. В продовження цих досліджень науковцями В. Молчановим, М. Б. Курганом, В. Бойко, В. М. Твердометом, О. Оліником, О. Сорокой було розроблено підручник під редакцією проф. Є. І. Даніленка «Проектування і розрахунки конструкцій залізничної колії», в якому висвітлюються інноваційні підходи до проектування і розрахунків конструкцій залізничних колій [99].

Питанням дослідження одного із показників взаємодії колії й рухомого складу, недотримання якого може призвести до порушення безпеки руху, а саме до сходження, присвячена стаття Д. М. Кургана, О. В. Губара, М. О. Гаврилова [100].

Незважаючи на наявність низки досліджень, пов'язаних з впровадженням автоматизованих систем зйомки та виправки колії, поки що відсутні роботи, які б давали комплексне науково-практичне обґрунтування удосконаленню технології виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі шляхом її автоматизації із застосуванням програмного забезпечення на вітчизняних машинах типу ВПР. Аналіз світового та вітчизняного досвіду виправки колії доводить, що невід'ємною складовою цього процесу є зйомка колії, тому існує нагальна необхідність комплексного аналізу практичних методів зйомки колії.

1.3 Висновки до розділу 1

1. Сьогодні на залізницях України склалася унікальна ситуація коли можна впровадити новітні технології контролю просторового положення залізничної колії базуючись на досвіді закордонних колег. Чим раніше почнеться реалізація визначення проектного положення плану, тим швидше покращиться ситуація із зносом рейок та комфортністю їзди.
2. Сьогодні, в складних фінансових умовах, застарілі системи виправки колії досі використовуються в підприємствах Укрзалізниці, але ані кваліфікація

обслуговуючого персоналу, ані складна система керування виправкою не відповідає сучасним вимогам до її виправки.

3. Дисертаційна робота присвячена розробці сучасній математичної моделі та імплементації її в автоматизовану систему виправки модернізованої машини типу ВПР радянського виробництва, яка замінить застаріли методи виправки колії викладені у третій концепції.
4. Системи виправки, які встановлюються на модернізовані машини радянського виробництва, слід розглядати як тимчасове рішення, адже їх механіка не дозволяє виявляти і виправляти довгі нерівності колії, так як працюють за принципом зменшення нерівностей колії в межах своєї геометричної довжини.
5. Порівняльний аналіз різних методів зйомки колії на залізницях України, дає змогу зробити висновок, що найбільш ефективними є методи зйомки колієвимірювальним вагоном, виправно-підбивно-рихтувальними машинами, метод зйомки з використанням GPS датчиків і зйомки з використанням колієвимірювальних візків. При цьому ефективність обраних методів підсилюється тим, що при їх застосуванні одночасно ведеться зйомка плану й поздовжнього профілю залізничної колії.
6. Незважаючи на наявність низки досліджень, пов'язаних з впровадженням автоматизованих систем зйомки та виправки колії, поки що відсутні роботи, які б давали комплексне науково-практичне обґрунтування удосконаленню технології виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі шляхом її автоматизації із застосуванням програмного забезпечення на вітчизняних машинах типу ВПР.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ЗЙОМКИ ПЛАНУ ТА ПОЗДОВЖНЬОГО ПРОФІЛЮ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

2.1 Загальні положення

П'ятдесят років тому до елементів колії було відповідальне ставлення при будівництві, ремонтах, та експлуатації. Всі вимірювання виконувалися спеціальними прийомами, що забезпечували контроль точності, а положення колії в плані закріплювалося спеціальними знаками. Такий підхід дозволяв достатньо точно забезпечувати просторове положення колії.

Поява спеціальних вагонів і машин для контролю і ремонту колії створило помилкове враження, що тепер питання вимірювань і виправлення положення колії можна покласти на них. Виробники сучасних колієвимірювальних вагонів стверджують, що після їх проїзду можна будувати план і профіль колії без використання геодезичних вимірювань, але без спеціального додаткового вимірювання координат окремих точок і зрівнювання результатів вимірювань колієвимірювального вагону результати таких заїздів для визначення просторового положення колії дають дуже низьку точність. Досить сказати, що по заїзду Баглій – Дніпропетровськ різниця в кутах повороту правої і лівої рейок склала 46 градусів. Як результат колія на всіх напрямках була «зрихтована» на розсуд автоматики машин, а її параметри, нанесені на проектних документах не мають нічого спільного з реальним просторовим положенням [101].

Доки швидкості пасажирських і вантажних поїздів не дуже відрізнялись, комфортність взагалі не аналізувалася, а економіка носила «витратний» характер, такий стан справ нікого не турбував. Але сьогодні, на шляху підвищення швидкостей руху пасажирських поїздів та в умовах економічної кризи, такий підхід до контролю просторового положення залізничної колії стає марнотратним і навіть небезпечним. Необхідно припиняти практику, при якій КМС використовує проект

тільки для якісної оцінки ділянки, а робота укладальних і рихтувальних машин ніяк не в'яжеться з проектними координатами колії. При виробництві ремонтних робіт колію необхідно доводити до проектного координатного положення як при укладанні нової рейко-шпальної решітки, так і при поточному ремонті виправними машинами. Залежно від конкретного завдання повинна застосовуватися технологія геодезичних робіт, що забезпечить реалізацію проектного рішення і контроль отриманого результату.

Слід зауважити що сьогодні при виробництві робіт в ланцюжку дослідник - проектувальник - інженер КМС - інженер КЧ кожна ланка працює практично сама по собі без будь-якої реальної ув'язки з проектом. Частина провини в цьому лежить і на проектувальниках котрі одержують проектне рішення у вигляді координатної моделі в будь-якій системі координат, але не пропонують КМС і КЧ систем, що дозволяють реалізувати і контролювати ці рішення. І хоча, сьогодні в країнах ЄС та РФ існують такі системи, їх автори широко рекламуючи в роботах свої розробки не приводять переконливих результатів випробувань в порівнянні з іншими методами зйомки [102].

Зважаючи на те, що якість залізничної колії в описовому її понятті це властивість, що робить її працездатною в заданих умовах експлуатації, можна говорити про якість проектування, виготовлення, укладання та утримання, а найважливіша мета підвищення якості полягає в доведенні технічної діяльності до рівня, який виключав відхилення від норм. [103]

У зв'язку з цими виникає гостра потреба в наведенні порядку з контролем і паспортизацією просторового положення колії.

При цьому необхідно вирішити такі завдання:

- З достатньою точністю отримувати інформацію про становище залізничної колії в просторі.
- При проектуванні отримувати проектні рішення виключно у вигляді координатної моделі.

- При ремонтах укласти колію у відповідності проектним рішенням, і контролювати виконання цих робіт.
- Забезпечити надійний контроль положення колії в процесі експлуатації.

Для отримання інформації про стан існуючої колії виконується зйомка. На жаль, в питаннях зйомки існує ряд помилок, як усталених, так і нових. Вважається, що зйомка є точною, а шляхом застосування математичних методів її точність можна підвищити, на що не одноразово звертав увагу в своїх роботах І. П. Корженевич [59, 20, 104, 58]. В останні роки до зйомки плану спостерігається легковажне ставлення. План знімають недбало, а потім намагаються привести його в нормальний стан, незважаючи на те, що витрати на зйомку менше витрат на виправку в сотні разів. Позитивним моментом сьогодення фінансово-економічної кризи є те, що вона примушує нас відмовлятися від витратних і неефективних технологій і рішень.

2.2 Мануальні способи зйомки плану колії

Способи зйомки які застосовуються на залізницях світу, можна умовно розділити на «мануальні» і «автоматизовані».

Розглянемо докладніше основні «мануальні» і «автоматизовані» методи контролю просторового положення залізничної колії, їх переваги та недоліки.

2.2.1 Метод стріл

Метод стріл є «мануальним» методом який використовують для оцінки кривизни рейкової колії в плані. При методі стріл прокладається хорда довжиною a , та вимірюється стріла f , як відстань від середини хорди до робочої грані рейки (рис.2.1). Стріли вигину вимірюють від робочої грані зовнішньої рейкової нитки на висоті 13 мм нижче верху головки рейки сталевую металевою лінійкою з точністю 0,5 мм. В якості хорди використовують капронову нитку, або рибацьку волосінь.

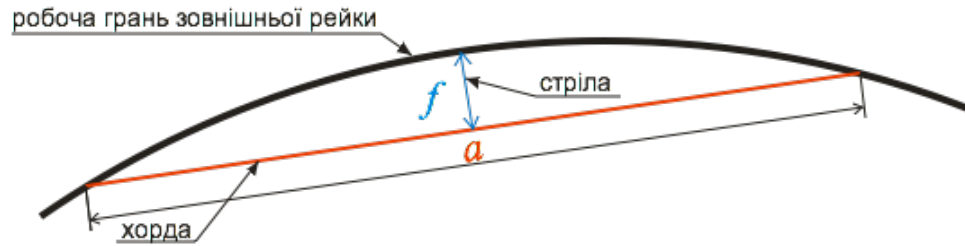


Рис. 2.1. Схема вимірювань методом стріл

Зйомка кривої способом вимірювання стріл вигину від середини хорди постійної довжини може виконуватись на коротких кривих, на станційних коліях. Результати зйомки використовуються для заповнення «Паспорту кривої».

Для оцінки кривизни та плавності кривої спочатку виконують розбивку кривої на відрізки. Першу точку намічають на прямій ділянці за 60 м до видимого початку кривої. Останню точку також розміщують на прямій ділянці колії. Розбивку виконують через 5 м при радіусах кривих 400 м і менше, та 10 м при радіусах кривих більше 400 м. Довжина хорди при радіусах кривих 400 м і менше становить 10 м, при радіусах кривих більше 400 м – 20 м.

Вимірювання стріл виконують в прямому та зворотному напрямках; за кінцевий результат приймають середнє значення, якщо розходження в сумах стріл не перевищує величини, визначеної за формулою:

$$\sigma = 2\sqrt{n}, \text{ мм}; \quad (2.1)$$

де n – кількість точок на кривій;

Починати та закінчувати розбивку кривої на відрізки необхідно таким чином, щоб стріли вигину на початку та в кінці вимірів дорівнювали нулю. Якщо відомий кут повороту кривої, наприклад з будівельного поздовжнього профілю, виконують контроль вимірювань шляхом визначення теоретичної величини суми стріл вигину кривої за формулою:

$$\sum f = \frac{\pi \cdot a \cdot \alpha^\circ}{360^\circ}; \quad (2.2)$$

де $\sum f$ – теоретична сума стріл вигину, мм;

π – 3.1415926;

a – довжина відрізка розбивки кривої, мм;

α° – кут повороту кривої, градус.

Різниця в сумах виміряних і теоретично визначених стріл вигину не повинна перевищувати допустимого значення, визначеного за формулою (2.1). [105]

Даний метод здатен виявляти горизонтальні нерівності, встановлювати безпечну швидкість руху поїздів, встановлювати довжини перехідних та кругових кривих, радіус кривизни. Однак він має низку важливих недоліків. Перший з них – швидке наростання помилки вимірювань по довжині завдяки подвійному сумуванню стріл (невизначеність положення колії в плані може досягати 5 м/км). Другий – відсутність будь якого контролю вимірів. Третій – досить великий крок зйомки (10 м).

Помилковою є думка, що точність зйомки можна підвищити, якщо брати точки частіше (наприклад через 5 м). Абсолютна погрішність виміру стріли в цьому випадку залишається такою ж, а відносна відразу знижується в 4 рази через зменшення значення самої стріли. Також наростає погрішність подвійного інтегрування через збільшення кількості точок. Зменшення кроку зйомки до 5 м приводить до збільшення похибки в 10 разів, так як значення вимірюваної стріли зменшується в 4 рази, а похибка відліку залишається колишньою. Крім того зростає в 2 рази кількість засумованих стріл.

Зйомку кривих слід проводити напередодні рихтування, інакше крива від руху поїздів може змінити своє положення, що приведе до втрати точності виправки.

2.2.2 Метод Гофера

Метод Гофера є «мануальним» та використовується для оцінки кривизни рейкової колії в плані. Для підвищення точності традиційної зйомки «мануальним» методом стріл, Гофером, в 1930 році, було рекомендовано трохи змінити схему зйомки (рис.2.2). При використанні хорди довжиною 20 м розбивку кривої виконують на відрізки довжиною 5 м. Стріли вимірюються від середини хорди довжиною 20 м через кожні 5 м.

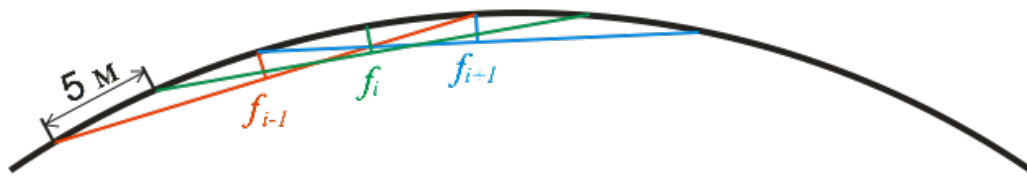


Рис. 2.2. Схема вимірювань методом Гофера

У цьому випадку абсолютне значення стріл не зменшується, а зйомка ведеться частіше. Точність визначення просторового положення в цьому випадку не підвищується, але за рахунок більш частих вимірів точніше відслідковується положення колії в плані. При обробці результатів таких вимірів виникає деяка складність, але графік стріл детальніше описує положення рейкової нитки.

До недоліків цього методу можна також віднести те, що проектні параметри визначаються не для осі колії, а для однієї з рейок [106].

2.2.3 Модифікований метод І. П. Корженевича

Модифікований метод І. П. Корженевича є «мануальним» та використовується для оцінки кривизни рейкової колії в плані. Істотно підвищити точність зйомки методом стріл можна при використанні спеціально розробленого І.П. Корженевичем модифікованого методу (рис. 2.3). На схемі перший індекс – номер точки, з якої прокладено хорду, другий індекс – порядковий номер виміру при прокладеній хорді, третій індекс – номер точки, в якій вимірюється хорда.

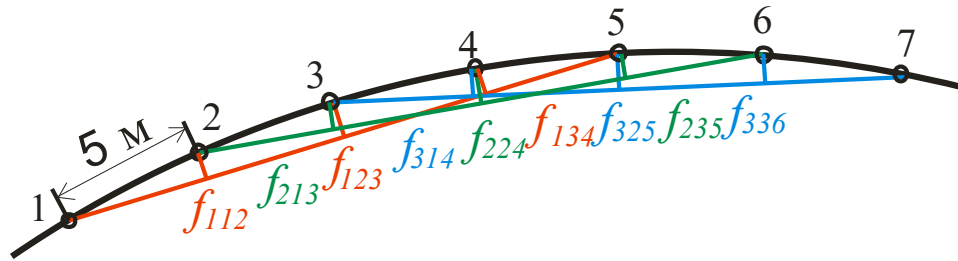


Рис. 2.3. Схема вимірювань методом І. П. Корженевича

У цьому методі (на відміну від методу Гофера) стріли вимірюються не тільки в середині хорди, але й у двох інших точках. У результаті практично кожна точка вимірюється тричі. Надмірність вимірів дозволяє використовувати при обробці такої зйомки спеціальні методи геодезичного вирівнювання. Це у свою чергу дозволяє оцінити точність вимірів у кожній точці й одержати планове положення колії з більшою точністю [107].

2.2.4 Метод Гонікберга

Метод Гонікберга є «мануальним» та використовується для оцінки кривизни рейкової колії в плані. При зйомці кривої методом Гонікберга від довгих хорд криву і прилеглі до неї прямі ділянки колії на довжині 30-40 м від видимого початку кривої по зовнішній нитки розбивають на відрізки 20 м при радіусах кривих більше 400 м і 10-метрові відрізки при менших радіусах. Вимірювання виконують по осі колії або по зовнішній рейці. Закріплення точок поділу кривої здійснюють фарбою на внутрішній шийці зовнішньої рейки.

Вимірювання кутів повороту хорд і стріл вигину в точках розмітки починають з початкової точки, розташованої на прямій ділянці колії. Наступні стоянки теодоліта призначають через 100-120 м при радіусах кривих більше 400 м і через 60-80 м – при менших радіусах. Довжина хорд визначається величиною стріл вигину, так як призначення великих відстаней викликає збільшення стріл вигину і,

як наслідок, зменшення точності вимірювань. Це питання було досліджено у роботі [17].

Кути між хордами вимірюються теодолітом повним прийомом. Якщо є пряма видимість з початковою на кінцеву точку розбивки, теодолітний хід слід замикати, вимірюючи кути які примикають.

При відсутності прямої видимості на кінцеву точку теодолітний хід замикається на проміжні точки, що дозволяє виконати контроль вимірювання горизонтальних кутів (рис. 2.4)

В усіх точках поділу кривої вимірюють за встановленою горизонтально нівелірної рейці стріли вигину. Вимірювання виконують у прямому і зворотному напрямках.

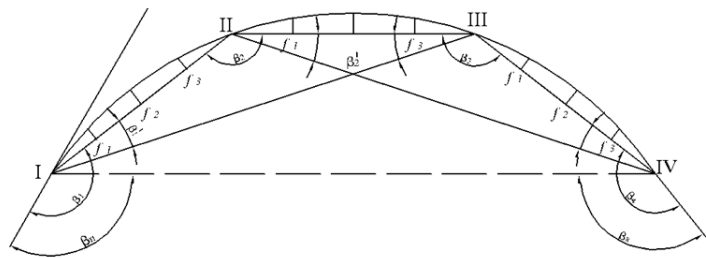


Рис. 2.4. Спосіб вимірювання стріл вигину від хорд

Випадкові похибки вимірів виникають в результаті спільного впливу великого числа факторів: точність інструментів, кваліфікація виконавця, температура повітря, освітленість, сила вітру та ін. У результаті зйомки кривої способом Гонікберга можуть мати місце такі похибки вимірювання: від центрування теодоліта, від редукції, зв'язаної з положенням рейки, від похибки зчитування кута і значення стріли по рейці.

Як показав проведений аналіз, точність зйомки кривої методом Гонікберга знижується через недотримання методики вимірювання. Так, наприклад, на ділянці Красне-Львів вимірювання кривої на ПК 14310+40 виконувалися в такий спосіб: кути вимірювалися двома напівприйомами з точністю 1'; стріли вимірялися з

точність 1 см; довжина хорд приймалась такими: перша – 140 м, друга – 120 м, третя – 180 м.

Встановлено, що точність теодолітної зйомки наближається до точності виміру за допомогою капронової нитки, коли рейка розташовується від теодоліта на відстані, при якій помилка відліку не буде більше ± 2 мм. Так, при використанні теодоліта Т2 відстань до рейки не повинна бути більшою за 130 м, для теодоліта Т5к – 80 м, для Т15, Т30 – 60 м.

Слід зазначити, що всі вище наведені методи не дозволяють безпосередньо отримати координати та абсолютне просторове положення колії, та не є взаємопов'язаними з глобальною системою координат на кшталт GPS, ГАЛІЛЕО тощо [108].

2.3 Мануальні методи зйомки поздовжнього профілю

2.3.1 Метод технічного нівелювання

Метод технічного нівелювання є «мануальним» та використовується для оцінки кривизни рейкової колії в поздовжньому профілі. Для отримання даних про положення поздовжнього профілю залізничною колією серед «мануальних» методів основним є нівелювання (рис. 2.5, 2.6).

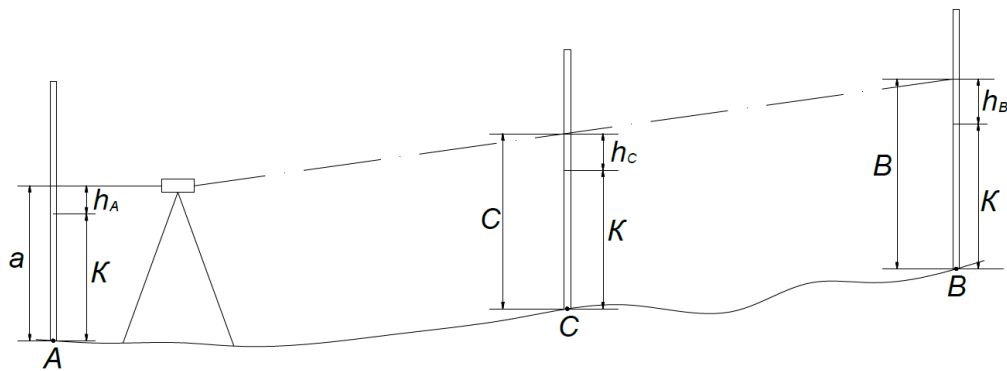


Рис. 2.5. Процес нівелювання залізничної колії.

Нівелювання, яке по точності й технології повинно відповідати технічному нівелюванню, виконують по головці рейок. Прилади для виконання нівелювання: нівеліри – Н-3, НИ-3 та інші не нижчої точності; нівелірні рейки – РН-3.

Перед початком нівелювання виконують дослідження нівелірних рейок та перевірки нівелірів.

Для рейок:

- визначають ціну поділу рейки; відхилення дециметрових значень не повинно перевищувати 1 мм, відхилення метрових інтервалів від їх номінальних значень – не більше 3 мм;
- визначають різницю положення «нулів» чорної та червоної сторін рейки з точністю 1 мм.

Виконують перевірки нівеліра (круглого рівня, сітки ниток та «головної умови» нівеліра) в разі необхідності виконують виправлення згідно вказівок, які приведені в технічному паспорті відповідного приладу.



Рис. 2.6. Процес нівелювання залізничної колії. Вигляд поздовжнього профілю колії звичайним поглядом (зліва) та через трубу нівеліру (справа)

Для контролю поздовжнього нівелювання використовують репери й марки державної геодезичної мережі, або репери й марки, встановлені на залізниці. Нев'язка нівелірного ходу не повинна перевищувати 50 мм на 1 кілометр ходу. Якщо отримана невязка допустима її розподіляють порівну на всі середні перевищення між зв'язуючими точками з протилежним знаком до знайденої із

заокругленням до цілих міліметрів. При отриманні недопустимої нев'язки виконують контрольне нівелювання.

При відсутності реперів і марок державної геодезичної мережі прив'язка нівелірного ходу виконується до початкової марки або репера, а по закінченню нівелювання виконують нівелювання в зворотному напрямку тільки по зв'язуючим точкам з метою отримання замкненого нівелірного ходу та визначення нев'язки.

При нівелюванні необхідно через 3–5 км встановлювати нові реperi на передніх правих (по ходу кілометрів) кордонних каміннях, на правих оголовках труб, на фундаментах світлофорів; їх відповідним чином підписують, закріплюють та заносять в робочий каталог пунктів геодезичної мережі. Постійні та тимчасові реperi і марки обов'язково нівелюють як зв'язуючі точки. Збереження встановлених при нівелюванні реперів та марок покладається на колійного майстра дільниці.

Геометричне нівелювання на прямих ділянках колії виконують по головці лівої рейки (по ходу пікетажу) на всіх пікетах та плюсах, на кривих ділянках – по головці внутрішньої рейки [109].

Такі виміри мають дуже високу точність, проте персонал який виконує ці вимір повинен мати високу кваліфікацію та досвід, в іншому випадку висока точність приладів буде згасати на тлі помилок одержуваних при розрахунках проведених по зйомці таких «фахівців».

2.3.2 Метод тахеометричної зйомки

Метод тахеометричної зйомки є «мануальною», координатною зйомкою для оцінки кривизни рейкової колії в плані й поздовжньому профілі. Виконується сучасними геодезичними приладами, наприклад електронними роботизованими тахеометрами фірми «SOKKIA» серії 30R або іншими відповідної, або більшої точності (рис. 2.7).

Прокладка полігонометричного ходу за допомогою електронного тахеометра виконується вздовж залізничної колії і за її межами. Пункти ходу вибирають і закріплюють на місцевості, виходячи зі зручності та безпеки виконання робіт (наприклад, на узбіччі земляного полотна, над пікетними стовпчиками та ін.). Довжина сторін ходу залежить від умов місцевості і може бути до 400м. При цьому повинна бути забезпечена пряма видимість суміжних точок полігонометричного ходу та вісі залізничної колії. Виконується прив'язка всіх пунктів ходу до вісі залізничної колії шляхом вимірювань відстані по нормалі до головки рейки; на шийці рейки робиться відмітка та вказується номер пункту полігонометричного ходу. Пункти ходу надійно закріплюються, виходячи із умов їх довгострокового збереження і використання для поточного контролю планового положення залізничної колії.

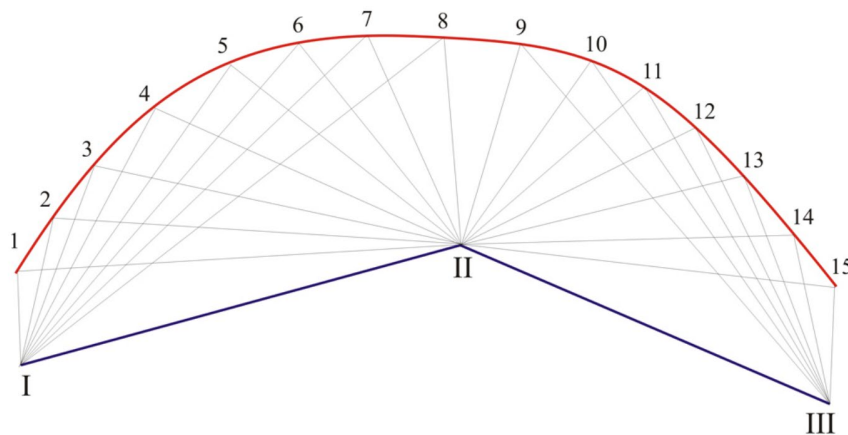


Рис. 2.7. Тахеометрична зйомка колії.

Для визначення планових координат пунктів полігонометричного ходу виконується його прив'язка на початку і в кінці до пунктів державної геодезичної мережі або використовують GPS-системи. Висотне положення пунктів визначається шляхом геометричного нівелювання по точності не нижче, ніж по програмі 3-го класу.

Координати точок по вісі залізничної колії (головці рейки) визначають полярним способом (кутова засічка, лінійна засічка) з точок полігонометричного ходу. Якщо зйомка виконується полярним способом, то при візуванні на кожну точку визначають відстань і горизонтальний кут одним прийомом. Попередньо залізнична колія не розмічається, але точки при зйомці вибирають на відстані одна від одної 40 - 60 метрів на прямих та 10-20 метрів на кривих (залежно від радіуса кривої).

При виконання зйомки по вісі залізничної колії доцільно використовувати шаблон, розроблений фахівцями київського підприємства «Транспроєкт-1» (на основі шаблону ЦУП-2), за допомогою якого відбивач тахеометра встановлюється безпосередньо над віссю колії. Постійна висота відбивача забезпечує визначення абсолютної відмітки точок залізничної колії на прямих ділянках, а на кривих – за допомогою шаблону визначають підвищення зовнішньої рейки та вводять поправку в визначену висоту, яка дорівнює половині виміряного шаблоном перевищення.

Для підвищення точності визначення координат точок залізничної колії доцільно використовувати два електронних тахеометра, встановлених в різних точках базису та виконувати зйомку не знімаючи шаблон з колії між вимірюваннями.

Висотне положення залізничної колії визначають тригонометричним нівелюванням, використовуючи електронний тахеометр.

2.4 Автоматизовані методи зйомки плану й поздовжнього профілю

2.4.1 Метод вимірювання колієвимірювальним вагоном

Метод вимірювання колієвимірювальним вагоном є «автоматизованим» та використовується для оцінки кривизни рейкової колії в плані й поздовжньому профілі. Колієвимірювальний вагон оцінює план рейкових ниток методом стріл,

виміряних від бокової робочої грані голівки рейки до хорди довжиною 21,5 м у точці, розташованій на відстані 4,1 м від кінця хорди. Ці записи за формою відрізняються від фактичного геометричного положення рейкових ниток у плані, а також від графіка стріл вигину, виміряних від середини хорди довжиною 20 м. Також у поздовжньому профілю вагон пише осідання рейкових ниток. Пише перевищення однієї рейкової нитки над іншою – рівень, та відстань між робочими гранями рейкових ниток – шаблон. Приклад записів показано на рисунку (рис.2.8). Для оцінки записів стану колії за колієвимірвальним вагоном використовують спеціальні шаблони та методику, яка не визначає координати колії, але дозволяє встановити допустиму швидкість руху поїздів. Всі записи носять відносний характер, але дозволяють визначити довжину кругової кривої, довжини перехідних кривих, та визначити пікетажне положення початку та кінця даних кривих.

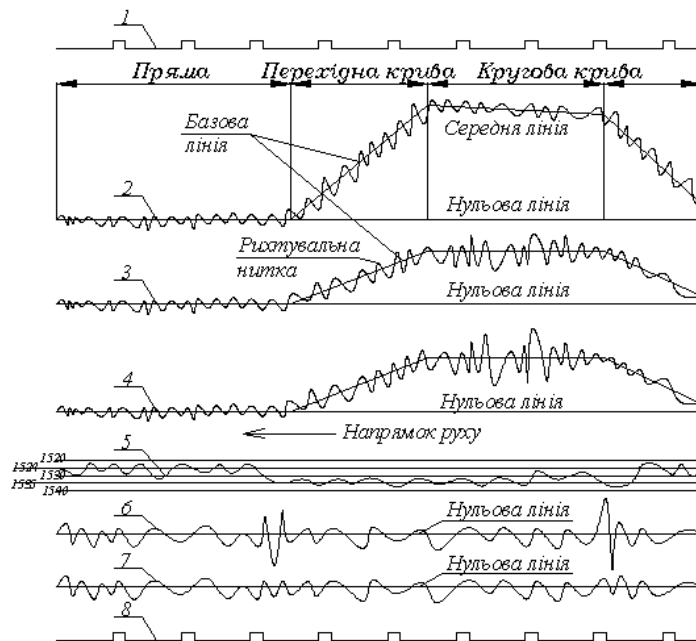


Рис. 2.8. Приклад записів стану колії вагоном ЦНИИ-2

Колієвимірвальні вагони системи ЦНИИ-2 випускав київський завод «Трансигнал» з 1960 р. Вони оснащені тросо-блочним механізмом передачі результатів вимірів на стіл для реєстрації. Результати вимірів записуються на двох

паперових стрічках – основному екземплярі і дублікаті. На стрічці в ручну відмічають кілометрові знаки і автоматично пікети. Інформацію, отриману при перевірці стану рейкової колії, обробляють в ручну техніки – розшифровувачі, заміряючи на стрічці відступи від норм утримання кожного параметру у відповідності з Технічними вказівками по розшифрованих стрічках. Контролюються наступні геометричні параметри рейкової колії:

- взаємне положення рейкових ниток по рівню (плавне відхилення рівня і перекося);
- стан колії в плані (рихтування);
- ширина колії (звуження, розширення, відведення ширини колії);
- просадки ниток (профільні);

Колієвимірювальні вагони системи ЦНИИ-2 були для свого часу найбільш досконалим засобом контролю за станом колії. Колію перевіряли в умовах, максимально приближених до умов взаємодії колії і рухомого складу, тобто під поїзним навантаженням і на високій швидкості, до того ж в будь який час доби і при будь якій погоді.

Основним недоліком колієвимірювальних вагонів системи ЦНИИ-2 є неможливість об'єктивної оцінки кривої. Особливо людський фактор впливає при великому об'ємі розшифрування. Але швидше всього це обумовлюється недоліком принципів оцінки колії: балової оцінки і стрибкоподібною зміною оцінки на границях ступенів відступів.

З 1994 р. НПЦ «ИНФОТРАНС» (м. Самара) обладнав ЦНИИ-2 приладом комп'ютерної розшифрування інформації про стан колії – бортовою автоматизованою системою (БАС), що дозволило виключити людський фактор при оцінці колії. В 1996 р. НПЦ «ИНФОТРАНС» виготовив перший вагон – колієвимірювальний вагон системи КВЛП, в якому наряду з БАС використали наступні вдосконалення:

- тросо-блочну систему передачі результатів вимірювання замінила система сельсин - датчиків, в результаті чого виміри стали більш точнішими, оскільки ліквідували вплив люфтів і розтягнення тросів;
- замість гіроскопічної системи застосували датчик вимірювання нахилу кузова (ДИН).

В 1997 р. в НПЦ «ИНФОТРАНС» був розроблений колієвимірювальний вагону КВЛ-П1МП.

В 2003 році Укрзалізниця придбала колієвимірювальний вагон типу КВЛ-П1МП.2.Т на базі купейного пасажирського вагона Тверського вагонобудівельного заводу, технічні характеристики якого наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики колієвимірювального вагону

Найменування	Діапазон і похибка
Взаємне положення рейкових ниток по висоті (рівень), мм	$(\pm 150) \pm 2,0$
Ширина рейкової колії (шаблон), мм	$(1510-1550) \pm 1,0$
Стріла вигину кожної рейкової нитки в горизонтальній площині відносно прямої хорди 21,5 при вимірюванні в точці на відстані 4,1 м від кінця хорди (рихтування), мм	$(\pm 225) \pm 2,0$
Швидкість руху (робоча швидкість), не більше, км/год	100
Час безперервної роботи, год	12
Вага колієвимірювального вагону, не більше, т	60

Визначити фактичний радіус кривої, підвищення зовнішньої рейки, довжину перехідної кривої за записами на стрічці колієвимірального вагону непросто. Особливо складно знайти радіус кругової кривої і кривизну в межах перехідної.

Якщо розглядати геометрично плавну криву, то задача зводиться до того, щоб знайти перехід від стріли вигину f_a , заміряної колієвимірвальним вагоном на відстані від заднього кінця хорди $a = 4,109$ м при її довжині $A = 21,495$ м, до стріли $f_{\frac{l}{2}}$, заміряної в середині хорди $l = 20$ м, прийнятої при ручних вимірах (рис. 2.9).

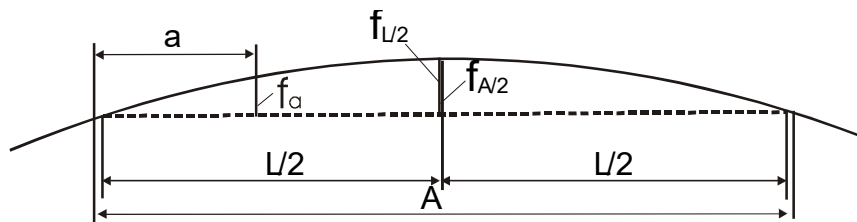


Рис. 2.9. Положення хорди колієвимірального вагону при його русі по кривій

При вирішенні такої задачі спочатку знаходиться значення стріли $f_{\frac{A}{2}}$ в середині хорди колієвимірального вагону, а потім через коефіцієнти k_1 і k_2 здійснюється перехід до стріли в середині 20-метрової хорди

$$f_{\frac{l}{2}} = f_{\frac{A}{2}} k_1 k_2 m, \quad (2.3)$$

де k_1 – коефіцієнт переходу від стріли f_a , вимірюваної на відстані від кінця хорди $a = 4,109$ м, до стріли $f_{\frac{A}{2}}$ в середині хорди колієвимірального вагону. Якщо хорда колієвимірального вагону A в даний момент вимірів знаходиться в межах кругової кривої, то коефіцієнт

$$k_1 = \frac{A^2}{4a(A-a)}. \quad (2.4)$$

При підстановці відповідних значень отримаємо $k_1=1,617$.

k_2 – коефіцієнт переходу від стріли $\frac{f_A}{2}$, вимірюваної в середині хорди колієвимірювального вагону до стріли $\frac{f_l}{2}$ в середині 20-метрової хорди.

$$k_2 = \frac{\frac{f_A}{2}}{\frac{f_l}{2}} = \frac{f^2}{A^2}; \quad k_2 = 0,866. \quad (2.5)$$

У формулі (2.3) враховується масштаб запису рихтування на колієвимірювальній стрічці, $m=2$.

При розташуванні колієвимірювального вагону в межах перехідної кривої чи частково на перехідній, а частково на круговій кривій величина коефіцієнта k_1 стає змінною.

Згідно конструкції в процесі заїзду колієвимірювальний вагон отримує інформацію про колію шляхом вимірювання кривизни в плані та нерівностей у профілі. Асиметричність вимірювальних схем не дозволяє отримати надійні дані про устрій колії. Через асиметричності вагон не «бачить» коротку пряму вставку, не вірно оцінює місце розташування перехідних кривих, зовсім не отримує інформації по профілю колії. Якщо побудувати план чи профіль за даними для лівого і правого рейок, то до кінця заїзду рейки «роз'їжджаються» на кілька кілометрів. Особлива проблема таких вагонів – вимірювання довжини. Так пройдений шлях визначається оборотами колісної пари, то навіть його паспортна точність (1: 500) в десять разів гірше звичайних вимірів рулеткою, а оскільки фіксація точок зйомки на колії взагалі відсутня, то знайти ці точки в «натурі» практично не можливо. Також цій метод має теж недоліки що й метод стріл – швидке наростання помилки вимірювань по довжині завдяки подвійному сумуванню стріл, відсутність будь якого контролю вимірів. Таким чином

вимірювальні системи цих вагонів, не дозволяють з достатньою точністю надійно визначати параметри плану і профілю лінії [110-112].

2.4.2 Метод вимірювання виправно-підбивно-рихтувальними машинами

Метод вимірювання виправно-підбивно-рихтувальними машинами є «автоматизованим» та використовується для оцінки кривизни рейкової колії в плані й поздовжньому профілі.

Цей метод дає кращі результати по точності зйомки ніж колієвимірювальні вагони. По-перше, вони обладнані досить точними системами виміру пройденого шляху, по-друге, на таких машинах використовується схема з невеликою асиметрією і, по-третє, точність виміру стріли на таких машинах складає 0,1 мм. Проблемним залишається оцінка просторового положення плану колії через необхідність подвійного інтегрування кривизни. Докладніше про три концепції вимірювання цим методом було наведено в розділі 1.1

2.4.3 Метод вимірювання з використанням GPS датчиків

Метод вимірювання з використанням GPS датчиків може бути як «автоматизованим» так і «мануальним», є координатним методом і використовується для оцінки кривизни рейкової колії в плані й поздовжньому профілі.

Автоматизований метод вимірювання з використанням GPS датчиків використовується на базі виправно-підбивно-рихтувальних машин (докладніше викладено в розділі 1.1, перша концепція) та колієвимірювальних візків різних конструкцій (рис. 2.10), докладніше буде розглянуто нижче.



Рис. 2.10. Колієвимірювальний візок з встановленим GPS датчиком

Даний метод дозволяє отримувати координати положення колії в русі, однак отримати точність на рівні електронних тахеометрів такі приймачі можуть тільки завдяки посилення базовими станціями на землі (докладніше викладено в розділі 1.1, перша концепція). Також можна отримати зазначену точність з використанням диференціальної схеми та стоянки на кожній точці протягом достатньо тривалого проміжку часу, що не дозволяє виконати таку зйомку безпосередньо на колії у «вікно».

Таким чином, єдиний варіант отримати бажану точність зйомки з використанням GPS датчиків без посилення базовими станціями на землі — це «мануальне» використання цих датчиків з тривалими стоянками на кожній точці зйомки. При цьому датчик потрібно встановити на головку однієї з рейок або безпосередньо, або на штатній штанзі з круглим рівнем (рис. 2.11)



Рис. 2.11. «Мануальна» зйомка колії за допомогою GPS датчика

Відстань між точками потрібно приймати від 5 до 20 м в залежності від кривизни. Обов'язково беруться точки в місцях розташування об'єктів, в районі яких необхідно контролювати рихтування (мости, переїзди, опори контактної мережі і т. п.). Слід уникати точок з маленькою (менше 0,5 м) відстанню між ними.

У точках зйомки вимірюються ширина колії для перенесення зйомки на вісь колії (при відсутності істотних відхилень можна вважати ширину постійної) і підвищення зовнішньої рейки (для контролю габаритів і швидкостей).

2.4.4 Метод вимірювання з використанням колієвимірювальних візків

На відміну від колієвимірювального вагона, колієвимірювальний візок проводить вимірювання без навантаження на рейки, що є безумовним мінусом. Випускаються механічні та електромеханічні колієвимірювальні візки. Перші з таких візків з'явилися ще 25 років тому, але були не досконалими, не забезпечували необхідної точності вимірів в профілі та в плані, що викликало справедливую критику з боку залізничників. Враховуючі зауваження та розвиток науково-технічного прогресу, були розроблені точні профілографи та одометри для цих візків. GPS-системи в багатьох випадках забезпечують 3-4 міліметрову точність

вимірів завдяки удосконаленню приладів і наземної інфраструктури всієї системи, а лазерні далекоміри гарантують більшу точність вимірів. Як правило, такий пристрій являє собою раму на невеликих колесах, що переміщується по рейках за допомогою робітника залізниці який його штовхає (рис. 2.12).



Рис. 2.12. Колієвимірювальний візок в роботі

На рамі, в залежності від складності конструкції, встановлюється різноманітне вимірювальне обладнання, складність якого відповідає за точність зйомки. На сучасних візках зазвичай встановлюється реєструючий пристрій, блок пам'яті, призмовідбивач або роверний GPS-приймач та бортовий комп'ютер з дисплеєм.

Сучасні колієвимірювальні візки випускаються фірмами:

- Amberg Technologies AG (Швейцарія) — візки марки Amberg GRP;
- Terra Vermessunger AG (Швейцарія) — візки марки Swiss Trolley;
- Geo – Metrik AG (Німеччина) — візки марки Tachy Rail.

Існують спрощені моделі візків для вимірів тільки ширини колії і підвищення виробництва Росії, Чехії, Китаю та Швейцарії.

На цей час найбільшого застосування на залізницях світу набув колієвимірювальний візок Amberg GRP (рис. 2.13)



Рис. 2.13. Колієвимірювальний візок Amberg GRP

Цей візок випускається в декількох комплектаціях і може бути обладнаний лазерним сканером (рис. 2.14), який дозволяє проводити виміри не лише геометрії колії, але й знаходити відстань до поверхні баласту, автоматично розраховувати ухил колії, знаходити відстані до світлофорів, платформ, елементів мостів, ліхтарів тощо (рис. 2.15).



Рис. 2.14. Візок Amberg GRP обладнаний лазерним сканером

Робочий процес зйомки колієвимірювальним візком складається з проходу по колії зі швидкістю до 3 км/год. з вимірами геометрії колії і зупинками через 2,5 — 8 м (або на кожній 4-й, 5-й, 7-й і т.д. шпалі) для фіксації місцезнаходження пристрою [113-118].



Рис. 2.15. Робота візка Amberg GRP обладнаного лазерним сканером

Основним недоліками колієвимірювальних візків є вимірювання без навантаження колії, низька точність та повільна швидкість зйомки з обов'язковими постійними зупинками, що унеможлиблює роботи на високошвидкісних магістралях.

2.4.5 Метод мобільного лазерного сканування

Метод мобільного лазерного сканування є «автоматизованим» та використовується для оцінки технічного стану залізничної інфраструктури через отримання хмарини точок зйомки.

Застосування сучасного обладнання та інноваційних технологій відкриває нові можливості для вирішення різноманітних завдань, що постають перед інженерами — проектувальниками, будівельниками і залізничниками. Метод мобільного лазерного сканування є особливо ефективний для оперативного отримання, опрацювання і поновлення великого обсягу високоточних даних. Проектні та будівельні організації, служби експлуатації об'єктів стратегічного призначення, залізничні дороги вимагають постійного і точного моніторингу конструктивного стану об'єктів — ці дані можна отримати за допомогою методу мобільного лазерного сканування (МЛС), який дозволяє за короткий проміжок часу збирати детальну тривимірну інформацію стосовно всіх об'єктів, що містяться в зоні візування скануючої системи. За швидкості зйомки 60 кілометрів на годину вдається досягти точності на рівні кількох сантиметрів і щільності — близько 3000 точок на квадратний метр. Скануюча лазерна система може встановлюватись на даху будь-якої машини, яка може рухатись по залізничній колії (рис. 2.16).

Для забезпечення високої точності вимірювань за коридором колії проходження можуть бути встановлені базові GNSS-станції. Разом зі скануванням ця система дозволяє вести фотозйомку території об'єкта чотирма ширококутними камерами з частотою зйомки до 20 кадрів на секунду, ці дані дозволяють значно

поліпшити сприйняття об'єктів, аналізувати їх характеристики, присвоювати справжні кольори точкам і атрибуту об'єктів. Автоматична корекція яскравості фотозйомки, водонепроникність системи, діапазон сканування забезпечують можливість виконувати зйомку за несприятливих погодних умов і в будь-який час доби (навіть уночі, за наявності штучного освітлення на місцевості).



Рис. 2.16. Скануюча лазерна система встановлена на даху машини типу ВПР

Після зйомки і опрацювання даних отриманих з МЛС можна створити:

- 3D-модель місцевості у форматі AutoCAD і ArcGIS із занесенням у базу даних атрибутивних характеристик;
- цифрові моделі об'єктів інфраструктури залізниць;
- цифрові моделі рельєфу в форматі ESRI GRID і ASCII;
- топографічні плани масштабу 1:1000;
- класифіковані ТЛВ.

Окрім цього, можна застосовувати найостанніші програмні комплекси у сфері цифрової картографії, САПР і ГІС від відомих виробників Autodesk, Bentley, TechNet, ESRI, RIEGL, InnovMetric, TerraSolid та інших (рис. 2.17). Потрібно відзначити програмний продукт SiRailScan німецької компанії TechNet. За його допомогою за хмарою точок лазерного відбивання в автоматичному режимі

перевіряються габарити залізничних колій і формуються докладні звіти щодо виявлених порушень.

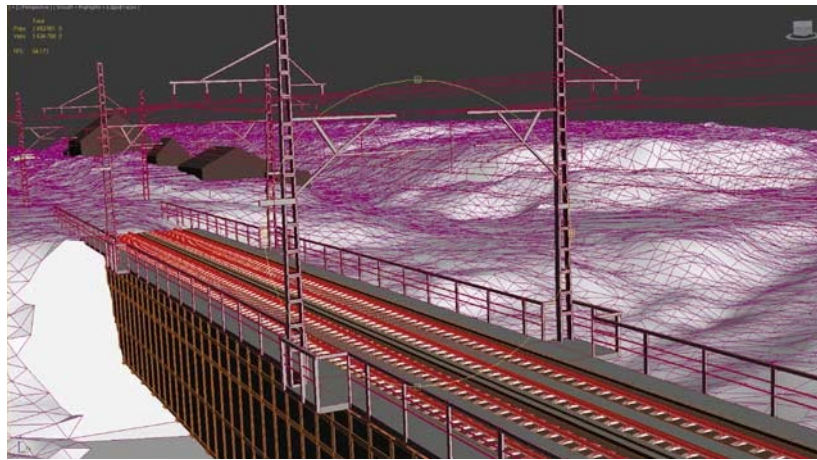


Рис. 2.17. Приклад опрацьованої у програмному комплексі хмари точок

У перспективі такі звіти можуть бути використані в процесах реконструкції та ремонту залізниць. За результатами опрацювання даних вирішуватимуться такі завдання:

- створення комплексної системи просторових даних інфраструктури залізничного транспорту;
- побудова поздовжніх і поперечних профілів;
- аналіз параметрів об'єктів інфраструктури залізниць та порівняння їх з нормативними значеннями;
- виявлення ділянок на залізничному полотні та баластній призмі, що вимагають ремонту або реконструкції;
- визначення габаритів об'єктів інфраструктури вздовж залізничної колії й обчислення критично небезпечних значень;

Недоліком методу МЛС є велика похибка отриманих даних які надалі можна використати для розрахунку виправки колії, у деяких випадках вона може дорівнювати до 5 см [119].

Наведені методи зйомки для порівняльного аналізу зведено до таблиці 2.2. Для простоти порівняння у таблиці використані коефіцієнти від нуля до десяти.

Таблиця 2.2

Порівняльний аналіз методів зйомки плану й поздовжнього профілю

№ п/п	Назва методу	Зйомка плану (так/ні)	Зйомка профілю (так/ні)	Кваліфікаційна простота використання	Простота обробки результатів	Ступінь автоматизації	Точність вимірювання
1	Метод стріл	Так	Ні	10	5	0	6
2	Метод Гофера	Так	Ні	8	4	0	7
3	Модифікований метод І. П. Корженевича	Так	Ні	8	3	0	8
4	Метод Гонікберга	Так	Ні	1	2	0	9
5	Метод технічного нівелювання	Ні	Так	2	5	0	8
6	Метод тахеометричної зйомки	Так	Так	2	7	8	8
7	Метод зйомки колівимірювальним вагоном	Так	Так	5	9	10	7
8	Метод зйомки виправно- підбивно-рихтувальними машинами	Так	Так	4	8	10	7

№ п/п	Назва методу	Зйомка плану (так/ні)	Зйомка профілю (так/ні)	Кваліфікаційна простота використання	Простота обробки результатів	Ступінь автоматизації	Точність вимірювання
9	Метод зйомки з використанням GPS датчиків	Так	Так	4	8	10	9
10	Метод зйомки з використанням колієвимірювальних візків	Так	Так	7	9	8	5
11	Метод мобільного лазерного сканування	Та	Так	8	1	10	2

Порівняльний аналіз одинадцяти методів зйомки колії, які можуть застосовуватись на залізницях України (табл. 1.2), дає змогу зробити висновок, що найбільш ефективними є метод зйомки колієвимірювальним вагоном, метод зйомки виправно-підбивно-рихтувальними машинами, метод зйомки з використанням GPS датчиків і зйомки з використанням колієвимірювальних візків. При цьому ефективність обраних методів підсилюється тим, що при їх застосуванні одночасно ведеться зйомка плану й поздовжнього профілю залізничної колії. Але кожен з них має свої недоліки і переваги. Найбільш точним методом з найбільшим ступенем автоматизації процесу можна вважати метод зйомки з використанням GPS датчиків, але для зазначеної точності він потребує наявності розвинутої мережі базових GPS-станцій на землі. Цей метод є найбільш перспективним.

Більш доступним є метод зйомки колієвимірювальним вагоном, але результати зйомки мають порівняно низьку точність. Такі ж характеристики мають виправно-підбивно-рихтувальні машинами, але їх наявна кількість в робочому стані недостатня для широкого використання.

Ще одним варіантом досягнення збалансованих результатів зйомки є метод використанням колієвимірювальних візків. Основним недоліком цього методу є занадто низька точність результатів зйомки та низька швидкість процесу у зв'язку з відсутністю механізованого переміщення.

2.5 Підвищення точності зйомки плану й поздовжнього профілю колії

Кожен раз, з черговою появою оновлених систем GPS позиціювання, науковці проводять дослідження в напрямку визначення координат машин у русі за допомогою цих систем, але без посилення їх базовими станціями на землі, однак досі результати цих досліджень не дають можливості визначити положення колії з достатньою точністю для виконання робіт по її виправці [120]. Для суттєвого підвищення точності зйомки будь-яким з методів можуть використовуватись

спеціальні реперні системи. Конструктивно спеціальні реперні системи можуть виконуватися різного типу. На електрифікованих ділянках робочі репера можуть знаходитись на опорах контактної мережі. На двоколійних ділянках слід також розглянути можливість установки робочих реперів у вигляді труб діаметром 15-20 мм і довжиною 1000-1200 мм в міжколійний простір. Координування робочих реперів може здійснюватися як тахеометричною зйомкою, так і за допомогою GPS.

Частота установки визначається призначенням реперів. Для моніторингу стану колії при зрівнюванні стрілових вимірів досить визначати координати окремих точок на відстані 50-200 м залежно від кривизни. На такій відстані влаштовуються пари (краще трійки) реперів.

Як приклад, розглянемо використання системи реперів в окремих європейських країнах. У такій системі на протилежних опорах контактної мережі встановлюються спеціальні датчики, координати яких постійно перевіряються і корегуються. При приведенні колії в проектне положення в створі між датчиками встановлюються спеціальні візки (рис. 2.18).



Рис. 2.18. Візок для прив'язки до реперної системи

Установка двох таких візків на відстані 200-300 м дозволяє визначити з достатньою точністю координати осі колії в місці їх установки і закоординувати пряму поміж ними (рис. 2.19).

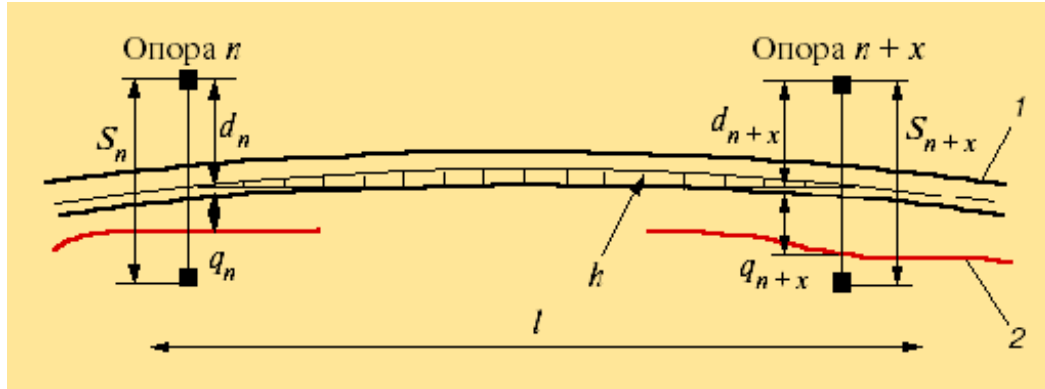


Рис. 2.19. Два візки та координатна вісь між ними

Спеціальна система, яка встановлена на колієрихтувальній машині, дозволяє за допомогою лазерного променя, що сполучає два візки, визначити координати осі колії в місці установки машини (рис. 2.20).



Рис. 2.20. Колієрихтувальна машина в створі двох лазерних візків

Порівнюючи координати осі колії з їх проектними значеннями, можна визначити величину і напрям рихтування. Наведена система є складною, дещо

застарілою в порівнянні з сучасними інноваційними технологіями і на даний момент вже виводиться з обігу в Німеччині [121-122].

Постановка колії в проектне положення без наявності системи реперів лише на підставі вимірювань з невисокою точністю стріл в окремих точках колії неможлива. Мова може йти тільки про згладжування кривої за наслідками вимірювань.

До основних недоліків спеціальної робочої реперної системи відносяться не тільки величезні витрати на її створення, але й додаткові щорічні витрати на її утримання. Однак епоха зневаги до точності плану привела до «зарихтовування», утворення багаторадіусних кривих, заводин. Все це дає надмірний знос рейок, рухомого складу і некомфортну їзду. Так само слід зазначити, що для такої технології необхідні, в основному, організаційні витрати і практично не потрібні додаткові кошти, тому що витрати на зйомку вже передбачені кошторисами.

2.6 Висновки до розділу 2

1. На сьогоднішній день існує багато методів, які використовуються для виміру параметрів і стану кривих. Саме вже існування різних методів, що мають практичне застосування, говорить про те, що кожен з них має свої як позитивні так і негативні якості. Для вибору того чи іншого методу треба мати як статистичне, так і математичне обґрунтування.
2. Порівнюючи результати зйомки кривої різними методами, можна встановити — на скільки вони відрізняються між собою. Однак визначити їх різницю відносно абсолютно правильних значень неможливо, тому що точне положення кривої залишається невідомим. Також очевидно, що точність результатів буде залежати не тільки від параметрів вимірювальних приладів і кваліфікації виконавців, але й від самої методики, яка визначає технологію

вимірювання і наступні математичні перетворення отриманих даних, наприклад, в кривизну кривої.

3. Найбільш ефективними є метод зйомки колієвимірювальним вагоном, метод зйомки виправно-підбивно-рихтувальними машинами, метод зйомки з використанням GPS датчиків і зйомки з використанням колієвимірювальних візків. При їх застосуванні одночасно ведеться зйомка плану й поздовжнього профілю залізничної колії. Але кожен з них має свої недоліки і переваги. Найбільш точним методом з найбільшим ступенем автоматизації процесу можна вважати метод зйомки з використанням GPS датчиків, але для зазначеної точності він потребує наявності розвинутої мережі базових GPS-станцій на землі.
4. На основі порівняльного аналізу методів зйомки плану й поздовжнього профілю встановлено, що найбільш надійні результати вимірювань для подальших розрахунків та визначення параметрів кривої дають методи Гонікберга та метод зйомки з використанням GPS датчиків за умови, що обробка результатів вимірювань виконується за програмою RWPlan.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВИПРАВКИ ПЛАНУ Й ПОЗДОВЖНЬОГО ПРОФІЛЮ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

3.1 «Однохордова» система автоматизованої виправки залізничної колії в плані. Застосування триточкового та чотириточкового методів виправки залізничної колії в плані

Широке застосування для виправлення колії в отримали важкі колійні машини ВПР, ВПРС і ВПО. Існує кілька варіантів систем і способів виправки залізничної колії в плані. Більшість систем виправки колії в плані машинами типу ВПР, що застосовуються з середини 90-х років минулого століття до сьогодні, працюють на базі «однохордової» системи. Застосовують три або чотириточковий метод рихтування в залежності від кількості датчиків стріли вигину, один або два відповідно. Принципова схема системи, яка використовується на більшості машин типу ВПР, показана на рис. 3.1.

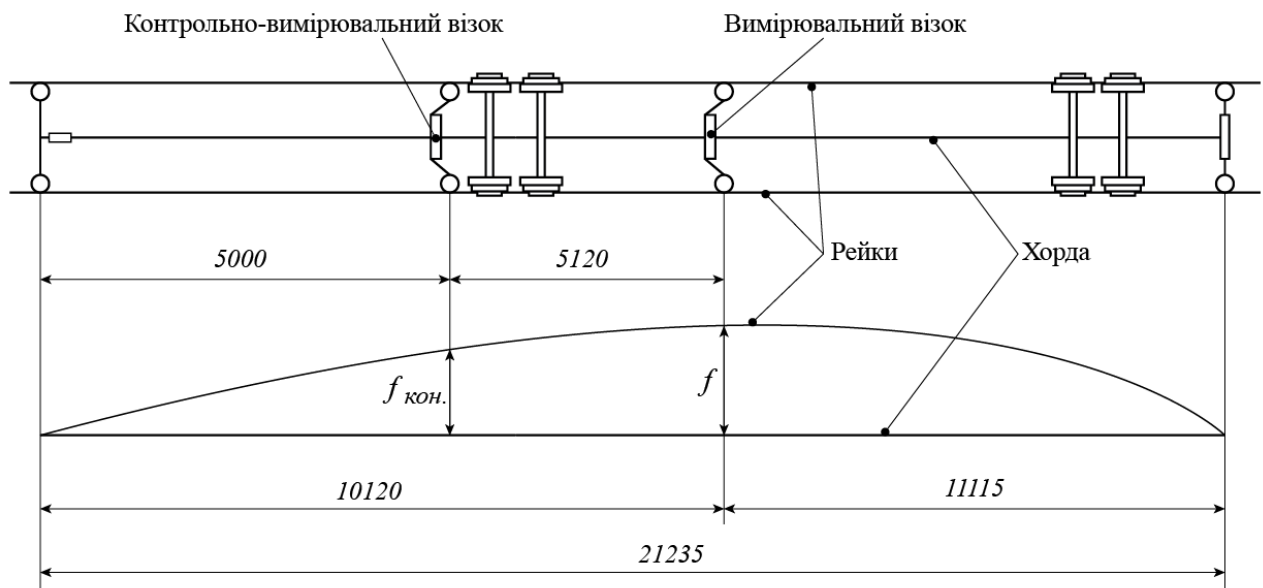


Рис. 3.1. Принципова схема «однохордової» системи виправки колії в плані

Рихтувальний трос (хорда) розміщено вздовж поздовжньої вісі машини та закріплено на передньому та задньому візку. Трос задає проектне положення

колії в плані та натягується за допомогою пневмоциліндра. В основному у конструкції системи передній та задній кінець тросу може зміщуватись поперек вісі колії спеціальними пристроями. Така система рихтування може бути використана для роботи способом згладжування або прецизійним способом (за «фіксованими точками», лазерній хорді, використанням GPS датчиків, за результатами лазерного сканування тощо).

Спосіб згладжування може бути задіяно при три або чотириточковому однохордовому методі виправки колії в плані.

3.1.1 Триточковий метод

При триточковому методі передній кінець рихтувального тросу фіксується на передньому візку, а задній на контрольно-вимірювальному візку та проходить через вимірювальний візок. Цю систему називають пропорційною, тому що швидкість виправки знаходиться в прямій залежності від розміру зміщення рейко-шпальної решітки в плані та зменшується з наближенням плану колії до проектного положення. Цей ефект збільшує продуктивність машини, а точність досягається за рахунок використання в гідросистемі машини слідкуючих золотників, які управляють виправним пристроєм (рис. 3.2).

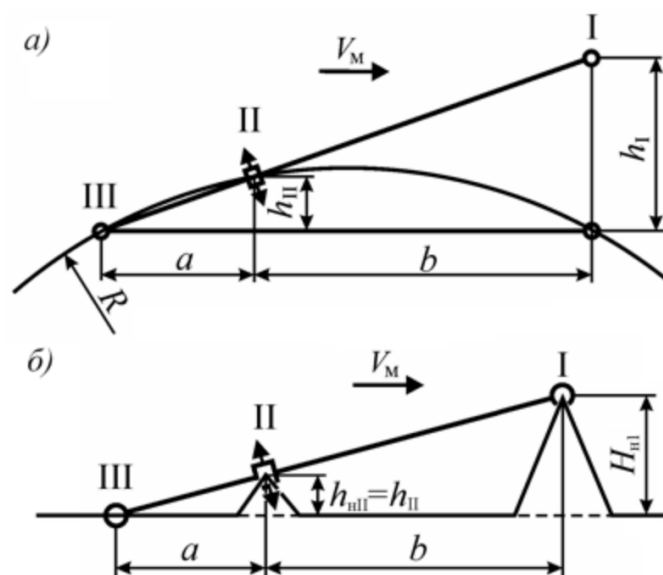


Рис. 3.2. Принципова схема «однохордового» триточкового методу виправки колії в плані

3.1.2 Чотириточковий метод

При чотириточковому методі кінці рихтувального тросу фіксуються на передньому і задньому візку, а сам трос проходить через вимірювальний та контрольно-вимірювальний візок. Принцип дії засновано на порівнянні двох суміжних стріл вигину h_{III} та h_{II} відносно хорди, які виникають, коли хорда вписується до кривої (рис. 3.3).

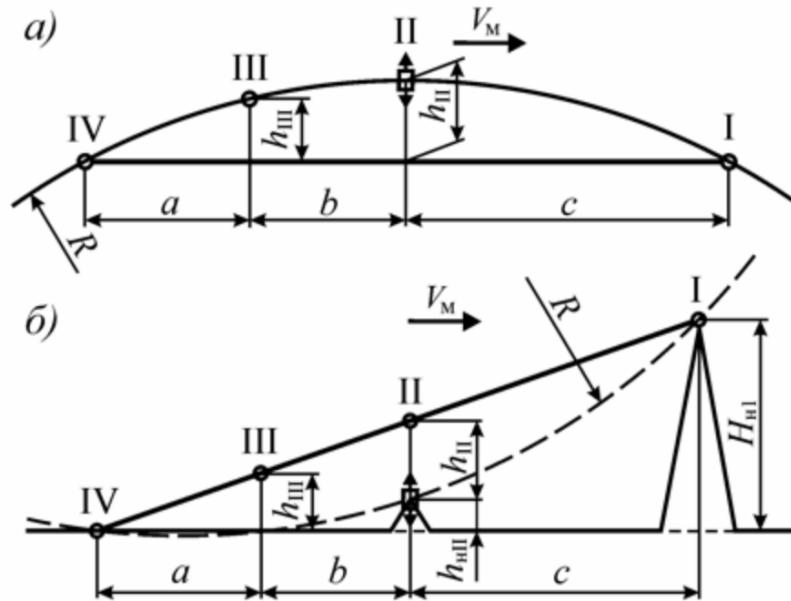


Рис. 3.3. Принципова схема «однохордового» чотириточкового методу виправки колії в плані

Відомо, що для хорд з малим центральним кутом співвідношення стріл вигину — коефіцієнт i — величина постійна, яка не залежить від радіуса кривої, а залежить лише від співвідношення відстаней між точками вимірів, та вираховується за формулою:

$$i = \frac{h_{II}}{h_{III}} \quad (3.1)$$

При виправці прямих ділянок колії хорда завжди повинна співпадати з віссю колії, тобто стріла f повинна дорівнювати нулю.

На сьогодні всі автоматизовані системи виправки колії базуються саме на «однохордовій» системі виправки колії, поза залежності від способу зйомки.

В залежності від способу базування передньої точки рихтувальної хорди система може працювати або методом згладжування, або прецизійним методом [123].

Обрання одного з методів залежить від оснащення машини типу ВПР — наявності одного або двох вимірювальних візків.

3.2 Використання методу «згладжування» та прецизійного методу для виправки залізничної колії

3.2.1 Метод згладжування

Виправку колії як перетворення параметрів початкового положення колії в прийнятій системі координат у параметри положення колії після виправки. Тому система розглядається як динамічно передавальна ланка, що перетворює вхідний сигнал у вихідний, а її динамічні властивості можна вивчати, використовуючи математичний апарат теорії передавальних функцій, який можна застосовувати для аналізу систем автоматичного регулювання.

Якщо на вхід передавальної динамічної ланки подати безперервний сигнал, що змінюється випадковим чином, то на виході ланки з'явиться відповідний випадковий сигнал. Це ускладнює об'єктивний аналіз його динамічних властивостей. Характеристики таких ланок зазвичай оцінюються шляхом подачі на вхід стандартних впливів: одиничного імпульсу нескінченно малої тривалості і нескінченно великої величини, у якого добуток тривалості на величину дорівнює одиниці; гармонійного синусоїдального впливу; порогового одиничного впливу (в певний момент часу подається вхідний сигнал, що дорівнює одиниці і витримується нескінченно тривалий час).

На відміну від динамічних систем в класичному розумінні, у яких незалежним параметром є час, у виправних систем незалежним параметром є координата від початку руху машини. При цьому для процесів, що відбуваються в часі, діє принцип причинності (наслідок — реакція на виході завжди за часом

відстає від причини — зміни вхідного сигналу). При аналізі властивостей виправних систем враховується, що положення колії в точці виправки. Наприклад, точка *II* на рис. 3.2а залежить від положень точки *I* до виправки і точки *III* після виправки.

Враховуючи вищенаведене, властивості виправної системи згладжуючого типу можна вивчити за її реакцією на одиничну нерівність (за аналогією з імпульсною дією), на періодичні вихідні нерівності і на порогове фіксоване зміщення передньої направляючої точки або нульової точки управління ПРП. Властивості системи по відношенню до початкової одиничної нерівності характеризуються статичним коефіцієнтом згладжування.

Для аналізу реакції виправної системи на вихідні гармонійні впливу (амплітудно-частотний і фазочастотний аналіз системи) використовуємо розрахункову схему, показану на рис. 3.4.

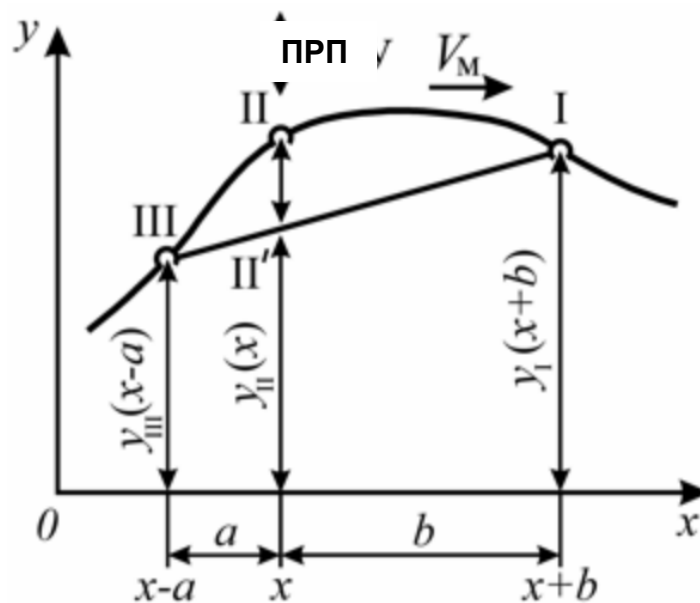


Рис. 3.4. Розрахункова схема до аналізу динамічних властивостей
рпичкової системи виправки колії

В процесі виправки положення точки *II* визначено становищем точок *I* і *III*. При аналізі прийняті наступні допущення:

- довжина дуги між кінцевими точками дорівнює довжині хорди;

- косинус центрального кута між двома точками дорівнює одиниці (радіуси, проведені з точок I , II , III до центру кривизни кривої, перетинаються умовно в нескінченності);
- довжина будь-якої ділянки вздовж довжини осі абсцис дорівнює його проекції на зазначену вісь;
- перпендикуляр, відновлений з будь-якої точки хорди в напрямку осі абсцис, паралельний осі ординат.

В результаті виправки точка II , що лежить на не виправленій ділянці, зміститься в положення II' і встане на одній лінії з точками I і III . Кути нахилу ділянки $III-II'$ і всієї хорди $III-I$ однакові, тому однакові і їх кутові коефіцієнти:

$$\frac{y_{II}(x) - y_{III}(x-a)}{a} = \frac{y_I(x+b) - y_{III}(x-a)}{a+b} \quad (3.2)$$

Після перетворень формула 2.1 має вигляд:

$$y_{II}(x) = y_I(x+b)P + y_{III}(x-a)Q \quad (3.3)$$

де: $P = \frac{a}{T}$; $Q = \frac{b}{T}$; $T = a + b$.

Рівняння 3.2 відображає реакцію системи в точці виправки II , виражену через ординати кінцевих точок I і III щодо базової осі.

Це рівняння можна назвати основним рівнянням виправки.

При теоретичному аналізі в першому наближенні нехтуємо пружними властивостями колії. Це виражається в тому, що кожна точка колії зберігає положення, в якому його «залишив» ПРП. Звідси випливає, що точка III системи, пройшовши шлях a , стане в положення, в якому в даний момент часу знаходиться точка II' , тобто: $y_{III}(x) = y_{II}(x)$

Виправна система розглядається як передавальна ланка, яка провадить вплив на колію в точках поділу колії з абсцисою x . Аналіз передавальних функцій в теорії систем автоматичного регулювання має на увазі в якості аргументу використовувати параметр часу. В даному випадку абсциса x інтерпретується як аналог часу. Ордината $y_1(x)$, відповідає положенню II точки

ділення колії до виправки, тоді інтерпретується як вхідна величина передавальної ланки, а ордината у $y_{II}(x)$ після виправки інтерпретується як вихідна величина. За рівнянням 3.4, для того, щоб отримати величину $y_{II}(x)$, необхідно провести підсумовування двох сигналів з коефіцієнтами посилення P і Q .

$$H_n = \frac{h_n + e_n - (e_{n-1} + e_{n+1})}{2} \quad (3.4)$$

де, H_n, h_n — стріли в точці до та після виправки, мм;

e, e_{n-1}, e_{n+1} — зсуви відповідно в точках $n, n-1, n+1$, мм.

Один із сигналів дорівнює значенню вхідної величини з «випередженням», інший — значенню вихідної величини з «запізненням». Структурна схема такої системи, що складається з типових передавальних ланок, показана на рис. 3.5а.

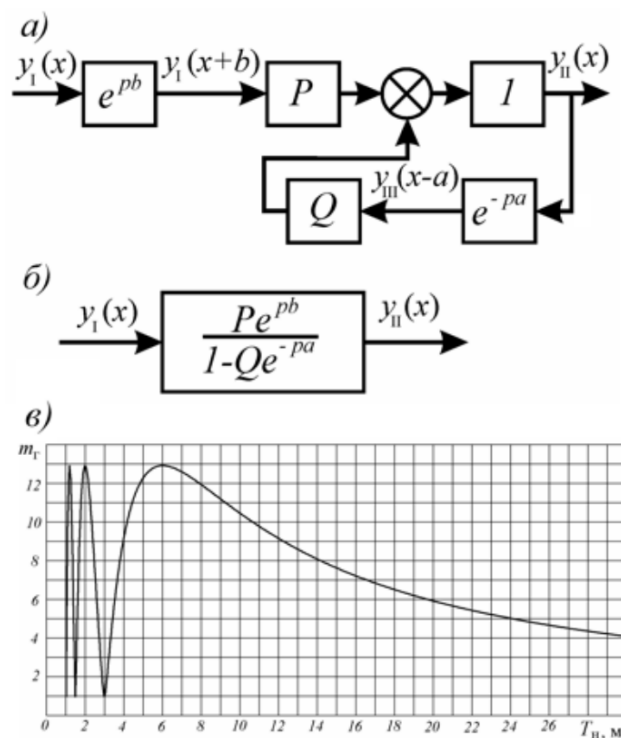


Рис. 3.5. Структурна схема триточкової системи виправки колії

Ланка e^{pb} є «спізнілою» ланкою з протилежним знаком, тобто «випереджальною» ланкою, що відображає той факт, що в момент виправки точка І знаходиться попереду і з цього положення формує свій сигнал для підсумовування. У системах, в яких в якості незалежного параметра

використовується час, зважаючи на наявність принципу причинності таке неможливо.

Ланка e^{-pa} — типова «спізнила» ланка, що відображає факт залежності вихідної величини $y_{II}(x)$ від положення точки III після виправки.

P, Q, I — підсилювальні ланки з коефіцієнтами посилення по формулах 3.4 і одиницею, відповідно. Коефіцієнти P і Q враховують вплив на рівень вихідної величини $y_{II}(x)$ співвідношення плечей a і b вимірювальної хорди.

Для того щоб отримати вираз передавальної функції для подальшого аналізу, необхідно шляхом еквівалентних перетворень груп ланок системи звести її до однієї передавальної ланці (рис. 3.5б). Після перетворень з урахуванням послідовного і паралельного розташування ланок вираз для передавальної функції системи набуде вигляду:

$$W(p) = \frac{Pe^{pb}}{1 - Qe^{-pa}} \quad (3.5)$$

де p — оператор Лапласа.

Далі, замінивши $p = i\omega$ і використовуючи формулу Ейлера ($e^{-i\omega} = \cos \omega - i \sin \omega$), після перетворень отримаємо значення частотної характеристики:

$$W(i\omega) = \frac{P \cos \omega b + iP \sin \omega b}{1 - Q \cos \omega a + iQ \sin \omega a} = \frac{Y + iZ}{M + iN} = U + iV; \quad (3.6)$$

$$U = \frac{YM + ZN}{M^2 + N^2}; \quad (3.7)$$

$$V = \frac{ZM + YN}{M^2 + N^2}; \quad (3.8)$$

$$Y = P \cos \omega b; \quad (3.9)$$

$$Z = P \sin \omega b; \quad (3.10)$$

$$M = 1 - Q \cos \omega a; \quad (3.11)$$

$$N = Q \sin \omega a. \quad (3.12)$$

де, $w = 2\pi/T_H$ — частота нерівностей залізничної колії, рад/м;

T_H — період нерівностей колії, м.

Амплітудно-частотна характеристика динамічної системи відображає ставлення амплітуди залишкових гармонійних нерівностей до амплітуди вихідних нерівностей. Величина, зворотна зазначеної характеристиці, називається гармонійним коефіцієнтом згладжування (див. рис. 3.2б):

Величина гармонійного коефіцієнта згладжування залежить не тільки від співвідношень плечей вимірювальної хорди, а й від періоду нерівностей. Як приклад на рис. 3.5в показаний графік залежності гармонійного коефіцієнта згладжування від періоду вихідних нерівностей для триточної контрольно-вимірювальної системи виправки з плечима $a = 3,2$ м і $b = 17,9$ м. Аналогічна система, наприклад, монтувалась на машинах ВПО-3000 і ВПО-3-3000.

Як видно з малюнка, системою найкраще згладжуються нерівності з періодом 2 і 6 м. При зростанні періоду нерівностей понад 6 м гармонійний коефіцієнт згладжування поступово зменшується. Нерівності періодом понад 30 — 35 м згладжуються значно гірше. Для їх виправки необхідно використовувати інші методи. Короткі нерівності періодом 1,5 м і 3 м системою не згладжуються. Такі короткі нерівності, враховуючи велику жорсткість рейок, можуть бути віднесені до дефектів прокату. Для їх виправки необхідно проводити пластичні деформації рейок з використанням спеціальних технологій.

3.2.2 Прецензійний метод

Вимірювальна база системи виправки колії зазвичай встановлюється на машині, тому можливості постановки колії в проектне положення без додаткової системи прив'язки обмежені. Тому сучасні виправно-підбивні машини типу ПРП оснащуються системами, які поєднують в собі відносну базу з прив'язкою до абсолютної бази реперних точок (маячків) на місцевості. Передня точка хорди є направляючої, тому в більшості випадків за абсолютною прив'язці коригується її положення. На практиці розроблено багато варіантів технічних рішень прив'язки

до об'єктів місцевості, про найпередовіші з них було розглянуто в першому розділі.

Системи виправки колії з використанням нівелювальних оптичних приладів. Цей метод ще називається методом фіксованих точок, або методом розрахункових зміщень. В цьому випадку виправна система здійснює постановку рейкових ниток в перетинах ділення уздовж колії в проектні положення щодо фіксованої базової лінії відліку. Технологія роботи таких систем передбачає два етапи. На першому етапі встановлюється відносно щодо проектного положення колії базова лінія відліку, на другому — виконуються безпосередні переміщення рейкових ниток з фіксацією в проектному положенні.

Установка базової лінії відліку може бути реалізована безпосередньою установкою нерухомої бази відліку (оптичної, лазерно-променевою і ін.), або попередніми нівелюванням з фіксацією на колії відповідних відміток після обробки даних вимірювань базової лінії відліку. При попередньому нівелюванні (приладом ПРП, або іншим) плану колії на кожній п'ятій шпалі на прямий або через 5 або 10 м в кривій (в залежності від її радіуса) записуються крейдою розрахункові величини переміщення рейкових ниток, які повинні бути реалізовані машиною.

На рис. 3.6 показана робота триточкової вимірювально-виправної системи за методом постановки колії в проектне положення в фіксованих точках. Величина відхилення ΔH_0 колії для постановки в проектне положення, яка записана на шпалах (або на рейці), відповідає положенню передній точки I хорди $I-III$, призводить до її зміщення щодо проектної осі колії 4. В результаті точка виправки II зміщується на величину Δh_{II} щодо положення, яке вона займала. Оскільки при виправці ця величина відома, то проводиться зсув передньої точки I хорди на проектну вісь 4 шляхи для компенсації. ПРП відслідковує положення хорди в точці II та робить зсув колії на величину $\Delta H_{II} = \frac{\Delta H_0}{m}$ (m — статичний коефіцієнт згладжування). Якщо виправка виконується в кривій, то накладається додаткове коригування шляхом зсуву «нуля» управління на величину проектної

теорії нормалей. Розрахунковою базою цих теорій є властивості епюри стріл вигину, виміряних від середини вимірювальної хорди постійної довжини, або еквівалентні їм за змістом епюри кривизни. Способи розрахунку параметрів кривих за стрілами вигину в плані найбільш обґрунтовані, дозволяють знаходити оптимальні параметри кривої тому широко застосовуються в розрахункових алгоритмах автоматизованих систем виправки колії [123].

3.3 Оцінка достовірності визначення положення залізничної колії в плані й поздовжньому профілі з використанням існуючих вітчизняних автоматизованих систем і механізмів

Для розробки сучасної математичної моделі виправки колії та імплементації її у автоматизовану систему виправки модернізованої машини типу ВПР радянського виробництва, яка замінить застаріли методи виправки колії викладені у третій концепції, створення робочої розрахункової моделі та алгоритму розрахунку виправки колії в профілі та плані необхідно провести серію експериментальних досліджень автоматизованої системи управління машиною.

Головними цілями експериментальних досліджень було прийнято такі:

- Проведення польової перевірки роботи всіх робочих органів машини;
- Проведення перевірки злагодженості роботи всіх електронних елементів машини;
- Проведення експерименту для перевірки повторюваності даних отриманих з робочих органів машини.
- Отримання достовірних даних для створення математичної моделі.

Випробування для перевірки повторюваності даних отриманих з робочих органів машини проводились в польових умовах на базі Криворізької машинної станції. Було зроблено декілька вимірювальних заїздів по ділянці. Дані отримані з датчиків розміщених на робочих органах машини (стрілографа, потенціометричних датчиків просадки/підйомки правої та лівої рейки,

потенціометричного датчика рівня (маятник), датчика пройденого шляху) оброблялись автоматизованою системою «Стріла» та зберігались у вихідному файлі в стандартному кодуванні ANSI (Windows) з розширенням «*.ids». Вихідний файл має текстовий формат який є масивом інформації отриманих з датчиків машини. Даний масив інформації сам по собі є описом стану колії та формує вихідне положення колії у просторі. Складається файл з заголовка та точок вимірів. Приклад файлу наведено на рисунку 3.7.

```

Приднєпровская
пч-4
Мелитополь 5
1
1
8 10 0
-1
3.03
ВПР-02
1
1
1
Леня
138
110
0 1350 0
Проба на Дарнице
625 5125 4992 10795 760 760
1 14245 3350 2640 2640 14210 3450 2650 2650
328
1 0.3 11.1 -1.2 0.0 -3.7 -2.6 0 0
2 0.3 11.7 -0.2 0.0 -3.1 -1.6 0 0
3 0.5 11.4 1.9 0.0 -1.5 0.1 0 0
4 0.9 11.7 -0.3 0.0 -0.5 1.6 0 0
5 1.2 11.1 0.1 0.0 0.5 3.0 0 0
6 0.9 11.1 1.6 0.0 -2.0 3.0 0 0
7 0.9 9.1 0.2 0.0 -3.5 2.0 0 0
8 0.5 7.8 1.8 0.0 -3.9 0.0 0 0
9 0.5 5.8 1.9 0.0 -3.8 -1.1 0 0
10 0.3 4.6 1.6 0.0 -3.7 -2.4 0 0
11 0.3 4.6 1.5 0.0 -2.9 -2.2 0 0
12 0.2 4.2 2.5 0.0 -2.3 -1.6 0 0
13 0.8 6.5 2.9 0.0 -2.2 -0.3 0 0
14 0.6 8.4 3.4 0.0 -2.4 0.8 0 0
15 0.6 8.4 2.5 0.0 -2.4 1.5 0 0
16 0.6 9.1 2.2 0.0 -2.5 1.5 0 0
17 0.8 9.1 -0.8 0.0 -2.0 -2.3 0 0
18 0.6 9.1 1.7 0.0 -1.1 -4.0 0 0
19 0.6 9.1 -2.5 0.0 -0.1 -3.5 0 0
20 0.6 9.1 0.5 0.0 0.9 -2.4 0 0
21 0.8 8.2 -0.7 0.0 2.3 -2.1 0 0

```

Рис. 3.7. Приклад вихідного файлу зйомки колії

У заголовку файлу зашифрована інформація про геометричні параметри робочих органів машини, місце зйомки, додаткові маркери та інша корисна

інформація для моделювання. Докладна інформація про файл зйомки наведена в таблиці 3.1

Таблиця 3.1

Інформаційні дані про вихідний файл зйомки

Данні	Опис даних
Придніпровская	Назва дороги
ПЧ4	Назва дистанції колії
Мелитополь5	Перегон, станція або номер колії
1	Номер колії: парний «0» непарний «1»
1	Номер кривої
8 10 0	Пікетаж початку ділянки виміру (колійний)
-1	Напрямок пікетажу заїзду: по ходу пікетажу «1» проти ходу пікетажу «-1»
3.03	Дата роботи
ВПП-02	Назва машини
1	Маркер присутності контрольного візку: Візок присутній «1» Візок відсутній «0»
1	Напрямок заїзду: вперед «1» назад «-1»
1	Маркер притиску вимірювальних візків: вправо «1» вліво «-1»

Данні	Опис даних
Леонід Рудько	ФІО співробітника який виконував виміри та контролював роботу машини
138	Унікальний ідентифікаційний номер заїзду
110	Максимально допустимий зсув підйомно-рихтувального пристрою машини, згідно її технічної документації, мм
0 1350 0	Данні розмежовані через пробіл: Маркер контрольного маятника: Маятник присутній «0» Маятника нема «1» Відстань (мм) від переднього рихтувального візка до переднього нівеліровочного. Маркер вимірювання координат в контрольних точках: Не вимірюються «0» Вимірюються «1»
Виправка колії на ст. Дарниця	Додаткова інформація
625 5125 4992 10795 760 760	Геометричні параметри контрольно-вимірювальної системи колійної машини для вимірювання плану (рис.3.2), через кому: Шаг вимірювального колеса Відстань між візками: A=5125 B=4992 C=10795

Данні	Опис даних
	Відстань між віссю тросу та рейкою (задній візок): $S1=760$ Відстань між віссю тросу та рейкою (передній візок): $S2=760$
1 14245 3350 2640 2640 14210 3450 2650 2650	Геометричні параметри контрольно-вимірювальної системи колійної машини для вимірювання профілю (рис.3.2), через кому: Маркер нівеліровочной системи: Відсутня «0» Присутня «1» данні (мм) нівеліровочной системи для лівого: $D=14246$ $E=3350$ $H1=2640$ $H2=2640$ та правого рейок по ходу руху відповідно
328	кількість точок

Геометричні параметри машини, які вказані у заголовку файлу, наглядно наведені на рисунку 3.8

Настройка параметров машины

Система измерения плана (мм) A= 5108 B= 4955 C= 10838 S1= 760 S2= 760

Система нивелирования для рельсов по ходу движения:

правого D= 14250 E= 3805 H1= 2650 H2= 2650

левого D= 14255 E= 3785 H1= 2640 H2= 2640

Отставание (мм) точки измерения H1 от S1 (при опережении "-") 1 350

☐ Есть контрольный маятник

☐ Выполнялись измерения координат в контрольных точках

Выход

Рис. 3.8. Геометричні параметри контрольно-вимірювальної системи колійної машини

Далі в файлі представлені результати вимірювань (рис. 3.6). Кожен рядок вимірювань у файлі складається з чисел, розділених пробілом і містить послідовно:

- номер точки
- відхилення вимірювального і контрольного стрілографів
- підвищення по ходу руху лівої рейки над правою для робочого і контрольного(за наявності, або нуль) маятників
- відхилення по датчику кожного з нівелювальних тросів, лівого і правого по ходу руху машини
- два останніх числа резервні (дорівнюють нулю)

Попередньо розшифровані дані з вихідного фалу можна наглядно представити по кожному стовпчику у вигляді графіків. Відхилення вимірювального і контрольного стрілографів представлені на рисунку 3.9

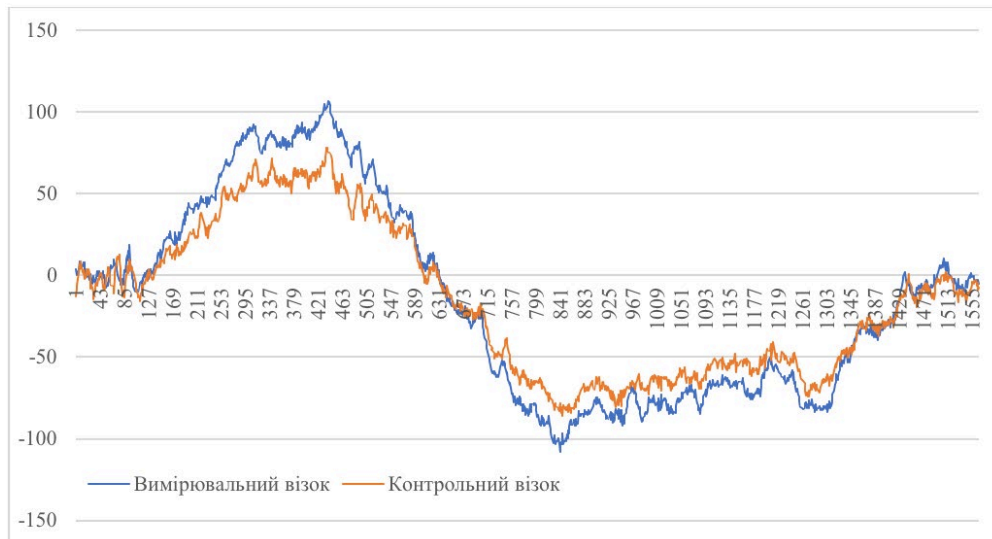


Рис. 3.9. Відхилення вимірювального і контрольного стрілографів

Підвищення по ходу руху лівої рейки над правою для робочого маятника наведено на рисунку 3.10



Рис. 3.10. Підвищення по ходу руху лівої рейки над правою для робочого маятника

Відхилення по датчику кожного з нівелювальних тросів, лівого і правого по ходу руху машини наведено на рисунку 3.11

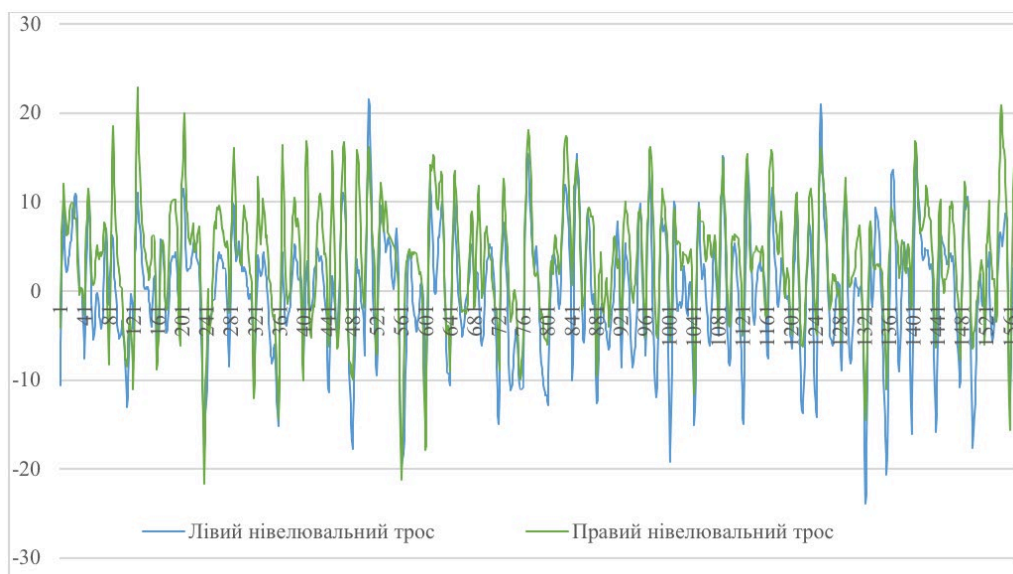


Рис. 3.11. Відхилення по датчику кожного з нівелювальних тросів, лівого і правого по ходу руху машини

Для оцінки правильності роботи датчиків робочих органів машини в ході випробувань була проведена експериментальна перевірка повторюваності отриманих з них даних при багатократних замірах на ділянці. Для цього машиною було зроблено шість вимірювальних заїздів по одній ділянці з збереженням даних по кожному заїзду. Перед кожним заїздом машина встановлювалась своїм підйомно-рихтувальним пристроєм на точку початку вимірювань, яка фіксувалась на рейці фарбою. Після заїзду точка зупинки також фіксувалась на рейці. Досвід експериментальної перевірки повторюваності отриманих з робочих органів машини даних дозволив виявити що за рахунок прослизання мірного колеса закінчення вимірювального заїзду кожен раз зміщувалась на непрогнозовану величину. Оскільки ця величина була значно малою по відношенню до пройденої машиною відстані і складала не більш ніж 1% від загальної довжини пройденої відстані, то цей факт у математичній моделі було вирішено не враховувати.

Дані були розшифровані та представлені для відхилення вимірювального і контрольного стрілографів на рисунках 3.12 та 3.13 відповідно, для підвищення робочого маятника по ходу руху лівої рейки над правою на рисунку 3.14, для

відхилення по датчику лівого та правого нівелювального тросу на рисунку 3.15 та 3.16 відповідно. Один з файлів даних випробувань наведено у додатку А

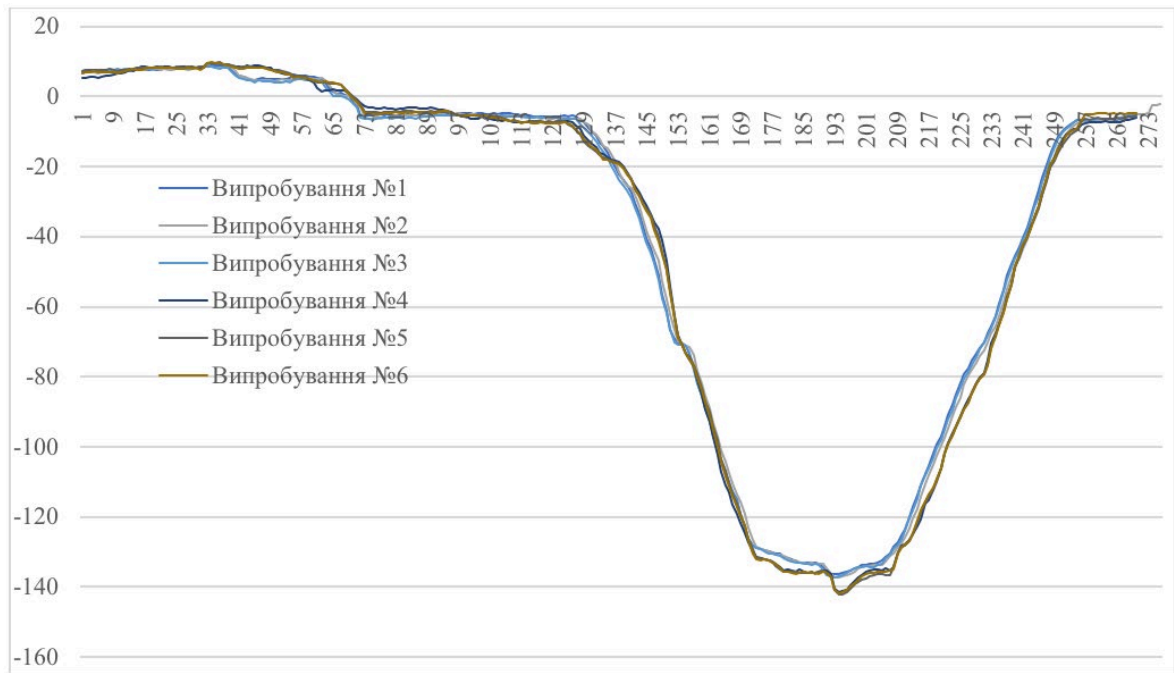


Рис. 3.12. Відхилення вимірювального стрілографа при контрольному заїзді

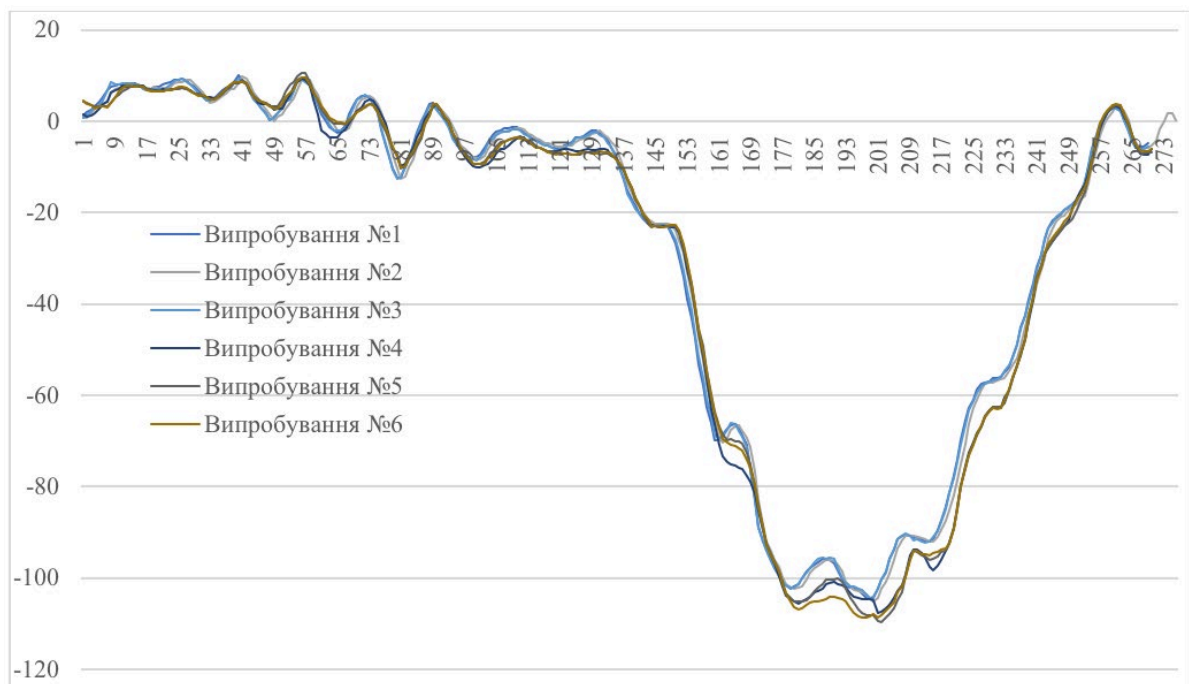


Рис. 3.13. Відхилення контрольного стрілографа при контрольному заїзді

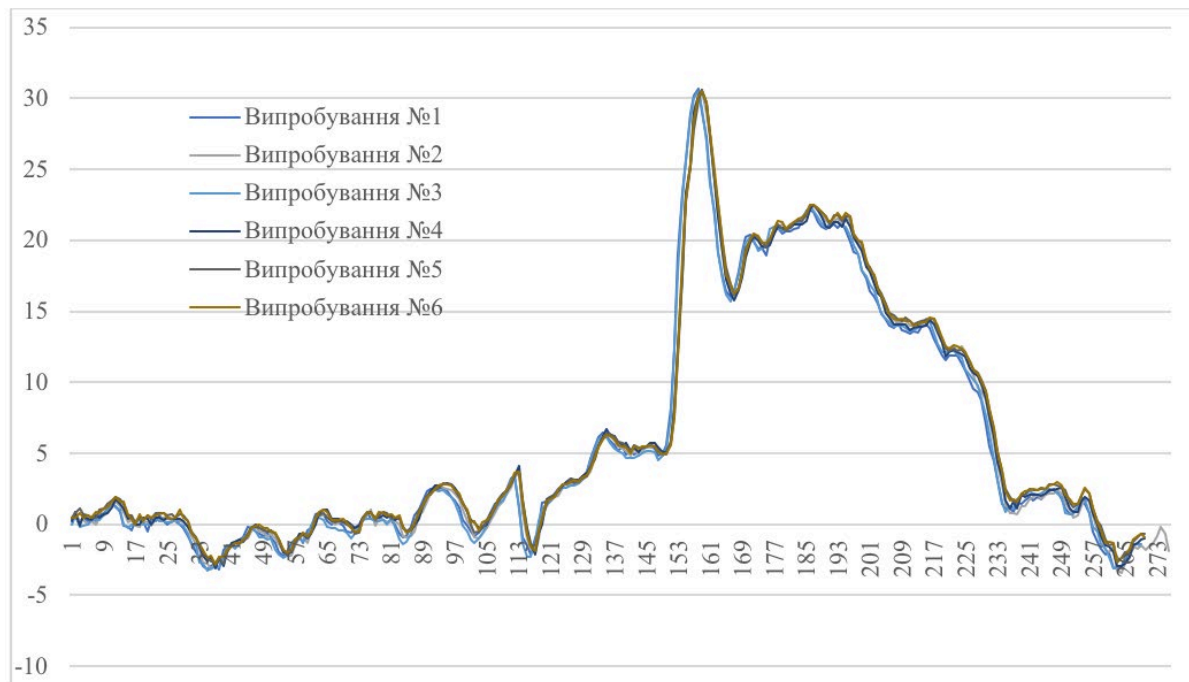


Рис. 3.14. Підвищення робочого маятника по ходу руху лівої рейки над правою

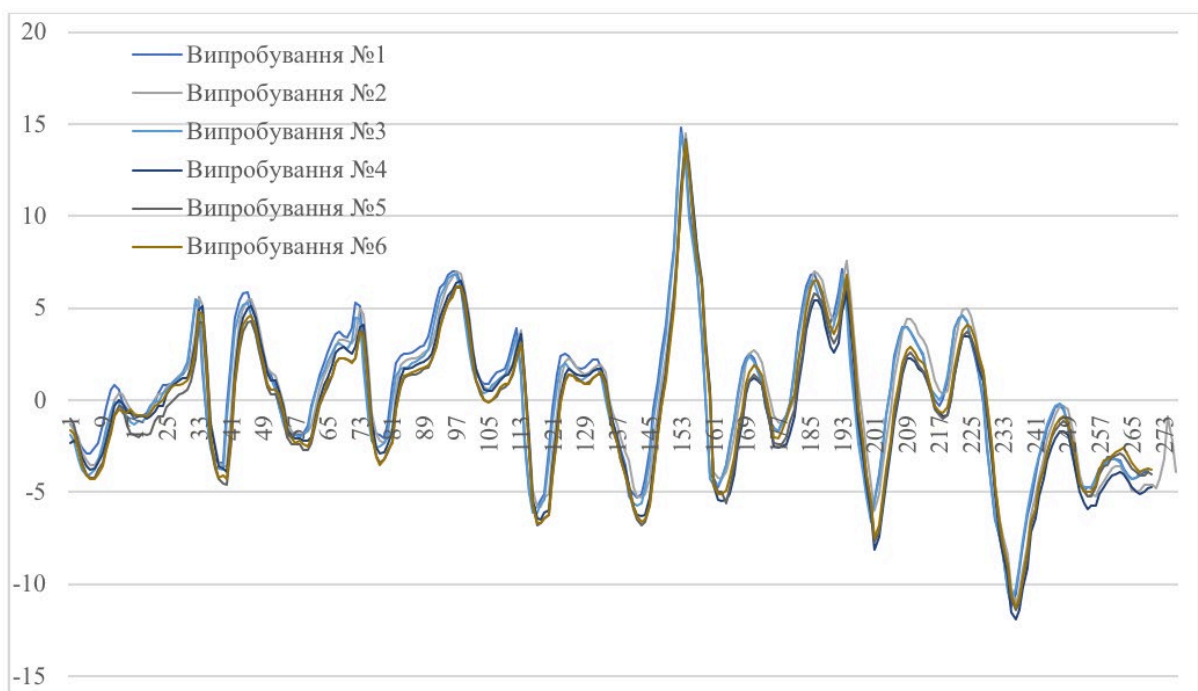


Рис. 3.15. Відхилення по датчику лівого нівелювального тросу

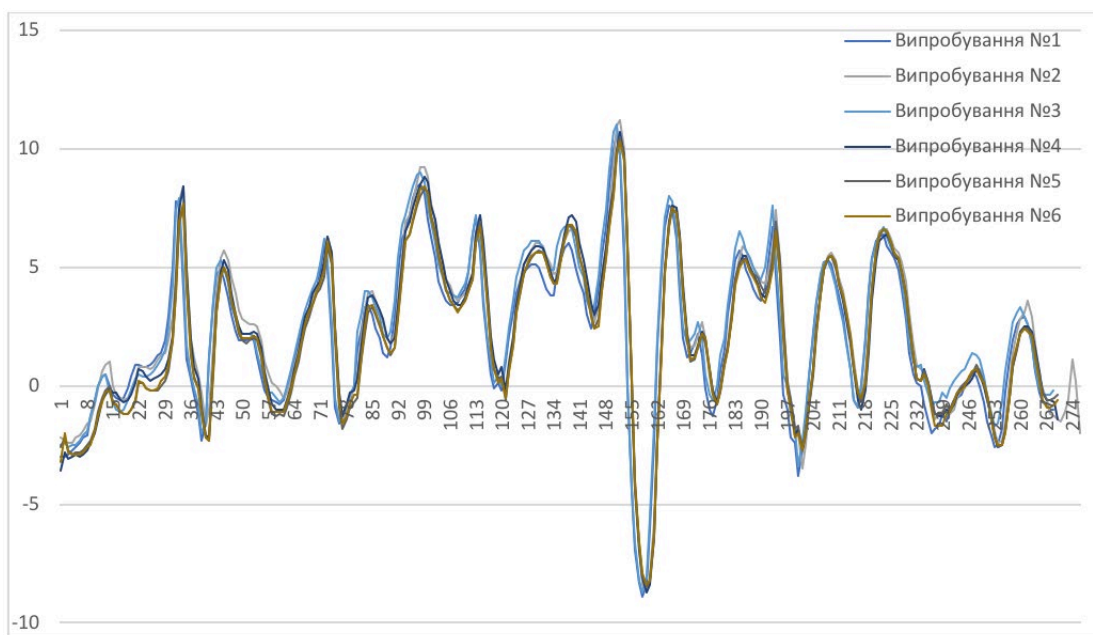


Рис. 3.16. Відхилення по датчику правого нівелювального тросу

Максимальна різниця стріл вигину за шість вимірювальних заїздів по даним зйомки для вимірювального стрілографа не перевищувала 5 мм, максимальна різниця вимірів підвищення робочого маятника не перевищувала 1мм, максимальна різниця вимірів по датчикам нівелювального тросу не перевищувала 2мм, що укладається в механічну похибку робочих органів машини.

Випробування з отримання достовірних даних для створення математичної моделі, вибору способу обробки даних та побудови математичних моделей плану й поздовжнього профілю проводились на перегоні Висунь-Утішне Придніпровської залізниці машиною ВПР-02 №225 під керівництвом доктора технічних наук, професора Рибкіна В. В..

В ході експерименту до проведення робіт по зйомці колії машиною ВПР проводились зйомка плану «методом стріл» та зйомка профілю геометричним нівелюванням колії (докладно описано у розділі 2.2.1). До виконання робіт випробувальна ділянка колії була розбита на рівні частини по десять метрів. Дані отримані після мануальної зйомки плану та поздовжнього профілю наведені у додатку Б.

Виміри плану колії на цій ділянці також виконувались «однохордовою» системою зйомки плану машини ВПР-02 №225 (докладно описано у розділі 3.1), розшифровувались та записувались за допомогою контрольно-вимірювальної системи у файл. Данні файлу приведені у додатку В.

Оскільки геометрія вимірювання стріл вигину машиною типу ВПР має асиметрію (рис. 3.1) та крок вимірів які відрізняються від мануального «методу стріл», то для порівняння результатів зйомки необхідно привести виміри до єдиної складової. Асиметрична стріла машини складає плечі хорди розміром по 10800мм и 9985мм (постійні геометричні величини машини рис. 3.8), а «метод стріл» має симетричні плечі по 10000 мм, то для приведення зйомок до єдиної системи використаємо залежність значення радіусу від стріли вигину кривої запропоновану доктором технічних наук Курганом Д. М.:

$$R = \frac{L_1 L_2}{2f_a}; \quad (3.12)$$

де, $L_1 L_2$ — плечі асиметричної хорди машини;

f_a — виміряна машиною стріла вигину.

Якщо розглядати вимірювання від середини двадцяти метрової хорди, то $L_1 = L_2 = \frac{a}{2}$ і формула (2.12) прийме загальновідомий вигляд:

$$R = \frac{a^2}{8f_m}; \quad (3.13)$$

f_m — стріла вигину виміряна «методом стріл».

Виразив через радіус формули 3.12 та 3.13 можна отримати формулу розрахунку коефіцієнта який дозволить перерахувати асиметричні стріли до симетричних:

$$f_m = \frac{a^2 f}{4L_1 L_2}; \quad (3.14)$$

Підставивши дані до формули 2.14 отримаємо коефіцієнт перерахунку який дорівнює 0,9273169 [45].

Система машини фіксує вимір кожні 625 мм, а метод стріл кожні 10000 мм, тобто для порівняння методів для кожної точки «метода стріл» потрібно брати кожену 16-ту точку контрольно вимірювальної системи машини. Для подальшого аналізу дані були зведені до таблиці 3.2

Таблиця 3.2

Результати зйомки плану «методом стріл» та машиною типу ВПР

Номер точки	Виміряні стріли вигину	
	Стріли виміряні «методом стріл», мм	Стріли виміряні машиною, мм
-2	0	0,0
-1	-3	4,9
0	-6	3,5
1	-14,5	-15,1
2	-15	-17,2
3	-17,5	-17,4
4	-23,5	-22,5
5	-23	-22,5
6	-41	-42,3
7	-54,5	-52,2
8	-56	-56,6
9	-58,5	-58,7
10	-57	-56,0
11	-71,5	-72,8
12	-74	-75,4
13	-71	-72,1
14	-70,5	-70,9
15	-65	-63,5
16	-59	-59,5
17	-57,5	-53,3
18	-56,5	-55,8
19	-62	-63,7
20	-59	-59,1
21	-56,5	-58,8
22	-56	-58,3
23	-65	-70,9
24	-72,5	-74,1
25	-74,5	-79,1
26	-74,5	-74,0
27	-66,5	-68,3
28	-68,5	-67,4

Номер точки	Виміряні стріли вигину	
	Стріли виміряні «методом стріл», мм	Стріли виміряні машиною, мм
29	-73,5	-74,7
30	-74	-75,3
31	-67,5	-70,0
32	-66	-69,8
33	-67	-64,1
34	-60	-60,7
35	-56,5	-56,9
36	-53,5	-53,9
37	-51	-53,6
38	-54	-54,9
39	-55	-57,3
40	-53,5	-55,2
41	-56,5	-52,3
42	-40	-44,9
43	-47,5	-46,6
44	-45	-45,3
45	-46,5	-45,7
46	-35	-42,3
47	-34,5	-32,2
48	-23	-22,4
49	-16,5	-16,6
50	-4,5	-3,5
51	-4	-2,9
52	-4	-1,9
53	-4,5	-2,6

Отримані дані було проаналізовано та для наочності наведено на рисунку 3.17

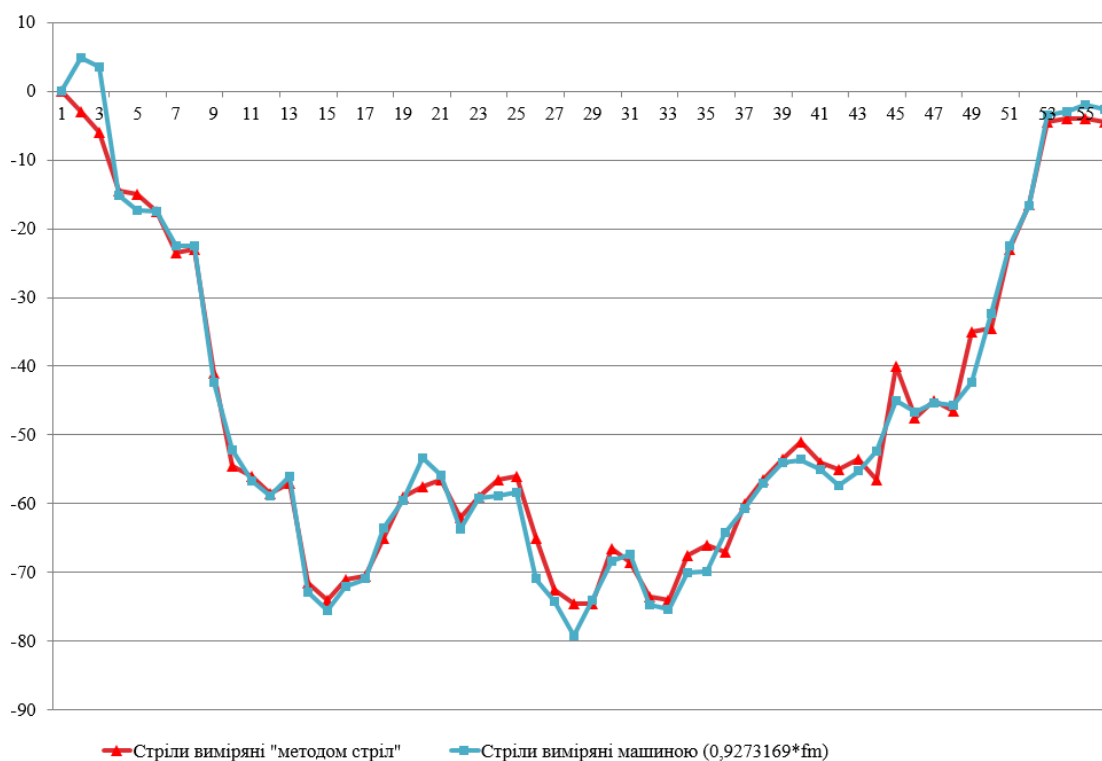


Рис. 3.17. Суміщений графік величин стріл, виміряних «методом стріл» та машиною

Після аналізу даних випробувань по зйомці плану зроблено висновки, що автоматизована зйомка плану контрольно вимірювальною системою машини ведеться асиметричною хордою, що дорівнює довжині машини. Стріли вигину в порівнянні зйомки плану «методом стріл» та машиною типу ВПР мають максимальну різницю, яка дорівнює 9,5 мм, що укладається в похибку механіки машини.

Для отримання достовірних даних про поздовжній профіль колії, до роботи машини проводилось нівелювання експериментальної ділянки. Для нівелювання використовувався точний нівелір Konі-007 та двосторонні нівелірні рейки прямого зображення. Геометричне нівелювання виконано способом «з середини», «плечі» нівелювання склали п'ятдесят метрів і місця встановлення нівеліру фіксувались на обочині залізничної колії. До роботи були виконані виміри нівеліру та нівелірних рейок згідно умов Інструкції ЦП 0124 [124]. Нівелювання було виконано по зовнішньої та внутрішньої рейкових нитках у

всіх точках розбивки, кожні десять метрів. Для контролю нівелірного ходу були прийняті два реperi. Висотна нев'язка нівелірних ходів склала +6мм, при дозволеному значенні $\pm 24\text{мм}$.

Результати вимірів наведені у додатку Б

Виміри профілю колії на цій ділянці також виконувались нівелювальною системою машини ВПР-02 №225, розшифровувались та записувались за допомогою контрольно вимірювальної системи в файл. Дані з файлу приведені у додатку В

Механіка системи зйомки колійної машини у профілі схожа на поширений метод стріл у плані та принципово від нього не відрізняється (рис. 3.18).

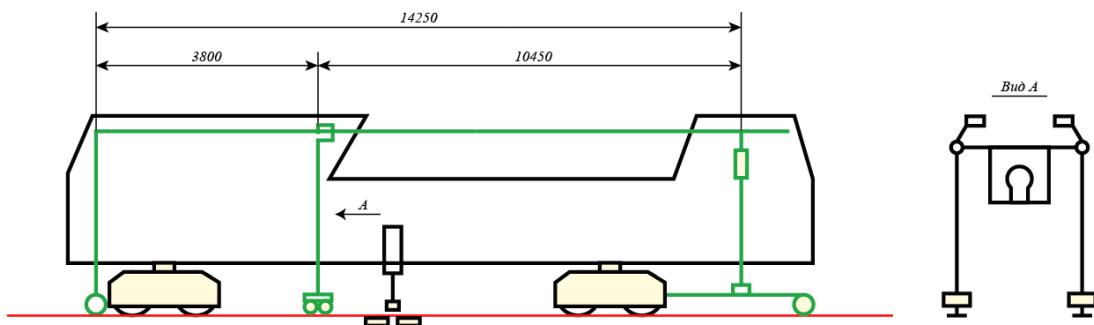


Рис. 3.18. Механіка системи зйомки колійної машини у профілі

Отримані дані були проаналізовані, результати наведені на рисунку 3.19.

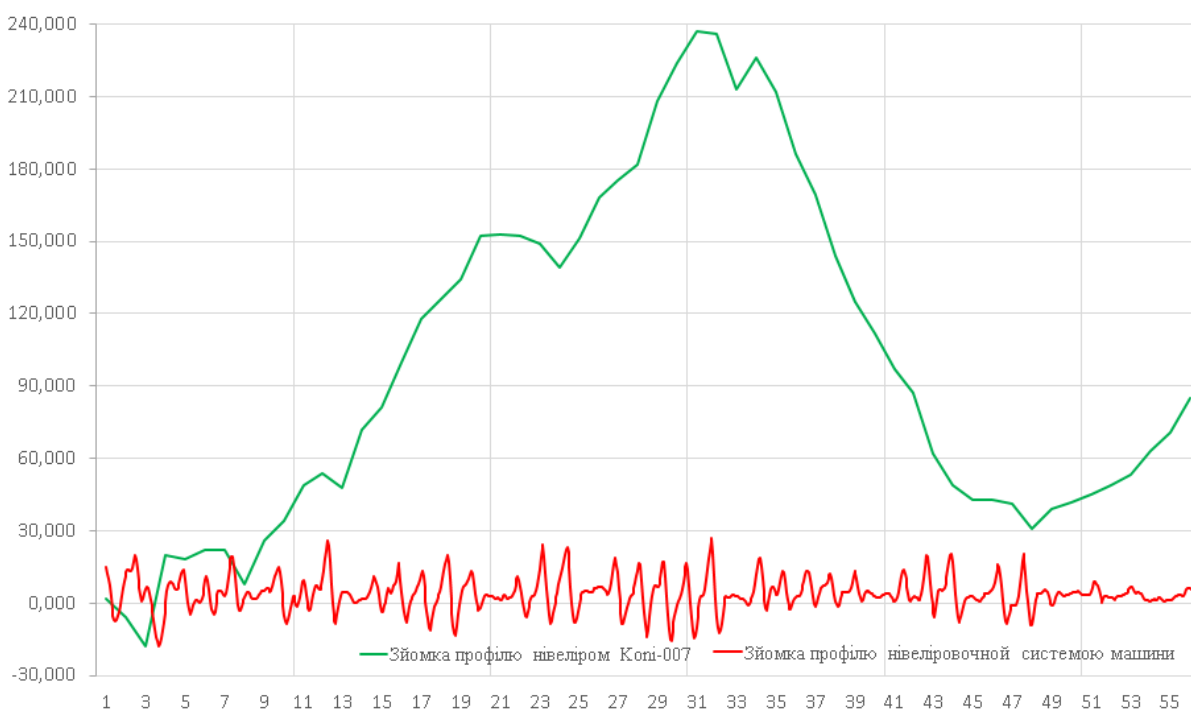


Рис. 3.19. Суміщений графік зйомки профілю нівеліром та нівелювальною системою машини

Після аналізу даних випробувань по зйомці профілю зроблені висновки, що автоматизована зйомка профілю контрольно-вимірювальною системою машини ведеться хордою, яка дорівнює довжині машини, що унеможливорює врахування більш довгих змін профілю. Так можна оцінити лише стан колії за показниками яма/бугор по довжині бази машини, тобто може мати місце лише локальне виправлення нерівності в профілі по довжині бази машини.

3.4 Евольвентна та сплайнова моделі, які описують положення плану існуючої залізничної колії

Для розрахунку виправки плану колії контрольно вимірювальною системою машини були розглянуті дві відомі розрахункові моделі — евольвентна та сплайнова.

3.4.1 Евольвентна модель

Евольвентна модель, при якій зсув визначається як різниця між проектною та існуючою евольвентою, є однією з найпоширеніших. У той же час є низка невирішених проблем при побудові евольвентної моделі, особливо для проектного варіанту при складному плану колії.

Як відомо, евольвента є інтегралом від кута повороту, а кут повороту — інтегралом від кривизни.

За значеннями кривизни окремих точок методами чисельного інтегрування визначаються кути і евольвенти для існуючої кривої.

При визначенні проектних параметрів і відповідних їм евольвент необхідно забезпечити вписування проектного рішення в вихідні прямі і нульовий зсув в кінці ділянки. Для однорадіусних кривих ця задача вирішується просто, але для складних ділянок плану побудова проектної евольвенти викликає певні труднощі.

Професор Гавриленков А. В. запропонував математичну модель для побудови проектних евольвент у вигляді системи рівнянь [125]. У цьому випадку рівняння евольвенти для прямої:

$$\dot{Y} = a_0 + a_1 k \quad (3.15)$$

для кругової кривої:

$$\dot{Y} = c_0 + c_1 k + c_2 k^2 \quad (3.16)$$

для перехідної кривої:

$$\dot{Y} = b_0 + b_1 k + b_2 k^2 + b_3 k^3 \quad (3.17)$$

Кількість рівнянь моделі при N радіусах становить (7N-4). Так система рівнянь для двохрадiусної кривої:

$$\begin{cases}
 0 = b_{10} + b_{11}k_1 + b_{12}k_1^2 + b_{13}k_1^3 \\
 0 = b_{11} + 2b_{12}k_1 + 3b_{13}k_1^2 \\
 0 = 2b_{12} + 6b_{13}k_1 \\
 b_{10} + b_{11}k_2 + b_{12}k_2^2 + b_{13}k_2^3 = c_{10} + c_{11}k_2 + c_{12}k_2^2 \\
 b_{11} + 2b_{12}k_2 + 3b_{13}k_2^2 = c_{11} + 2c_{12}k_2 \\
 2b_{12} + 6b_{13}k_2 = 2c_{12} \\
 c_{10} + c_{11}k_3 + c_{12}k_3^2 = b_{20} + b_{21}k_3 + b_{22}k_3^2 + b_{23}k_3^3 \\
 c_{11}k_3 + 2c_{12}k_3 = b_{21} + 2b_{22}k_3 + 3b_{23}k_3^2 \\
 2c_{12} = 2b_{22} + 6b_{23}k_3 \\
 b_{20} + b_{21}k_4 + b_{22}k_4^2 + b_{23}k_4^3 = c_{20} + c_{21}k_4 + c_{22}k_4^2 \\
 b_{21} + 2b_{22}k_4 + 3b_{23}k_4^2 = c_{21} + 2c_{22}k_4 \\
 2b_{22} + 6b_{23}k_4 = 2c_{22} \\
 c_{20} + c_{21}k_5 + c_{22}k_5^2 = b_{30} + b_{31}k_5 + b_{32}k_5^2 + b_{33}k_5^3 \\
 c_{21} + 2c_{22}k_5 = b_{31} + 2b_{32}k_5 + 3b_{33}k_5^2 \\
 2c_{22} = 2b_{32} + 6b_{33}k_5 \\
 b_{30} + b_{31}k_6 + b_{32}k_6^2 + b_{33}k_6^3 = a_{20} + a_{21}k_6 \\
 b_{31} + 2b_{32}k_6 + 3b_{33}k_6^2 = a_{21} \\
 2b_{32} + 6b_{33}k_6 = 0
 \end{cases} \quad (3.18)$$

При збільшенні кількості радіусів модель викликає досить складні і громіздкі обчислення, крім того, в даній моделі не забезпечується вписування проектного варіанту в ті ж прямі.

На основі аналізу лінійної моделі Гавриленкова А. В. була отримана Корженевичем І. П. рекурентна евольвента модель плану [126], що описує ділянки, які містять скільки завгодно прямих і кривих різних напрямків (рис. 3.20). Модель дозволяє визначати евольвенту в окремих точках кругової і перехідної кривих при будь-якій їх кількості за досить простими рекурентними формулами:

$$\begin{aligned}
\mathcal{E}k_{n+1} &= \mathcal{E}k_n + \\
&+ \frac{1}{2} \left[(s - S_n - l_n)(s - S_n) + \frac{l_n^3}{3} \right] (k_{n+1} - k_n), \\
\mathcal{E}nk_n &= \mathcal{E}k_n + \frac{(s - S_n)^3}{6l_n} (k_{n+1} - k_n),
\end{aligned}
\tag{3.19}$$

де n – номер прямої або кругової кривої;

s – відстань від початкової точки;

k – кривизна окремих елементів;

S – ординати окремих точок;

l – довжини перехідних кривих..

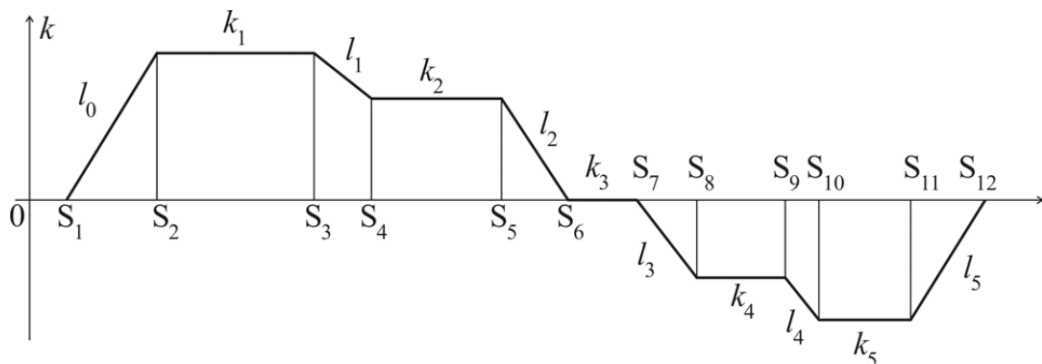


Рис. 3.20. Приклад ділянки

Результати розрахунків за цією моделлю перевірялися шляхом порівняння з традиційними розрахунками, а також з розрахунками за програмами Андріанова О. А., Бредюка В. Б., Бучкіна В. А. На основі порівняння зроблено висновки, що отримана Корженевичем І. П. евольвентна модель описує ділянки, які містять скільки завгодно прямих і кривих різних напрямків та дозволяє визначати евольвенту в окремих точках кругової і перехідної кривих [104].

3.4.2 Сплайнова модель

Можливості застосування сплайнових моделей. досліджував Корженевич І. П. [58]. Аналіз сплайнових моделей показав, що для математичного опису

плану існуючої колії найкращим чином підходять кубічні параметричні сплайни спеціального виду. Для простоти подальшої математичної обробки такий сплайн в діапазоні між точками i та $i + 1$ записується в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 Y(t) = \omega_i Y_{i+1} + \bar{\omega}_i Y_i + l_i^2 \left[\left(\omega_i^3 - \omega_i \right) \gamma_{i+1} + \right. \\
 \left. + \left(\bar{\omega}_i^3 - \bar{\omega}_i \right) \gamma_i \right], \\
 X(t) = \omega_i X_{i+1} + \bar{\omega}_i X_i + l_i^2 \left[\left(\omega_i^3 - \omega_i \right) \delta_{i+1} + \left(\bar{\omega}_i^3 - \bar{\omega}_i \right) \delta_i \right],
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

де X_i, Y_i — координати i -ї точки;

$$\omega = \frac{t - t_i}{l_i}; \tag{3.21}$$

$l_i = R(i, i + 1)$ — відстань між точками i ;

$i + 1$; $t_1 = 0$; $t_i = t_{i-1} + l_{i-1}$; δ_i, γ_i — коефіцієнти сплайна.

Коефіцієнти сплайна визначаються з умов рівності в точках колії координат, а також першої і другої похідних. Другі похідні в першій і останній точках приймаються рівними нулю.

Отримана тридіагональна матриця легко вирішується. В результаті план колії описується параметричним кубічним сплайном, що дозволяє визначати кривизну і знаходити вектори нормалей в окремих точках. Для цього необхідно знайти перші і другі похідні:

$$\begin{aligned}
 \dot{X} &= \frac{X_{i+1} - X_i}{l_i} + l_i \left[\left(3\omega_i^2 - 1 \right) \delta_{i+1} - \left(3\bar{\omega}_i^2 - 1 \right) \delta_i \right] \\
 \dot{Y} &= \frac{Y_{i+1} - Y_i}{l_i} + l_i \left[\left(3\omega_i^2 - 1 \right) \gamma_{i+1} - \left(3\bar{\omega}_i^2 - 1 \right) \gamma_i \right] \\
 \ddot{X} &= 6\omega_i \delta_{i+1} + 6\bar{\omega}_i \delta_i \\
 \ddot{Y} &= 6\omega_i \gamma_{i+1} + 6\bar{\omega}_i \gamma_i.
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Координати центру кривизни і саму кривизну можна знайти за відомими [127] формулами:

$$\begin{aligned} X_c &= X - \frac{\dot{Y}(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)}{\dot{X}\ddot{Y} - \dot{Y}\ddot{X}} \\ Y_c &= Y + \frac{\dot{X}(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)}{\dot{X}\ddot{Y} - \dot{Y}\ddot{X}} \\ k &= -\frac{\dot{X}\ddot{Y} - \dot{Y}\ddot{X}}{\sqrt{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^3}}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Знаючи коефіцієнти сплайна, можна також досить точно розраховувати кривизну, вектори нормалей і координати проміжних точок на плані існуючої ділянки колії, що дозволяє вирішувати ряд додаткових завдань при проектуванні виправки плану [58].

Розглянуті моделі стали основою розробки комп'ютерної програми для розрахунку виправки колії в плані, яка в подальшому отримала назву RWPlan [75]. Функціональність програми для використання її на машинах типу ВПР була перевірена експериментально. Для цього результати зйомки плану «методом стріл» і машиною були імпортовані до цієї програми (рис. 3.21 та рис. 3.22 відповідно) та по ним проведені розрахунки виправки колії в плані з встановленням раціональних параметрів.

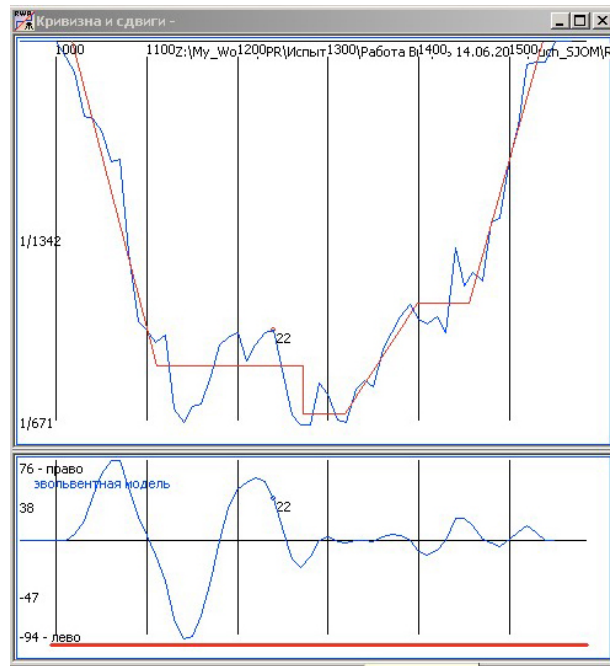


Рис. 3.21. Графіки розрахунку кривизни та зсувів для зйомки «методом стріл»

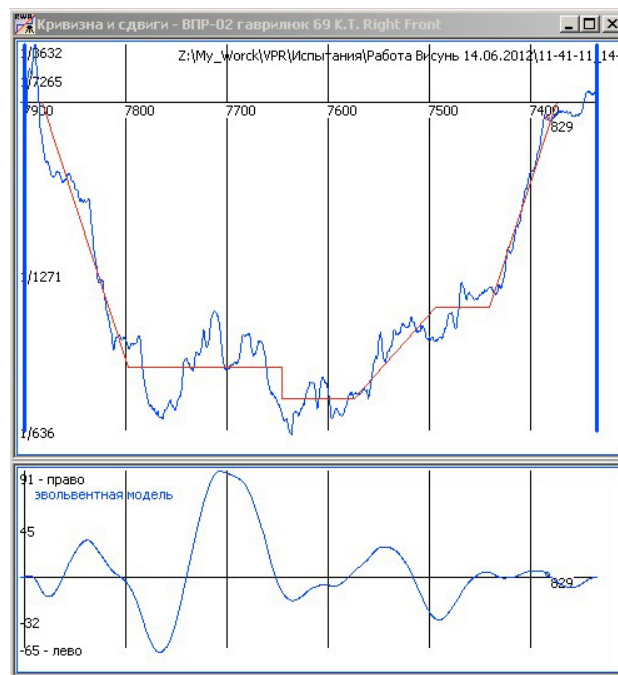


Рис. 3.22. Графіки розрахунку кривизни та зсувів для зйомки машиною типу ВПР

Для порівняльного аналізу дані розрахунків зведені до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Результати розрахунків по даним зйомки плану «методом стріл» та
машиною типу ВПР

Номер точки	Проектне рішення по даним зйомки плану «методом стріл»	Проектне рішення по даним зйомки плану машиною типу ВПР
-2	0	0
-1	-2	0
0	-9	-6
1	-16	-14
2	-22	-22
3	-29	-30
4	-36	-38
5	-43	-46
6	-49	-54
7	-56	-62
8	-63	-68
9	-63	-68
10	-63	-68
11	-63	-68
12	-63	-68
13	-63	-68
14	-63	-68
15	-63	-68
16	-63	-68
17	-63	-68
18	-63	-68
19	-63	-68
20	-63	-68
21	-63	-68

Номер точки	Проектне рішення по даним зйомки плану «методом стріл»	Проектне рішення по даним зйомки плану машиною типу ВПР
22	-63	-68
23	-63	-68
24	-63	-76
25	-72	-76
26	-72	-76
27	-72	-76
28	-72	-76
29	-72	-76
30	-69	-76
31	-66	-74
32	-64	-71
33	-61	-68
34	-58	-65
35	-56	-62
36	-53	-59
37	-51	-56
38	-51	-53
39	-51	-53
40	-51	-53
41	-51	-53
42	-51	-53
43	-48	-53
44	-42	-49
45	-35	-41
46	-29	-33
47	-23	-25
48	-17	-17

Номер точки	Проектне рішення по даним зйомки плану «методом стріл»	Проектне рішення по даним зйомки плану машиною типу ВПР
49	-11	-9
50	-4	0
51	0	0
52	0	0
53	0	0

Для наочності за результатами отриманих даних побудовано суміщений графік проектного рішення (рис. 3.23)

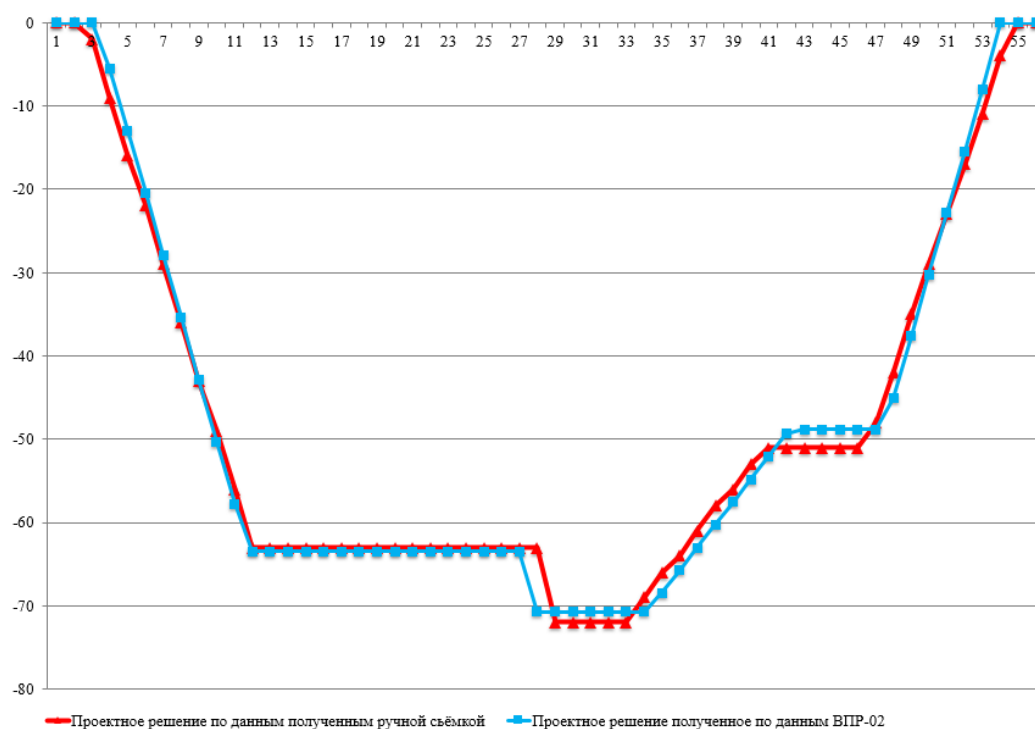


Рис. 3.23. Суміщений графік отриманих проектних рішень для зйомки «методом стріл» та машиною типу ВПР

Аналізуючи отримані результати розрахунків, можна стверджувати, що графіки кривизни ідентичні, отримані проектні рішення та зсуви не мають істотних розбіжностей та максимально наближені один до одного.

На підставі вищеприведеного дані зйомки існуючого положення колії в профілі та плані машиною ВПР можна вважати достовірними та з високим ступенем повторюваності. Текстові дані вихідного файлу з автоматизованої системи машини ВПР формують масив даних вихідного стану колії з достатнім ступенем відповідності для подальшого використання та вводу в розрахункову модель. Програма RWPlan по даним, отриманим з машини типу ВПР, з достатньою точністю вираховує виправку колії в плані, але не має модулів для розрахунку колії в профілі, тому надалі дана програма використовувалася для розрахунку виправки колії в плані. Надалі використовуємо ці дані як вихідні для вводу в математичну модель для розрахунку виправки профілю (Рис. 3.24).

L – відстань від задньої пінолі до передньої машини;
*L*₁ – відстань від задньої пінолі до органа зйомки машини;
*L*₂ – відстань від органа зйомки до передньої пінолі машини;
whileRot – довжина кола мірного колеса машини;
railCheck = 0, розрахункова рейка (ліва-0, права -1);
maxUp = 100, максимальна підйомка машиною за конструкцією;
*f*_(i) = [], масив виміряних стріл;
countCyclesLimit = 1000;
countCycles = 0;
upLimit = 0;
*hrw*_(i) = [], розрахункове підвищення наружної рейки;
*ma*_(i) = [], виміряне підвищення;

Рис. 3.24. Схема вихідних даних математичної моделі

В продовження автоматизації програмою RWPlan розрахунків плану колії був розроблений модуль для автоматизованого розрахунку виправки поздовжнього профілю для даних, отриманих з машини типу ВПР

3.5 Висновки до розділу 3

1. Доведено, що автоматизована виправка залізничної колії в плані може бути застосована тільки на базі використання «однохордової» системи, яка на цей час не має альтернативи. На підставі результатів дослідження виявлено, що невід'ємними складовими цієї системи є триточковий, чотириточковий, «згладжування» та прецизійний методи виправки колії, які функціонально взаємопов'язані, і дозволяють отримувати досить достовірні дані для автоматизації процесу із застосуванням вітчизняних ВПР.
2. Аналіз даних випробувань по зйомці плану показав, що автоматизована зйомка плану контрольно-вимірювальною системою машини ведеться асиметричною хордою, що дорівнює довжині машини. Стріли вигину ідентичні, а максимальна різниця між контрольною мануальною зйомкою «методом стріл» дорівнює 9 мм, що укладається в похибку механіки машини.
3. Аналіз даних випробувань по зйомці профілю показав, що автоматизована зйомка профілю контрольно вимірювальною системою машини ведеться хордою, що дорівнює довжині машини що унеможливорює врахування більш довгих змін профілю. Так можна оцінити лише стан колії за показниками яма/бугор по довжині бази машини, тобто може мати місце лише локальне виправлення нерівності в профілі по довжині бази машини.
4. Евольвентна та сплайнова моделі, які описують положення плану існуючої залізничної колії, дозволяють розрахувати виправку плану колії будь-якого абрису. Оскільки коефіцієнти сплайну дозволяють досить точно розраховувати кривизну, вектори нормалей і координати проміжних точок на плані існуючої ділянки колії, то ця модель більш гнучка для вирішення

ряду додаткових завдань при проектуванні виправки плану, однак потребує більшого часу для проведення розрахунків та високої кваліфікації інженерів, які їх виконують. Тому для виконання розрахунків по виправці колії машинами типу ВПР достатньою є евольвентна модель плану.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МАШИНІЗОВАНОЮ ВИПРАВКОЮ КОЛІЙ В ПОЗДОВЖНЬОМУ ПРОФІЛІ

4.1 Визначення раціональної математичної моделі для описування положення залізничної колії в профілі

До початку побудови моделі були розглянуті всі можливі варіанти запису нерівностей у вихідний файл, а саме: бугор (рис. 4.1), яма (рис. 4.2), нульове місце (рис. 4.3).

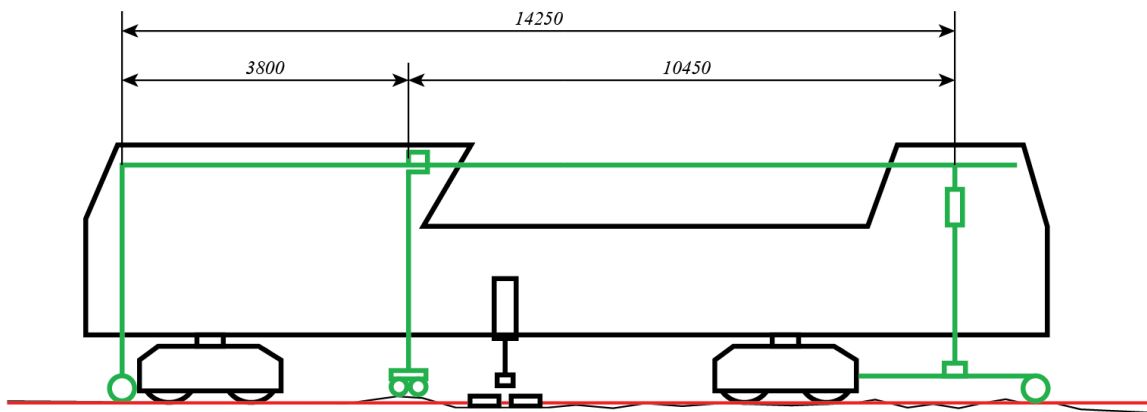


Рис. 4.1. Варіант запису нерівності – бугор

Варіанти запису у файл відповідно були такі: бугор – «плюсове значення», яма – «мінусове значення», нульове місце – «нульове значення».

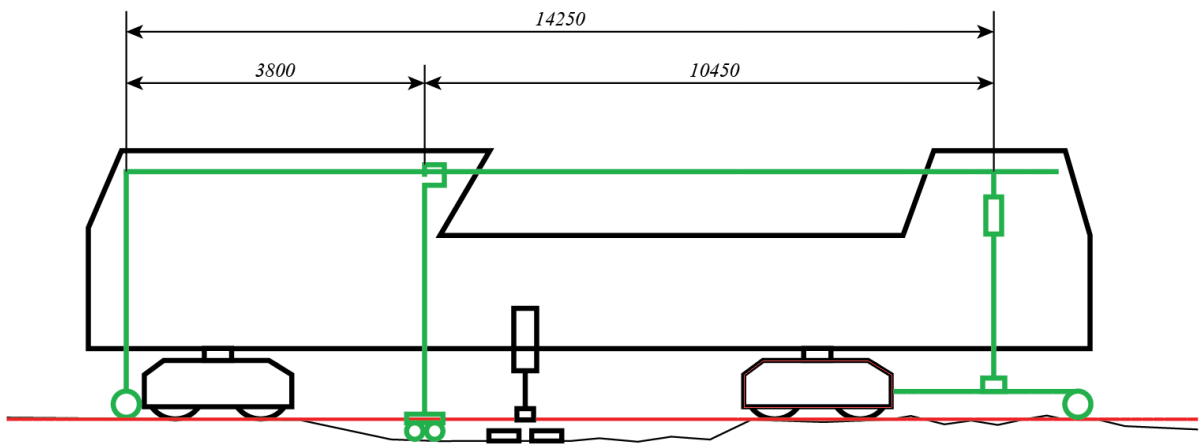


Рис. 4.2. Варіант запису нерівності – яма

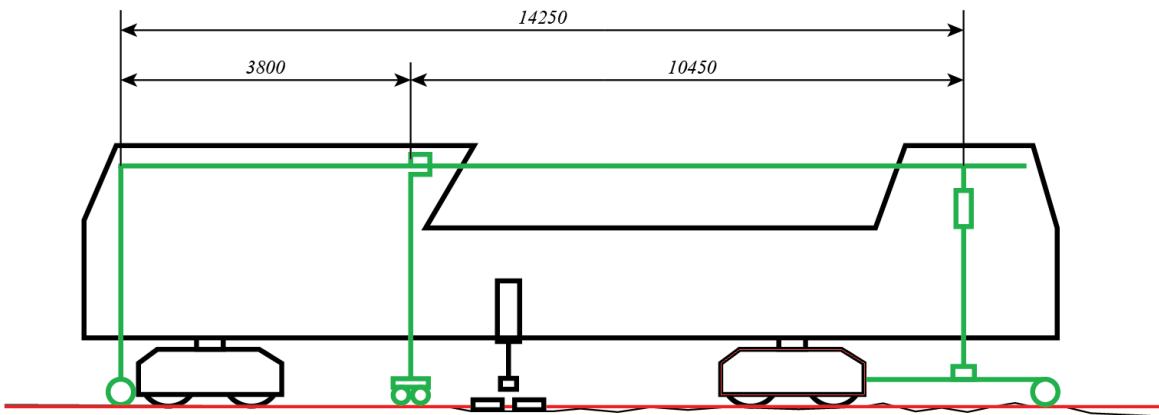


Рис. 4.3. Варіант запису нерівності – нульове місце

Оскільки геометрично-правильному положенню колії відповідає нульове значення стріли (рис. 4.3), а локальна нерівність «яма» (рис. 4.2) має мінусове значення і при виправці, у будь якого разі, колію необхідно буде підняти, як мінімум, до «нульового значення» (рис. 4.3), виникає перша умова для алгоритму виправки колії в профілі:

$$f_i \geq 0; \quad (4.1)$$

де f_i – значення вертикальної стріли в окремій точці масиву.

Таким чином першою задачею алгоритму виправки колії в профілі, є перебір масиву вхідних даних по профілю, та приведення до нуля всіх від'ємних значень масиву. У математичній моделі за f_i приймається точка зйомки стріли профілю по однієї нитці колії, лівої або правої по ходу руху, за вибором оператора машини, а весь масив приймаємо за $\{f\}$, тоді друга складова алгоритму моделі набуває вигляд функції **dataZero**($\{f\}$), де $\{f\}$ – вхідні дані для даної функції (рис. 4.4).

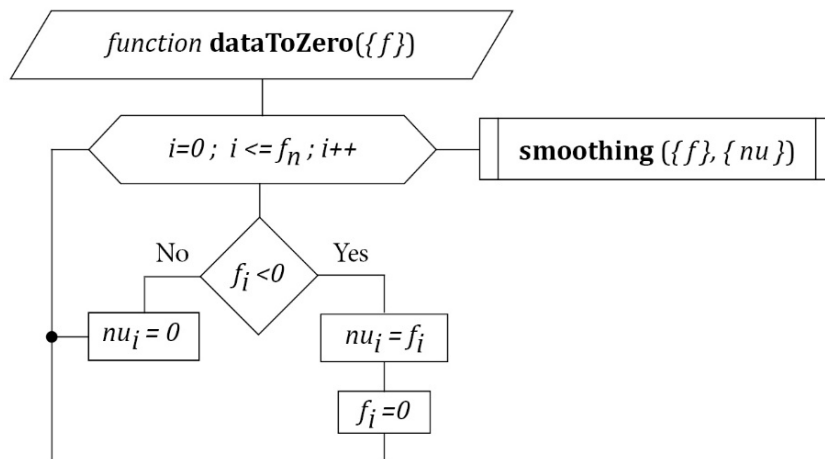


Рис. 4.4. Друга складова алгоритму

Як показано на рисунку 4.4 функція створює новий, не змінний надалі масив $\{nu\}$. Якщо вхідна стріла більше, або дорівнює нулю, то в нього заносять нуль. Надалі цей масив $\{nu\}$ використовується для розрахунку чистої підйомки. Під терміном «чиста підйомка» тут і далі мається на увазі різниця виміряної та розрахованої вертикальної стріли.

Для отриманого масиву даних f_i , необхідно знайти математичну модель яка зменшить різницю стріл для утворення найменших переломів між ухилами (екстремумами), але з урахуванням максимально-допустимої підйомки, яка задається оператором згідно з наявним в колії баластом, який є постійною та

необхідною складовою при виправці колії в профілі. В моделі кількість баласту (n_{bal}) розглядається як константа введена в систему оператором, та відповідає умові:

$$100 \geq n_{bal} = const; \quad (4.2)$$

Згідно з конструкцією машини підйомка не може перевищувати 100 міліметрів за один прохід машини. Якщо, оператор встановить кількість баласту більше за зазначену величину, то буде прийнята величина 100 міліметрів.

Як відомо, плавність кривої характеризується різницею суміжних стріл $f_i - f_{i+1}$. Чим менше різниця – тим плавніше крива. Звідси виникла третя умова для алгоритму виправки колії в профілі:

$$f_i - f_{i+1} \rightarrow min; \quad (4.3)$$

де f_i – значення вертикальної стріли в окремій точці масиву;

f_{i+1} – значення вертикальної стріли в наступній точці масиву.

Три основні умови алгоритму виправки колії в профілі можна об'єднати в одну, оскільки всі вони є основними, вхідними умовами для виконання розрахунків:

$$\left. \begin{array}{l} f_i \geq 0 \\ 100 \geq n_{bal} = const \\ f_i - f_{i+1} \rightarrow min \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

Оскільки механіка машини дозволяє вести зйомку профілю вертикальними стрілами, то першою розглянутою моделлю для опису геометрії колії в вертикальній площині була модель побудована методом евольвент за принципом розрахунку виправки кривої у плані. Отримані з машини вихідні дані прийняті як вертикальна кривизна колії, з наступним розрахунком виправки кривої методом «евольвент» за основною залежністю проектних стріл від натурних стріл та зсувів за формулою (4.5):

$$F_n = f_n + e_n - \frac{e_{n+1} - e_{n-1}}{2}; \quad (4.5)$$

де F_n – проектна стріла в точці n ;

f_n – натурна стріла в точці n ;

e_n – зсув в точці n ;

e_{n+1}, e_{n-1} – зсув в суміжних точках;

За формулою 3.5. було проведено розрахунок, графік отриманих стріл вертикальної кривої та результати розрахунку методом евольвент наведено на рисунку 3.5.

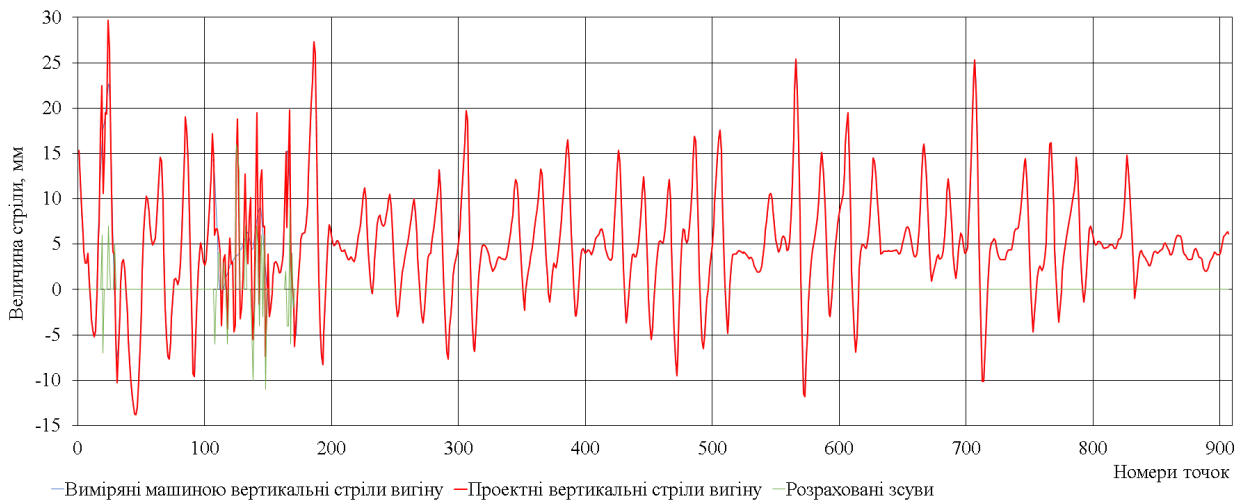


Рис. 4.5. Розрахунок зсувів вертикальних стріл вигину методом евольвент

Як впливає з рисунку 4.5, розраховані за формулою 4.5 проектні вертикальними стріли (позначені на рисунку червоним кольором) практично повністю співпадають з виміряними вертикальними стрілами (позначені на рисунку синім кольором), а зсуви (позначені на рисунку зеленим кольором) практично відсутні. Звідси можна зробити висновок, що отримати проектну модель виміряних вертикальних стріл за допомогою метода евольвент неможливо. Метод евольвент може використовуватися лише для розрахунків кривих постійної кривизни, а отримані дані в вертикальній площині не є такими, а лише відображають локальні нерівності по базі машини. Тому ця математична модель була відкинута.

Наступні розглянуті моделі базувались на методиці опису геометрії кривих за допомогою поліномів згладжування. Поліном забезпечує плавність між суміжними точками і дає змогу вирішити задачу з урахуванням вищевказаних граничних умов (4.4). Розглядалось декілька варіантів поліномів. Поліноми які використовувались у пошуку алгоритму виправки відрізнялись кількістю точок через які вони визначались, та виду математичної функції, яка їх апроксимує.

4.1.1. Згладжування методом ітерацій по п'яти членам ряду

Пошуки оптимальних поліномів «згладжування» кривих в плані ведуться давно. Одне з таких рішень було запропоновано Босовим А. А.. В його вишукуванні [128] було встановлено, що «згладжування» методом «ітерацій» по п'яти членам ряду достатньо ефективно, та запропоновано використовувати у розрахунках з виправки кривої поліном згладжування наступного виду:

$$\left. \begin{aligned} \bar{y}_0 &= \frac{31 \cdot y_0 + 9 \cdot y_1 - 3 \cdot y_2 - 5 \cdot y_3 + 3 \cdot y_5}{35}; \\ \bar{y}_1 &= \frac{9 \cdot y_1 + 13 \cdot y_2 + 12 \cdot y_3 + 6 \cdot y_4 - 5 \cdot y_5}{35}; \\ \bar{y}_i &= \frac{17y_i + 12 \cdot (y_{i-1} + y_{i+1}) - 3 \cdot (y_{i-2} + y_{i+2})}{35} \quad | 2 \leq i \leq n-2; \\ \bar{y}_{n-1} &= \frac{4 \cdot y_n + 3 \cdot y_{n-1} + 2 \cdot y_{n-2} + y_{n-3}}{10}; \\ \bar{y}_n &= \frac{3 \cdot y_n + 2 \cdot y_{n-1} + y_{n-2} + y_{n-4}}{5}. \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

де n – номер останньої точки (ординати y_i) [128].

Формули (4.6) були прийняті як перший варіант у пошуку потрібного поліному для вирішення задачі виправки нерівностей на поздовжньому профілі. Розрахунок складався з контрольної кількості ітерацій поліному за вихідними даними отриманими в експерименті. Фрагмент результату розрахунку наведено на рисунку 4.6. Повний варіант розрахунку наведено у додатку Г.

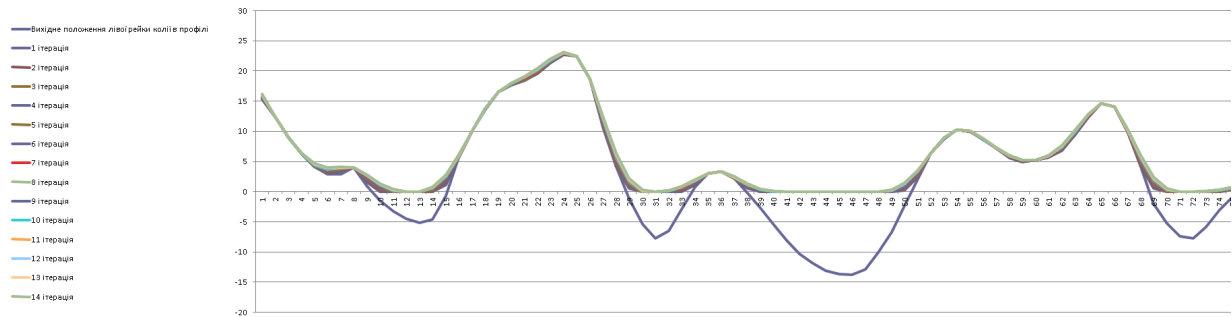


Рис. 4.6. Фрагмент результату розрахунку поліномом по п'яти членам ряду за умовами 4.6

Прийнято, що «згладжування» даних експерименту є спеціальною операцією усереднення, яка за допомогою інтерполяційних многочленів за заданим значенням y_i та кількох прилеглих значень $\dots, y_{i-1}, y_i, y_{i+1}, \dots$ забезпечує отримання «уточненого» $\bar{y}_i$.

Прикладами алгоритмів лінійного згладжування є:

- Лінійне згладжування по трьох точках
- Лінійне згладжування по п'яти точкам
- Нелінійне згладжування по сьомих точках [129]

4.1.2. Алгоритм лінійного згладжування по трьох точках

Лінійне згладжування по трьох точках виконувалось за допомогою наступних формул:

$$\left. \begin{aligned} \bar{y}_0 &= \frac{5 \cdot y_0 + 2 \cdot y_1 - y_2}{6}; \\ \bar{y}_i &= \frac{y_{i-1} + y_i - y_{i+1}}{3} \mid 1 \leq i \leq n-1; \\ \bar{y}_n &= \frac{5 \cdot y_n + 2 \cdot y_{n-1} - y_{n-2}}{6}. \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

де n – номер останньої точки (ординати y_i) [129].

Фрагмент результату розрахунку лінійного згладжування по трьох точках наведено на рисунку 4.7. Повний варіант розрахунку наведено у додатку Д.

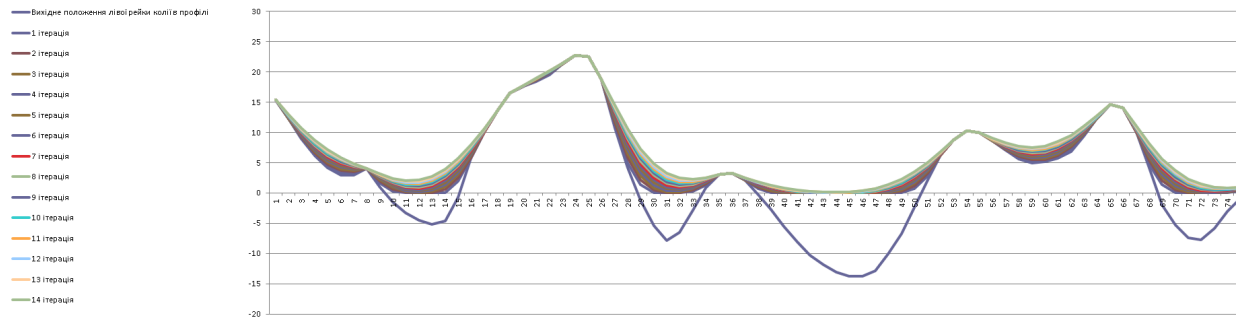


Рис. 4.7. Фрагмент результату розрахунку поліномом по трьох членах ряду за умовами 4.7

4.1.3. Алгоритм лінійного згладжування по п'яти точках

Лінійне згладжування по п'яти точкам виконувалось за допомогою наступних формул:

$$\left. \begin{aligned} \bar{y}_0 &= \frac{3 \cdot y_0 + 2 \cdot y_1 + y_2 - y_4}{5}; \\ \bar{y}_1 &= \frac{4 \cdot y_0 + 3 \cdot y_1 + 2 \cdot y_2 + y_3}{10}; \\ \bar{y}_i &= \frac{y_{i-2} + y_{i-1} + y_i + y_{i+1} + y_{i+2}}{5} \quad | 2 \leq i \leq n-2; \\ \bar{y}_{n-1} &= \frac{4 \cdot y_n + 3 \cdot y_{n-1} + 2 \cdot y_{n-2} + y_{n-3}}{10}; \\ \bar{y}_n &= \frac{3 \cdot y_n + 2 \cdot y_{n-1} + y_{n-2} + y_{n-4}}{5}. \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

де n – номер останньої точки (ординати y_i) [129].

Фрагмент результату розрахунку лінійного згладжування по п'яти точкам наведено на рисунку 4.8. Повний варіант розрахунку наведено у додатку Е

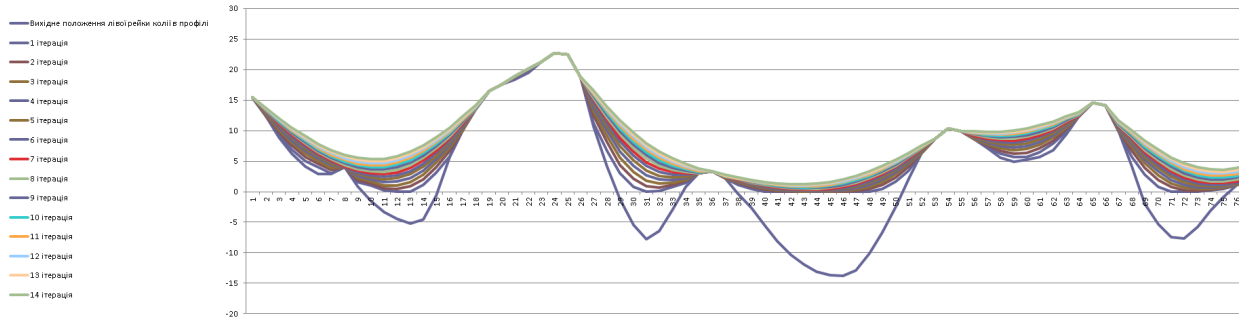


Рис. 4.8. Фрагмент результату розрахунку поліномом по п'яти членах ряду за умовами 4.8

4.1.4. Алгоритм лінійного згладжування по семи точках

Лінійне згладжування по семи точках виконувалось за допомогою наступних формул:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{y}_0 &= \frac{39 \cdot y_0 + 8 \cdot y_1 - 4 \cdot (y_2 + y_3 - y_4) + y_5 - 2 \cdot y_6}{42}; \\
 \bar{y}_1 &= \frac{8 \cdot y_0 + 19 \cdot y_1 + 16 \cdot y_2 + 6 \cdot y_3 - 4 \cdot y_4 - 7 \cdot y_5 + 4 \cdot y_6}{42}; \\
 \bar{y}_2 &= \frac{-4 \cdot y_0 + 16 \cdot y_1 + 19 \cdot y_2 + 12 \cdot y_3 - 2 \cdot y_4 - 4 \cdot y_5 + y_6}{42}; \\
 \bar{y}_i &= \frac{7 \cdot y_i + 6 \cdot (y_{i+1} + y_{i-1}) + 3 \cdot (y_{i+2} + y_{i-2}) - 2 \cdot (y_{i+3} + y_{i-3})}{21} \quad | 3 \leq i \leq n-3; \\
 \bar{y}_{n-2} &= \frac{-4 \cdot y_n + 16 \cdot y_{n-1} + 19 \cdot y_{n-2} + 12 \cdot y_{n-3} + 2 \cdot y_{n-4} - 4 \cdot y_{n-5} + y_{n-6}}{42}; \\
 \bar{y}_{n-1} &= \frac{8 \cdot y_n + 19 \cdot y_{n-1} + 16 \cdot y_{n-2} + 6 \cdot y_{n-3} - 4 \cdot y_{n-4} - 7 \cdot y_{n-5} + 4 \cdot y_{n-6}}{42}; \\
 \bar{y}_n &= \frac{39 \cdot y_n + 8 \cdot y_{n-1} - 4 \cdot y_{n-2} - 4 \cdot y_{n-3} + y_{n-4} + 4 \cdot y_{n-5} - 2 \cdot y_{n-6}}{42}.
 \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

де n – номер останньої точки (ординати y_i) [129].

Фрагмент результату розрахунку лінійного згладжування по семи точках наведено на рисунку 4.9. Повний варіант розрахунку наведено у додатку Є.

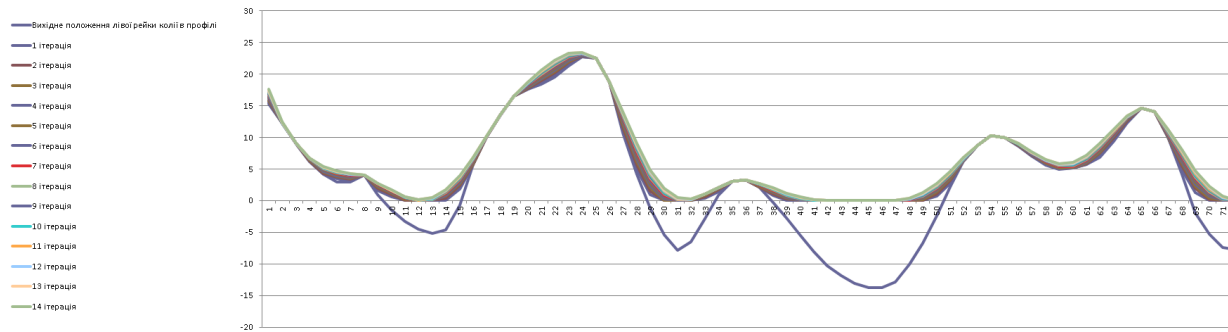


Рис. 4.9. Фрагмент результату розрахунку поліномом по семи членах ряду за умовами 4.9

Всі розглянуті поліноми забезпечили необхідну плавність між суміжними точками з урахуванням вищевказаних граничних умов (4.4). Для обрання більш оптимального поліному результати розрахунків по всім моделям аналізувались та їм була надана оцінка адекватності, про що докладно наведено в наступному розділі.

4.2 Оцінка адекватності обраної математичної моделі, яка описує положення залізничної колії в профілі

Для встановлення найбільш раціональної математичної моделі, яка описує положення залізничної колії в профілі та оцінки її адекватності, обрано коефіцієнт згладжування, який розраховується за формулою:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n f_3(i)}{n}; \quad (4.10)$$

де, k — коефіцієнт згладжування;

$f_3(i)$ — величина «згладженої» вертикальної стріли в i точці;

n — кількість точок зйомки.

Результати розрахунку коефіцієнтів для кожної з обраних моделей наведені у таблиці 4.1

Таблиця 4.1.

Результати розрахунку коефіцієнту згладжування

Назва математичного методу	Кількість точок зйомки n , шт.	Сума «згладжених» вертикальних стріл $\sum_{i=1}^n f_3(i)$, мм	Коефіцієнт згладжування k
По п'яти точках запропонований Босовим А. А.	907	5268,33	5,81
Лінійне згладжування по трьох точках	907	6096,79	6,72
Лінійне згладжування по п'яти точкам	907	7300,11	8,05
Лінійне згладжування по семи точках	907	5694,83	6,27

Функція з максимальним коефіцієнтом згладжування є оптимальною та найбільш адекватною для розрахунку «згладжування» положення залізничної колії в профілі. Для порівняння результатів розрахунків побудована гістограма (рис. 4.10)

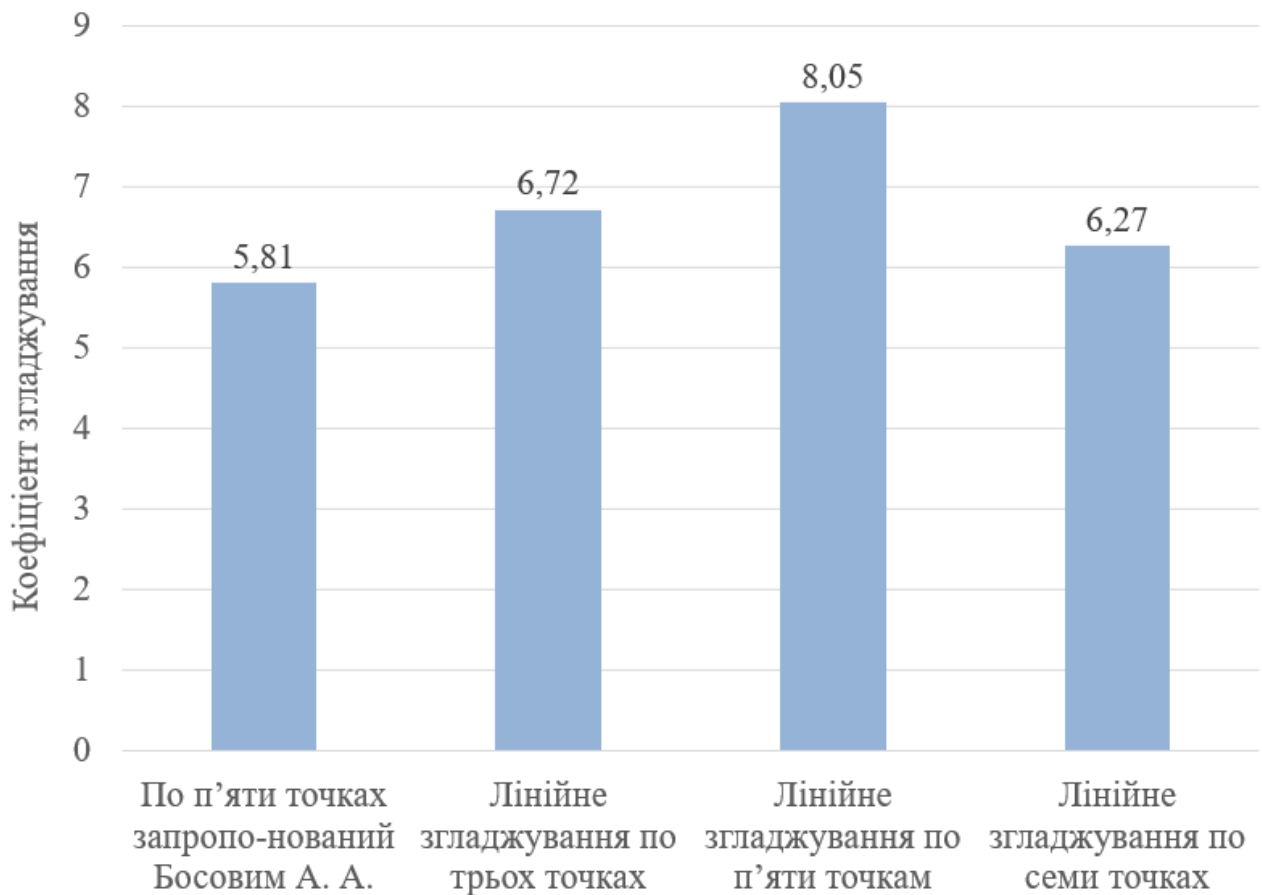


Рис. 4.10. Гістограма порівняння результатів розрахунків коефіцієнту згладжування для чотирьох математичних методів

При контрольній кількості ітерацій з наведеного вище сімейства функцій (4.6—4.9) найбільший коефіцієнт згладжування 8,05 отримано при лінійному згладжуванні по п'яти точках за системою формул (4.8). Застосування такого поліному забезпечило більш плавне положення рейкової колії, ніж інші алгоритми згладжування. Тому для подальшого моделювання був обраний лінійний поліномом по п'яти членах ряду за системою формул (4.8).

4.3 Розробка алгоритмів визначення величини підйомок колії у поздовжньому профілі з урахуванням їх можливих обмежень

Обраний вище поліном було введено у алгоритм розрахунку виправки колії в профілі у вигляді функції **smoothing**($\{f\}, \{nu\}$), де $\{f\}$ – вхідний масив вимірних стріл де від’ємні стріли вже приведені до нульового значення, $\{nu\}$ – вхідний, не змінний масив, який складається з від’ємних значень стріл масиву $\{f\}$, та нулів у місцях де їх значення були більше нуля.

Основною складовою функції є поліном згладжування, позначений на рисунку 4.12, як *Formula* (4.8)

Для забезпечення третьої умови алгоритму (4.3), а саме – забезпечення плавності кривої, була введена умова (4.11), де розрахована «згладжена» стріла nf_i не повинна бути меншою за виміряну f_i .

$$f_i > nf_i ; \quad (4.11)$$

Ця умова забезпечила згладжування кривої між ухилами профілю (екстремумами), та унеможливила зменшення розрахованої стріли, якщо сусідні стріли менші за неї (рис. 4.11).

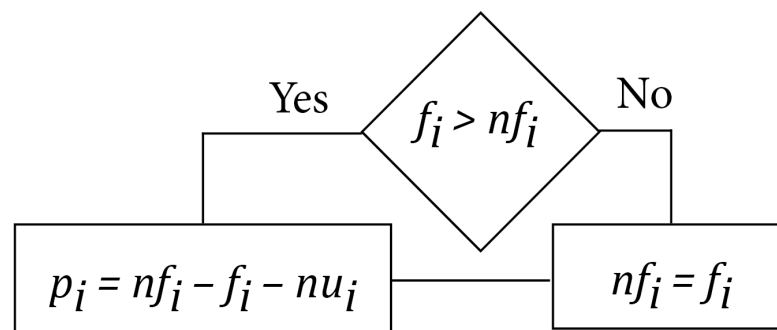


Рис. 4.11. Умова для забезпечення плавності кривої

Як можна побачити з рисунку 4.11 до алгоритму було включено розрахунок масиву «чистих» підйомок p_i , за формулою 4.11, який використовувався для подальшого контролю максимальної підйомки.

$$p_i = nf_i - f_i - nu_i; \quad (4.11)$$

Поліном, разом з умовою (4.11), було включено до «циклу», в якому послідовно «перебираються» всі складові вхідного масиву $\{f\}$ (рис. 4.12).

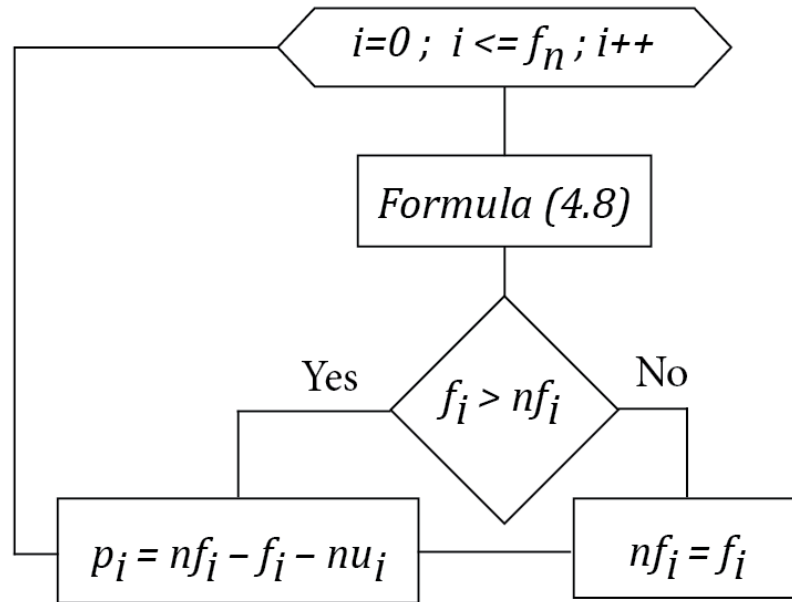


Рис. 4.12. Поліном згладжування у циклі з умовою (4.11)

Однієї ітерації циклу згладжування недостатньо щоб отримати динамічно плавну криву, тому передбачено декілька ітерацій циклу при не перевищенні максимальної кількості яку задає оператор (змінна *countCyclesLimit*).

Щоб згладжені стріли не перевищили наведених вище умов (4.2) з урахуванням існуючого та розрахованого підвищення, після кожної ітерації циклу отримані «чисті підйоми» перевіряються функцією **checkingUp**($\{p\}$) (рис. 4.14), де p_i є вхідними параметрами функції, а саме – масивом розрахованих «чистих» підйомок за поточну ітерацію, що докладно описано у розділі 4.5. Результат цієї функції записується у змінну *upLimit*, яка перевіряється простою умовою на існування. Якщо за цією умовою отримано негативний результат, то наступним кроком перевіряється умова на виконання максимальної кількості ітерацій (змінна *countCyclesLimit*) заданою оператором (4.12):

$$countCycles = countCyclesLimit ; \quad (4.12)$$

Якщо умова за максимальною кількістю ітерацій має негативний результат, то до змінної *countCycles* додається одиниця і знову викликається функція **smoothing**(*{f}*,*{nu}*), в яку, у якості входних параметрів, передається масив «згладжених» стріл *{f}* з попереднього етапу роботи цієї функції, та той самий, не змінний масив *{nu}* – який складається з від’ємних значень першого входження масиву стріл *{f}*, та нулів у місцях де їх значення були більше нуля. Якщо умова за максимальною кількістю ітерацій має позитивний результат, то цикл та робота функції завершуються, а розраховані дані передаються до наступної функції **checkUpLimit**(*{nf}*,*{p}*) в яку, у якості входних параметрів передається масив «згладжених» стріл *{nf}*, та масив розрахованих «чистих» підйомок за останню ітерацію *{p}*. Функція **checkUpLimit** перевіряє достатність підйомки у випадках, коли розрахованої підйомки не достатньо для забезпечення розрахункового підвищення, докладніше ця функція описана нижче.

У разі позитивного результату за умовою перевірки змінної *upLimit*, наступним кроком перевіряється умова дотримання мінімальної кількості циклів, яка не повинна бути меншою за п’ять одиниць (4.13), оскільки менша кількість ітерацій для даного алгоритму не має сенсу, про що докладно описано вище.

$$countCycles > 5 ; \quad (4.13)$$

Якщо ця умова виконується, то цикл та робота функції також завершується, а розраховані дані передаються до наступної функції **checkUpLimit**(*{nf}*,*{p}*). Якщо умова не виконується, то потрібно збільшувати підйомку або змінювати розрахункову рейку.

Схематично повна функція з вищенаведеним поліном для розрахунку «згладжування» масиву отриманих вертикальних стріл положення колії *{f}* , та з усіма умовами зображено на рисунку 4.13.

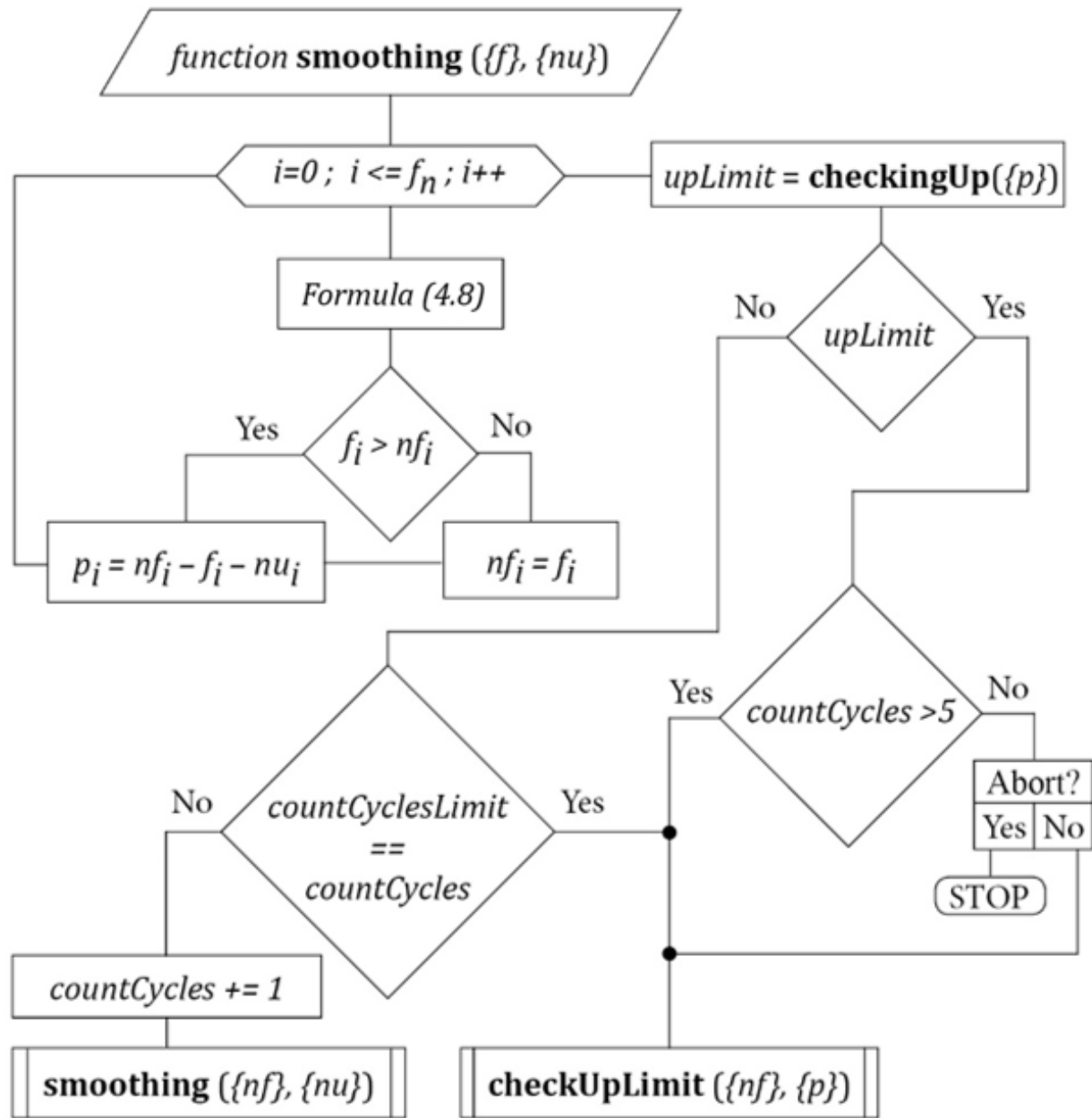


Рис. 4.13. Блок розрахунку «згладжування» масиву отриманих вертикальних стріл положення колії $\{f\}$

На рис. 4.13 позначено:

$\{p\}$ – вихідний масив чистих підйомок;

$\{nf\}$ – вихідний масив згладжених стріл;

$countCycles$ – кількості циклів розрахунку.

countCyclesLimit – максимальна кількість циклів.

upLimit – умовний перемикач, отриманий від функції *checkingUp*($\{p\}$) (детальніше описано нижче).

checkingUpLimit($\{nf\}, \{p\}$) – функція перевірки достатності підйомки для забезпечення розрахованого підвищення (детальніше описано нижче).

Таким чином, за будь яким позитивним результатом розрахунку функції, формується масив «згладжених» стріл $\{nf\}$, та масив підйомок у кожній розрахунковій точці $\{p\}$, які передаються до наступної функції **checkUpLimit**.

Після кожної ітерації циклу згладжування, до нової його ітерації, для забезпечення наведених вище умов (4.2) з урахуванням існуючого та розрахованого підвищення, функцією **checkingUp** перевіряються отриманий від функції «згладжування» (**smoothing**) – масив «чистих» підйомок.

Для контролю результату виконання умов цієї функції (**checkingUp**) до неї було введено умовний лічильник (змінна *upLimit*), який прирівнюється нулю при кожному вході у функцію. Після завершення роботи функції (**checkingUp**) значення цього лічильника повертається на місце виклику функції, що інтерпретується на місці виклику функції (рис.3.15) як позитивний або негативний (нульове значення) результат.

Для перевірки кожного елементу масиву всі умови функції «загорнуто» до циклу (рис. 4.14).

Для виконання умови (4.2), а саме – $100 \geq n_{bal} = const$, до алгоритму була додана константа ($maxUp = 100mm$), яка забезпечує обмеження максимальної підйомки механізму машини. Нарівні з цим є можливість, виходячи з наявної кількості баласту, вводити максимальну величину підйомки колії (F_{max}). Мінімально-допустима величина підйомки (F_{min}) дорівнює 20 мм і відповідає технічним можливостям машини. Виходячи з вищенаведеного у розрахунок введена перевірна величина, яка є половиною різниці максимально-допустимої

та мінімальної підйомки ($\frac{F_{max}-F_{min}}{2}$), та повинна бути меншою за розраховану «чисту підйомку» у кожній розрахунковій точці (4.14).

$$p[i] \geq \frac{F_{max}-F_{min}}{2}; \quad (4.14)$$

де $p[i]$ – підйомка в розрахунковій точці, мм.

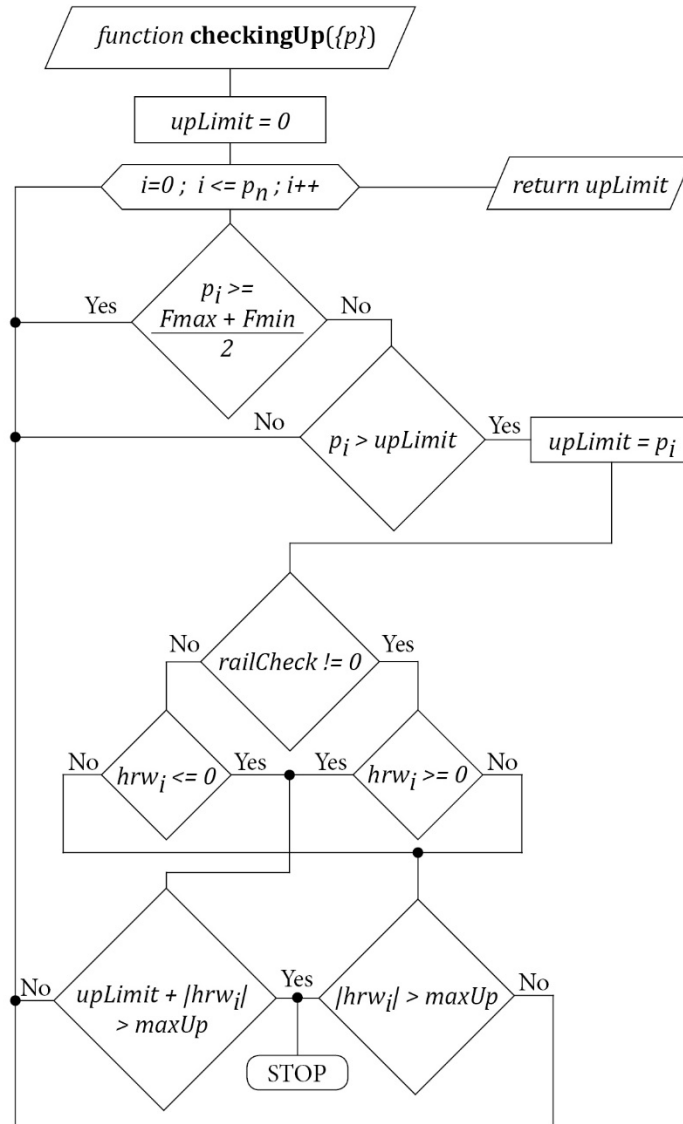


Рис. 4.14. Блок перевірки обмежень з урахуванням підвищення

Якщо результат перевірки умови 4.14 негативний, то цикл переходить до наступного елементу масиву. Якщо результат позитивний, то наступним кроком є

перевірка умови перевищення «чистої» підйомки над умовним лічильником *upLimit* (4.15).

$$p[i] > upLimit ; \quad (4.15)$$

Якщо результат перевірки цієї умови (4.15) негативний, то цикл переходить до наступного елементу масиву. Якщо результат позитивний, то умовному лічильнику *upLimit* присвоюється значення «чистої» підйомки, та переходить до наступної умови.

Наступним кроком став розрахунок виправки в профілі другої рейкової нитки. Було обрано найпростіший варіант виправки другої рейки – постановка у розрахункове положення через маятникову систему машини (рис. 4.15).

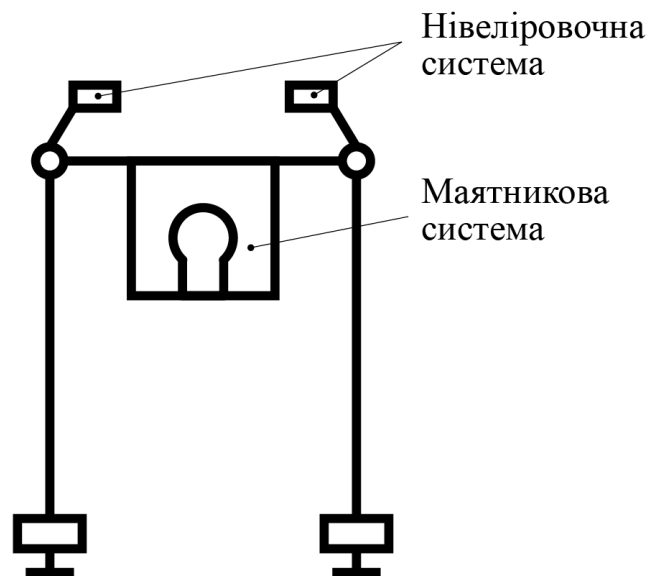


Рис. 4.15. Схема маятничкової системи машини типу ВПР

Таким чином, технологія роботи машини представлена наступним алгоритмом:

- Машина підіймає рейко-шпальну решітку на розрахункову величину згідно розрахунку наведеного у розділі 4.4 для розрахункової рейки обраної оператором.

- Машина встановлює другу рейку згідно розрахункових даних на підвищення зовнішньої рейки.
- Маятникова система машини, як наведено вище, показала на випробуваннях гарні результати по повторюваності. Дані для роботи маятникової системи беруться з розрахунку підвищення, який виконується в програмі «RWPlan» [3], та складає масив даних $\{hrw\}$ для кожної точки виправки, у тому числі у відводі підвищення. Оскільки, згідно своїх характеристик, машина не може підіймати РШР на висоту більшу ніж 100 мм, виникає необхідність перевірити масив підйомок у кожній розрахунковій точці p_i для забезпечення в неї розрахованого підвищення hrw_i .
- Для перевірки забезпечення розрахованого підвищення виникає потреба побудувати розрахункову модель яка опише вертикальне положення РШР з урахуванням можливостей машини.

Для введення перевірки можливості забезпечення проектного підвищення у математичну модель було включено п'ять можливих випадків.

Перша гранична умова. Чиста підйомка p_i у розрахунковій точці більше нуля, розрахункове підвищення hrw_i менше за виміряне ma_i , рис. 4.16.



Рис. 4.16. Перша гранична умова (на цьому і подальших рисунках сірим сполосним кольором показано існуюче положення рейко-шпальної решітки, зеленим контуром – розрахункове)

Друга гранична умова. Чиста підйомка p_i у розрахунковій точці дорівнює нулю, розрахункове підвищення hrw_i менше за виміряне ta_i , рис. 4.17.

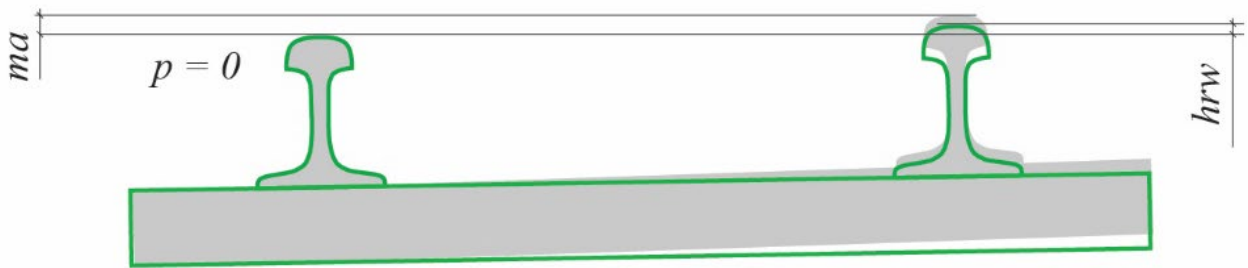


Рис. 4.17. Друга гранична умова

Третя гранична умова. Чиста підйомка p_i у розрахунковій точці більше нуля, розрахункове підвищення hrw_i дорівнює нулю, виміряне підвищення ta_i більше нуля, рис. 4.18.

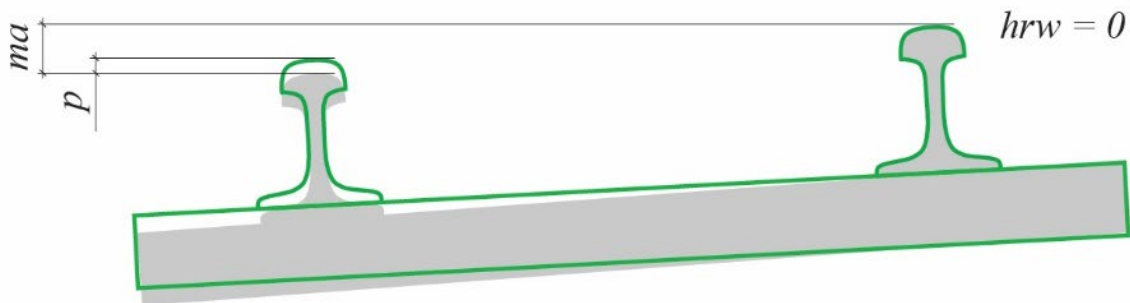


Рис. 4.18. Третя гранична умова

Четверта гранична умова. Чиста підйомка p_i у розрахунковій точці більше нуля, розрахункове підвищення hrw_i більше виміряного підвищення ta_i , рис. 4.19.

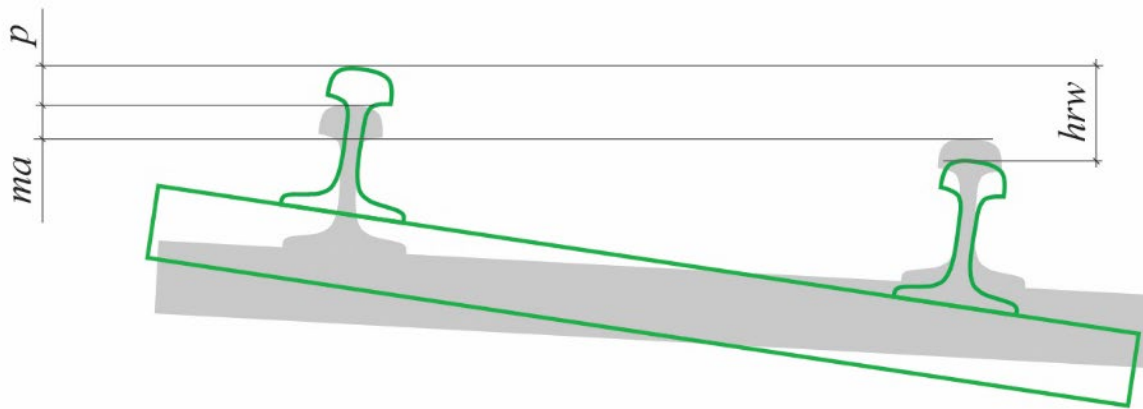


Рис. 4.19. Четверта гранична умова

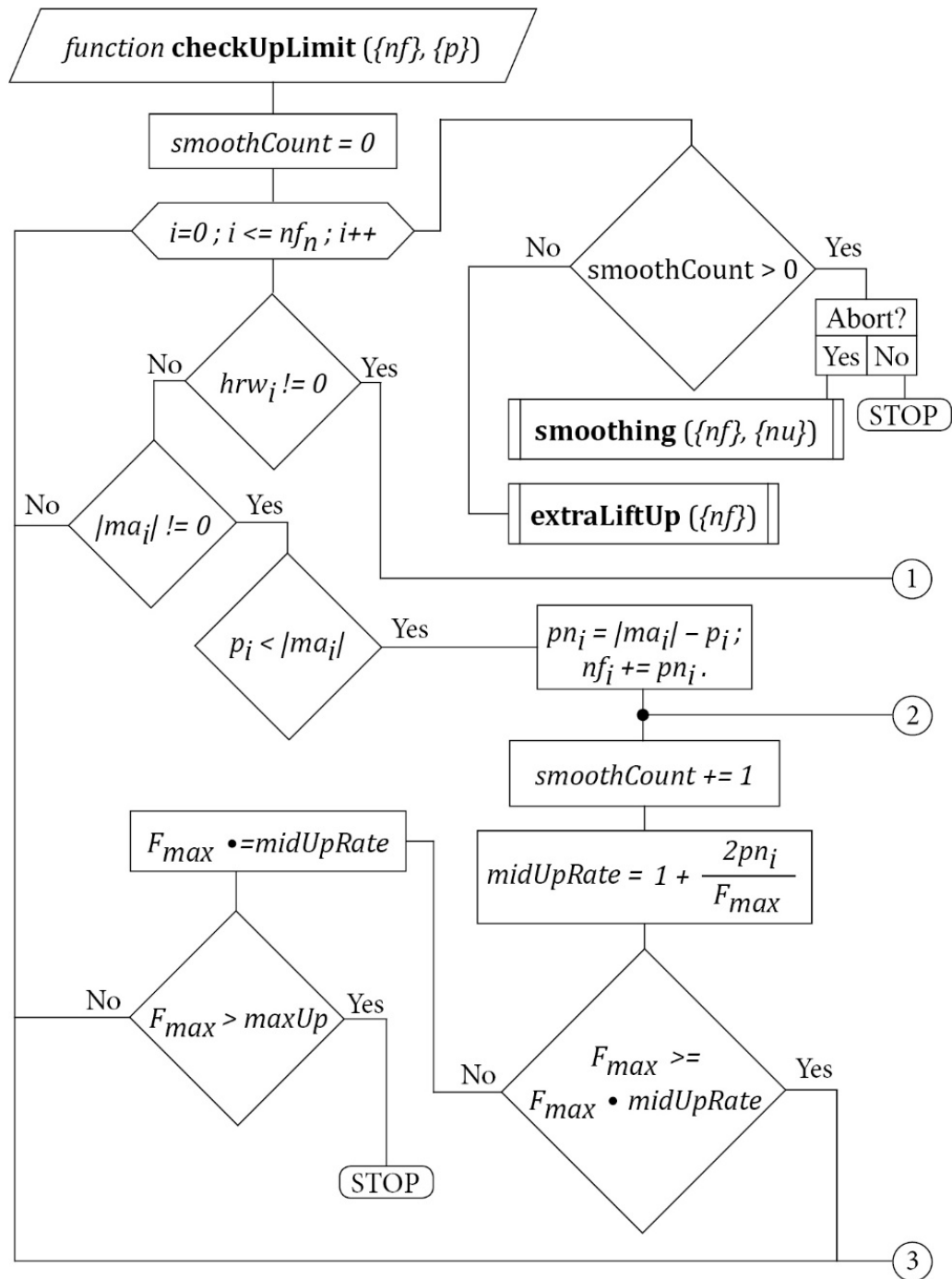
П'ята гранична умова. Чиста підйомка p_i у розрахунковій точці більше нуля, розрахункове підвищення hrw_i більше нуля, вимірне підвищення ma_i дорівнює нулю, рис. 4.20.



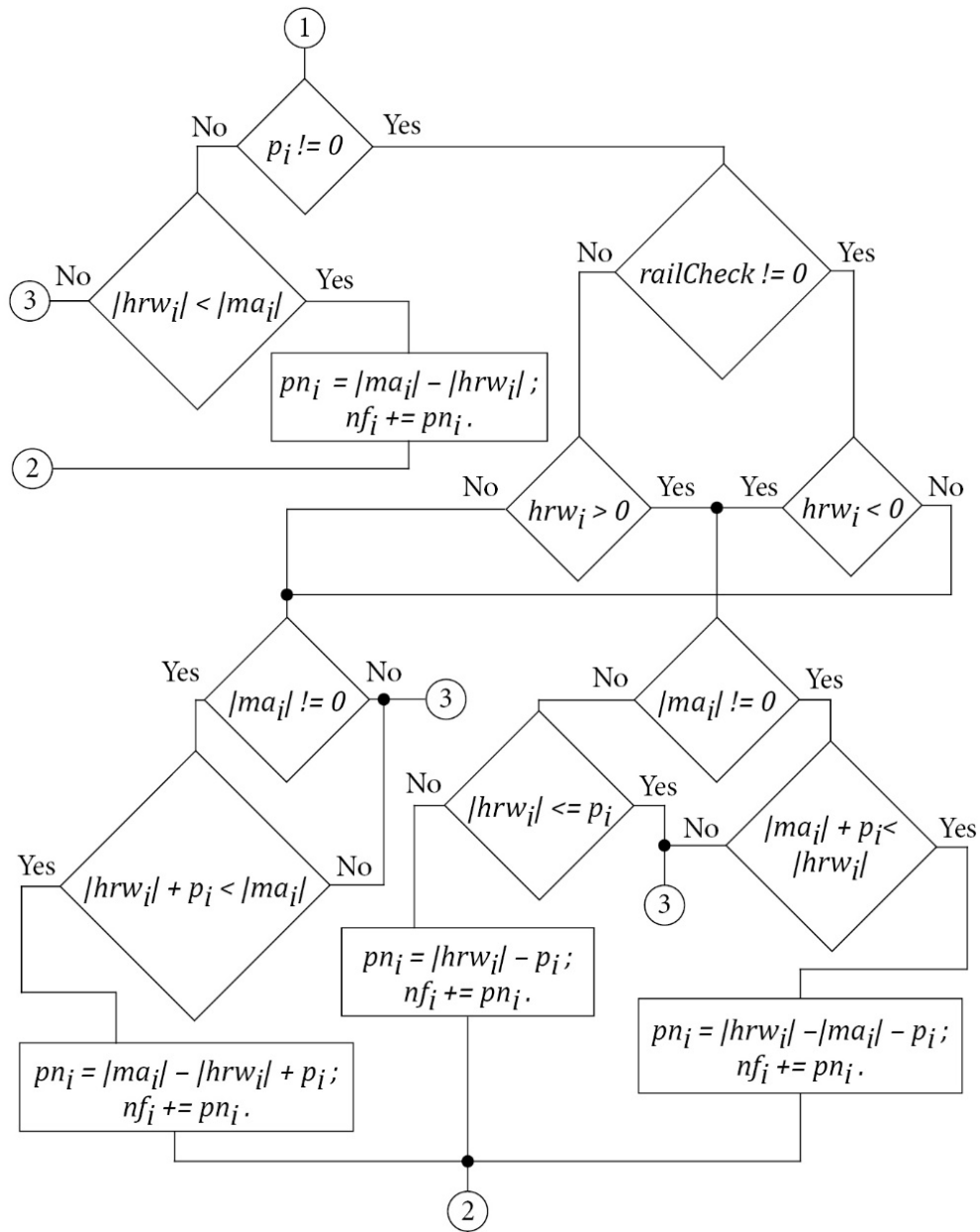
Рис. 4.20. П'ята гранична умова

Рис. 4.16–4.20 наведені для лівої розрахункової рейки, такі самі умови чинні і для правої рейки.

Для урахування всіх наведених граничних умов в математичній моделі була врахована функція перевірки достатності підйомки для забезпечення розрахованого підвищення **checkingUpLimit**($\{nf\}, \{p\}$) (рис. 4.21).

Рис. 4.21. Алгоритм роботи функції **checkingUpLimit** (Частина 1)

Якщо вище зазначені умови порушуються, то функція **checkingUpLimit**(**{nf}**, **{p}**) вносить корегування в розрахунок та повертає масив даних **{nf}** на повторне згладжування до функції **smoothing**(**{nf}**, **{nu}**), після чого цикл перевірок повторюється до виконання граничних умов.

Рис. 4.22. Алгоритм роботи функції `checkingUpLimit` (Частина 2)

При виправці профілю машиною, виникає ситуація, коли задній контрольний пристрій нівеліровочної системи машини стоїть вже на виправленій ділянці колії, а передній на невиправленій, звідси виміряні при зйомці стріли вже не відповідають дійсності і розрахунок потребує коригування на величину h , рис. 4.23. При цьому це коригування слід проводити лише там, де воно потрібно, тобто тільки при наявності вище зазначеної ситуації.

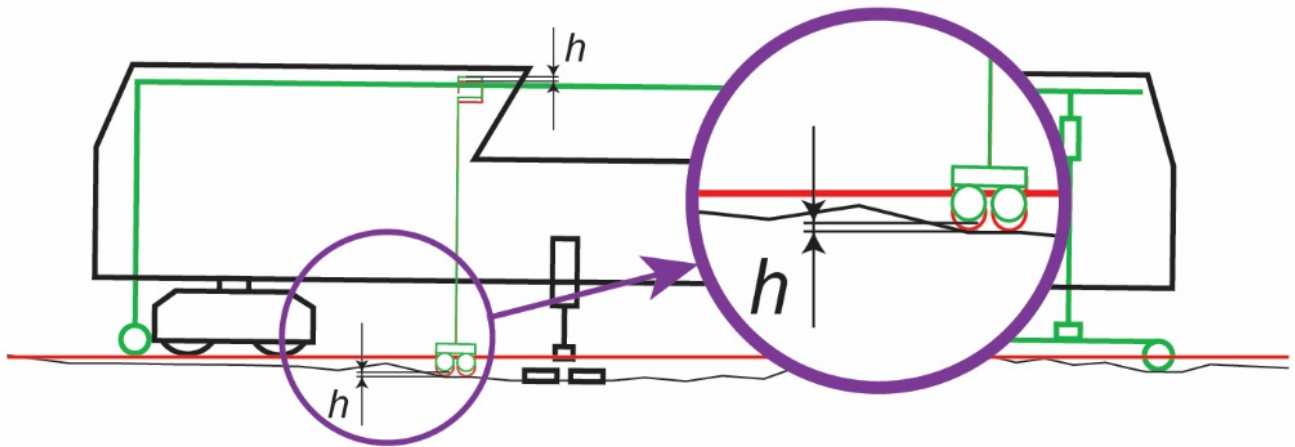


Рис. 4.23. Величина коригування розрахованої підйомки

На рисунку 4.23 (збільшено) – зеленим кольором позначено очікуване положення вимірювального пристрою, а червоним його поточне положення з урахуванням підйомки заднього контрольного пристрою нівеліровочної системи за рахунок виправки колії.

Величина коригування h вираховується спираючись на задану геометрію машини за схемою наведеної на рис. 4.24.

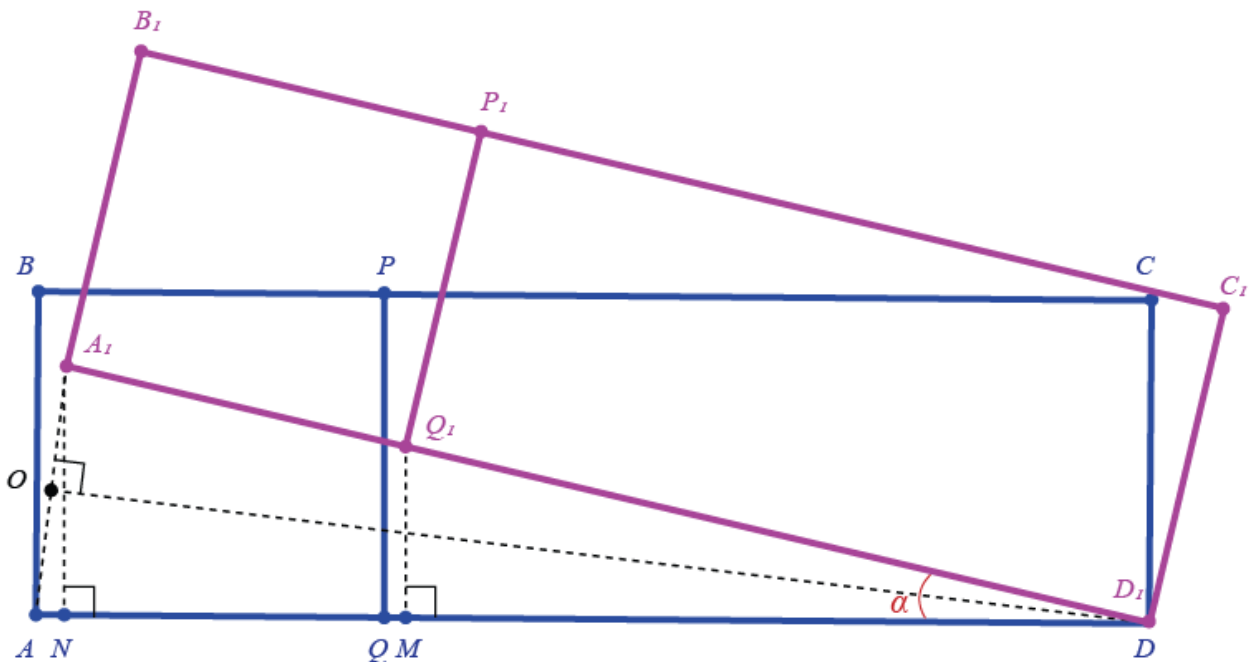


Рис. 4.24. Схема розрахунку поправки h

Виходячи з розрахованого вище масиву підйомок $\{nf\}$ — величина підйомки заднього контрольного пристрою нівеліровочної системи очікується як окрема складова масиву в кожній розрахунковій точці nf_i , на рисунку позначено як відрізок NA_1 .

Знаючи величину підйомки колії в кожній розрахунковій точці nf_i можна розрахувати коригування h , на рисунку позначено як відрізок MQ_1 , двома способами.

Перший спосіб. Згідно рисунка 4.24, з прямокутного трикутника NA_1D , синус кута $\angle\alpha$ дорівнює:

$$\sin \alpha = \frac{NA_1}{A_1D}, \quad (4.16)$$

з формули 4.16 кут $\angle\alpha$ буде дорівнювати:

$$\angle\alpha = \sin^{-1} \frac{NA_1}{A_1D} \quad (4.17)$$

з прямокутного трикутника MQ_1D , синус кута $\angle\alpha$ дорівнює:

$$\sin \alpha = \frac{MQ_1}{Q_1D}, \quad (4.18)$$

З формули 4.18 відрізок MQ_1 буде дорівнювати:

$$MQ_1 = Q_1D \cdot \sin \alpha, \quad (4.19)$$

Виразивши кут $\angle\alpha$ через формулу 4.17 формула 4.19 набере вид:

$$MQ_1 = \frac{Q_1D \cdot NA_1}{A_1D} \quad (4.20)$$

Другий спосіб. За теоремою подібності трикутників згідно рисунка 4.24 $\triangle NA_1D \sim \triangle MQ_1D$. Так як кути $\angle NDA_1 = \angle MDQ_1 = \alpha$, а кути $\angle A_1ND = \angle Q_1MD = 90^\circ$, то з визначення подібних трикутників подібні боки пропорційні, тоді:

$$\frac{NA_1}{MQ_1} = \frac{A_1D}{Q_1D}, \quad (4.21)$$

Виходячи з формули 3.21 відрізок MQ_1 буде дорівнювати:

$$MQ_1 = \frac{Q_1D \cdot NA_1}{A_1D} \quad (4.22)$$

У формулі 4.20 та 4.22 відрізок Q_1D , NA_1 та A_1D є геометричними параметрами контрольно-вимірювальної системи колійної машини для вимірювання профілю (рис.4.1), та беруться з вихідного файлу зйомки. Згідно формул 4.20 та 4.22 перший і другий способи тотожні.

Ця формула додана у математичну модель розрахунку виправки колії в профілі у вигляді функції *extraLiftUp* ($\{nf\}$), де $\{nf\}$ – вихідний масив згладжених та перевірених за граничними умовами стріл, рис. 4.25.

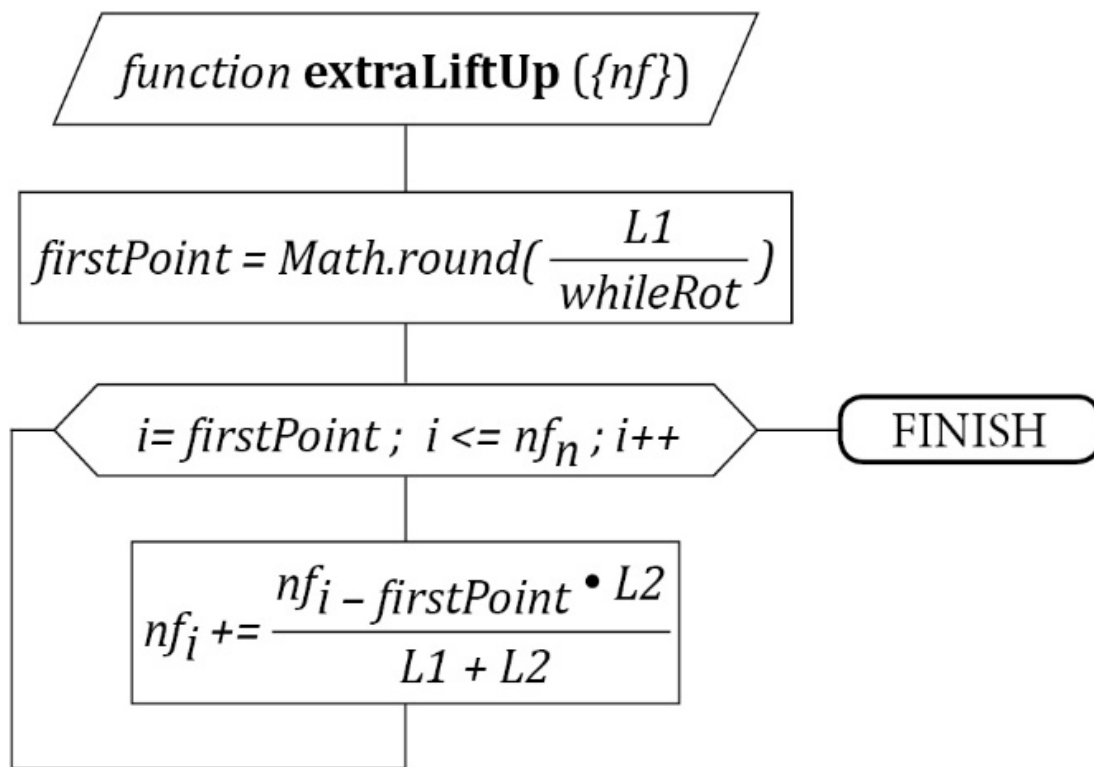


Рис. 4.25. Функція компенсації неврахованої додаткової підйомки машини

На рис. 4.25 позначено:

- *whileRot* – довжина кола колеса, беруться з вихідного файлу зйомки
- *firstPoint* – перша точка для розрахунку додаткової підйомки

- $L1$ – відстань від заднього контрольного пристрою до органа зйомки машини, беруться з вихідного файлу зйомки
- $L2$ – відстань від пристрою зйомки до переднього контрольного пристрою, беруться з вихідного файлу зйомки

Функція розраховує точку з якої потрібно вносити коригування, та додає до стріли розрахункову коригуючу величину h тим самим збільшуючи вихідну розрахункову стрілу. На основі даних отриманих за розрахунками будується нова геометрія колії.

Розроблені алгоритми складають логічну послідовність розрахунку виправки колії в поздовжньому профілі у вигляді взаємопов'язаних блок-схем. Вони є основою для програмування модуля виправки колії в поздовжньому профілі, який дозволяє здійснити розрахунок підйомок для досягнення плавності абрису колії в поздовжньому профілі та вирішення задачі по підвищенню швидкості руху.

4.4 Розробка модуля для розрахунку виправки колії в поздовжньому профілі та його застосування на основі комбінаторного принципу в автоматизованій системи управління машинізованою виправкою колії

В основу розробки модуля розрахунку виправки колії в поздовжньому профілі покладено вищенаведений математичний інструмент. Цей математичний інструмент був імплементований до автоматизованої системи виправки колії в плані й поздовжньому профілі у вигляді модуля комп'ютерної програми RWPlan. Початковий фрагмент коду на мові програмування *Pascal* наведений на рисунку 4.26.

```

    L1,L2: array [1..2] of integer;
    n: array [1..2] of array of double; //массив исходных значений
по каждому рельсу
    nu,nf,p,nd,pn,nkr,nfn,nnb,ndn: array of extended;
    ma,hrw: array of double;
    //MemoryNF: array of array of double;
    StepNumber: integer;

    FormProfilHandle: Hwnd;
    AllZirrow: boolean;

    function LoadFromFile(FileName: string): boolean;
    procedure FreeMemory;
    procedure Obnulenie;
    procedure Glagka5;
    procedure ArrayOfPodjomka;
    procedure CalckDopodjomka;
    procedure CalckDopodjomkaTwoRail;
    function ViborNarugnogo: integer;
    function ViborRaschetReil(Var Bugor1,Bugor2: double): integer;
    function StepTo: double;
    function StepOut: double;
    function Calck: double;
    function GetMaxP: double;
    function CalckTwoRailFromMajatnik: boolean; //false -
корректировать 1-й рельс
    function PorverkaTwoRail: boolean; //false - проверка не прошла
    procedure SaveToFileTxt(FileName: string);
    end;

var
    FStrelaProfil: TFStrelaProfil;

const
    obert_kolesa=625;

implementation

Uses Math, UFStopProfil, UFStopIterProfil;

{$R *.dfm}

```

Рис. 4.26. Початковий фрагмент модуля розрахунку виправки колії в
поздовжньому профілі комп'ютерної програми RWPlan

Кінцевий фрагмент коду на мові *Pascal* наведений на рисунку 4.27. Наведені фрагменти є необхідною і достатньою умовою для ідентифікації оригінальності комп'ютерної програми. Модифікована програма RWPlan з модулем розрахунку виправки колії в поздовжньому профілі надалі набула назву RWPlan Strela.

```

Var a: double;
    e,i: integer;
begin
    Val(str,a,e);
    if e<>0 Then
        begin
            for i:=1 to Length(str) do
                if (str[i]='.') or (str[i]=',') or (str[i]='+') Then str[i]:
                ='.';
            Val(str,a,e);
        end;
    if e=0 Then Result:=a Else Result:=0;
end;

function DoubleToStrN(x: double; N: byte): string;
begin
    Str(x:0:N,Result);
    while (Result[Length(Result)]='0') and (Length(Result)>1) do
        Delete(Result,Length(Result),1);
    if Result[Length(Result)]='.' then
        Delete(Result,Length(Result),1);
    if Length(Result)=0 then Result:='0';
end;

{ TFStrelaProfil }

procedure TFStrelaProfil.ArrayOfPodjomka;
Var i: integer;
begin
    //Расчет подъёмки
    for i:=1 to m do
        p[i]:=nf[i]-n[br,i];
    //if CheckBox1.Checked then CalckDopodjomka;
end;

procedure TFStrelaProfil.Button1Click(Sender: TObject);
Var povtor,korrektno,bPorverkaTwoRail: boolean;
    i,j: integer;
    s: string;
begin
    if AllZirrow then
        begin
            MessageDlg('Отсутствуют данные для расчёта, произведите
повторную съёмку!',mtWarning, [mbOK], 0);
        end
    end
end

```

Рис. 4.27. Кінцевий фрагмент модуля розрахунку виправки колії в
 поздовжньому профілі комп'ютерної програми RWPlan

Для функціонування модуля на машині типу ВПР повинно бути встановлено обладнання: контролер виправки колії «Стрела v.1.0» з адаптером зв'язку USB-2xCAN (рис. 4.28), пилрозахищений комп'ютер (з процесором не нижче і3, внутрішньою пам'яттю не менше 4 Гб, з вінчестером об'ємом не менше 500 Гб,

пилотажним монітором та операційною системою Windows, Java Machine v. 1.8.0_111) (рис. 4.29).

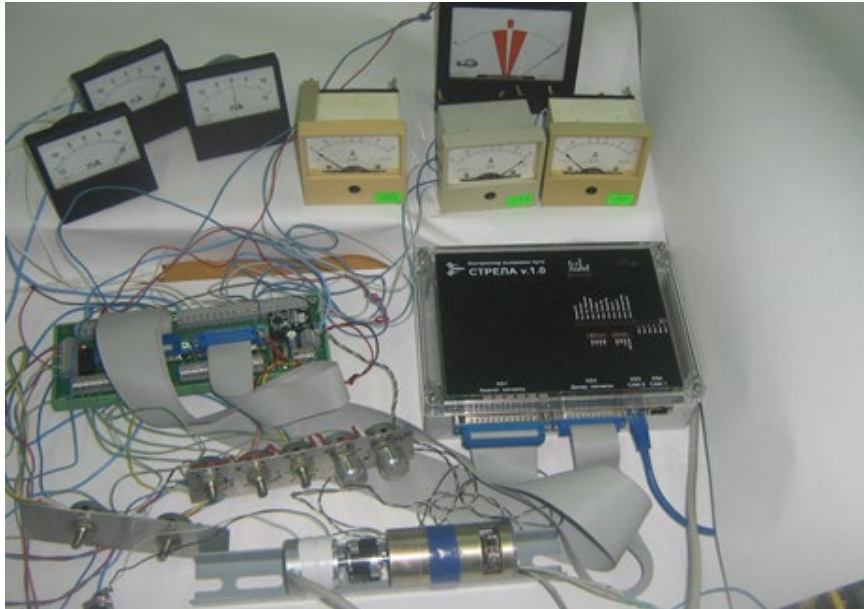


Рис. 4.28. Контролер виправки колії «Стрела v.1.0»



Рис. 4.29. Комп'ютер, встановлений на машині типу ВПР

Встановлене обладнання повинно пройти тестування контрольно-вимірювальною системою (рис. 4.30)

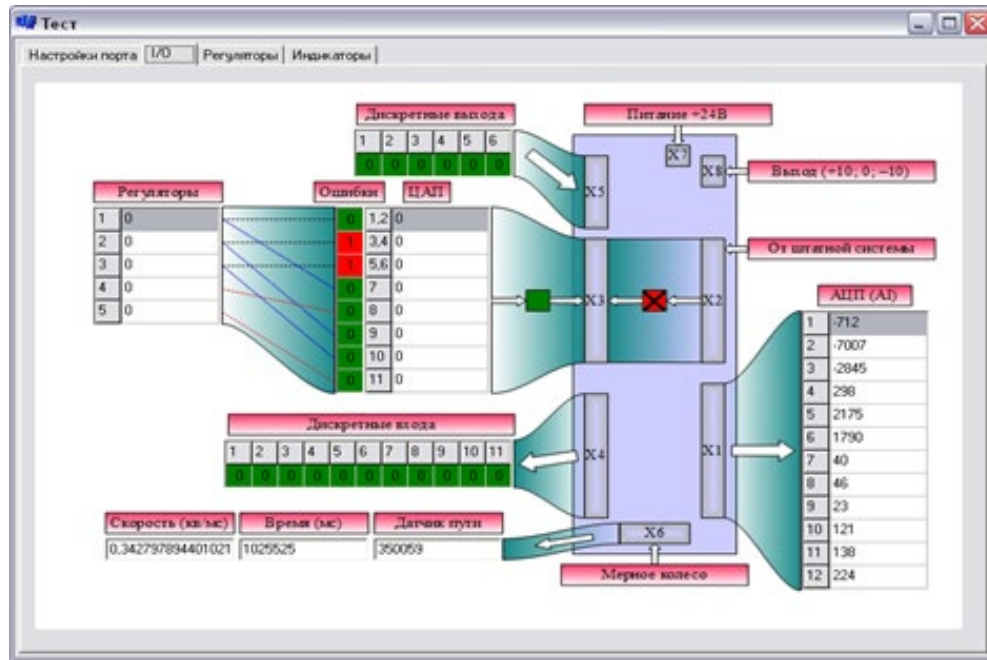


Рис. 4.30. Экран тестування обладнання, встановленого на машину типу ВПР для автоматизованої виправки колії в профілі та плані

Основні функціональні характеристики розробленого модуля такі:

- Прийом вихідного файлу з масивом даних вихідного стану колії в поздовжньому профілі, який отримується автоматично з контрольно-вимірювальної системи машини типу ВПР
- Автоматизований контроль механічного браку зйомки вихідного стану колії
- Автоматична обробка модулем отриманих даних
- Формування модулем масиву оброблених даних для передачі їх у автоматизовану контрольно-вимірювальну систему машини
- Передача отриманих даних автоматизованій контрольно-вимірювальній системі для виправки колії в поздовжньому профілі.

На рисунку 4.31 наведено приклад роботи модуля розрахунку виправки колії в поздовжньому профілі

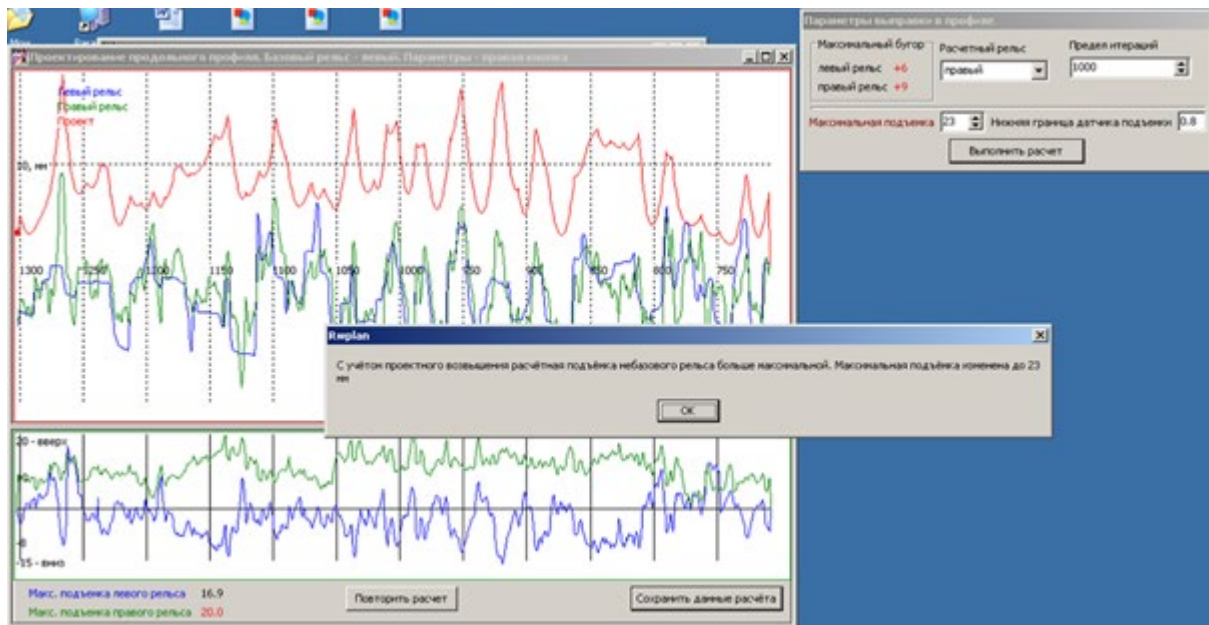


Рис. 4.31. Работа модуля розрахунку виправки колії в поздовжньому профілі

Для контролю результатів виправки колії в поздовжньому профілі потрібно провести контрольно-вимірювальний заїзд машини типу ВПР та порівняти отримані дані з розрахованими.

Запропонована комп'ютерна програма для розрахунку виправки колії в плані та поздовжньому профілі на основі комбінаторного принципу в автоматизованій системі управління машинізованою виправкою колії, характеризується достатньо простим інтерфейсом, який не потребує високої кваліфікації користувача. Це дозволяє спростити управління модернізованою системою виправки колії в плані й поздовжньому профілі.

Нижче наведено скорочений алгоритм дій в програмі автоматизованого розрахунку виправки колії в плані й поздовжньому профілі.

На рисунку 4.32 наведено основне вікно програми до відкриття вихідного файлу.

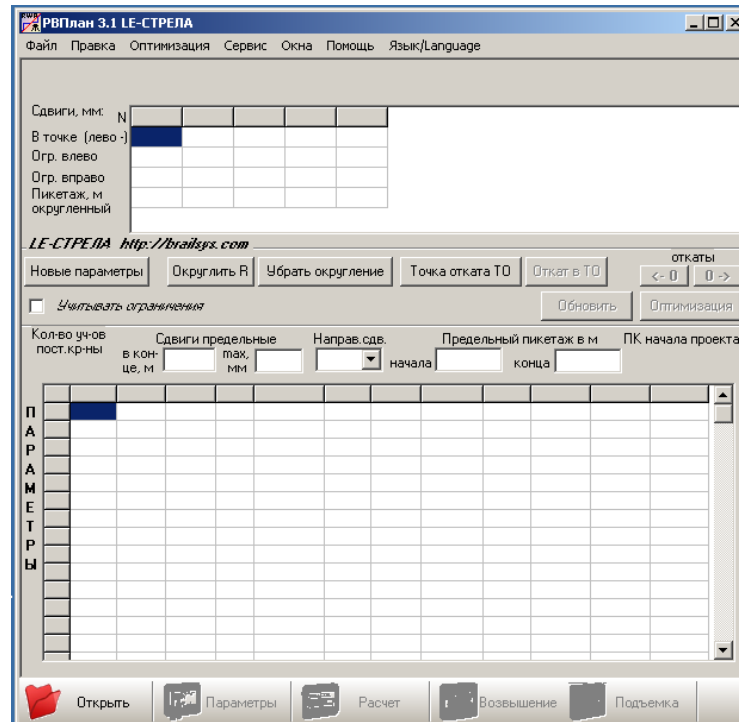


Рис. 4.32. Основне вікно програми

На рисунку 4.33 наведено основне вікно програми з масивом даних вихідного стану плану колії та розрахунок її виправки.

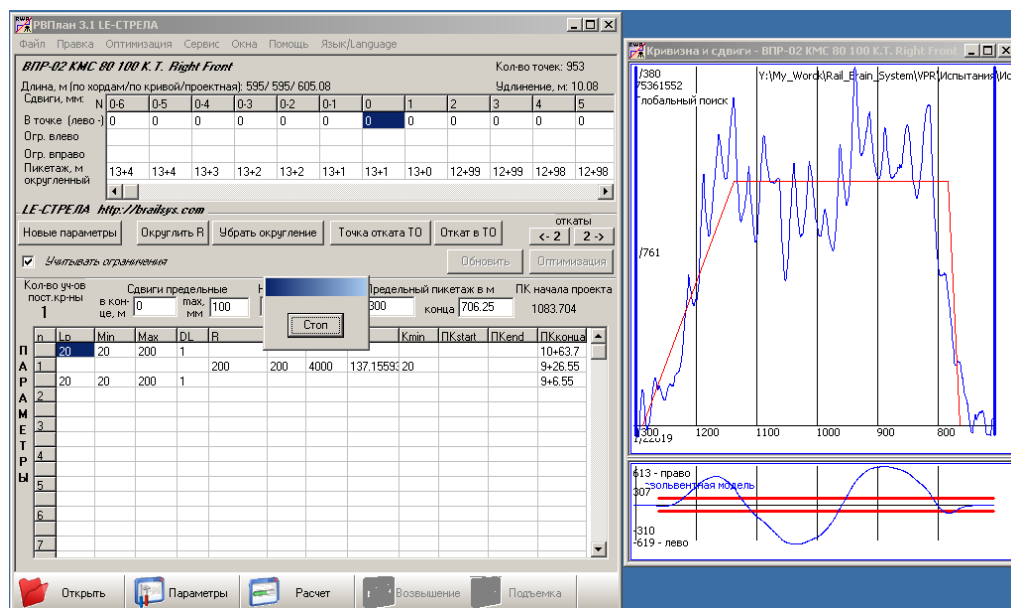


Рис. 4.33. Розрахунок виправки колії в плані

Наступний рисунок 4.34 містить результати розрахунку підвищення зовнішньої рейки колії для забезпечення відповідної швидкості.

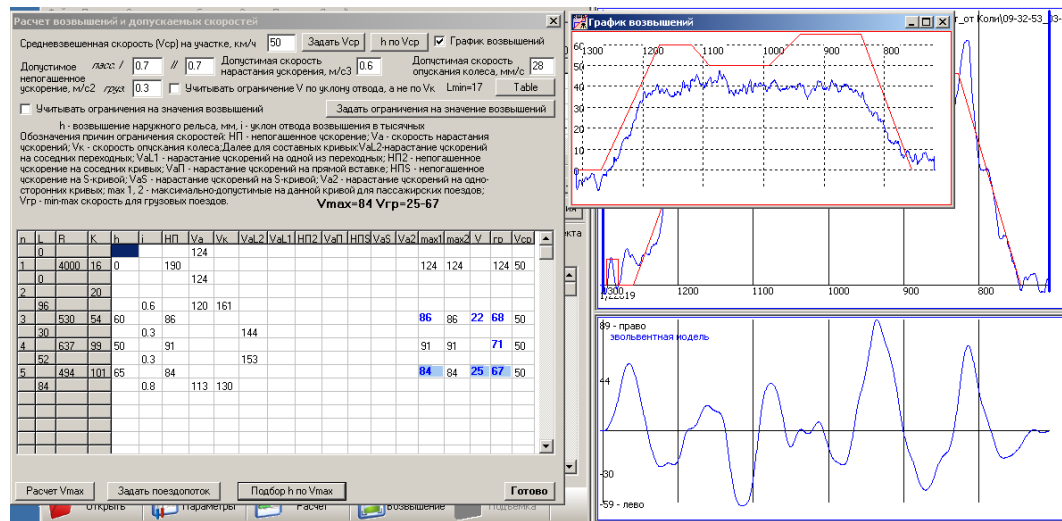


Рис. 4.34. Результати розрахунку підвищення зовнішньої рейки колії

Далі наведено вікно модуля по розрахунку виправки залізничної колії в поздовжньому профілі (рис. 4.35). При цьому оператор, проаналізувавши графік, повинен обрати у відповідному віконці розрахункову рейкову нитку (праву або ліву) з найбільшим «бугром», межу ітерацій та максимальну підйомку, виходячи з наявного баласту в шпальних ящиках.

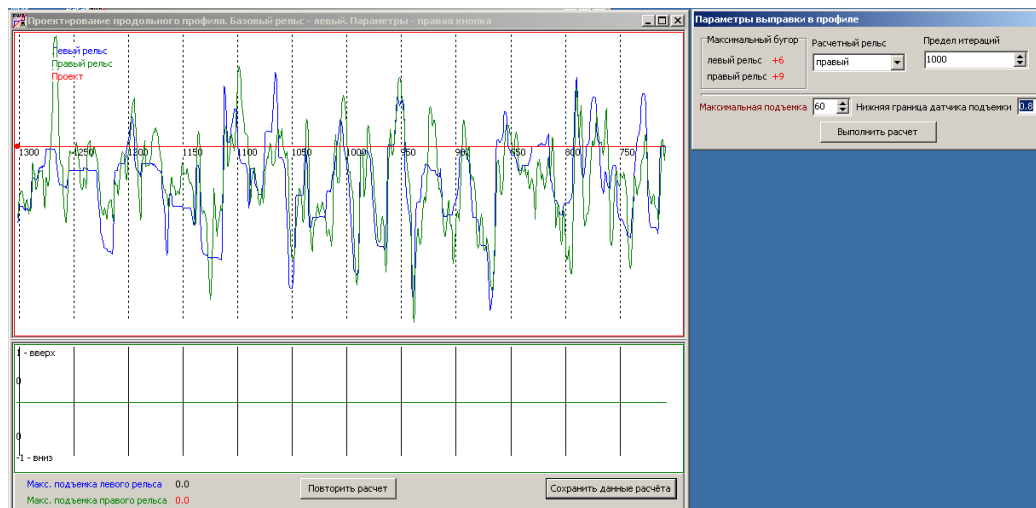


Рис. 4.35. Вікно модуля по розрахунку виправки залізничної колії в поздовжньому профілі

Після натискання кнопки «Виконати розрахунок» модуль дає можливість отримати результати виправки колії в поздовжньому профілі (рис.4.36).

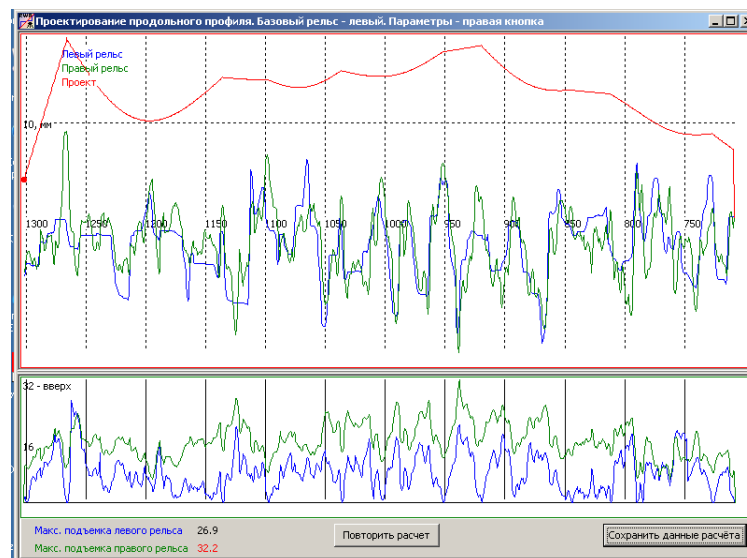


Рис. 4.36. Результаты выправки колії в поздовжньому профілі

Наступним кроком роботи з програмою є формування модулем масиву оброблених даних для передачі їх у автоматизовану контрольно-вимірвальну систему машини (рис. 4.37)

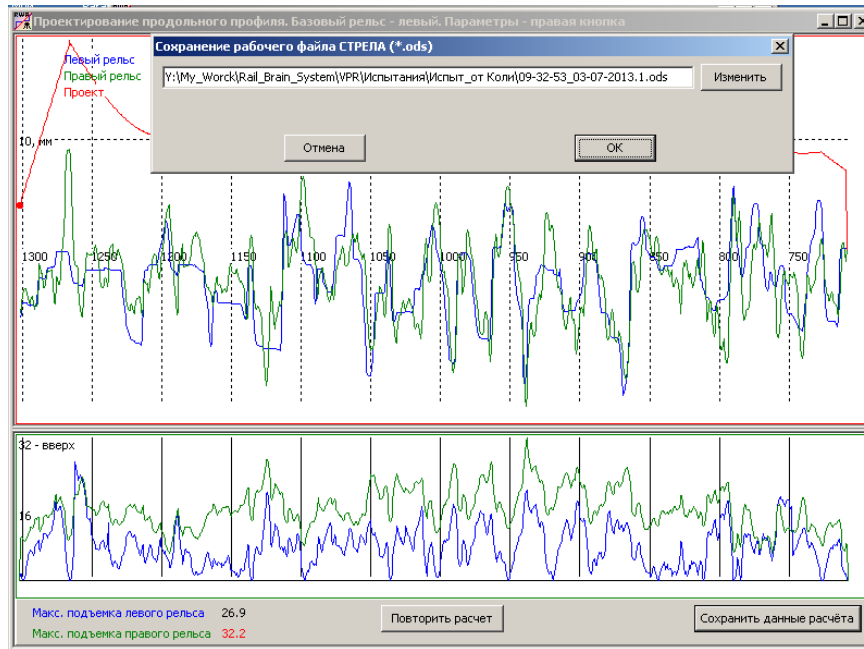


Рис. 4.37. Формування і збереження оброблених даних

Розроблений модуль для розрахунку виправки колії в поздовжньому профілі дає можливість значно збільшити ступінь автоматизації процесу виправки колії вітчизняними машинами типу ВПР, які використовуються на залізницях України. Його застосування на основі комбінаторного принципу в автоматизованій системі управління машинізованою виправкою колії дозволяє значно розширити можливості досягнення стану колії, необхідного для впровадження високошвидкісного руху.

4.5 Висновки до розділу 4

1. Доведено, що дані отримані автоматизованою зйомкою профілю машиною типу ВПР не дають можливості розглядати їх як кривизну у вертикальний площині. На підставі результатів дослідження виявлено, що отримати проектну модель вимірних вертикальних стріл за допомогою метода евольвент неможливо, так як отримані дані не є кривою постійної кривизни у

вертикальній площині, а лише відображають локальні нерівності по базі машини («бугор», «яма», «нульове місце»).

2. Для встановлення найбільш раціональної розглянуто чотири математичні моделі, які можуть описати положення та дають можливість розрахувати виправку залізничної колії в профілі. Аналіз розглянутих моделей показав, що при розрахунку виправки залізничної колії в профілі вони забезпечують необхідну плавність між суміжними точками.
3. Доведено, що при контрольній кількості ітерацій з наведеного сімейства моделей найбільший коефіцієнт згладжування 8,05 одиниць отримано при лінійному згладжуванні по п'яти точках. Дана модель дала більш плавний обрис положення рейкової колії ніж інші моделі, результати яких можуть досягнути меншої різниці екстремумів за більшу кількість ітерацій.
4. Вперше отримані алгоритми розрахунку виправки колії в поздовжньому профілі, які складають логічну послідовність розрахунку у вигляді взаємопов'язаних блок-схем. Вони є основою програмного модуля, який дозволяє здійснити розрахунок підйомок для досягнення плавності обрису колії в поздовжньому профілі та вирішення задачі з підвищення швидкості руху поїздів.
5. Розроблено модуль для розрахунку виправки колії в поздовжньому профілі, який дає можливість значно збільшити ступінь автоматизації процесу виправки колії вітчизняними машинами типу ВПР для подальшого ефективного використання їх на залізницях України. Застосування цього модуля на основі комбінаторного принципу в автоматизованій системі управління машинізованою виправкою колії дозволяє значно розширити можливості досягнення стану колії необхідного для впровадження високошвидкісного руху.

РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОГО ПОЛОЖЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

5.1 Підготовка експерименту для дослідження геометричного положення залізничної колії.

Аналіз існуючих наукових досліджень з питань автоматизованої виправки залізничної колії в плані і поздовжньому профілі показав, що наявних експериментальних результатів з вітчизняними машинами типу ВПР не достатньо, тому було проведено експериментальні дослідження, які мали на меті підтвердити на практиці можливість застосування математичної моделі для удосконалення системи управління автоматизованою виправкою колії в плані й поздовжньому профілі.[131-135] Для проведення експерименту було обрано 23 окремих ділянки перегонів Придніпровської, Львівської, Південно-Західної, Донецької залізниць.

Постановка експерименту включала кілька етапів. На першому підготовчому етапі на машини типу ВПР встановлюється обладнання:

1. Одноплатний контролер виправки колії «СТРЕЛА v.1.0», розміщений у пластиковому корпусі розмірами (рис. Зовнішні роз'єми контролера: XS1 (DB37) - аналогові сигнали; XS2 (DB25) - дискретні сигнали; XS3 і XS4 - канали зв'язку CAN0 і CAN1 (рис. 5.1)
2. Крос-плати КЛП-ВПР-02 розміром 200x70x30 мм з кріпленням на DIN-лінійці для підключення до контролера електричних ланцюгів
3. Адаптер зв'язку USB-2xCAN з 2-CAN інтерфейсом, призначений для підключення контролера до комп'ютера по каналу USB
4. Частотно-імпульсний датчик (перетворювач кутових переміщень ЛПР-МІ137Ж), який встановлюється на вимірювальне колесо машини для відстеження його обертання в прямому або зворотному напрямку

5. Бортовий промисловий пилезахищений комп'ютер с пакетом програмного забезпечення

Перераховане вище обладнання дозволило забезпечити візуалізацію процесів налаштування цієї системи, а також зйомки та виправки колії.

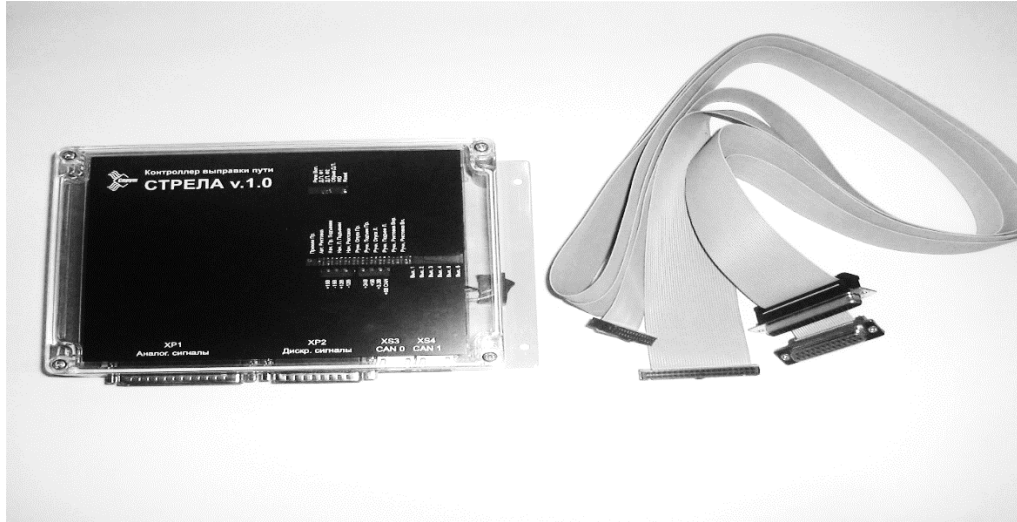


Рис. 5.1. Контролер виправки колії «СТРЕЛА v.1.0»

Основними технічними засобами системи виправки колії є контролер та бортовий комп'ютер з оригінальним програмним забезпеченням (рис. 5.2).

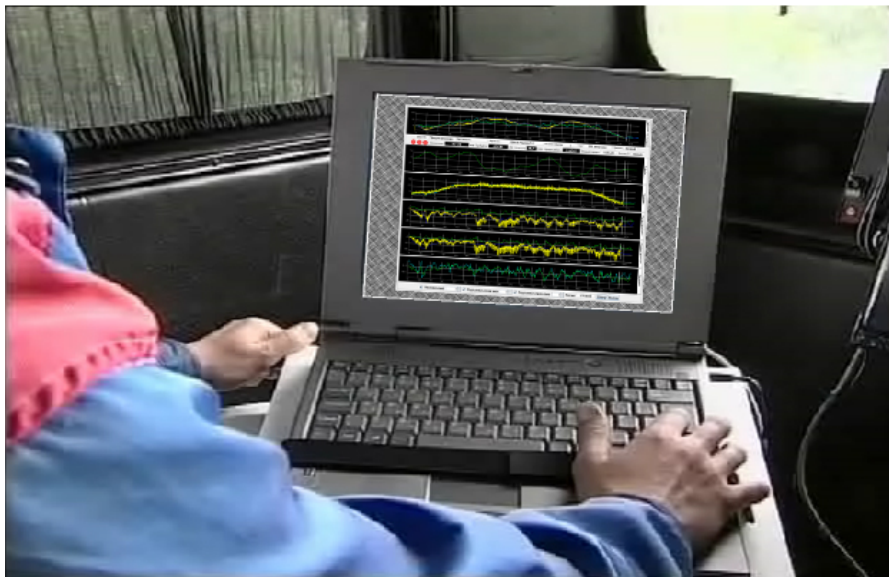


Рис. 5.2. Бортовий комп'ютер системи виправки колії на машині ВПР

Для управління машиною до контролеру були підключені наступні її елементи:

1. Потенціометричні датчики стрілографів (рис.5.3), які встановлені на робочому (рис.5.4) та контрольному візках (рис.5.5) для автоматичного вимірювання відхилення рихтувального тросу (хорди).

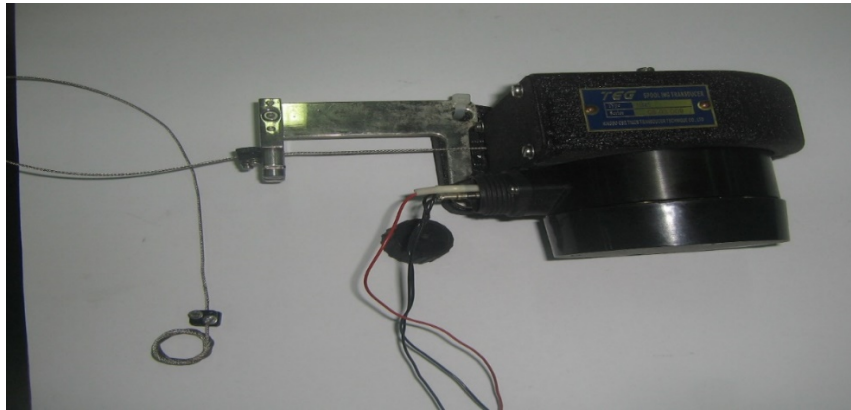


Рис. 5.3. Потенціометричний датчик стрілографа, встановлений на машині ВПР



Рис. 5.4. Робочий візок контрольно-вимірювальної системи машини ВПР



Рис. 5.5. Контрольний візок контрольно-вимірювальної системи машини ВПР

2. Потенціометричні датчики нівеліровочної системи правої та лівої рейок для вимірювання відхилення від нівелювальних тросів (рис.5.6)



Рис. 5.6. Потенціометричний датчик нівеліровочної системи

3. Потенціометричний датчик рівня (типу «маятник») для визначення положення машини ВПР в поперечному профілі колії.
4. Вимірювальне колесо для фіксації відстані, яку проходить машина ВПР при роботі (рис. 5.7)



Рис. 5.7. Вимірювальне колесо контрольно-вимірювальної системи машини ВПР

5. Підйомно-рихтувальний пристрій (ПРП) з гідроприводами рихтування (рис. 5.8), яке здійснює захоплення, зсув та підйом рейкошпальної решітки на розрахункові величини.



Рис. 5.8. Підйомно-рихтувальний пристрій (ПРП) системи виправки машини ВПР

6. Стрілочні прилади — індикатори зсувів, підйомки, рівня.

До складу програмного забезпечення, яке для проведення експерименту було встановлено на промислові пилрозахищенні комп'ютери шести машин ВПР, входить резидентна програма контролера, розміщена у флеш-пам'яті його однокристальної мікросхеми, та модернізована комп'ютерна програма для розрахунків виправки колії в плані й поздовжньому профілі RWPlan Strela [136].

Резидентна програма контролера машини ВПР реалізує п'ять основних режимів роботи автоматизованої системи виправки колії:

1. Налаштування системи
2. Зйомка колії
3. Розрахунок виправки колії
4. Виправка колії
5. Контрольна зйомка колії

При цьому контролер системи, з'єднаний з бортовим комп'ютером високошвидкісним каналом передачі даних, здійснює зв'язок з периферійними елементами управління машиною та виконує:

1. Введення дискретних станів з датчиків і панелей управління
2. Автоматичні вимірювання параметрів контрольно-вимірювальної системи
3. Виведення аналогових і дискретних керуючих дій
4. Опрацювання ряду вбудованих функцій контролю і управління автоматизованою системою

В ході підготовки до експерименту в режимі «Налаштування системи» по кожному вхідному і вихідному аналоговому каналу визначався масштабуючий коефіцієнт, який потрібен для перетворення комп'ютерного формату чисел у фізичні величини (міліметри).

Настройка устройств

Датчик	Значение, АЦП	Значение, мм	Минимум, мм	Максимум, мм	Значение поправки, мм
Стрелогрaф РАБОЧИЙ	-28	-11,3	-300	300	2,0
Стрелогрaф КОНТРОЛЬНЫЙ	-104	-3,6	-300	300	8,0
Маятник РАБОЧИЙ	-121	-4,2	-100	100	-0,6
Просадка ЛЕВАЯ	211	1,9	-40	40	4,2
Просадка ПРАВАЯ	-785	-2,2	-40	40	4,1
Доподъемка СПЕВА	8161		0	3	
Доподъемка СПРАВА	8168		0	3	
Мерное колесо					

Сохранение

Сохранить все данные настроек во FLASH-память?

Да Нет

Индикатор	Значение, АЦП
РИХТОВКА	0
Уровень РАБОЧИЙ	-17
Подъемка ЛЕВАЯ	18
Подъемка ПРАВАЯ	-21

Регулятор	Значение, АЦП	Ошибка
РИХТОВКА	0	
Подъемка ЛЕВАЯ	1536	
Подъемка ПРАВАЯ	1536	

Контрольный заезд КИС Параметры машины Сохранить Выход

Рис. 5.9. Режим налаштування системи з визначенням масштабуючих коефіцієнтів

Для вводу в експлуатацію модернізованих машин типу ВПР та перевірки працездатності програмного комплексу RWPlan Strela були проведені польові випробування на ділянках колії, підпорядкованих УЗ, за наступною послідовністю:

1. Машина проводить вимірювальний заїзд та робить запис геометрії колії
2. Оператор машини, використовуючи програму RWPlan Strela, робить розрахунок необхідної виправки колії
3. Машина типу ВПР виконує заїзд для виправки колії в розрахункове положення
4. Машина проводить контрольний заїзд для запису геометрії колії після виправки

Така послідовність дій в ході проведення експерименту дає можливість оцінити стан колії до та після її виправки.

Розроблена математична модель була інтегрована в програмний комплекс «СТРЕЛА v.1.0» який на сьогодні встановлено на шістьох машинах типу ВПР-02 після їх капітального ремонту на українському заводі ТОВ «НВК Дніпроспецмаш». Машини пройшли польові випробування та введені в експлуатацію [130].

5.2 Натурна зйомка та виправка залізничної колії в поздовжньому профілі машиною ВПР.

Наступним етапом експерименту є «Зйомка колії», яка виконується вимірною поїздкою по ділянці, що підлягає виправленню, при якій формується вихідний файл даних для розрахунків. У файл автоматично, через задані проміжки, записуються значення з датчиків: робочого і контрольного стрілографів, маятника, нівелювальної системи.

У режимі «Розрахунок виправки колії» запускається модифікований програмний комплекс RWPlan Strela, у якому проводиться розрахунок виправки колії. Після розрахунку програма формує вихідний файл з проектними значеннями.

У режимі «Виправка колії» проводиться робоча поїздка по ділянці, для якого проводилися зйомка і розрахунок. Під час виправки машину зупиняють над черговою шпалою, і за командою оператора «Початок рихтування» автоматизована система переміщує рейко-шпальну решітку до встановлення її у проектне положення. Фіксація рейко-шпальної решітки відбувається після виконання операції підбиття, ущільнення баласту під шпалою підбійками підбивного блоку (рис.5.10).



Рис. 5.10. Ущільнення баласту під шпалою підбійками підбивного блоку

Після виправки, у режимі «Контрольна зйомка», аналогічно режиму «Зйомка колії», виконується вимірювальна поїздка по ділянці, при якій формується файл даних для оцінки отриманого результату.

Зйомка колії, що підлягає виправленню машиною типу ВПР, виконується у режимі «Вимірювальної поїздки». В цьому режимі сигнали вимірювань з датчиків машини типу ВПР через контролер записуються у пам'ять комп'ютера. Кожен запис виконується через певний інтервал пройденої відстані (625 мм) вимірювального колеса.

Вимірювальна поїздка машиною типу ВПР виконується в транспортному режимі, при якому дизельний двигун безпосередньо підключено до ходового редуктора машини, а швидкість руху обмежується 2 км/год. Вимірювальні поїздки машиною типу ВПР також можуть виконуватись в робочому режимі, при якому обертання ходових коліс машини виконується від гідромоторів.

Для виконання зйомки колії контрольно-вимірювальна система машини приводиться до робочого стану за наступним алгоритмом:

- візки контрольно-вимірювальної системи повинні спускаються на рейки
- включається бічний притиск візків контрольно-вимірювальної системи до однієї з рейок
- кінці рихтувальної хорди виводяться на «нульові» позначки

Перед рухом машини робочі органи машини повинні бути встановлені в транспортне положення (рис.5.11).

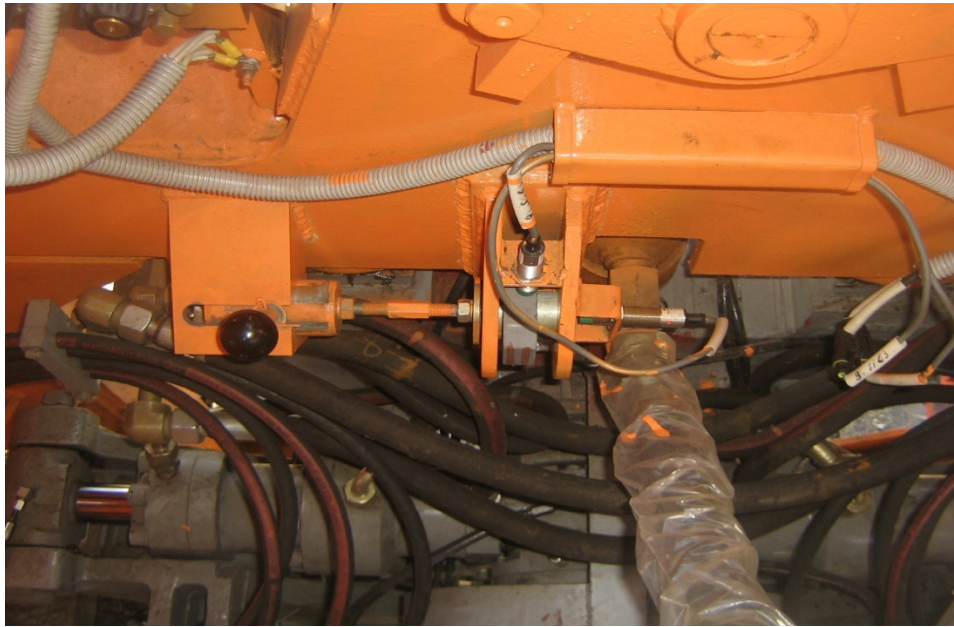


Рис. 5.11. Фіксатори і датчики установки машини в транспортне положення

В ході експерименту на криволінійних ділянках колії було проведено вимірювальні заїзди машин типу ВПР.

Приклад візуалізації результатів, що були отримані в ході вимірювань нивеліровочною системою машини по лівій рейці та записані в файл контрольно-вимірювальної системи, показані на рис. 5.12.



Рис. 5.12. Результати вимірювань машиною ВПР для лівої рейки

Як можна побачити в цьому випадку, профіль колії має багато нерівностей і потребує виправки.

5.3 Оцінка точності виправки залізничної колії на підставі експерименту

На підставі отриманих в ході експерименту даних було проведено розрахунок необхідної виправки колії в поздовжньому профілі для її нової геометрії (рис. 5.13)

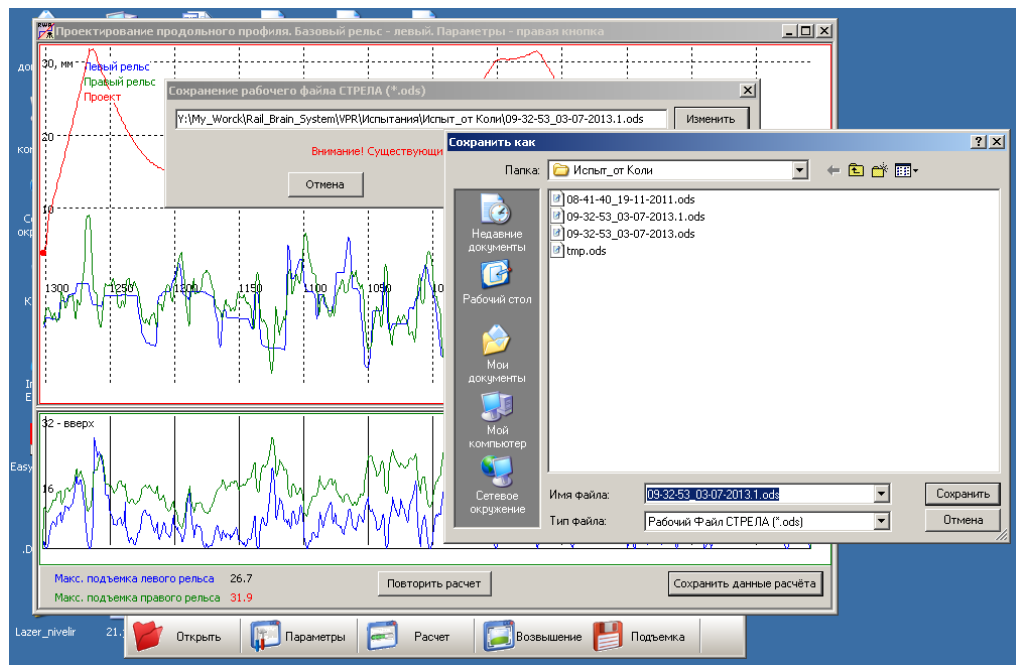


Рис. 5.13. Розрахунок виправки колії в поздовжньому профілі

Після розрахунку виправки колії була отримана її нова геометрія, яка показана на рисунку 5.14.



Рис. 5.14. Результати розрахунку виправки колії комп'ютерною програмою RWPlan Strela для лівої рейки на обраній ділянці

Для порівняння наводиться суміщений графік результатів вимірювань та розрахункового положення лівої рейки колії на обраній ділянці (рис. 5.15).



Рис. 5.15. Суміщений графік результатів вимірювань та розрахункового положення лівої рейки на обраній ділянці

На рисунку 5.15. синім кольором позначено вихідне положення колії, а червоним – розрахункове. Для наочності на рисунку 5.16. наведена різниця між результатами вимірювань та розрахунками по лівій рейці.



Рис. 5.16. Різниця між результатами вимірювань та розрахунками по лівій рейці

Як можна побачити з рисунку 5.16, розрахована підйомка колії варіюється у діапазоні від 0 мм до 20 мм, що вкладається у межі заданого оператором значення.

Після розрахунку дані записуються у файл, який направляється як завдання для виправки колії на контролер системи. Хід виправки контролюється обслуговуючим персоналом машини ВПР.

По закінченню виправки машиною проводиться контрольний заїзд для запису геометрії колії після виправки. Результати контрольного заїзду наглядно наведено на рисунку 5.17.



Рис. 5.17. Результати контрольних вимірювань машиною ВПР після виправки для лівої рейки

Для наочності на рисунку 5.18. наведено суміщений графік розрахункової моделі, контрольних вимірювань машиною ВПР та різниці між ними.

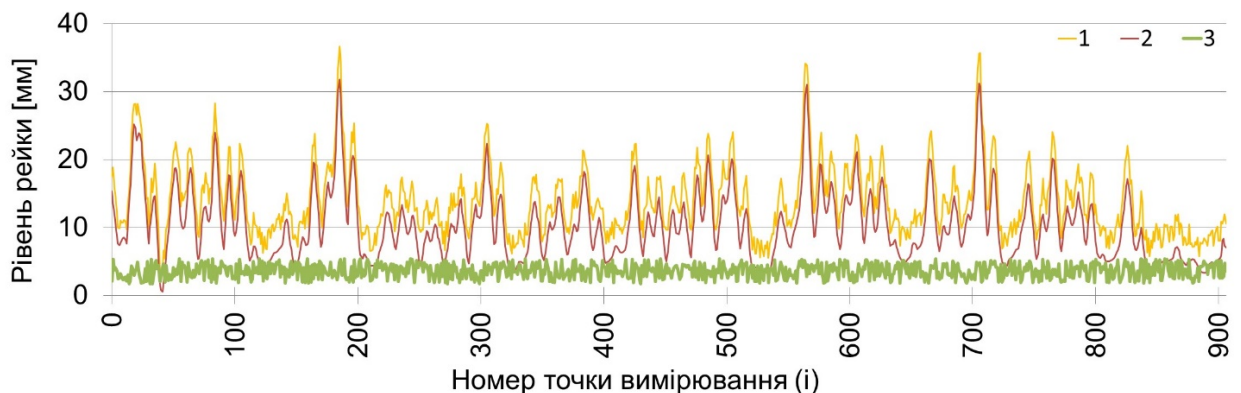


Рис. 5.18. Суміщений графік розрахунковій моделі, контрольних вимірювань машиною ВПР та різниці між ними

На рис. 5.18. позначено:

- 1 — Результати контрольних вимірювань машиною ВПР
- 2 — Розрахункова модель колії
- 3 — Різниця між розрахунковою моделлю та контрольними

вимірюваннями колії

Порівняння розрахованої та отриманої в ході експерименту моделей колії показало, що вони мають добру збіжність. Розбіжність між теоретичними даними та отриманими в ході експерименту склала:

- 1. Максимальна – 5,4 мм.
- 2. Мінімальна – 1,7 мм
- 3. Середня – 3,6 мм

Наведені розбіжності вкладаються в межі механічних похибок, виходячи з практики експлуатації автоматизованих систем виправки колії [131, 133].

Для тестування роботи автоматизованої контрольно-вимірювальної системи модернізованої машини ВПР були проведені експерименти на 23 окремих ділянках перегонів Придніпровської, Львівської, Південно-Західної, Донецької залізниць. Результати експериментів були розраховані та збережені у вигляді текстових файлів з розширенням *.ods. Приклади візуалізації окремих результатів розрахунків, записаних у файли, наведено на наступних рисунках.

Результат розрахунку кривої на ділянці перегону Павлопілля – Лошкарівка наведено на рисунках 5.19 для плану та 5.20 для поздовжнього профілю.

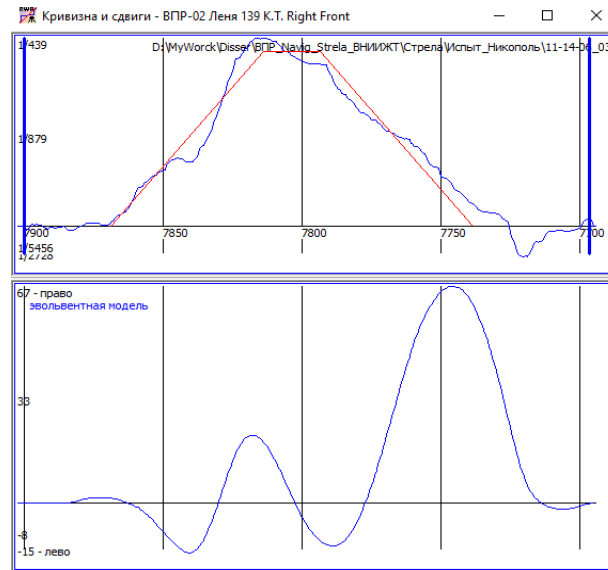


Рис. 5.19. Розрахунок виправки колії в плані,
експеримент на перегоні Павлопілля - Лошкарівка

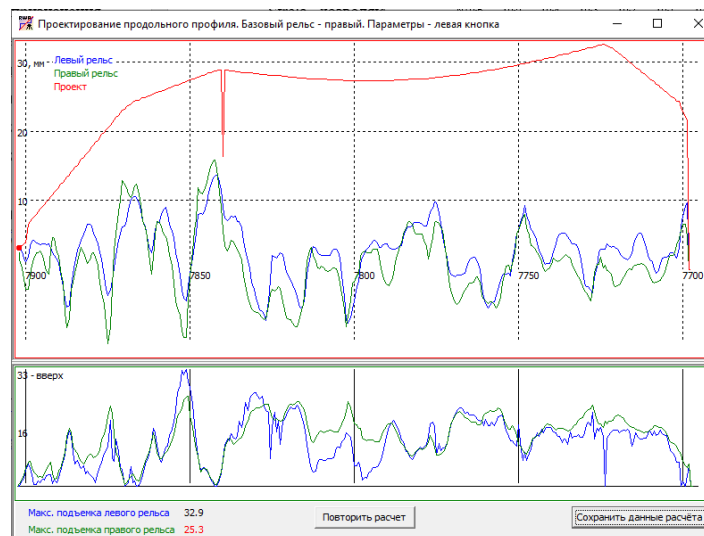


Рис. 5.20. Розрахунок виправки колії в поздовжньому профілі,
експеримент на перегоні Павлопілля – Лошкарівка

Результат розрахунку кривої на ділянці перегону Дубове-Близнюки наведено на рисунках 5.21 для плану та 5.22 для поздовжнього профілю.

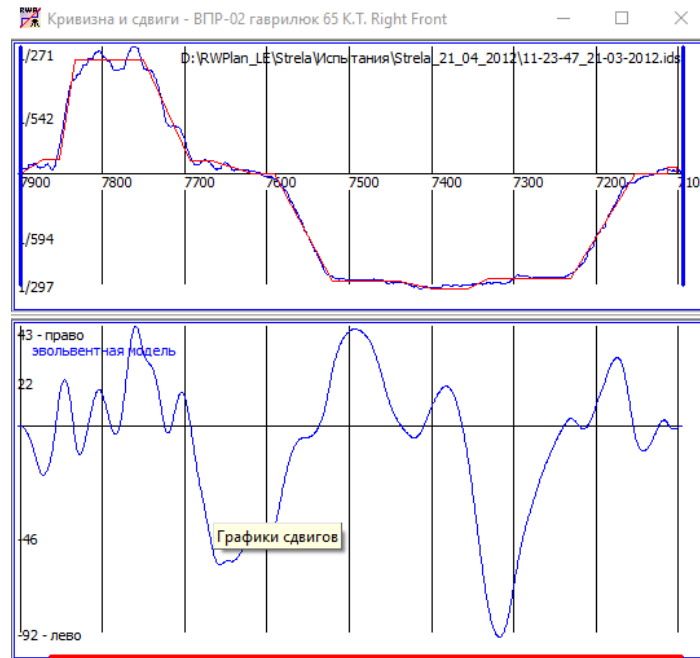


Рис. 5.21. Розрахунок виправки колії в плані,
експеримент на перегоні Дубове-Близнюки

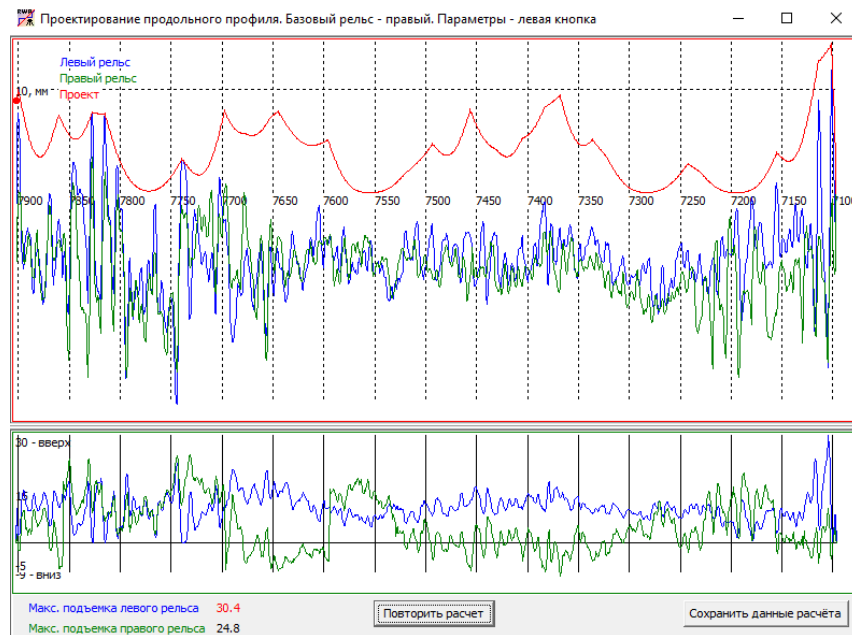


Рис. 5.22. Розрахунок виправки колії в поздовжньому профілі,
експеримент на перегоні Дубове-Близнюки

Результат розрахунку кривої на ділянці перегону Дарниця-Бортничі наведено на рисунках 5.23 для плану та 5.24 для поздовжнього профілю.

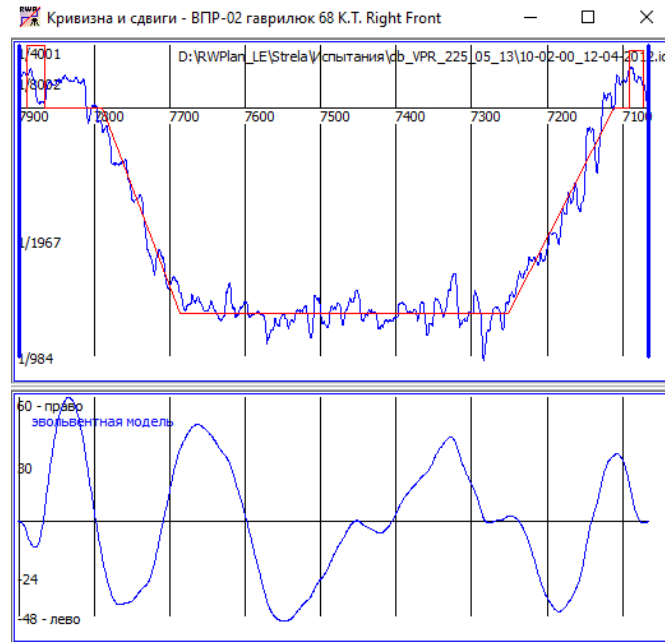


Рис. 5.23. Розрахунок виправки колії в плані, експеримент на перегоні Дарниця-Бортничі

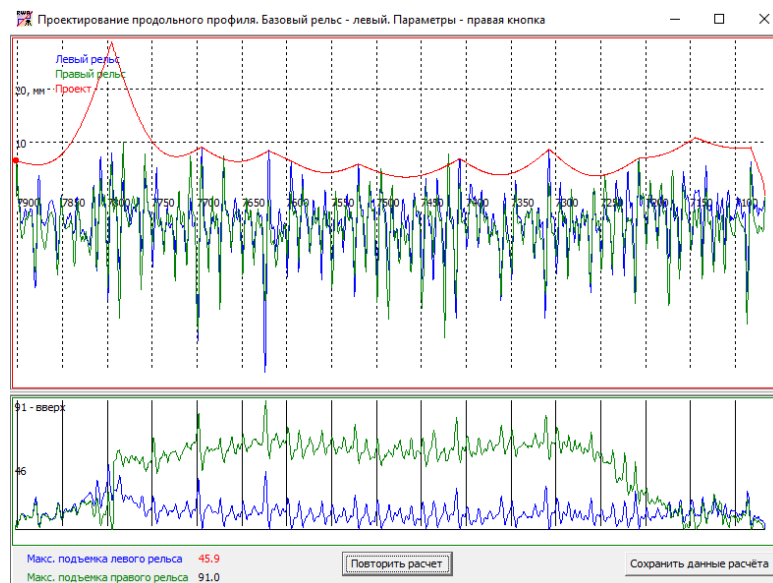


Рис. 5.24. Розрахунок виправки колії в поздовжньому профілі, експеримент на перегоні Дарниця-Бортничі

Результат розрахунку кривої на ділянці перегону Ожидів-Заболотці наведено на рисунках 5.25 для плану та 5.26 для поздовжнього профілю.

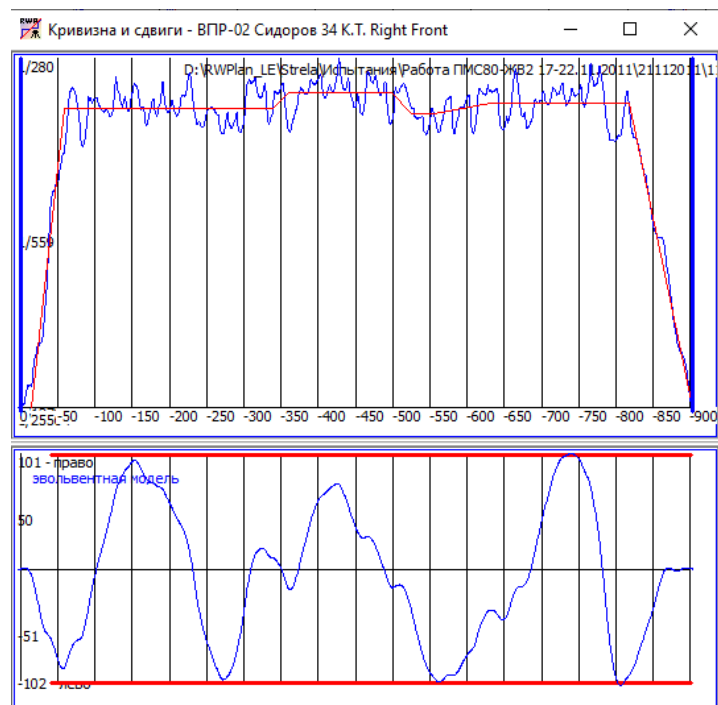


Рис. 5.25. Розрахунок виправки колії в плані, експеримент на перегоні Ожидів-Заболотці



Рис. 5.26. Розрахунок виправки колії в поздовжньому профілі, експеримент на перегоні Ожидів-Заболотці

Зведені дані експериментальних досліджень для вищенаведених перегонів представлені в таблиці 5.1

Таблиця 5.1

Результати експериментальних досліджень на залізничних перегонах Укрзалізниці

№ з/п	Перегін	Радіус кривої, м	Довжина кругової кривої/ прямої, м	Дов- жина пере- хідних кривих, м	Розра- ховане підви- щення, мм	Максимально допустимі швидкості пасажирських поїздів до виправки км/год	Допустимі швидкості поїздів після виправки км/год		
							пасажирські (макс.)	вантажні (мін.)	вантажні (макс.)
1	Павлопілля - Лошкарівка			55					
		474	21		25	65	80	15	63
				55					
2	Дубове- Близнюки			27					
		2537	20		0	45	50	без обмежень	50
				20					
		303	83		40	45	50	без обмежень	46
				48					
		2843	28		0	45	141	без обмежень	105
				48					

№ з/п	Перегін	Радіус кривої, м	Довжина кругової кривої/ прямої, м	Дов- жина пере- хідних кривих, м	Розра- ховане підви- щення, мм	Максимально допустимі швидкості пасажирських поїздів до виправки км/год	Допустимі швидкості поїздів після виправки км/год		
							пасажирські (макс.)	вантажні (мін.)	вантажні (макс.)
		0	27		0	45		без обмежень	
				70					
		-318	81		50	45	64	без обмежень	50
				42					
		-298	41		50	45	62	без обмежень	48
				27					
		-328	99		50	45	65	без обмежень	51
				79					
		0	38		0	45		без обмежень	
				0					
		5990	12		0	45	142	без обмежень	142

№ з/п	Перегін	Радіус кривої, м	Довжина кругової кривої/ прямої, м	Дов- жина пере- хідних кривих, м	Розра- ховане підви- щення, мм	Максимально допустимі швидкості пасажирських поїздів до виправки км/год	Допустимі швидкості поїздів після виправки км/год		
							пасажирські (макс.)	вантажні (мін.)	вантажні (макс.)
3	Дарниця- Бортничі	4001	25	0	0		124	без обмежень	124
		0	77						
				103					
		-1213	435		50	80	126	без обмежень	98
				141					
		0	20						
		4311	20	0	0		127	без обмежень	127
4	Ожидів- Заболотці			43					
		326	281		40	55	63	48	50
				31					
		310	138		40	55	62	47	50
				26					
		332	31		40	55	64	48	50

№ з/п	Перегін	Радіус кривої, м	Довжина кругової кривої/ прямої, м	Дов- жина пере- хідних кривих, м	Розра- ховане підви- щення, мм	Максимально допустимі швидкості пасажирських поїздів до виправки км/год	Допустимі швидкості поїздів після виправки км/год		
							пасажирські (макс.)	вантажні (мін.)	вантажні (макс.)
				67					
		320	186		40	55	63	48	50
				85					

Таблиця 5.2

Визначення економії часу та палива при виправці колії з використанням автоматизованої системи

Перегін	Загальна довжина експериментальної ділянки виправки, м	Норма часу на проведення робіт машиною ВПР-02 згідно «Типових технічно обґрунтованих норм часу на роботи з поточного утримання колії», маш-хв.	Час, витрачений на виправку кривої з використанням автоматизованої системи виправки машини ВПР-02, маш-хв.	Економія часу, маш-хв.	Витрата палива на виконання робіт при виправці колії згідно типових норм, л/год	Витрата палива на виконання робіт при виправці колії з використанням автоматизованої системи виправки кривої машини ВПР-02, л/год	Економія палива, л	Економія часу та палива при виправці колії з використанням автоматизованої системи виправки кривої машини ВПР-02, відсоток
Павлопілля - Лошкарівка	131	17	14	3	7,5	6,2	1,3	17,6%
Дубове-Близнюки	790	102	87	15	44,9	38,3	6,6	14,7%
Дарниця-Бортничі	821	106	90	16	46,6	39,6	7,0	15,1%
Ожидів-Заболотці	888	114	98	16	50,2	43,1	7,0	14,0%

Тестування роботи автоматизованої контрольно-вимірювальної системи модернізованої машини ВПР показало, що виправка за даною технологією із застосуванням комп'ютерної програми RWPlan Strela дозволяє зменшити бальність відхилень колії, підвищити швидкість руху, зменшити знос колії, скоротити тривалість «вікна» на перегонах, зменшити витрати палива. Економія часу та палива при виправці за цією технологією (таблиця 5.2) були визначені з урахуванням «Типових технічно обґрунтованих норм часу на роботи з поточного утримання колії» [137], а також згідно технічного опису до машини ВПР-02 [138] Норм витрат палива до двигунів цих машин [139]. Згідно таблиці 5.2 загальна економія ресурсів (часу та палива) склала від 14% до 17,6%, що є значним показником з врахуванням обсягу робіт по виправці колії. Впровадження запропонованих заходів щодо виправлення залізничної колії в плані й поздовжньому профілі дає можливість знизити в середньому на 15% трудовитрати й енерговитрати на виконання робіт, підвищити плавність і комфортабельність їзди, забезпечивши на більш високому рівні виконання програми впровадження швидкісного руху поїздів на залізницях України.

Правильне виконання виправки колії за допомогою автоматизованих систем, наприклад з використанням RWPlan Strela, дозволяє не тільки відновлювати геометрію колію в вертикальній площині, а й забезпечувати потрібне ущільнення баласту. Стан баластного шару є одним з основних факторів, що визначають стабільність колії в цілому [140] та строки призначення чергових ремонтів [141]. Крім того, якісне ущільнення баласту під час виправки модернізованими машинами типу ВПР забезпечує рівнопружність колії, яка впливає на динамічні показники взаємодії колії і рухомого складу [142]. Особливо це стосується ділянок, які за конструкцією мають пружність, від'ємну від загальної протяжності, наприклад, місця розташування рейкових стиків [143, 144], стрілочних переводів [144-145] та ін.

Аналіз результатів експериментів дозволяє стверджувати, що наукові підходи, використані в математичній моделі комп'ютерної програми RWPlan Strela, дозволяють скоротити тривалість роботи машин типу ВПР у «вікно», спростити роботу обслуговуючого персоналу, створити інформаційну базу параметрів колії, встановити раціональні параметри кривих при виправці.

Надалі напрямок розвитку полягає в модернізації механіки машин для впровадження координатної зйомки, яка дасть більшу точність результатів як зйомки, так і виправки колії.

5.4 Висновки до розділу 5

Після аналізу даних, отриманих в ході експерименту, можна зробити такі висновки:

1. На підставі експерименту значно розширена доказова база адекватності застосування математичного інструменту, імplementованого в якості модулю комп'ютерної програми RWPlan Strela для розрахунку автоматичної виправки колії в поздовжньому профілі.
2. Набули подальшого розвитку задачі визначення реального положення колії за результатами виміру вітчизняними колійними машинами типу ВПР.
3. Запропоновані напрямки розвитку вимірювальних засобів сучасних колійних машин на прикладі застосування комп'ютерної системи виправки колії для машин типу ВПР.
4. Отримані результати будуть корисні для планування ремонтно-колійних робіт з метою підвищення плавності руху поїздів, комфортабельності їзди, зменшення витрат на колійні роботи та при впровадженні прискореного й швидкісного руху поїздів.
5. Існуючі методи розрахунку допустимої швидкості за характеристиками плану повинні корегуватися для урахування динамічних явищ, що

набирають важливості при зростанні швидкостей руху. Визначення реального положення колії, навіть з використанням сучасних колійних машин, є складною математичною задачею, яка може бути вирішена тільки у визначеному діапазоні точності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якому викладено комплексний методологічний підхід щодо оцінки та ефективності застосування виправно-підбивно-рихтувальних машин (ВПР). На основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача контролю стану залізничної колії та встановлення раціональних параметрів плану й поздовжнього профілю модернізованими ВПР машинами, що буде сприяти реалізації державної програми, визначеної в Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року. Отримані результати, висновки і практичні рекомендації в сукупності мають суттєве значення для залізничного транспорту і полягають в наступному:

1. Відсутність системного підходу до автоматизованої зйомки плану й поздовжнього профілю й розв'язання задачі виправки залізничної колії було перешкодою в реалізації відповідних практичних програм впровадження швидкісного руху поїздів на залізницях України.
2. Аналіз існуючих концепцій щодо виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі з використанням сучасних виправно-підбивно-рихтувальних колійних машин показав, що найбільш інноваційна концепція, яка використовується, наприклад, на залізницях Німеччини (DB), не може бути прийнятною для вітчизняних залізниць, бо потребує більш щільної мережі TNT GNSS Network, ніж існуюча в Україні. Для виправки колії в плані й поздовжньому профілі вітчизняними виправно-підбивно-рихтувальними колійними машинами слід орієнтуватися на вдосконалення автоматизованих систем цих машин.

3. Порівняння вихідних даних, отриманих різними способами зйомки про стан залізничної колії в плані й поздовжньому профілі, підтвердив їхню непристосованість для подальшого математичного моделювання обрису колії. Показана доцільність перед виконанням реконструкції залізничних напрямків проведення натурного обстеження з виконанням повного циклу вимірів і розрахунків.
4. За результатами експерименту з виправки колії в плані встановлено, що рекурентна евольвентна модель плану забезпечує достатню точність, тому саме її рекомендовано прийняти за базову при розробці математичної моделі для подальшого удосконалення технології виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі.
5. На основі аналізу практики вітчизняної технології виправки залізничної колії з використанням сучасних виправно-підбивно-рихтувальних колійних машин показана наявність певних недоліків в функціональності системи управління цих машин (проковзування вимірювального колеса, недостатній натяг вимірювальної хорди, конструкція вимірювальної системи вимагає постійних перевірок та налагоджування).
6. Розроблений математичний інструмент, який було інтегровано в автоматизовану систему виправки колії вітчизняних модернізованих виправно-підбивно-рихтувальних машин, дає можливість збільшити швидкість виконання робіт, а тим самим скоротити тривалість «вікон» на виконання цих робіт до 17,6%.
7. Порівняння результатів математичної моделі виправки колії у поздовжньому профілі та натурних даних, отриманих в ході

експерименту, показало їх відповідність. Розбіжність між теоретичними даними та отриманими в ході експерименту склала: максимальна – 5,4 мм; мінімальна – 1,7 мм; середня – 3,6 мм.

8. Випробування показали, що система виправки колії вітчизняними модернізованими виправно-підбивно-рихтувальними машини з використанням запропонованого математичного інструмента забезпечує необхідну точність встановлення проектно-оптимального обрису залізничної колії при виконанні реконструкції та поточному утриманні колії.
9. Загальна економія ресурсів (часу та палива) склала від 14% до 17,6%, що є значним показником з урахуванням обсягу робіт по виправці колії. Впровадження запропонованих заходів щодо виправлення залізничної колії в плані й поздовжньому профілі. дає можливість знизити до 17,6% трудовитрати й енергоресурси на виконання робіт, підвищити плавність і комфортабельність їзди, забезпечивши на більш високому рівні виконання програми впровадження швидкісного руху поїздів на залізницях України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. Схвалено Кабінетом Міністрів України від 30.05.2018 // [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/news/28581.html>
2. Кірпа Г. М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему : монографія // Г. М. Кірпа. – 2-ге вид., переробл. і допов. – Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 248 с.
3. Hollinger W. Einsatzerfahrungen mit dem Gleisvormesswagen EM-SAT (Operation findings with the track survey car EM-SAT) / Hollinger W., Lichtberger B. // EI — Der Eisenbahningenieur 46 — 1995 — №5. — С. 314
4. Lichtberger B. Stand der Langsehennenvermessung mittels EM-SAT oder GPS (State of chord measuring using EM-SAT or GPS) // EI — Der Eisenbahningenieur 46 — 1995 — №8 — С. 560
5. Lahr B. Homogene Koordinaten durch GPSReferenzstationen; Erfahrungen mit GPSEchtzeitanwendungen in Hessen; (Homogeneous co-ordinates using GPS reference stations; findings with GPS real-time applications in Hessen) // EI — Der Eisenbahningenieur — №50 3/99 — С. 38.
6. Lahr B. Grundlagen und Begriffe des GPS (Basics and terminology of GPS) Eisenbahningenieurkalender / Lahr, B.; Wübbena, G.. // EIK — 2000 — С. 317.
7. Lichtenegger K. Real Time GPS, An application for railway engineering / Lichtenegger K. Hofmann-Wellenhof, Lichtberger // General Meeting of IAG, Beijing, P.R. China, August — № 6-13 — 1993.
8. Marx L. DB Netz uses satellites to locate track in three dimensions // Railway Gazette International, November — 2008 — С. 872-875.

9. Marx L. Laserlangsehnvermessung und ermittlung von GPS-absolutkoordinaten; (Surveying with laser reference chords and calculation of absolute GPS co-ordinates) / Marx L., Lahr B., Lichtberger B., Wbbena G. // Der eisenbahningenieur 5.03
10. Marx, L, moЯmann D and kullmann, H.: Work procedures for maintenance of the permanent way of the DB Netz aG. — 2006
11. Мережа TNT GNSS Network на території України // [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://net.tnt-tpi.com/page>
12. К вопросу выправки железнодорожного пути при его ремонтах / Ершова К.Б., Петуховский В.В., Петуховский С.В., Холин А.Е., Юдин Б.А. // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. — 2006. — №10 — С.36-40
13. Железнодорожный путь и подвижной состав для высоких скоростей движения / А. Ф. Золотарский, А. Д. Вершинский, О. П. Ершков и др.; Под ред. М. А. Чернышова. // М.: Транспорт, 1964. — 272 с.
14. Чернышов М. А. О смягчении продольных профилей, улучшении плана и спрямлении трассы // Железнодорожный транспорт. — М., 1950, №7.
15. Науково-технічне забезпечення залізничного сполучення Україна – Євросоюз: монографія / М. Б. Курган, Д. М. Курган // Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс». – 2018. – 268 с. ISBN 978-617-7382-13-2
16. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні: монографія // М. Б. Курган, Д. М. Курган; Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2016. – 283 с.

- 17.Курган М. Б. Наукові основи перебудови існуючих залізниць України для впровадження швидкісного руху поїздів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06. Дніпропетровськ, 2004. - 515 с.
- 18.Курган Н. Б. Вопросы реконструкции трассы существующих железных дорог: дис. канд. техн. наук: 05.22.04. Москва, 1976. - 165 с.
- 19.Корженевич І. П. Нові можливості проектування перебудови плану та виправлення кривих при використанні програми RWPlan 1.2 // Залізничний транспорт України, №5, 2007. – С.79-82.
- 20.Визначення оптимального набору реконструктивних заходів для впровадження швидкісного руху.// Босов А. А., Корженевич І. П., Курган М. Б., Зубко, А. П. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, №6, 2004. — С.49-56.
- 21.Rießberger K. // Railway Gazette International — 1977
- 22.Fortin J // International Railway Journal — 1978
- 23.Prud'homme M. Die Stabilität des mit durchgehend verschweißten Schienen verlegten Gleises / Prud'homme M., Janin M. // Revue Général des Chemins — 1968 — №2
- 24.Rießberger K. 40 Jahre «dynamische Gleisstabilisation»/ Rießberger K, Wenty R., // EIK — 2015 — С. 55-76.
- 25.Wenty R. High-capacity, precision and reliability in track maintenance // Railway technical review — 2006. — №3 — С. 24-32
- 26.Корженевич И. Расчет переустройства кривых в декартовой косоугольной системе координат // Вопросы проектирования и строительства железных дорог — 1976 — № 5 — С. 41-45

27. Корженевич И. Автоматизация расчетов по определению допускаемых скоростей движения поездов в кривых участках пути // Ресурсосберегающие технологии в транспортном и гидротехническом строительстве. — 1996. — №2 — С. 80-84
28. Корженевич И. Ограничение скоростей движения поездов при недостаточных длинах прямых вставок между смежными кривыми / Корженевич И., Курган Н., Ренгач Н. // Ресурсосберегающие технологии в транспортном и гидротехническом строительстве. — 1996. — №2 — С. 71-72
29. Корженевич И. Расчеты выправки сложных кривых на основе рекуррентной математической модели плана линии // Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних заходів і поїздів. — 1997. — С. 93-95
30. Определение допускаемых скоростей движения поездов в кривых участках пути при несовпадении отводов кривизны и возвышения наружного рельса / Корженевич И., Демин Ю., Кирпа Г., Курган Н. // Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних заходів і поїздів. — 1997. — С. 90-92
31. Рибачок П. Определение минимального радиуса кривых в плане для достижения проектных скоростей / Рибачок П., Курган М., Курган Д. // Залізничний транспорт України. — 1997 — № 2 — С. 2-4
32. Курган М. К вопросу определения допускаемых скоростей движения поездов в кривых участках пути / Курган М., Курган Д. // Исследования взаимодействия пути и подвижного состава. — 1997. — С. 124-133
33. Корженевич И. Вероятностный подход при определении допускаемой скорости движения в кривой / Корженевич И., Курган Н. // Проблемы механики железнодорожного транспорта. — 2000. — С. 81-82

34. Корженевич И. Применение комплекса CREDO при проектировании реконструкции плана железных дорог // Современные технологии изысканий, проектирования и геоинформационного обеспечения в промышленном, гражданском и транспортном строительстве. — 2000 — С. 97-98
35. Халипова Н. Экспериментальные исследования по воздействию на путь в переходных кривых при наличии несовпадений отводов кривизны и возвышения / Халипова Н., Уманов М., Воробейчик Л. // Збірник наукових праць Дніпропетровського державного університету залізничного транспорту. — 2002 — С. 106-111
36. Влияние параметров колеи в переходных кривых на динамику и комфортабельность езды / Халипова Н., Рыбкин В., Цыганенко В., Уманов М. // Залізничний транспорт України. — 2002 — С. 25-27
37. Обґрунтування параметрів плану лінії для ліквідації бар'єрних місць при реконструкції залізниці / Харлан В., Рибкін В., Курган М., Халіпова Н. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна — 2003. — №1 — С. 74-83
38. Теоретические и экспериментальные исследования по установлению допускаемых скоростей движения поездов по участку пути, отремонтированному с применением современных путевых машин / Халипова Н., Уманов М., Цыганенко В., Рейдемейстер А., Ковалев В., Сысын Н. // Збірник наукових праць Київського університету економіки і технологій транспорту Міністерства транспорту та зв'язку України. — 2005. — №7 — С. 101-107
39. Експериментальні та теоретичні дослідження з визначення допустимої швидкості руху поїздів залежно від технології ремонту колії / Уманов М.,

- Циганенко В., Халіпова Н., Ковальов В. // Вісник Академії митної служби України. — 2005. — №1 — С. 72-76
40. Встановлення допустимих швидкостей руху поїздів по ділянці колії, відремонтованій із застосуванням сучасних колійних машин / Уманов М., Циганенко В., Рейдемейстер А., Халіпова Н., Ковальов В. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. — 2005. — №9 — 81-87
41. Корженевич И. Новый метод расчета выправки кривых // Тези 65 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». — 2005. — С. 194
42. Корженевич И. Программа расчетов переустройства (выправки) плана одного железнодорожного пути - Желдорплан // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. — 2006. — №3 — С. 13-16
43. Корженевич И. Новые подходы к расчетам выправки (переустройства) плана железнодорожного пути // Повышение эффективности работы путевого хозяйства и инженерных сооружений железных дорог. Сб. научн. тр. УрГУПС — 2006. — №45 — С.16-26
44. Курган Д. Определение допускаемой скорости движения в кривой реального очертания // Транспорт. Сб. науч. трудов ДІІТу — 2001. — №8 — С. 119-123
45. Курган Д. К вопросу определения параметров кривой по ленте путеизмерительного вагона // Збірник наукових праць ДНУЗТ — 2002 — №10 — С. 76-82
46. Корженевич И. Предпосылки и возможности развития программных продуктов CREDO для комплексной автоматизации в железнодорожном

- хозяйстве / Корженевич И., Курган Д. // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования — 2003. — №9-10 — С. 94-96
47. Корженевич И. Анализ существующего железнодорожного пути в программных продуктах CREDO III / Корженевич И., Курган Д. // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования — 2003. — №9-10 — С. 96
48. Корженевич И. Обеспечение точности съемки при возрастании скоростей движения поездов/ Корженевич И., Ренгач Н. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту — 2003. — №2 — С. 174-175
49. Корженевич И. Повышение точности съемки кривых/ Корженевич И., Ренгач Н. // Тези 65 Міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» — 2005. — С. 194
50. Динамическая оценка содержания железнодорожных кривых в плане / Корженевич И., Курган Н., Ренгач Н., Патласов А. // Проблемы механики железнодорожного транспорта. 9-я Международная конференция — 1996 — С. 164-165
51. Оценка основных параметров железнодорожных кривых при установлении максимальных скоростей / Корженевич И., Курган Н., Курган Д., Ренгач Н. // Будівництво. Збірник наукових праць ДІІТу — 2002 — №10 — С. 28-34
52. Оценка достоверности основных параметров железнодорожных кривых при установлении по ним допустимой скорости движения поездов / Корженевич И., Курган Н., Ренгач Н., Курган Д. // Будівництво / Збірник наукових праць ДІІТу — 2002 — №10 — С. 36-48

53. Корженевич И. Улучшение плавности движения и качества плана существующих железнодорожных линий с использованием программных продуктов CREDO при повышении скоростей движения поездов / Корженевич И., Пих Б., Соколан А. // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования — 2005. — №1 — С. 101-104
54. Железные дороги мира в XXI веке. Монография / Корженевич И., Кирпа Г., Пшинько А., Корниенко В., Боднарь Б., Блохин Е., Мямлин С., Плахотник В. // Изд-во Днепропетровского национ. ун-та ж.-д. транспорта им. акад. В. Лазаряна. — Днепр — 2004 — 228с.
55. Корженевич І. Нові підходи до перебудови кривих ділянок колії для впровадження швидкісного руху поїздів / Корженевич І., Курган М., Пшінько О. // Экономика, менеджмент, маркетинг. Управление проектами, организация. Сборник научных трудов Приднепровской гос. акад.. строит-ва и архитектуры — 2003 — №3 — С. 62-71
56. Вирішення задачі оптимальної перебудови дільниці для організації швидкісного руху поїздів / Босов А., Корженевич І., Курган М., Курган Д. // Транспорт. Збірник наукових праць ДІПТУ — 2002 — №12 — С. 43-49
57. Визначення оптимального набору реконструктивних заходів для впровадження швидкісного руху / Корженевич І., Босов А., Зубко А., Курган М. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту — 2005 — №6 — С. 49-56
58. Корженевич И. П. Математическая модель плана существующего железнодорожного пути // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. — 2007. — №. 15. — С. 50-51.

59. Корженевич І., Нові можливості проектування перебудови плану та виправлення кривих при використанні програми RWPlan 1.2 // Залізничний транспорт України — 2007 — №5 — С. 79-82
60. Харлан В. Вирішення задач вибору раціональних швидкостей руху поїздів за допомогою математичного моделювання процесу експлуатації залізничної ділянки / Харлан В., Курган Д., Бондаренко І. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна — 2007. — №18 — С. 71-74
61. Скорости движения в кривых после ремонта / Халипова Н., Уманов М., Рейдемейстер О., Циганенко В., Сисін Н., Курган Д. // Путь и путевое хозяйство — 2007 — №10 — С. 29-30
62. Допускаемые скорости движения поездов на участках пути отремонтированных с использованием современных путевых машин / Халипова Н., Уманов М., Рейдемейстер О., Набоченко О. // Збірник наукових праць «Удосконалення конструкції залізничної колії та системи ведення колійного господарства» УДАЗТ — 2008 — №91 — С. 48-54
63. Рекомендации по технологии выполнения ремонта пути на длительно закрутом перегоне и по установлению скоростей движения поездов после завершения этих работ / Уманов М., Цыганенко В., Рейдемейстер А., Халипова Н. // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта — 2007. — №17 — С. 16-22
64. Розробка високоефективних мікро, нанотехнологій оптоелектроніки і комунікаційних систем на їх основі / Вербицький В., Вікулін І., Воробієнко В., Годованюк В., Каток В., Курмашев Ш., Осінський В., Панфілов І., Рюхтін В., Сукач Г. // Монографія — Логос. Київ — 2009.

- 65.Вербицкий В. Однокристалльная микро-ЭВМ с аналого-цифровым преобразователем / Вербицкий В., Липовецкий Г., Сивобород П. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре — 2001 — № 6. — С. 54-58.
- 66.Косуля О. Розробка та виготовлення експериментальних зразків приладів для аналізу багатоеlementних за складом речовин в реальному масштабі часу в складі мас-спектрометра / Косуля О., Вербицкий В. // Журнал нано-та електронної фізики — 2016 — №4 — С. 04026-1—04026-4
- 67.Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований усиления земляного полотна малодеформируемым слоем / Петренко В., Гузченко В., Тюткин А., Алхдур А. // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. — 2010. — №35 — С 35-45
- 68.Результаты анализа параметров экспериментальных исследований армирования геотекстилем земляного полотна / Петренко В., Гузченко В., Тюткин А., Алхдур А. // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. — 2010. — №34 — С. 84-96
- 69.Корженевич І., Розширені можливості проектування перебудови плані під високі швидкості поїздів в програмі RWPlan 1.3.4 // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: Управління, економіка і технології. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції. Серія "Техніка, технологія". Київ. ДЕТУТ — 2008. — С. 187-189

70. Корженевич І., Забезпечення габаритних відстаней до опор і платформ при виправленні кривих // Вісник №22 Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту — 2008. — №22 — С. 76-78
71. Корженевич І., Выправка кривых и решение задач плана в программе РВПлан // Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних заходів і поїздів Праці Зах. Наук. Центру. — 2008.
72. Корженевич І., Специальная реперная система для контроля положения пути в плане // Вісник №25 Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту — 2009. — №25 — С. 69-71
73. Корженевич І., Точность съёмки плана железнодорожной колеи и пути ее повышения // Вісник №27 Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту — 2009. — №27 — С. 116 -120
74. Корженевич І. Удосконалення плану лінії для реалізації швидкісного руху поїздів / Корженевич І. Курган М., Харлан В. // Тези 69 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» — 2009. — С. 135-136
75. Корженевич І., Выправка кривых и решение задач плана в программе РВПлан // Особенности проектирования и строительства железных дорог в условиях Дальнего Востока: Сб. науч. тр. / Дальневосточный государственный университет путей сообщения; Под ред. В.С. Шварцфельда – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС — 2009. — С. 71-79
76. Корженевич І., Влияние плана железнодорожного пути на повышение эффективности работы инфраструктуры железнодорожного транспорта // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы межвуз.науч.-практ.конф. Иркутск — 2009. — т.1 — С. 386 - 388

77. Корженевич І. План залізничного пути: проблемы его съёмки: расчетов и реализации / Корженевич І., Суслов О., Торопов Б. // Вісник № 32 Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту — 2010. — №32 — С. 193-197
78. Корженевич І. Проблемы плана железнодорожного пути и направления их решения / Корженевич І., Суслов О., Торопов Б. // Проблемы и перспективы изысканий: проектирования: строительства и эксплуатации железных дорог: тр. IV Всероссийск. научн.-практ. конф. с международн.. участием:, Иркутск — 2010. — т.2 — С. 46- 54
79. Корженевич І. Изменение возвышения наружного рельса вдоль кривой / Корженевич І., Лыкова С., Мамитко А. // Вісник № 34 Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту — 2010. — №34 — С. 81- 87
80. Курган М. Перебудова кривих для впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів / Курган М., Гусак М., Хмелевська Н. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту — 2012. — №40 — С. 90-97
81. Халіпова Н., Моделювання взаємодії колії та рухомого складу // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна — 2013 — №5 — С. 58-69
82. Петренко В. Аналіз стійкості земляного полотна для реалізації умов його безпеки при підвищенні швидкості руху / Петренко В., Тютюкин А., Купрій В. // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті — 2015. — №9 — С. 76-85

- 83.Бондаренко І. Надійність залізничної колії / Бондаренко І., Курган Д., Арбузов М. // Навчальний посібник. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна — 2015. — 160с.
- 84.Циганенко В. В. Математическая модель взаимодействия пути и подвижного состава / Циганенко В. В. Халипова Н. В., Уманов М. І. // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. Труды XI между-народной научно-технической конференция — 2015. — С. 335-339
- 85.Lichtberger B. New TrackMaintenance Work Techniques // International Railway Journal — 2000. — С. 21
- 86.Pech F. Automatische Einzelfehlerbehebung / Pech F, Lichtberger B. // ETR — 2000. — №12 — С. 809-815
- 87.Lichtberger B. Laser-Controlled Tamping In Curves// International Railway Journal — 2005. — С. 12
- 88.Lichtberger B. Modern maintenance of switches // ZEVrail Glasers Annalen — 2005 — №129 — С. 2-9
- 89.Lichtberger B. Combating rolling noise of trains by means of rail grinding// Rail Ingeniring International — 2005. — №3 — С. 13-16
- 90.Lichtberger B. Track surveying.systems that provide high-accuracy correction values for the guiding of tamping machines: the EM-SAT, the GAL curve laser and the CAL-SAT // Rail Ingeniring International — 2010. — №3 — С. 4-7
- 91.Lichtberger B. Track maintenance strategies for ballasted track – a selection // Rail Ingeniring International — 2011. — №2 — С. 13-16

- 92.Lichtberger B. Modern tamping technology //RTR — 2011. — №3 — C. 11- 25
- 93.Lichtberger B. Bahnindustrie 4.0 - Innovative Railway Vehicle Monitoring RaVeM in der Anwendung // ZEVrail Glasers Annalen — 2016— №140— C. 2-11
- 94.Lichtberger B. Der neu entwickelte Universal Tamper 4.0 // Derei eisenbahn ingenieur — 2018 — №18 — C. 2-7
- 95.Stute E. Umweltfreundlich und ressourcenschonend stopfen / Stute E., Vogel R., Söllinger M., Lichtberger B. // Derei eisenbahn ingenieur — 2019. — May — C. 48-54
- 96.Курган М. Б. Шляхи зниження аварійності на залізничних переїздах / Курган М. Б., Лужицький О. Ф., Гаврилов М. О. // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. — 2014. — №. 7. — С. 53-62.
- 97.Даніленко Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін // ЦП-0117– К.: Транспорт України. — 2004. — 64 с.
- 98.Даніленко Е., Залізнична колія // Підручник для вищих навчальних закладів. Київ, Інпрес. – 2010. — Том 2 – 456 с.
- 99.Проектування і розрахунки конструкцій залізничної колії. Підручник для вищих навчальних закладів в 2-х томах: / Молчанов В., Курган М., Боко В., Твердомет В., Оліник О., Сорока О., За ред. д.т.н., проф. Даніленка Е. // К.: «Хай-Тек Прес» — 2019. — ISBN 978-966-910-034-4. — 344 с.
100. Курган, Д. М. Методика інженерного розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування колеса на рейку / Курган, Д. М., Губар О. В.,

- Гаврилов М. О. // Наука та прогрес транспорту. — 2020. — № 3 (87). — С. 71–80.
101. Оцінка можливості підвищення швидкості пасажирських поїздів на залізницях України / І. П. Корженевич, Б. І. Торопов, Ю. Л. Земляний, В. В. Арсонов // Залізничний транспорт України, № 6, 2007. — С. 9-11.
102. Корженевич И. П. Выправка кривых и решение задач плана в программе РВПлан // Особенности проектирования и строительства железных дорог в условиях Дальнего Востока. — 2009. — С. 71-79.
103. Бондаренко И. А. К вопросу о повышении качественной оценки работоспособности железнодорожного пути //Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. — 2007. — №. 18. — С. 46-50
104. Корженевич И. П. Построение и оптимизация эвольвентной модели при проектировании переустройства плана железнодорожной линии //Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. — 2007. — №. 18. — С. 51-53.
105. Інструкція по устрою та утриманню колії залізниць України. № 0050//ЦП. — Київ «Транспорт України» — 1999. — С. 6–7.
106. Корженевич И. П. Новые способы съёмки железнодорожных кривых // И. П. Корженевич // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. — 2006. — Вип. 12 — С. 45–49.
107. Корженевич И. П. Новые способы съёмки железнодорожных кривых // И. П. Корженевич // Вісник Дніпропетровського національного університету

- залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. — 2006. — Вип. 12 — С. 53-56.
108. Корженевич И. П. Модифицированный инструментальный способ съёмки плана железнодорожного пути // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. — 2008. — №24 — С. 85-87.
 109. Корженевич І. П., Мартова К. П., Ренгач М. Г., Гоц О. В. Технічні вказівки з перевірки плану та поздовжнього профілю залізничної колії // ЦП. — К.: ПП «Алькор» — 2004. — С. 10–12.
 110. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії : ЦП-0267 / О. М. Патласов, В. В. Рибкін, Ю. В. Палейчук, С. О. Соломаха, П. В. Панченко // — Київ, 2012. — 25 с.
 111. Юрковський Є. Інноваційні технології діагностики та обслуговування інфраструктури / Юрковський Є., Яковлев В. // Укр. залізниця. — 2013. — № 5. — С. 18–20.
 112. Щербина Ю. В. Использование ленты вагона-путеизмерителя для определения основных параметров железнодорожной кривой и оценки воздействия подвижного состава на путь в кривой / Щербина Ю. В., Саяпин А. С., Ватуля Л. П. // Залізн. трансп. України. — 1997. — № 1. — С. 22–23.
 113. Возненко А. Досвід зарубіжних країн в проведенні колієвимірювальних робіт при будівництві та експлуатації швидкісних магістралей // Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології» — 2011.— №19 — С. 23-25

114. Akpinar B. Multisensor Railway Track Geometry Surveying System / Akpinar B., Güral E. // IEEE Transactions on instrumentation and measurement — 2012. — №61 — C. 190-197
115. A Railway Track Geometry Measuring Trolley System Based on Aided INS / Chen O, Niu X, Zuo L, Zhang T, Xiao F, Liu Y, Liu J // Sensors — 2018 — №18 — C. 1-26
116. Chen Q Railway Track Irregularity Measuring by GNSS/INS Integration / Chen Q, Zhang Q, Cheng Y // Navigation — 2015. — March — C. 75-91
117. Zhou Y Kinematic Measurement of the Railway Track Centerline Position by GNSS/INS/ Zhou Y, Chen Q, Niu X / Odometer Integration // IEEE Access — 2019. — №7 — C. 157241-157253
118. Specht C Verification of GNSS Measurements of the Railway Track Using Standard Techniques for Determining Coordinates / Specht C, Wilk A, Koc V. // Remote Sens — 2020. — №12 — C. 1-24
119. Ковач Н., Шуршин К. Мобильное лазерное сканирование для мониторинга железных дорог.// Евразия вести — 2012. —№4 // [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2012-04a22>
120. Determination of the tram track axis using a multi receiver GNSS measurement system / Wilk A., Specht C., Koc W., Karwowski K., Skibicki J., Szmagliński J., Dąbrowski P., Specht M., Zienkiewicz M., Judek S., Chrostowski P., Skóra M., Grulkowski S. // Transportation Overview - Przegląd Komunikacyjny — 2020 — №4 — C. 1-17

121. Lichtberger B. Producing and securing the exact track geometry on main line tracks by EMSAT combined with GPS technology // AusRAIL PLUS — 2005. — С. 13-25
122. Lichtberger B. Electronically Assisted Surveying on Plain Track and Switches with GPS Link // Hestra-Verlag — 2001. — № 2-3 — С. 23-30
123. Машины для уплотнения балластной призмы, выправки и отделки пути // [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://gis.ru.net/article/masiny-dla-uplotnenia-ballastnoj-prizmy-vypravki-i-otdelki-puti>
124. Технічні вказівки з перевірки плану та повздовжнього профілю залізничної колії. ЦП 0124. затв. Наказом Укрзалізниці від 5.12.2004р. №971-ЦЗ / Корженевич І., Мартова К., Ренгач М., Гоц В. // К : Алькор, — 2004. — 30 с.
125. Изыскания и проектирование железных дорог / Турбин И, Гавриленков А., Кантор И. и др., Под ред.. И. В. Турбина. // – М.: Транспорт, — 1989. – 479 с.
126. Корженевич І., Рекуррентная математическая модель плана железнодорожного пути// Ресурсосберегающие технологии в транспортном и гидротехническом строительстве: Межвузовский сб. науч. тр. – Д. — 1996. – Вып. 2. – С. 63-64.
127. Корн Г., Справочник по математике // Корн Г., Корн Т. – М.: Наука. – 1973. – С. - 832
128. Босов А. А. Математическое моделирование оценки влияния подвижного состава на состояние пути в плане // Вопросы взаимодействия

- пути и подвижного состава в условиях интенсификации работы железнодорожного транспорта — 1990. — №278/31 — С. 36-39
129. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам на языке бейсик для персональных ЭВМ // Москва — Наука — 1987. — С. - 240
 130. Курган, Д. М. Діагностування і виправка положення залізничної колії колійними машинами: [препринт] / Д. М. Курган, М. О. Гаврилов // Українська залізниця. — 2016. — № 8 (38). — С. 60—64.
 131. Матвієнко О. Проблеми точності вимірювань кривих на міжнародних транспортних коридорах України/ Матвієнко О., Шевченко А. // Метрологія та прилади — 2018. — №4 — С. 56-60
 132. Щербаков В. В. Выправка пути при реконструкции и ремонте железнодорожных путей с использованием ГИС-технологий и ГНСС //Интерэкспо Гео-Сибирь — 2013. — №3.
 133. Полетаев В. И Подготовка железнодорожного пути к работе путевых машин/ Полетаев В. И., Шкурников С. В., Голубцов В. А. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2009. — №2 — С. 50-60.
 134. Misar H. Criteria for cost-effective ballast cleaning: machine design considerations // Rail Engineering International — 2005. — №4 — С. 11-16
 135. D. Kurhan, To the solution of problems about the railways calculation for strength taking into account unequal elasticity of the subrail base // Science and Transport Progress — 2016. — № 1 (55) — С. 90-99
 136. Kurhan D. The Mathematical Support of Machine Surfacing for the Railway Track / Kurhan D., Havrylov M. //Acta Technica Jaurinensis. – 2020. – T. 13. – №. 3. – С. 246-267.

137. Типові технічно обґрунтовані норми часу на роботи з поточного утримання колії № 138-Ц — Київ — 2010. — С.11-13.
138. Машина выправочно-подбивочно-рихтовочная ВПР-02. Техническое описание 1023.00.00.000 ТО и Инструкция по эксплуатации 1023.00.00.000 ИЭ // Москва «Транспорт» — 1995.
139. Расход топлива двигателей ямз-236 и 238 // [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://td-yamz.ru/rashod-topлива-dvigatелеj-yamz-236-i-238/>
140. B. Eller Review of the modern ballasted railway tracks' substructure and further investigations / B. Eller, S. Fischer // Science and Transport Progress — 2019. — № 6 (84). — С. 72-85
141. Monitoring and repair of isolated trackbed defects on a ballasted railway/ D. Milne, L. Le Pen, G. Watson, D. Thompson, W. Powrie, M. Hayward, S. Morley // Transportation Geotechnics — 2018. — №17 (A). — С. 61-68
142. A. Németh FEM Modelling Possibilities of Glued Insulated Rail Joints for CWR Tracks/ A. Németh, Z. Major, Sz. Fischer // Acta Technica Jaurinensis — 2020. — 13 (1) — С. 42-84
143. Effect of joint and isolated irregularities of the track on the wear of rails in curves / D. Potapov, S. Panchenko, Y. Leibuk, Y. Tuley, P. Plis, // MATEC Web Conf., 230 (2018) 01012
144. Multifractal Analysis of the Common Crossing Track-Side Measurements/ M. Sysyn, L. Izvolt, O. Nabochenko, V. Kovalchuk, J. Sestakova, A. Pentsak, //Civil and Environmental Engineering — 2019. — 15(2) — С. 101-114

145. Analysis of Vertical Irregularities and Dynamic Forces on the Switch Frogs of the Underground Railway / V. Boiko, V. Molchanov, V. Tverdomed, O. Oliinyk // MATEC Web Conf., 230 (2018) 01001

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
ФАЙЛ ВИПРОБУВАНЬ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ПОВТОРЮВАНOSTІ ДАНИХ
ОТРИМАНИХ З РОБОЧИХ ОРГАНІВ МАШИНИ

Приднепровская
ПМС80

ПМС80 S-
кривая Заезд вперед 1

1
1
8 10 0
-1

#####

ВПР-02

1
1
-1

Стасюкевич

39
100
0 1350 0

Дополнительная информация

625	5108	4955	10838	760	760			
1	14255	3785	2640	2640	14250	3805	2650	2650
270								
1	6,6	4,6	0,5	0	-1,6	-3,2	0	0
2	7	3,9	0,5	0	-1,8	-2	0	0
3	7,1	3,5	0,8	0	-2,7	-2,8	0	0
4	7,2	2,9	0,5	0	-3,5	-2,9	0	0
5	7	3,2	0,6	0	-4,1	-2,9	0	0
6	6,9	3,2	0,5	0	-4,3	-2,9	0	0
7	7	3	0,9	0	-4,3	-2,8	0	0
8	6,8	4	0,8	0	-4	-2,6	0	0
9	6,9	5,2	1,1	0	-3,6	-2,5	0	0
10	6,7	6,6	1,2	0	-2,7	-1,9	0	0
11	6,9	7,4	1,6	0	-1,8	-1,3	0	0
12	7,3	7,9	1,9	0	-0,9	-0,7	0	0
13	7,7	7,8	1,6	0	-0,5	-0,3	0	0
14	7,9	7,6	1,6	0	-0,6	-0,2	0	0
15	7,7	7,8	0,6	0	-0,7	-0,8	0	0
16	7,6	7,6	0,4	0	-0,5	-0,8	0	0
17	7,9	6,8	0	0	-0,8	-1,1	0	0
18	8,1	6,6	0,7	0	-0,8	-1,2	0	0
19	8,1	6,7	0,2	0	-0,8	-1,2	0	0
20	8,2	6,5	0,6	0	-0,9	-1	0	0
21	8,3	6,5	0,5	0	-0,7	-0,6	0	0
22	8,2	6,8	0,6	0	-0,3	0,2	0	0
23	8,2	6,9	0,7	0	-0,2	0,1	0	0

24	8,4	7	0,8	0	0	-0,1	0	0
25	8	7,6	0,5	0	0,4	-0,2	0	0
26	8	7,6	0,4	0	0,7	-0,2	0	0
27	8	7,3	0,5	0	0,8	-0,1	0	0
28	8,2	6,7	1	0	0,8	0,2	0	0
29	8	6,2	0,5	0	0,9	0,4	0	0
30	8,1	5,6	0,2	0	1,1	0,9	0	0
31	7,7	5,8	-0,6	0	1,5	1,9	0	0
32	8,3	5,4	-1	0	2,8	3,9	0	0
33	9,6	4,7	-1,4	0	4,8	6,9	0	0
34	9,8	4,7	-1,8	0	4,7	7,7	0	0
35	9,7	5,2	-2,4	0	1,5	4,3	0	0
36	9,5	6,3	-2,2	0	-1,9	1,4	0	0
37	9,3	7	-2,9	0	-3,5	0,3	0	0
38	8,9	8,1	-2,3	0	-4,2	-0,1	0	0
39	8,6	8,6	-2,3	0	-4,1	-1,1	0	0
40	8,3	8,6	-1,8	0	-4,3	-2,2	0	0
41	8	8,5	-1,6	0	-1,9	-2,3	0	0
42	8	8,4	-1,3	0	1	0,7	0	0
43	8,3	6,9	-1,3	0	3,1	3,1	0	0
44	8,4	5,3	-1,1	0	4,1	4,6	0	0
45	8,2	4,5	-0,8	0	4,5	5	0	0
46	8,4	4,2	-0,3	0	4,6	4,6	0	0
47	8,2	3,8	-0,1	0	4	3,6	0	0
48	8	3,4	0	0	3	3	0	0
49	7,6	2,8	-0,3	0	1,9	2,3	0	0
50	7,4	2,8	-0,3	0	0,9	2	0	0
51	7,1	3,9	-0,5	0	0,6	2	0	0
52	6,8	5,3	-0,6	0	0,6	2	0	0
53	6,4	6,3	-1,1	0	0,3	2,1	0	0
54	6,2	7,2	-1,8	0	-0,6	2	0	0
55	5,4	8,8	-2	0	-1,7	1,3	0	0
56	5,8	9,6	-1,8	0	-2,1	0,4	0	0
57	5,2	9,7	-1,1	0	-2,3	-0,6	0	0
58	5,3	8,1	-0,9	0	-2,2	-1,1	0	0
59	5	6,4	-0,6	0	-2,4	-1,1	0	0
60	4,6	4,9	-0,8	0	-2,5	-1,1	0	0
61	4,5	3,3	-0,6	0	-2,1	-1,1	0	0
62	4,1	2,1	0,4	0	-1	-0,7	0	0
63	4,3	0,9	0,9	0	-0,2	-0,1	0	0
64	4,2	0,3	1	0	0,4	0,5	0	0
65	4,1	-0,2	0,9	0	1	1,3	0	0
66	3,8	-0,2	0,3	0	1,3	1,9	0	0
67	3,5	-0,4	0,3	0	2	2,6	0	0

68	2,1	0,3	0,3	0	2,3	3,2	0	0
69	0,8	1,1	0,4	0	2,3	3,4	0	0
70	-0,4	2	0,1	0	2,2	4	0	0
71	-1,5	2,6	-0,3	0	2	4,3	0	0
72	-2,6	3,2	-0,5	0	2,3	4,9	0	0
73	-4,6	3,8	-0,5	0	3,7	6,1	0	0
74	-4,7	3,5	0,4	0	3,5	5,3	0	0
75	-4,9	2	0,9	0	1	2,4	0	0
76	-4,9	0,3	0,8	0	-1,8	-0,7	0	0
77	-5	-1,4	0,4	0	-3,1	-1,6	0	0
78	-4,7	-3,6	0,9	0	-3,5	-1,3	0	0
79	-4,7	-5,6	0,8	0	-3,2	-0,8	0	0
80	-4,6	-7,8	0,6	0	-2,7	-0,4	0	0
81	-4,4	-10,1	0,7	0	-2,3	-0,4	0	0
82	-4,7	-9,7	0,5	0	-0,5	1,3	0	0
83	-4,6	-7,8	0,6	0	0,8	2,5	0	0
84	-4,4	-6,6	-0,2	0	1,3	3,3	0	0
85	-4,8	-4,7	-0,6	0	1,4	3,4	0	0
86	-4,5	-3	-0,4	0	1,5	3,1	0	0
87	-4,5	-0,5	0,1	0	1,6	2,6	0	0
88	-4,5	1,4	0,8	0	1,7	2,1	0	0
89	-4,7	3,7	1,3	0	1,8	1,6	0	0
90	-4,4	3,9	1,9	0	1,9	1,4	0	0
91	-4,7	2,5	2,2	0	2,2	1,6	0	0
92	-4,5	1	2,5	0	2,9	2,8	0	0
93	-4,2	-0,2	2,7	0	3,9	4,7	0	0
94	-4,1	-2,5	2,8	0	4,8	6,1	0	0
95	-4,8	-4,1	2,8	0	5,3	6,4	0	0
96	-5	-5,9	2,7	0	5,6	7	0	0
97	-5,2	-7,3	2,4	0	6,2	7,8	0	0
98	-5,6	-8	2,2	0	6,2	8,3	0	0
99	-5,5	-9,2	1,4	0	5,6	8,4	0	0
100	-5,3	-9,4	1	0	4	8,1	0	0
101	-5,5	-9,4	0,1	0	2,3	7,1	0	0
102	-5,2	-9,2	0,2	0	1,1	6,4	0	0
103	-5,6	-8,1	-0,4	0	0,5	5,6	0	0
104	-5,5	-7,6	0,1	0	0	4,7	0	0
105	-5,9	-6,2	0,3	0	-0,1	4,1	0	0
106	-6,1	-5	0,6	0	0	3,6	0	0
107	-6,4	-4,4	1,2	0	0,3	3,4	0	0
108	-6,4	-4,1	1,8	0	0,7	3,1	0	0
109	-6,6	-3,7	2	0	0,9	3,3	0	0
110	-6,9	-3,5	2,4	0	0,9	3,6	0	0
111	-6,8	-3,7	2,9	0	1,5	4	0	0

112	-7,1	-3,8	3,6	0	2,3	4,5	0	0
113	-7,5	-4,2	3,7	0	3,1	6	0	0
114	-7,4	-5	1,7	0	1,1	6,7	0	0
115	-7,4	-5,7	-0,7	0	-2,9	5,4	0	0
116	-7,5	-5,8	-1,6	0	-5,7	3,4	0	0
117	-7,6	-6,4	-1,9	0	-6,7	1,6	0	0
118	-7,4	-6,9	-0,5	0	-6,7	0,7	0	0
119	-7,6	-7	0,5	0	-6,4	0,1	0	0
120	-7,5	-7,3	1,7	0	-6,2	0,3	0	0
121	-7,7	-6,9	1,8	0	-4,1	-0,5	0	0
122	-7,5	-7,1	1,9	0	-2	0,6	0	0
123	-7,7	-7,1	2,4	0	-0,2	1,7	0	0
124	-7,4	-7,3	2,8	0	1	3,1	0	0
125	-7,6	-7,3	2,8	0	1,4	4,1	0	0
126	-8,4	-6,9	3	0	1,3	4,7	0	0
127	-9,7	-6,7	3,1	0	1,1	5,2	0	0
128	-10,7	-6,7	3	0	1	5,5	0	0
129	-12	-7,1	3,3	0	0,9	5,6	0	0
130	-13,5	-7	3,5	0	0,9	5,6	0	0
131	-14,4	-6,6	3,9	0	1,2	5,6	0	0
132	-15,2	-6,7	4,7	0	1,4	5,2	0	0
133	-16,5	-6,7	5,4	0	1,5	4,6	0	0
134	-17,9	-7,1	6	0	0,9	4,3	0	0
135	-18,1	-8,2	6,3	0	-0,5	4,3	0	0
136	-18,5	-9,1	6,2	0	-1,5	5,4	0	0
137	-19	-10,6	6	0	-2,3	6,1	0	0
138	-19,4	-12,5	5,6	0	-3,2	6,8	0	0
139	-20,7	-14,7	5,5	0	-4,1	6,8	0	0
140	-22,3	-16,7	5,4	0	-4,7	6,5	0	0
141	-23,8	-18,6	5	0	-5,8	5,5	0	0
142	-26,4	-20,5	5,5	0	-6,3	4,8	0	0
143	-28,4	-21,5	5,3	0	-6,6	4,1	0	0
144	-30,6	-22,8	5,5	0	-6,5	2,9	0	0
145	-32,5	-22,9	5,5	0	-5,7	2,4	0	0
146	-34,4	-23	5,6	0	-4,2	2,5	0	0
147	-38	-23,1	5,5	0	-1,9	4	0	0
148	-41,2	-22,9	5,1	0	-0,4	5,4	0	0
149	-44,8	-22,7	4,9	0	1,1	6,7	0	0
150	-49,3	-22,6	5	0	2,8	8	0	0
151	-55,9	-23,8	5,6	0	5	9,7	0	0
152	-63,3	-26,9	7,6	0	7,8	10,3	0	0
153	-68,8	-30,6	11,9	0	11,1	9,5	0	0
154	-71,1	-35,8	18,7	0	14	5,8	0	0
155	-73,3	-40,4	22,8	0	12,3	0,4	0	0

156	-75	-45,5	25,3	0	9,4	-4,2	0	0
157	-77,1	-50,5	28,5	0	7,7	-6,6	0	0
158	-80,1	-54,8	30,2	0	6,2	-7,9	0	0
159	-83,7	-60,3	30,5	0	2,9	-8,4	0	0
160	-87,4	-63,9	29,7	0	0,1	-8,2	0	0
161	-91,2	-67,4	27,6	0	-4,6	-6,3	0	0
162	-95,2	-69,5	24,9	0	-5,1	-2,4	0	0
163	-100,1	-70,4	22,7	0	-5,1	1,4	0	0
164	-104,3	-70,8	19,8	0	-4,9	4,7	0	0
165	-108,5	-71,1	17,6	0	-4,2	6,8	0	0
166	-111,5	-71,5	16,9	0	-3,1	7,5	0	0
167	-113,9	-72	16,3	0	-1,7	7,3	0	0
168	-117,2	-74	16,6	0	-0,5	6,1	0	0
169	-119,9	-75,8	17,8	0	0,9	4	0	0
170	-122,4	-79,7	19,1	0	1,5	2	0	0
171	-126,5	-84,5	20,1	0	1,9	1,1	0	0
172	-130,6	-88,8	20,5	0	1,8	1,2	0	0
173	-132	-92,7	20,3	0	1,3	1,6	0	0
174	-132,3	-95,1	19,8	0	0,4	2,2	0	0
175	-132,2	-96,5	19,8	0	-0,8	2	0	0
176	-132,3	-98,6	20,1	0	-2	0,6	0	0
177	-132,9	-101,4	20,9	0	-2,1	-0,4	0	0
178	-133,4	-103,4	21,4	0	-1,7	-0,8	0	0
179	-134,7	-105,2	21,3	0	-1	-0,2	0	0
180	-135,7	-106,3	20,8	0	-0,3	0,9	0	0
181	-135,8	-106,8	21,1	0	0,3	1,5	0	0
182	-136,1	-106,6	21,3	0	2,1	2,9	0	0
183	-136,2	-105,9	21,5	0	3,5	4,2	0	0
184	-136,1	-105,3	21,6	0	4,9	5	0	0
185	-135,8	-105,1	21,9	0	6,1	5,2	0	0
186	-135,9	-105	22,5	0	6,5	5,3	0	0
187	-136,1	-104,8	22,5	0	6,5	4,8	0	0
188	-136	-104,5	22,3	0	5,9	4,6	0	0
189	-136,2	-104,2	22	0	5	4,2	0	0
190	-135,8	-104,2	21,6	0	4	3,7	0	0
191	-135,9	-104,3	21,3	0	3,6	3,5	0	0
192	-137,3	-104,6	21,6	0	4,2	4	0	0
193	-140,7	-105,2	21,9	0	5,3	4,9	0	0
194	-141,7	-106,7	21,5	0	6,8	6,5	0	0
195	-141,4	-107,6	21,9	0	5,1	4,7	0	0
196	-140,8	-108,3	21,7	0	2,4	2,2	0	0
197	-140	-108,5	20,5	0	-0,4	-0,2	0	0
198	-138,8	-108,6	20	0	-2,2	-1	0	0
199	-137,9	-108,3	19,9	0	-4	-2,2	0	0

200	-137,1	-107,9	18,6	0	-5,5	-2	0	0
201	-136,4	-108,5	18	0	-7,5	-2,7	0	0
202	-135,9	-108,2	17,6	0	-6,8	-1,9	0	0
203	-136	-107,2	16,6	0	-5,3	-0,7	0	0
204	-135,8	-106,3	16,1	0	-3,8	0,7	0	0
205	-135,5	-105,4	15,4	0	-2,2	2,3	0	0
206	-135,7	-103	14,8	0	-0,4	3,9	0	0
207	-135,4	-101,7	14,5	0	0,9	5	0	0
208	-135	-99,9	14,4	0	2	5,4	0	0
209	-130,6	-96,1	14,5	0	2,7	5,5	0	0
210	-128,9	-94	14,3	0	2,9	5,2	0	0
211	-128	-94,1	14,3	0	2,6	4,3	0	0
212	-126,8	-94,8	14	0	2,2	3,8	0	0
213	-124,6	-94,7	14,1	0	2	3,2	0	0
214	-121,2	-94,9	14,2	0	1,6	2,1	0	0
215	-118,1	-94,5	14,2	0	0,5	0,8	0	0
216	-115,7	-94,3	14,6	0	-0,3	-0,3	0	0
217	-113,5	-93,8	14,5	0	-0,6	-0,5	0	0
218	-111,7	-93,4	14	0	-0,7	0,1	0	0
219	-109,5	-92,5	13,1	0	-0,4	2	0	0
220	-106	-89,3	12,5	0	0,5	4,1	0	0
221	-102,1	-84,9	12,4	0	1,8	5,7	0	0
222	-99,2	-79,9	12,6	0	3	6,4	0	0
223	-96,7	-75,9	12,5	0	3,8	6,6	0	0
224	-94,2	-73	12,4	0	4,1	6,5	0	0
225	-91,6	-70,7	12,1	0	4	6	0	0
226	-89,3	-68,6	11,5	0	3,3	5,6	0	0
227	-87,2	-66,5	10,9	0	2,4	5,4	0	0
228	-84,7	-64,8	10,6	0	1,6	4,8	0	0
229	-82,3	-63,4	10,1	0	-0,1	3,8	0	0
230	-80,6	-62,8	9,4	0	-2,2	2,7	0	0
231	-79,2	-62,9	8,2	0	-4,5	1,2	0	0
232	-76,5	-62,7	6,8	0	-6,6	0,3	0	0
233	-72,1	-60,9	5,1	0	-7,8	0,2	0	0
234	-68,2	-58,7	3,8	0	-9	0,5	0	0
235	-65,3	-56,1	2,3	0	-10,6	0	0	0
236	-61,6	-53,3	1,7	0	-11,3	-1	0	0
237	-57,7	-50,8	1,8	0	-10,8	-1,7	0	0
238	-53,6	-47,9	1,6	0	-9,7	-1,7	0	0
239	-48,6	-42,7	2,2	0	-8,2	-1,7	0	0
240	-45,1	-38,6	2,3	0	-6,6	-1,2	0	0
241	-42,3	-34,7	2,4	0	-5,9	-1,1	0	0
242	-40	-32,1	2,5	0	-4,6	-0,7	0	0
243	-37,8	-28,8	2,4	0	-3,7	-0,3	0	0

244	-34,6	-26,9	2,5	0	-2,9	-0,2	0	0
245	-31,4	-25,4	2,5	0	-1,9	0	0	0
246	-27,5	-24,3	2,7	0	-1,4	0,4	0	0
247	-23,3	-23,2	2,8	0	-1	0,6	0	0
248	-19,3	-21,8	3	0	-0,9	0,7	0	0
249	-17,6	-20,8	2,7	0	-1,2	0,4	0	0
250	-15,2	-19,5	2,1	0	-2	0,1	0	0
251	-13,2	-17,1	1,8	0	-3,2	-0,4	0	0
252	-11,3	-16	1,4	0	-4,5	-1,4	0	0
253	-10	-14,3	1,4	0	-5	-2,2	0	0
254	-9,5	-12,4	2	0	-5	-2,5	0	0
255	-9	-8,6	2,6	0	-5	-2,5	0	0
256	-6,5	-3,8	2,2	0	-4,6	-2	0	0
257	-5	-0,6	1,2	0	-3,8	-0,5	0	0
258	-4,9	1,5	0,1	0	-3,3	1	0	0
259	-5,1	2,5	-0,4	0	-3,2	1,7	0	0
260	-4,8	3,5	-1,3	0	-3	2,2	0	0
261	-4,7	3,8	-1,2	0	-2,8	2,4	0	0
262	-4,8	3,5	-1,3	0	-2,7	2,3	0	0
263	-5,1	1,9	-2,6	0	-2,6	2,1	0	0
264	-4,8	-0,7	-2,4	0	-3	1,2	0	0
265	-4,9	-3	-2,2	0	-3,4	0,2	0	0
266	-4,8	-5,1	-1,7	0	-3,7	-0,6	0	0
267	-5,1	-6,2	-1,1	0	-3,9	-0,9	0	0
268	-4,7	-6,6	-0,8	0	-3,8	-0,9	0	0
269	-4,7	-6,5	-0,7	0	-3,7	-0,8	0	0
270	-4,6	-5,9	-0,9	0	-3,8	-0,6	0	0

ДОДАТОК Б
РЕЗУЛЬТАТИ МАНУАЛЬНОЇ ЗЙОМКИ ПЛАНУ ТА ПОЗДОВЖНЬОГО
ПРОФІЛЮ В ХОДІ ВИПРОБУВАНЬ З ОТРИМАННЯ ДОСТОВІРНИХ
ДАНИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм		Висотні відмітки головки рейки до виправки, м		Висотні відмітки головки рейки після виправки, м	
	до виправки	після виправки	Права рейка	Ліва рейка	Права рейка	Ліва рейка
1	2	3	4	5	6	7
-2	0	-3	9.602	9.608	9.602	9.608
-1	-3	-6	9.594	9.593	9.594	9.593
0	-6	-10	9.582	9.579	9.592	9.592
1	-14.5	-6.5	9.620	9.610	9.630	9.620
2	-15	-13	9.618	9.601	9.634	9.627
3	-17.5	-21.5	9.622	9.596	9.640	9.626
4	-23.5	-35	9.622	9.584	9.636	9.612
5	-23	-45	9.608	9.568	9.638	9.605
6	-41	-50	9.626	9.574	9.654	9.610
7	-54.5	-54.5	9.634	9.572	9.662	9.608
8	-56	-56	9.649	9.574	9.673	9.610
9	-58.5	-71.5	9.654	9.576	9.676	9.607
10	-57	-70.5	9.648	9.564	9.698	9.616
11	-71.5	-66	9.672	9.593	9.716	9.635
12	-74	-62.5	9.681	9.612	9.717	9.637
13	-71	-60	9.700	9.623	9.723	9.645
14	-70.5	-60	9.718	9.639	9.740	9.661
15	-65	-59.5	9.726	9.653	9.755	9.676
16	-59	-60	9.734	9.660	9.769	9.691
17	-57.5	-65	9.752	9.673	9.783	9.701
18	-56.5	-62.5	9.753	9.673	9.797	9.714
19	-62	-62	9.752	9.674	9.799	9.719
20	-59	-63.5	9.749	9.667	9.797	9.717
21	-56.5	-67	9.739	9.667	9.808	9.728

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм		Висотні відмітки головки рейки до виправки, м		Висотні відмітки головки рейки після виправки, м	
	до виправки	після виправки	Права рейка	Ліва рейка	Права рейка	Ліва рейка
1	2	3	4	5	6	7
22	-56	-66.5	9.751	9.678	9.830	9.751
23	-65	-65.5	9.768	9.688	9.853	9.773
24	-72.5	-68	9.775	9.697	9.859	9.779
25	-74.5	-70	9.782	9.709	9.869	9.790
26	-74.5	-65	9.808	9.729	9.889	9.802
27	-66.5	-72.5	9.824	9.747	9.890	9.810
28	-68.5	-72.5	9.837	9.757	9.889	9.805
29	-73.5	-70.5	9.836	9.758	9.892	9.810
30	-74	-70.5	9.813	9.744	9.897	9.819
31	-67.5	-66.5	9.826	9.745	9.853	9.777
32	-66	-64.5	9.812	9.734	9.825	9.747
33	-67	-60.5	9.786	9.706	9.801	9.724
34	-60	-59	9.769	9.690	9.781	9.705
35	-56.5	-55	9.744	9.662	9.760	9.681
36	-53.5	-53.5	9.725	9.640	9.741	9.663
37	-51	-57	9.712	9.633	9.723	9.649
38	-54	-56	9.697	9.612	9.711	9.635
39	-55	-51	9.687	9.603	9.699	9.629
40	-53.5	-51.5	9.662	9.583	9.679	9.605
41	-56.5	-45	9.649	9.577	9.665	9.597
42	-40	-47.5	9.643	9.576	9.658	9.597
43	-47.5	-48.5	9.643	9.583	9.658	9.604
44	-45	-45	9.641	9.588	9.657	9.607
45	-46.5	-39	9.631	9.585	9.619	9.613

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм		Висотні відмітки головки рейки до виправки, м		Висотні відмітки головки рейки після виправки, м	
	до виправки	після виправки	Право рейка	Ліва рейка	Право рейка	Ліва рейка
1	2	3	4	5	6	7
46	-35	-30	9.639	9.594	9.657	9.622
47	-34.5	-24	9.642	9.606	9.659	9.625
48	-23	-14	9.645	9.613	9.659	9.631
49	-16.5	-8	9.649	9.624	9.663	9.641
50	-4.5	-3	9.653	9.631	9.669	9.655
51	-4	-6	9.663	9.655	9.678	9.669
52	-4	-2.5	9.671	9.669	9.683	9.682
53	-4.5	-1.5	9.685	9.682	9.697	9.695

ДОДАТОК В

РЕЗУЛЬТАТИ ЗЙОМКИ ПЛАНУ ТА ПОЗДОВЖНЬОГО ПРОФІЛЮ
АВТОМАТИЗОВАНОЮ СИСТЕМОЮ МАШИНИ ВПР-02 В ХОДІ
ВИПРОБУВАНЬ З ОТРИМАННЯ ДОСТОВІРНИХ ДАНИХ ДЛЯ
СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
1	-7.3	15.3	4.7
2	-8.2	12.3	4.4
3	-6.5	8.9	5
4	-4.9	6.2	4.2
5	-0.3	4.1	2.2
6	3.7	2.9	-2
7	4.2	2.9	-5.1
8	5.3	4	-5.5
9	7.1	0.9	-3.6
10	7.4	-1.5	-1.6
11	7.6	-3.3	-0.8
12	7.8	-4.5	-0.1
13	8.3	-5.2	-1.3
14	10.4	-4.6	0.2
15	14.6	-0.7	0.1
16	15.5	5.7	-1.7
17	15.7	10	-2.9
18	15.6	13.5	-4.6
19	15.4	16.5	-6
20	11.1	17.6	-7.4
21	8.2	18.4	-9.9
22	5.7	19.5	-11.7
23	5.4	21.3	-13.2
24	3.8	22.7	-13.2
25	0.8	22.5	-12.9
26	-1.7	18.7	-10.1

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
27	-3.7	10.7	-8.4
28	-4.1	4.1	-6.7
29	-5.2	-1.2	-5.6
30	-7.4	-5.4	-4.9
31	-9.1	-7.8	-3.8
32	-11.3	-6.5	-4.3
33	-13	-2.9	-5.3
34	-14.8	0.8	-5.3
35	-15.6	3	-5.4
36	-15.7	3.3	-5.5
37	-15.8	2.2	-6.1
38	-15.7	-0.3	-7
39	-15.8	-2.7	-7.2
40	-16.3	-5.5	-7.3
41	-16.4	-8.1	-7.9
42	-16.9	-10.3	-9.1
43	-17.8	-11.9	-10.5
44	-18.4	-13.1	-11.6
45	-18.3	-13.7	-12.6
46	-18.3	-13.8	-12.2
47	-18.3	-12.9	-11.5
48	-18.3	-10.1	-12.9
49	-18.3	-6.7	-13.9
50	-18.8	-2.4	-15.5
51	-18.6	2.1	-15.7
52	-18.4	6.3	-16.4

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
53	-18.7	8.7	-17.2
54	-18.4	10.3	-18.1
55	-18.7	9.9	-19.1
56	-18.6	8.6	-19.1
57	-18.5	7.1	-19.1
58	-18.7	5.6	-19.2
59	-19	4.9	-20
60	-19.2	5.2	-20.3
61	-19.2	5.7	-20.5
62	-19.4	6.8	-21.1
63	-19.5	9.4	-22.7
64	-19.5	12.3	-24.3
65	-19.5	14.6	-25.3
66	-19.5	14.1	-24.8
67	-19.7	10	-24.2
68	-19.7	4.1	-23.7
69	-19.5	-2	-23.9
70	-19.3	-5.3	-26
71	-18.6	-7.4	-25.8
72	-18.8	-7.7	-25.4
73	-18.7	-5.8	-26.9
74	-19.1	-3.1	-26.7
75	-19.7	-0.9	-27.3
76	-19.9	1.1	-28.5
77	-19.7	1.2	-29.1
78	-19.6	0.9	-28.8

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
79	-19.5	0.5	-29.2
80	-20.3	1.1	-31
81	-21.4	2.9	-33
82	-22.1	6.1	-35.4
83	-22.3	10.5	-37.6
84	-22.1	15	-40.1
85	-22.4	19	-41.3
86	-22.9	17.5	-41.2
87	-24.2	14.3	-42.7
88	-24.3	8.3	-42.3
89	-25.1	1.4	-40.2
90	-24.8	-4.6	-40
91	-24.1	-9.3	-38.7
92	-24	-9.6	-38.4
93	-24.2	-5	-39.1
94	-24.3	-1	-39.9
95	-24.4	2.4	-40.3
96	-24	4.4	-40.4
97	-23.9	5.1	-41.4
98	-24.5	4.3	-41.4
99	-24.4	3.1	-41.9
100	-24.2	2.7	-42.3
101	-24.2	3.2	-42.6
102	-24.1	4.6	-42.4
103	-24	6.8	-41.6
104	-24.3	9.5	-40.6

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
105	-26.1	12.1	-41
106	-27.3	14.2	-42.3
107	-29.5	14.3	-42.3
108	-31.6	12	-42.6
109	-32.5	8.7	-44.9
110	-33.4	5.7	-44.5
111	-35.1	1.7	-49.1
112	-37.4	0.2	-48.6
113	-38.5	-0.5	-48.4
114	-38.9	-0.1	-47.7
115	-39.9	0.3	-47.9
116	-41.7	0.8	-48.7
117	-43.8	1.3	-48.8
118	-45.6	1.7	-48.8
119	-45.9	2.2	-48.7
120	-45.7	2.7	-49.2
121	-45.8	2.8	-50.4
122	-45.6	3.1	-51.9
123	-45.3	3.3	-52.6
124	-45.5	3.6	-53.2
125	-45.6	3.7	-53.6
126	-45.7	3.8	-55.1
127	-48.1	4	-55.9
128	-49.4	4.3	-56.3
129	-50.2	4.5	-56.7
130	-51.1	4.8	-57

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
131	-52.6	5.3	-57.4
132	-53	5.7	-58.6
133	-53.7	6.2	-59.6
134	-53.7	6.3	-60.4
135	-55	5.9	-60.4
136	-56.3	5.1	-60.3
137	-57.6	4.4	-61.2
138	-58.4	4.5	-62.3
139	-59	5.1	-63.2
140	-59.9	6.4	-63.4
141	-62.1	7.5	-63.3
142	-63.3	8.4	-62.4
143	-63.4	8.9	-62
144	-63	9	-61.8
145	-61.5	8.2	-61.3
146	-61.4	6.4	-61.7
147	-60.8	4	-63.1
148	-61.2	2.1	-64.5
149	-61.1	0.2	-66.9
150	-61.1	-1.6	-68.1
151	-60.9	-3	-69.4
152	-61.1	-2	-70.8
153	-61.2	-0.5	-72.4
154	-60.9	1.5	-72.5
155	-61.1	2.9	-73
156	-60.9	3.1	-72

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
157	-60.8	2.8	-71.4
158	-60.5	2.3	-72.1
159	-60.6	1.8	-73.8
160	-60.8	1.9	-75.2
161	-61.8	2.8	-76.3
162	-62.3	4.9	-77.6
163	-62.8	7.7	-78.4
164	-63.1	11.2	-79.8
165	-63.5	15.3	-81.4
166	-63.5	15.1	-81.5
167	-63.4	10.8	-80.3
168	-63.4	5.4	-79.8
169	-62.7	0.8	-79.4
170	-62.2	-2.3	-79
171	-62	-4.3	-79.8
172	-61.9	-5.1	-78.8
173	-62.4	-0.9	-78.4
174	-62.2	1.6	-78.3
175	-62.2	3.6	-77.6
176	-62	5.5	-77.9
177	-62.2	6.1	-78.4
178	-61.9	6.2	-78.9
179	-61.6	6.3	-79.3
180	-60.9	7.3	-79.5
181	-60.3	9.3	-80.2
182	-60.4	12.6	-81

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
183	-60.4	16.6	-82
184	-60.4	20.5	-82.5
185	-61.1	22.9	-82.6
186	-63.2	27.3	-83.2
187	-65.9	26	-83.1
188	-67.5	20.2	-83.6
189	-68.6	9.6	-81.5
190	-69.4	1.1	-80.7
191	-70.5	-4.3	-80.1
192	-70.8	-7.3	-80
193	-72.5	-8.3	-80
194	-73.4	-4.8	-79.8
195	-75.1	-1.5	-79.9
196	-76	1.9	-79.9
197	-76.7	5.1	-80.3
198	-77.6	7.1	-80.4
199	-78.2	6.9	-79.8
200	-78.6	6	-79
201	-78.7	5.1	-78.1
202	-78.5	4.8	-77.8
203	-78.5	5	-77.9
204	-78.9	5.4	-77.9
205	-79.2	5.4	-77.9
206	-79	5.1	-77.9
207	-79.2	4.5	-77.9
208	-79.7	4.2	-78.1

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
209	-80.2	4.2	-78.4
210	-80.7	4.4	-78.6
211	-81	4.1	-77.8
212	-80.8	3.7	-77.3
213	-80.8	3.3	-77
214	-81.3	3.3	-77.4
215	-81.4	3.6	-77.4
216	-81.4	3.5	-77
217	-81.3	3.2	-76.6
218	-81.4	3.1	-76.4
219	-81.3	3.7	-76.6
220	-81.5	4.8	-76.9
221	-81.3	6	-76
222	-80.4	6.3	-74.9
223	-79.8	7.2	-73.9
224	-79.8	8.8	-74
225	-79.6	10.4	-75.2
226	-79.3	11.2	-76.3
227	-79.2	9.9	-74.6
228	-78.9	7.3	-73
229	-78.7	4.2	-74
230	-78.1	2.1	-75.3
231	-77.8	0.3	-75.6
232	-77.7	-0.5	-75.1
233	-78.7	1.3	-74.9
234	-79.2	3.2	-75.9

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
235	-79.3	5.2	-76.7
236	-79.4	7.2	-76.9
237	-79.2	8	-77
238	-79.3	8.2	-77.7
239	-79.3	7.7	-77.4
240	-79.4	7.1	-76.4
241	-79.2	7	-75.2
242	-78.1	7.2	-74.9
243	-77.5	8.1	-74
244	-77.3	9	-72.5
245	-77.2	9.8	-70.3
246	-76.9	10.5	-72.6
247	-76.6	9.2	-74.5
248	-76.5	6.5	-75.3
249	-76.1	3.2	-76
250	-74.8	0.3	-74.7
251	-72.9	-1.5	-74.9
252	-70.8	-3	-75.3
253	-68.7	-2.4	-74.9
254	-68.1	-0.6	-74.8
255	-67.9	1	-75.2
256	-67.5	1.9	-75.5
257	-68	2.7	-75.5
258	-67.9	3.7	-75.3
259	-67.8	4.5	-75.2
260	-67.8	5.2	-75

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
261	-67.8	6.2	-74.9
262	-67.8	6.9	-74.6
263	-68	7.9	-74.1
264	-68.5	9.2	-72.5
265	-68.8	10	-71.1
266	-68.6	8.5	-71.6
267	-69.3	6.2	-72.2
268	-69.7	3.5	-73.2
269	-69.2	1.2	-74
270	-68.6	-1.1	-74.7
271	-67.3	-2.9	-75.4
272	-66.2	-3.7	-76.2
273	-65.7	-2.2	-76.7
274	-65.6	-1	-76.1
275	-65.4	1.6	-77.2
276	-65.5	3.5	-77.9
277	-65.5	3.9	-77.8
278	-65.4	4	-77.5
279	-64.8	5	-77.1
280	-64.2	6.1	-77.4
281	-63.5	7.1	-76.9
282	-62.6	8.5	-75.8
283	-61.2	9.9	-75.1
284	-61	11.4	-75
285	-60.3	13.2	-74.5
286	-60.6	11.2	-70.9

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
287	-62	6.7	-69.6
288	-64.3	2.1	-71
289	-64.5	-2	-72.7
290	-64.1	-5.2	-75.6
291	-63.8	-6.9	-76.4
292	-63	-7.7	-78.2
293	-61.8	-4.1	-78.2
294	-60.7	-2.8	-77.7
295	-58.9	-0.5	-77.6
296	-57.5	1.5	-77.2
297	-56.2	2.7	-77
298	-56.2	3.4	-76.6
299	-55.8	4	-76.6
300	-55.4	5.2	-77.2
301	-55	6.7	-78.2
302	-54.6	8.6	-79.4
303	-54.9	11.1	-80.5
304	-54.3	13.7	-81.8
305	-54.2	16.2	-82.5
306	-54.5	19.7	-84.6
307	-54.4	18.6	-84.5
308	-54.6	13.2	-82.9
309	-55.9	5.5	-82.5
310	-57.5	-0.2	-80.7
311	-58.7	-4	-79.7
312	-60.2	-6.6	-78.7

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
313	-63.1	-6.8	-78.7
314	-64.6	-4.2	-78.7
315	-65.7	-1.1	-78.7
316	-66.8	1.5	-78.2
317	-67.5	3	-78.1
318	-68.1	4.3	-78.4
319	-68.6	4.8	-79.1
320	-68.2	4.9	-79.6
321	-68.9	4.8	-79.4
322	-68.9	4.6	-79.2
323	-68.7	4.2	-79
324	-68.9	3.7	-78.9
325	-68.8	3.1	-78.6
326	-68.9	2.5	-78
327	-68.2	2	-77.3
328	-68.7	2.2	-77
329	-68.2	2.5	-77.9
330	-68.5	3.1	-78.4
331	-68.5	3.4	-78.8
332	-68.3	3.6	-77.6
333	-68	3.5	-77.4
334	-67.9	3.4	-77.5
335	-68	3.4	-77.8
336	-68.1	3.3	-78.1
337	-67.9	3.3	-78.1
338	-67.9	3.6	-77.7

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
339	-68	4.4	-77.7
340	-67.4	5.4	-78.1
341	-67.1	6.4	-78.5
342	-66.6	7.2	-78.6
343	-65.4	8.2	-77.8
344	-63.8	11	-77.2
345	-61.8	12.1	-77.3
346	-60.7	11.7	-77.9
347	-60.4	9.9	-78.4
348	-60.4	7.3	-77.8
349	-60.6	4.5	-78.3
350	-60.5	1.7	-78.6
351	-60.6	-0.6	-77.6
352	-60.5	-2.3	-78.4
353	-60.5	-0.5	-77.7
354	-60.6	0.9	-77.4
355	-60.6	1.9	-77.5
356	-60.2	2.7	-77
357	-60.4	3.8	-77.4
358	-60.6	4.6	-77.4
359	-61.7	5.3	-77.4
360	-63.5	6.7	-76.9
361	-64.5	7.9	-75.9
362	-64.6	8.8	-74.1
363	-64.8	10.3	-72
364	-64.8	12.2	-69.2

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
365	-64.4	13.3	-67.7
366	-63.8	12.7	-65.3
367	-63.9	9.6	-66.7
368	-63.8	6.4	-66.6
369	-63.5	3.4	-70
370	-63.3	1.4	-70.3
371	-62.9	-0.4	-72.1
372	-62.6	-1.4	-73.9
373	-62.7	0	-74.7
374	-63	1.8	-75.3
375	-62.7	2.9	-75.4
376	-62.9	2.7	-74.7
377	-62.7	2.4	-74.9
378	-63.1	3.2	-74.8
379	-63.8	4.5	-74.8
380	-63.6	6	-74.6
381	-64.3	7.7	-73.5
382	-64.7	9.1	-72.7
383	-66.3	11	-72.1
384	-67.3	13.1	-71.4
385	-69.2	15.3	-71.6
386	-71.4	16.5	-70.4
387	-71.9	14.3	-70.9
388	-72.8	10.7	-72.5
389	-73.7	6.2	-74.2
390	-74.8	3.1	-75.4

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
391	-75.7	-0.2	-77.2
392	-76.5	-2.9	-76.8
393	-76.1	-2.9	-76.8
394	-76.3	-1.6	-77
395	-76.6	0.7	-78.1
396	-76.5	3.1	-78.6
397	-77	4.3	-78.3
398	-77	4.5	-77.3
399	-76.7	4.4	-77.3
400	-77	4	-77.1
401	-77.1	4.1	-77.3
402	-77.5	4.4	-77.6
403	-77.7	4.3	-77.3
404	-78.2	4	-76.8
405	-78.9	3.8	-76.5
406	-79	4.2	-76.6
407	-79.5	4.8	-76.7
408	-80	5.6	-76.6
409	-81.4	5.8	-76.1
410	-82.1	6	-76
411	-82.4	6.1	-75.8
412	-83.3	6.6	-76.2
413	-82.6	6.7	-76.3
414	-82.3	6.1	-76.1
415	-82.5	5.3	-75.3
416	-82.4	4.5	-75.1

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
417	-82.9	4	-75.5
418	-83.6	3.5	-75.8
419	-83.8	3.3	-75.8
420	-84.7	3.2	-75.7
421	-84.8	3.5	-75.2
422	-84.9	4.7	-75.2
423	-85	7.5	-75.3
424	-85.4	10.3	-74.3
425	-84.2	13.2	-73.7
426	-82	15.3	-73.5
427	-81.4	14	-73.9
428	-81.4	11.9	-74.3
429	-81.4	7.2	-75.1
430	-81.1	2.4	-75.6
431	-81.1	-0.8	-76.5
432	-81.1	-3.7	-77.6
433	-81.1	-3.2	-77.7
434	-80.9	-1.3	-77.9
435	-81.3	0.8	-78
436	-81.1	2.5	-78.4
437	-80.2	3.8	-78.4
438	-79.4	3.9	-77.3
439	-79.8	3.6	-76.9
440	-79.8	3.6	-77.3
441	-79.8	4.2	-77.1
442	-79.5	5.3	-76.7

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
443	-79.1	7	-76.3
444	-79.3	9.2	-74.4
445	-78	10.7	-73.6
446	-76.5	12.4	-72.7
447	-76.2	10.3	-71.1
448	-75	6.4	-72.1
449	-75	2.4	-73.4
450	-75	-0.9	-73.8
451	-74.9	-3.8	-75.3
452	-73.9	-5.5	-76.9
453	-73.1	-4.3	-78.5
454	-73.3	-1.1	-79
455	-73.6	1.1	-78
456	-73.7	2.4	-76.4
457	-73.4	4	-75.6
458	-73.5	5.2	-75.7
459	-73.5	5.4	-75.8
460	-74.6	5.2	-75.5
461	-75.3	5.1	-74.2
462	-77.3	5.5	-73.9
463	-78.2	6.7	-73.2
464	-78.7	8.6	-72.8
465	-77.7	10.8	-71.1
466	-76.4	12.1	-68.3
467	-75.1	9.7	-66.2
468	-73.6	4.8	-66.7

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
469	-73.1	-0.1	-67.9
470	-72.6	-4.6	-70.6
471	-72.8	-7.6	-71.7
472	-72.7	-9.5	-73.2
473	-72.9	-7.8	-74.1
474	-72.9	-2.3	-77.4
475	-73.1	2.1	-77.9
476	-73.3	5.1	-78.7
477	-72.9	6.7	-79.2
478	-72.8	6.5	-79.3
479	-72.7	5.6	-78.9
480	-73	5.1	-78.3
481	-73.5	5.5	-77.7
482	-74.4	6.9	-77.4
483	-75.7	8.8	-76.9
484	-76.8	11.3	-76.2
485	-78.4	14.3	-75.4
486	-80.2	16.9	-75.2
487	-80.6	16.3	-76.4
488	-80.6	11.6	-75.4
489	-80.8	6.3	-76.6
490	-80.8	1.9	-77.6
491	-80.8	-2.2	-77.6
492	-80.8	-5.7	-78.1
493	-80.6	-6.5	-77.5
494	-80.5	-5	-77.4

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
495	-80.6	-2.3	-76.6
496	-80.8	-1	-75.8
497	-80.9	0.5	-75.3
498	-80.7	2.4	-75.9
499	-81	3.6	-75.9
500	-80.8	4.9	-76.3
501	-80.9	7.1	-75.7
502	-80.7	9.6	-74.6
503	-81.1	12	-73.1
504	-81.2	14.6	-71.4
505	-80.5	16.5	-70.5
506	-80.3	17.6	-67.3
507	-80.2	15.3	-65.3
508	-79.7	10.4	-66.4
509	-79.4	5.1	-69.1
510	-79.2	0.6	-71.1
511	-79.1	-2.4	-74.1
512	-78.5	-4.8	-75.9
513	-77.9	-3.6	-76.7
514	-76.9	0.5	-78.2
515	-76.2	2.5	-78.9
516	-75.7	3.8	-78.5
517	-75.8	3.9	-77.7
518	-75.2	3.9	-78
519	-74.9	3.9	-79.4
520	-75.5	4.1	-80.1

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
521	-76.7	4.3	-80.2
522	-76.5	4.2	-79.9
523	-75.4	4.1	-79.8
524	-75.5	4	-79.7
525	-75.4	4.1	-80.2
526	-75.1	4	-79.8
527	-75.2	3.8	-79.7
528	-75.3	3.6	-79.2
529	-75.3	3.4	-79.3
530	-75.5	3.5	-79.6
531	-75.5	3.5	-79.6
532	-75.4	3.2	-79.6
533	-75.2	2.6	-78.9
534	-75.3	2.3	-78.3
535	-75.4	2	-78.8
536	-75.3	1.9	-79.8
537	-75.5	1.9	-79.9
538	-75.1	2.1	-79.8
539	-75.2	2.6	-79.6
540	-75.8	3.8	-79.7
541	-75.4	5.1	-80.3
542	-75.1	6.5	-80.4
543	-75.6	7.7	-79.9
544	-76.4	9.3	-77.4
545	-76.6	10.4	-75.6
546	-76	10.6	-74.3

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
547	-74.6	10	-75
548	-73.2	8.7	-76.6
549	-72.4	7.1	-77.9
550	-71.3	5.5	-78.6
551	-70.6	4.8	-78.9
552	-69.2	4.1	-80.5
553	-68.2	4.2	-80.5
554	-67.6	4.7	-80.7
555	-67.4	5.7	-80
556	-66.3	5.9	-79.6
557	-65.8	5.7	-78.8
558	-66.5	5	-78.6
559	-66.8	4.3	-78.8
560	-64.6	4.4	-79.7
561	-62.2	5.4	-81.1
562	-61.2	7.8	-82.7
563	-61.1	11.6	-85.3
564	-60.6	16.6	-88.4
565	-61.1	21.9	-90.9
566	-62.2	25.4	-91.4
567	-64.1	21.8	-88.2
568	-65.5	16.1	-87.4
569	-65.9	8.5	-85.4
570	-66	1.3	-82.9
571	-65.8	-5.3	-83.9
572	-65.7	-11.5	-78.8

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
573	-65.5	-11.8	-78.8
574	-65.1	-7.7	-78.4
575	-64.8	-4.6	-78.4
576	-64.7	-1.5	-78.7
577	-64.8	1.1	-78.9
578	-65.3	3.1	-79.1
579	-64.8	4.4	-79.5
580	-64.1	5.2	-79.7
581	-64.8	6.1	-79.7
582	-64.5	6.8	-79.7
583	-62.9	8	-80.3
584	-61.4	10	-81.2
585	-59.8	13.1	-82.2
586	-59	15.1	-82.5
587	-59.1	14.5	-81.9
588	-59.5	12.4	-81.5
589	-60.3	9.3	-80.7
590	-59.8	5.2	-80.1
591	-59.7	0.7	-80.3
592	-59.8	-2.7	-80.3
593	-60	-3	-80.2
594	-59.5	-1.5	-80.7
595	-59.2	0.8	-80.8
596	-59.2	3.1	-80.7
597	-58.7	4.9	-80.3
598	-58.1	6.3	-80.5

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
599	-58	7.2	-80.6
600	-58.2	8.3	-81.5
601	-58	9.1	-82.1
602	-58.1	9.7	-82.5
603	-58.2	10.5	-82.9
604	-57.8	12.8	-84
605	-57.8	16	-85.8
606	-57.5	18.1	-88.7
607	-57.4	19.5	-88
608	-57.1	14.4	-87.3
609	-57.3	8	-85.7
610	-57.2	2	-83.5
611	-57.2	-1.6	-80.6
612	-57.2	-4.8	-83.5
613	-57.5	-6.9	-80.6
614	-57.5	-5.3	-80.1
615	-57.6	-1.1	-80.8
616	-57.8	2.4	-80.8
617	-57.6	4.1	-80.5
618	-57.7	4.9	-80.6
619	-58.4	5	-80.1
620	-58.8	4.7	-79.7
621	-59.1	4.5	-80.1
622	-58.2	4.8	-80
623	-58.1	5.8	-79.7
624	-58.1	7.5	-79.5

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
625	-58.3	9.9	-79.4
626	-58.4	12.6	-80.2
627	-59	14.5	-82.4
628	-58.3	14.1	-82.6
629	-59	12.6	-82.4
630	-59.8	10.1	-83
631	-59.7	8	-82.5
632	-59.3	5.7	-82.3
633	-60.4	3.9	-82.3
634	-59.4	4	-81.9
635	-59.8	4.2	-81.2
636	-60.6	4.2	-80.6
637	-60.6	4.2	-80
638	-60.4	4.2	-80
639	-61.1	4.3	-79.7
640	-61.4	4.2	-79.5
641	-61.5	4.2	-79.6
642	-60.6	4.2	-80.7
643	-61.7	4.3	-80.5
644	-61.6	4.3	-80.7
645	-60.9	4.4	-81.1
646	-61	4.2	-81
647	-61.1	3.9	-81.4
648	-61.8	4	-80.8
649	-61.8	4.5	-80.9
650	-62	5	-80.9

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
651	-61.5	5.6	-81.4
652	-61.6	6.3	-81.4
653	-61.5	6.8	-81.6
654	-61.4	6.9	-82
655	-61.7	6.6	-81.9
656	-61.6	6.1	-81.9
657	-61.4	5.3	-82.1
658	-61.6	4.3	-82.1
659	-61.8	3.7	-81.9
660	-61.6	3.6	-81.6
661	-61.6	3.9	-81.2
662	-61.5	4.7	-81.3
663	-60.8	6.4	-80.5
664	-59.6	9.3	-80.8
665	-58.7	12.8	-81
666	-57.7	15.6	-80.7
667	-57.5	16	-80.1
668	-57.5	14.5	-79
669	-57.2	12	-79
670	-56.5	8.4	-78.6
671	-56.5	4.6	-78.5
672	-56.3	1.8	-77.4
673	-56.1	0.9	-76.7
674	-56.3	1.7	-76
675	-56.2	2.3	-75.8
676	-56.1	2.9	-75.6

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
677	-55.8	3.6	-75.5
678	-56	3.8	-75.1
679	-56	3.4	-75.1
680	-56.5	3.4	-74.8
681	-57.3	3.6	-74.1
682	-57.7	4.3	-73.2
683	-57.2	5.9	-71.5
684	-56.8	8.2	-70
685	-55.6	10.7	-67.8
686	-54	12.2	-65.6
687	-53.8	10.8	-66.1
688	-53.1	8.5	-67.7
689	-51.2	6.1	-69.2
690	-49.2	3.8	-70.8
691	-48.8	2.2	-71.2
692	-48.8	1.2	-71.8
693	-48.8	2.4	-72.4
694	-48.9	4.5	-72.4
695	-48.6	5.6	-71.1
696	-48.5	6.2	-69.2
697	-49	5.9	-68.4
698	-48.7	4.8	-67.8
699	-49.3	4	-67.6
700	-50.3	4.1	-66.1
701	-49.6	4.6	-65.6
702	-49.1	6.6	-65

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
703	-49.3	10.1	-65.5
704	-49.2	14.3	-66.9
705	-49.5	19.3	-68.2
706	-50.3	23.9	-68.9
707	-50	25.3	-68.7
708	-50.1	22.1	-67.1
709	-50.3	15.8	-65.5
710	-50.4	6.5	-63.9
711	-50.4	-0.5	-62.4
712	-50.3	-6.8	-61.5
713	-50.3	-10.1	-60
714	-50.4	-10.1	-59.3
715	-50.5	-6.8	-58.9
716	-50.5	-3.3	-59.2
717	-50.8	0.4	-59.2
718	-50.6	3	-58.3
719	-50.5	4.3	-57.8
720	-50.3	5.1	-57.9
721	-50	5.3	-58.1
722	-49.9	5.6	-58.2
723	-49.8	5.4	-57.5
724	-49.4	4.8	-56.3
725	-49.2	4	-55.4
726	-49.4	3.5	-55
727	-48.8	3.3	-55.3
728	-48.9	3.3	-55.2

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
729	-48.2	3.3	-55
730	-48.5	3.3	-54.5
731	-48.6	3.3	-53.9
732	-48.7	4	-53.7
733	-48.7	4.3	-53.7
734	-48.5	4.4	-52.2
735	-48.4	4.4	-52.1
736	-48.1	4.4	-51.3
737	-48	5.1	-51.5
738	-47.9	6.3	-51.7
739	-48.1	6.7	-51.5
740	-48	6.7	-50.7
741	-48.7	6.8	-49.5
742	-48.6	7.4	-49
743	-48.9	8.6	-48.7
744	-49.3	10.2	-47.8
745	-49.3	12.3	-46.9
746	-49.3	14.1	-46.5
747	-49.1	14.4	-46.3
748	-49.1	12.2	-45.5
749	-49.3	8.5	-45.1
750	-49.2	3.8	-45.1
751	-48.1	-0.4	-44.7
752	-48.1	-3.3	-45.6
753	-48.9	-4.7	-44.6
754	-48.4	-2.7	-45.1

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
755	-49.1	-0.8	-44.4
756	-48.5	1.2	-44.1
757	-48.5	2.2	-43.9
758	-45.6	2.6	-44.4
759	-46.2	2.4	-44
760	-45.7	2.1	-43.8
761	-43.2	2.5	-44.1
762	-41.9	3.5	-43.5
763	-41.1	5.1	-43.4
764	-39.7	8.3	-43.1
765	-39.4	12.1	-42.1
766	-39.6	16	-41
767	-39.3	16.2	-38.8
768	-39.2	12.9	-38.2
769	-39.2	9.2	-38.5
770	-38.5	4.4	-39.1
771	-38.1	1.2	-39.5
772	-37.8	-1.5	-39.1
773	-37.4	-3.6	-39.2
774	-36.4	-2	-39.7
775	-35.3	-0.2	-38.6
776	-34.8	2	-37.8
777	-34.4	3.6	-37.2
778	-33.4	4.7	-36.9
779	-32.7	5.7	-36.7
780	-32.5	6.6	-36.9

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
781	-32.9	7.5	-36.7
782	-32.4	8	-36.4
783	-31.6	8.9	-36.5
784	-31.2	9.9	-36.8
785	-30.8	10.7	-37.4
786	-28.8	12.2	-39.2
787	-27.7	14.6	-40.5
788	-26.7	13.1	-39.7
789	-25.7	9.3	-37.5
790	-25	4.4	-35.2
791	-24.8	1.4	-33.6
792	-24.2	-0.6	-33.6
793	-22.8	-1.4	-31.9
794	-22.7	-0.1	-31.3
795	-22.4	2.1	-30.3
796	-21.7	4.5	-30
797	-20.9	6.7	-30.1
798	-20	7	-30.1
799	-19.3	6.6	-29.9
800	-18.6	6	-29.2
801	-18.1	5.2	-28.6
802	-17.9	4.9	-27.8
803	-17.6	5	-27.6
804	-17.8	5.3	-27.5
805	-17.8	5.3	-27
806	-17.8	5.2	-26.1

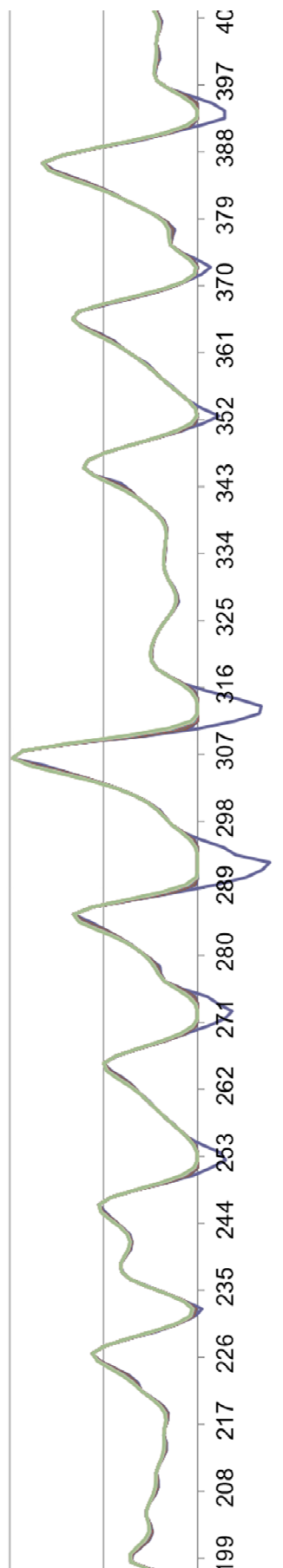
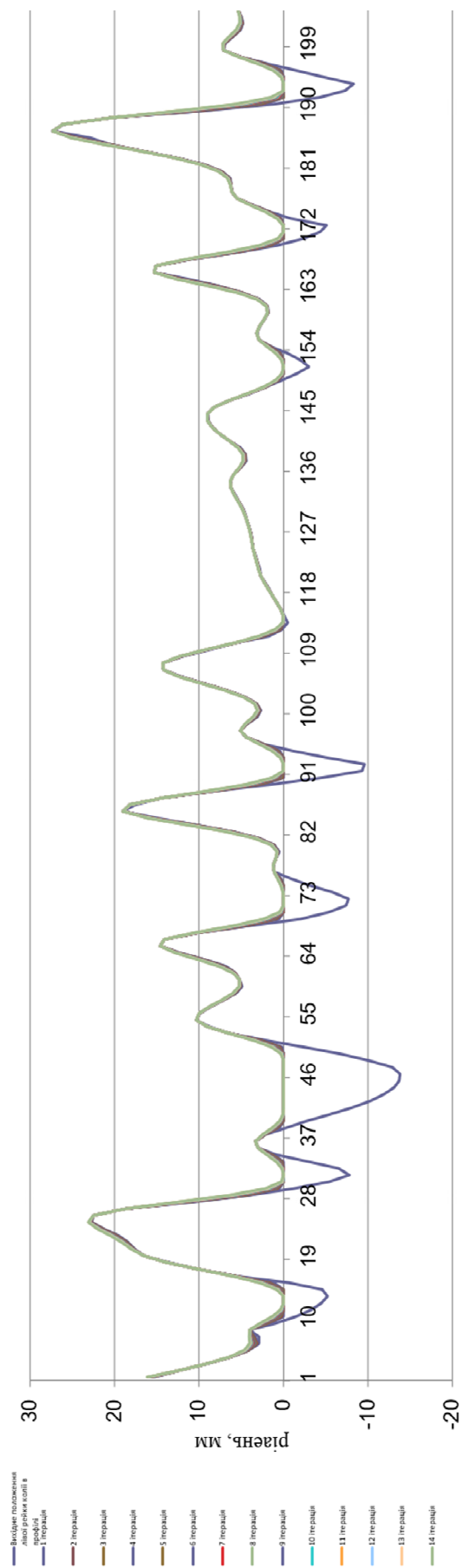
Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
807	-18.5	5	-24.7
808	-17.9	4.6	-24
809	-16.4	4.5	-23.7
810	-15.7	4.6	-23.3
811	-14.8	4.6	-22.8
812	-14	4.7	-22.4
813	-13.4	4.9	-21.6
814	-12.8	4.9	-21.5
815	-12.5	5	-21.3
816	-11.8	4.8	-20.5
817	-10.7	4.5	-20.2
818	-9.2	4.5	-19.6
819	-7.7	4.9	-20
820	-6.9	5.5	-19.9
821	-5.9	5.6	-19.6
822	-4.7	5.7	-19.3
823	-4	6.3	-19.4
824	-3.8	7.8	-19.6
825	-3.5	10	-20.3
826	-3.4	13.2	-21.6
827	-3.6	14.8	-21.2
828	-3.6	13.1	-20.3
829	-3.5	10.7	-18.5
830	-3.7	8	-16.7
831	-3.8	5	-16.1
832	-3.8	1.7	-16.2

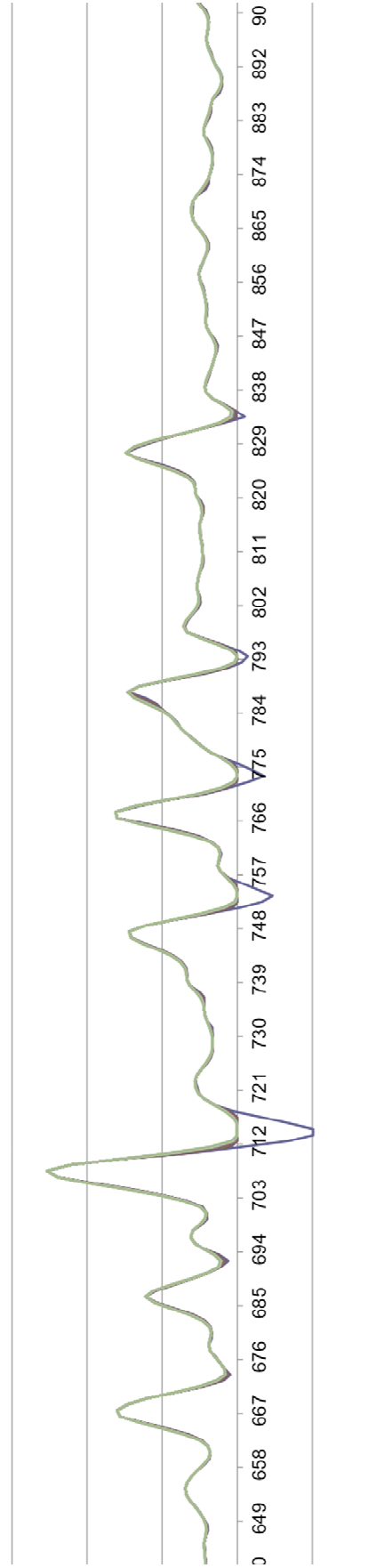
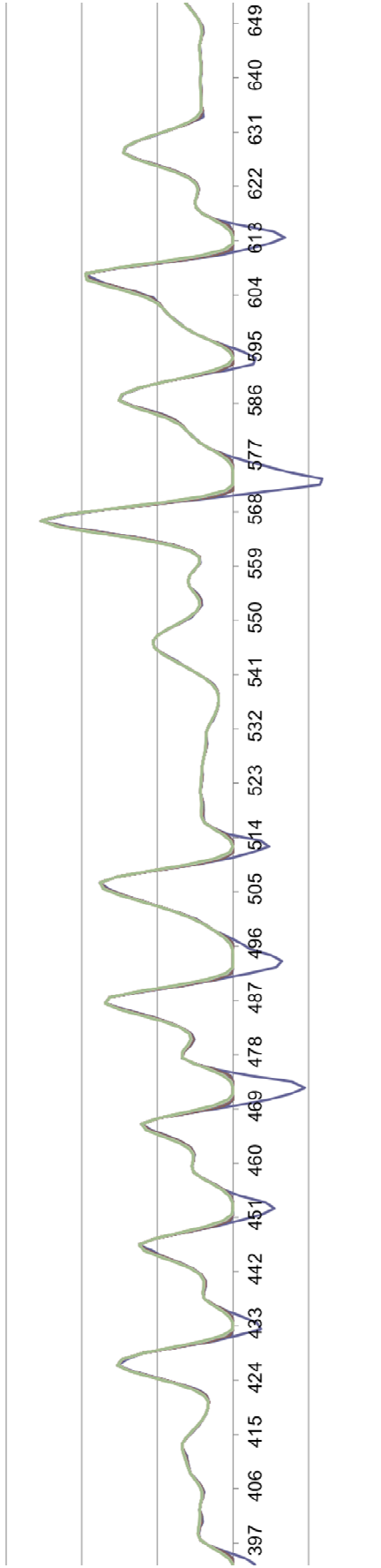
Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
833	-3.8	-1	-14.2
834	-3.9	0.2	-12.7
835	-3.8	1.6	-11.7
836	-3.4	3.3	-12
837	-3	4.1	-12.1
838	-3.1	4.3	-11.7
839	-3.1	4	-10.8
840	-3.2	3.7	-10.2
841	-2.7	3.5	-10
842	-2.8	3.2	-10.2
843	-2.3	3	-9.9
844	-2.3	2.7	-8.6
845	-2.1	2.6	-7.5
846	-2.2	3	-7.3
847	-2.2	3.7	-7.6
848	-2.1	4.1	-7.7
849	-2.1	4.2	-7
850	-2	4.1	-6.2
851	-2.1	4	-5.8
852	-2.2	4.1	-5.5
853	-2.3	4.3	-5.9
854	-2.3	4.4	-4.9
855	-2.1	4.6	-3.6
856	-2.1	5	-2.9
857	-2.1	5.1	-2.7
858	-2.1	4.8	-2.2

Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
859	-1.8	4.5	-2.3
860	-2.5	4.2	-1.8
861	-2.4	3.8	-0.7
862	-2.2	3.8	-0.4
863	-2.3	4.2	-0.5
864	-2.2	4.8	-1.2
865	-2.2	5.5	-1.9
866	-2.6	5.9	-1.9
867	-2.9	6	-2.3
868	-2.9	5.9	-2.8
869	-3	5.9	-3.7
870	-2.7	5.4	-3.8
871	-2.9	4.2	-3.4
872	-2.9	3.8	-3.8
873	-2.9	3.8	-4.1
874	-2.9	3.5	-4
875	-2.9	3.3	-3.6
876	-3	3.3	-3.5
877	-2.9	3.3	-3.6
878	-2.6	3.4	-3.8
879	-2.4	3.8	-4
880	-2.5	4.4	-4.1
881	-2.5	4.5	-3.9
882	-2.1	4.2	-3.6
883	-1.4	3.7	-4.2
884	-0.6	3.5	-4.6

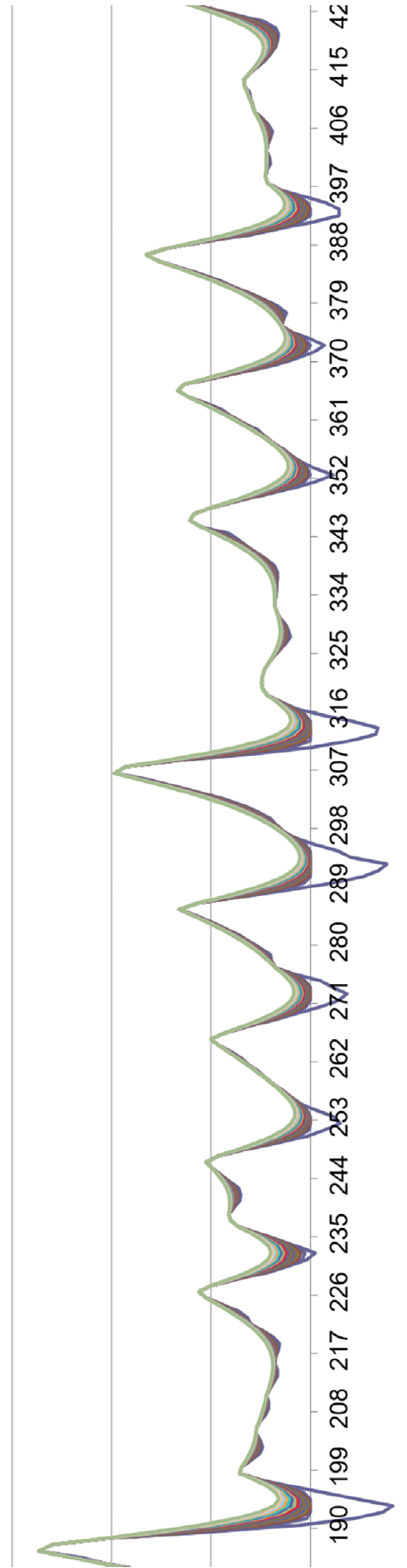
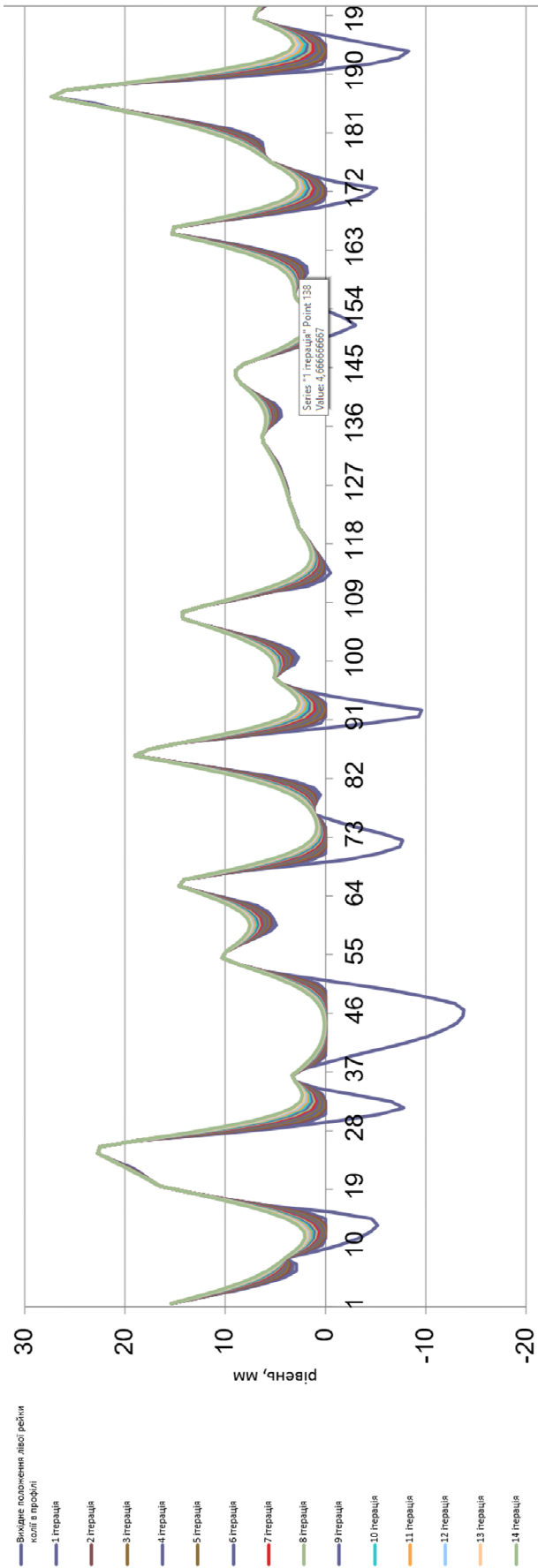
Номер точки зйомки	Виміряні стріли вигину, мм	«Бугри» та «ями» лівої рейки до виправки, мм	Підвищення зовнішньої рейки, мм
885	0	3.5	-4.4
886	0.3	3.3	-4
887	0.9	2.4	-3.7
888	1.3	2.1	-3.6
889	1.8	2	-3.8
890	2.2	2.1	-4.1
891	2.4	2.4	-3.4
892	2.6	3	-3.2
893	2.9	3.3	-3.5
894	2.7	3.5	-3.6
895	2.8	3.9	-3.7
896	2.8	4.1	-3.4
897	2.7	4	-3.1
898	2.6	3.8	-2.4
899	2.5	3.8	-2.5
900	2.8	3.9	-3.3
901	2.5	4.2	-3.1
902	2.4	5	-2.4
903	2.8	5.8	-1.8
904	3	6	-1.4
905	3	6.2	-2
906	3.5	6.4	-2.1
907	3.4	6.1	-3.6

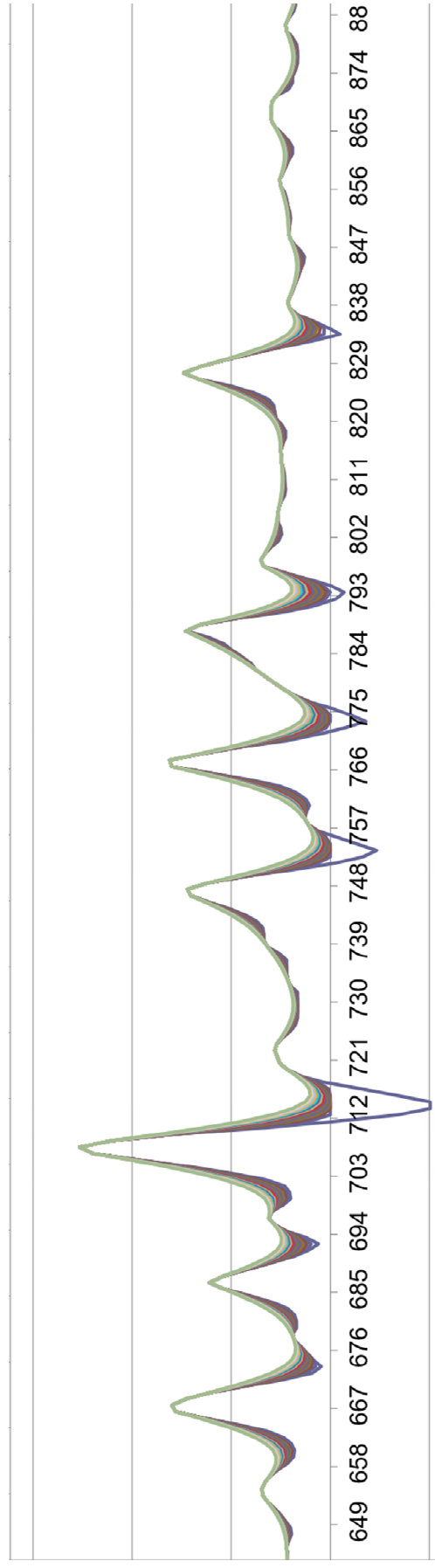
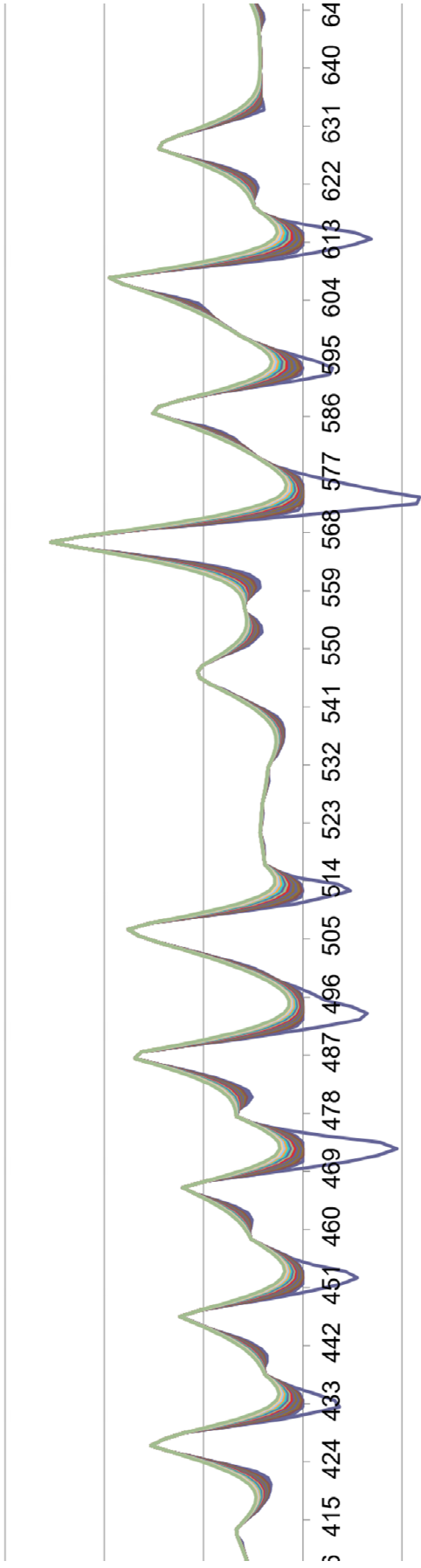
ДОДАТОК Г
РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ «ЗГЛАДЖУВАННЯ» МЕТОДОМ
«ІТЕРАЦІЙ» ПО П'ЯТИ ЧЛЕНАМ РЯДУ ЯКИЙ БУВ ЗАПРОПОНОВАН
БОСОВИМ А. А.



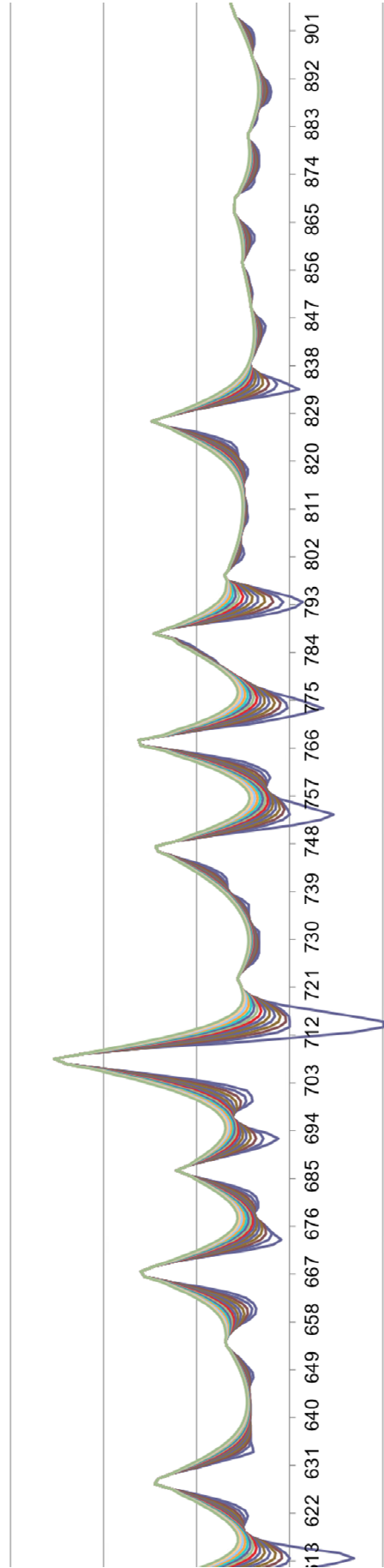
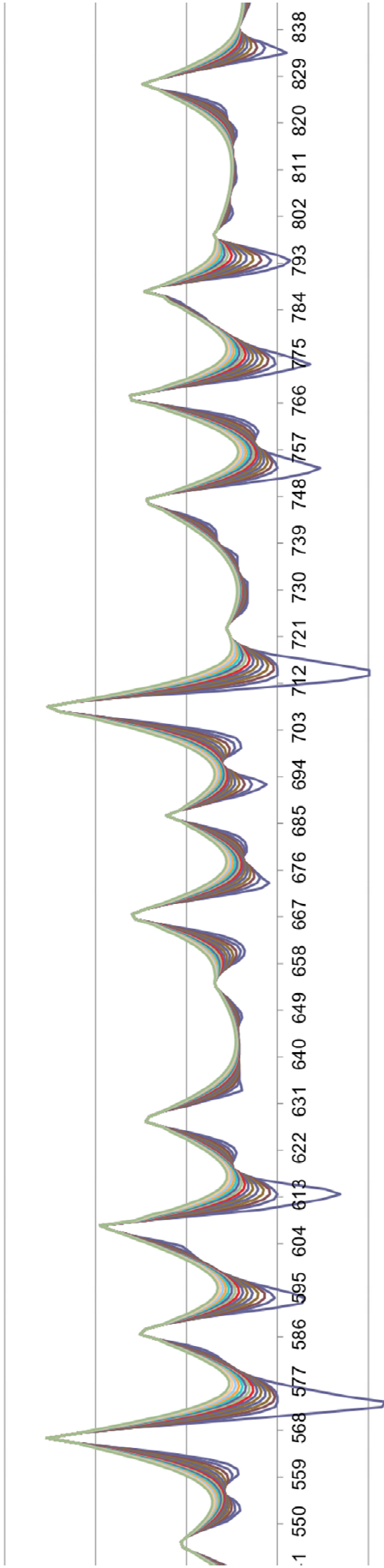


ДОДАТОК Д
РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ МЕТОДОМ ЛІНЕЙНОГО
«ЗГЛАДЖУВАННЯ» ПО ТРЬОХ ТОЧКАХ

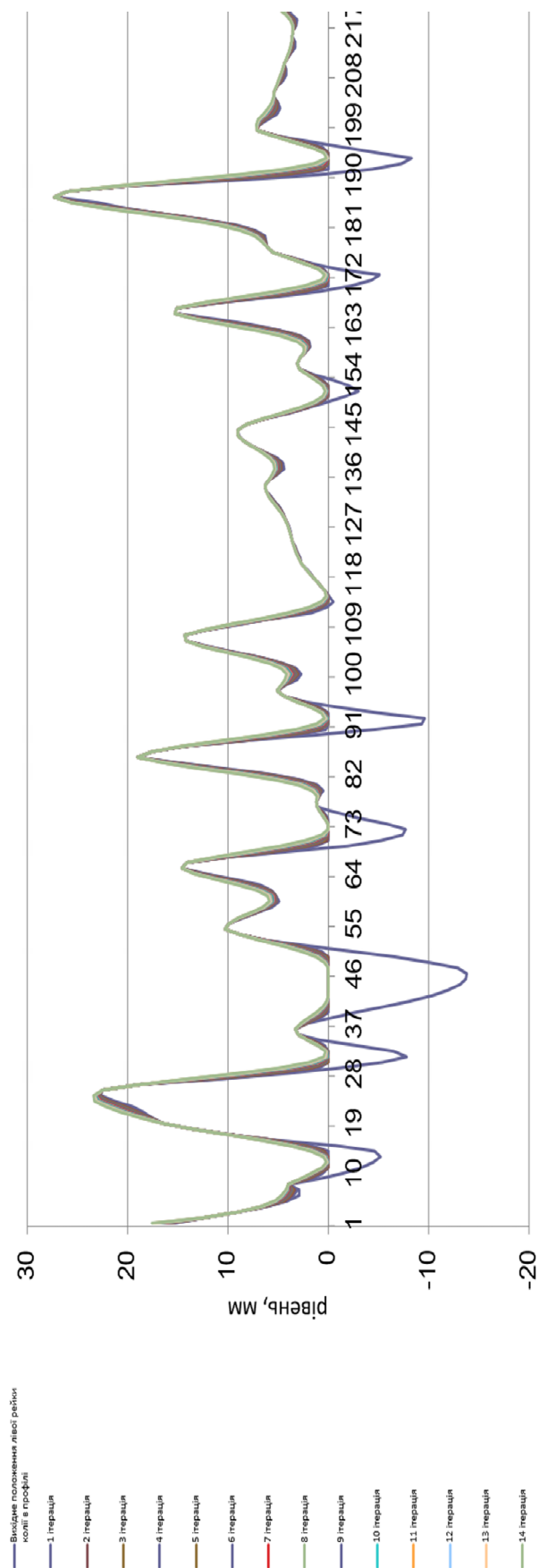


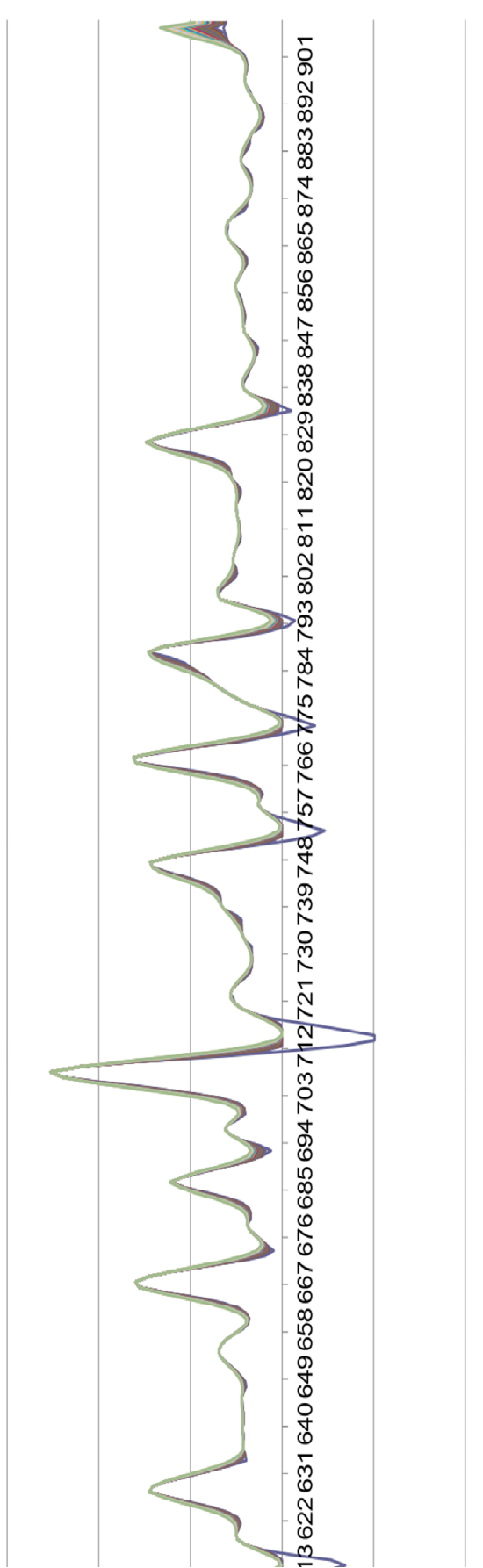
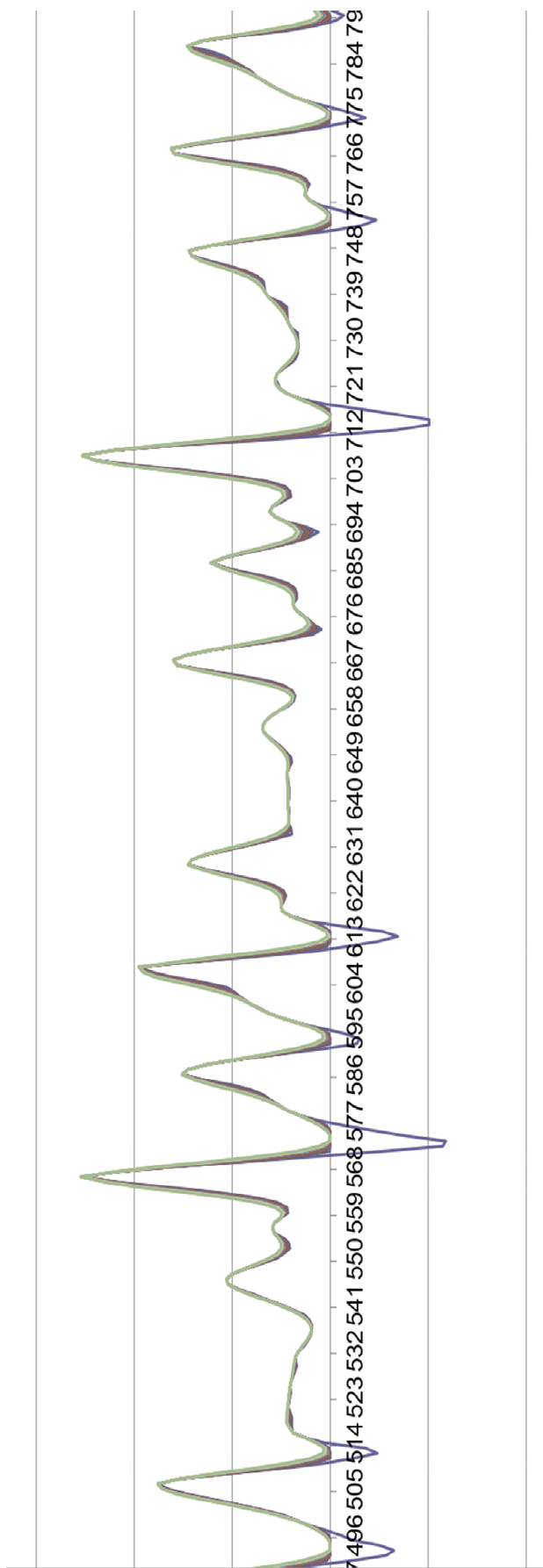


ДОДАТОК Е
РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ МЕТОДОМ ЛІНЕЙНОГО
«ЗГЛАДЖУВАННЯ» ПО П'ЯТИ ТОЧКАХ



ДОДАТОК Є
РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ МЕТОДОМ ЛІНЕЙНОГО
«ЗГЛАДЖУВАННЯ» ПО СЕМИ ТОЧКАХ





ДОДАТОК Ж
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ