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

ГАВРИЛОВ МАКСИМ ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 625.113:625.173.2/.5

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПРАВКИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ В ПЛАНІ Й ПОЗДОВЖНЬОМУ ПРОФІЛІ

Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія
27 - транспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
***КУРГАН Микола Борисович*,** Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, професор кафедри «Транспортна інфраструктура», м. Дніпро

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
ВЕРБИЦЬКИЙ Володимир Григорович,
Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, завідувач кафедри «Програмне забезпечення автоматизованих систем», м. Запоріжжя

кандидат технічних наук, доцент
***ТВЕРДОМЕТ Володимир Миколайович*,**
Державний університет інфраструктури та технологій, доцент кафедри «Залізничні споруди та колійне господарство», кандидат технічних наук, доцент, м. Київ

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. о 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: ауд. 314, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, за адресою: вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010 та на сайті http://ndch.diit.edu.ua/ (Наука – Захисти у спеціалізованій раді Д08.820.01).

Автореферат розіслано «29 » березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д-р техн. наук, професор А. М. Муха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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, стали поштовхом до обґрунтування 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 дослідження. 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 натурного 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 проектне 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 ВПР 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. 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 «Проблемы безопасности на транспорте» (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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета і задачі досліджень, їх зв'язок з науковими темами та програмами. Викладені основні наукові положення і результати, що винесені на захист, наукова новизна, практичне значення отриманих результатів. Наведені відомості про апробацію і публікації матеріалів досліджень.

У першому розділі роботи проаналізовано теорії і практики технології виправки залізничної колії з використанням сучасних колійних машин. Розглянуто наукові дослідження вчених у цій галузі. Проаналізовані існуючі концепції щодо виправки залізничної колії в плані і профілі з використанням сучасних ВПР. Показано, що питаннями виправки колії займались як вітчизняні, так і закордонні фахівці, досліджуючи різні напрямки цієї проблеми, яка є багатогранною і потребує комплексного підходу.

Вітчизняні й закордонні науковці створили значну теоретичну і практичну базу для удосконалення технології виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі. Але досить широке вивчення кола питань, пов'язаних з технологією виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі, не надало комплексного науково-технічного обґрунтування впровадження інноваційних технологій виправки залізничної колії в Україні. Тому в дисертаційному дослідженні було приділено увагу детальному аналізу щодо виправки залізничної колії в плані і профілі з використанням вітчизняних ВПР, дослідженням існуючих методів і принципів зйомки плану та поздовжнього профілю залізничної колії.

Питаннями виправки колії займались як вітчизняні, так і закордонні фахівці, досліджуючи різні напрямки цієї проблеми. Так, основні засади визначення надійності роботи залізничної колії при її експлуатації висвітлені у виданні під авторством проф. Е. І. Даніленка «Залізнична колія» (2010 р.), яке є першою в Україні фундаментальною працею на цю тему. Також в підручнику колективу

авторів «Проектування і розрахунки конструкцій залізничної колії» (2019 р.) висвітлюються інноваційні підходи до проектування і розрахунків конструкцій залізничних колій, наведені сучасні методики інженерних розрахунків рейкової колії в прямих і кривих ділянках, в тому числі призначених для експлуатації швидкісних поїздів.

Дослідженням процесів реконструкції плану існуючих залізниць при підвищенні швидкостей руху поїздів і виправки кривих пов'язані з іменами вчених: А. А. Босов, В. І. Євграфов, І. П. Корженевич, Д. М. Курган, М. Б. Курган, В. О. Певзнер, Д. О. Потапов, М. Г. Ренгач, В. В. Рибкін, В. М. Твердомед, Н. В. Халіпова, В. І. Харлан, Г. М. Шахунянц та ін.

Аналіз впливу поверхні кочення на коливання та стійкість динамічної системи колесо-рейка проводить проф. В. Г. Вербицький.

Для вирішення поставлених завдань були використані дослідження як вітчизняних, так і закордонних вчених, які зробили істотний внесок в теорію і експериментальне вивчення питань виправки колії. Слід назвати таких науковців як Ц. Ах, Г. Вубенна, Р. Вогель, А. Вілк, П. Дабровський, В. Коц, А. Кампчік, Б. Ліхтеберг, Ф. Пех, М. Солінгера, Я. Скібіцький, М. Центер-Маннер та ін.

У другому розділі досліджені існуючі методи зйомки плану та поздовжнього профілю залізничної колії. Розглянуті мануальні способи зйомки плану і профілю колії, а саме: метод стріл, метод Гофера, модифікований метод І. П. Корженевича, метод Гонікберга, метод технічного нівелювання, метод тахеометричної зйомки.

А також наведено детальний аналіз автоматизованих методів зйомки плану й поздовжнього профілю: метод вимірювання колієвимірювальним вагоном, метод вимірювання виправно-підбивно-рихтувальними машинами, метод вимірювання з використанням GPS датчиків, метод вимірювання з використанням колієвимірювальних візків, метод мобільного лазерного сканування.

Розглянуто способи підвищення точності зйомки плану й поздовжнього профілю для будь-якого методу при використанні спеціальних реперних систем, які можуть виконуватись різного типу. Координування робочих реперів може здійснюватися як тахеометричною зйомкою, так і за допомогою GPS.

Зроблено порівняльний аналіз одинадцяти методів зйомки колії та визначено, 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.

У третьому розділі проаналізовано існуючі автоматизовані системи виправки плану й поздовжнього профілю залізничної колії. На першому етапі

досліджень були вивчені технологія і параметри роботи важких колійних машин ВПР, ВПРС і ВПО. На шляху машинізації колійного господарства АТ «Укрзалізниця» була суттєвого збільшена кількість цих важких машин для виправлення плану залізничної колії.

Визначено, що існує кілька варіантів виправки залізничної колії в плані і профілі. Більшість систем виправки колії машинами типу ВПР працюють на базі однохордової системи. Однохордовий метод виправки залізничної колії в плані є базовим для практичної зйомки і рихтування залізничної колії в плані триточковим та чотирьохточковим методами (рис. 1).

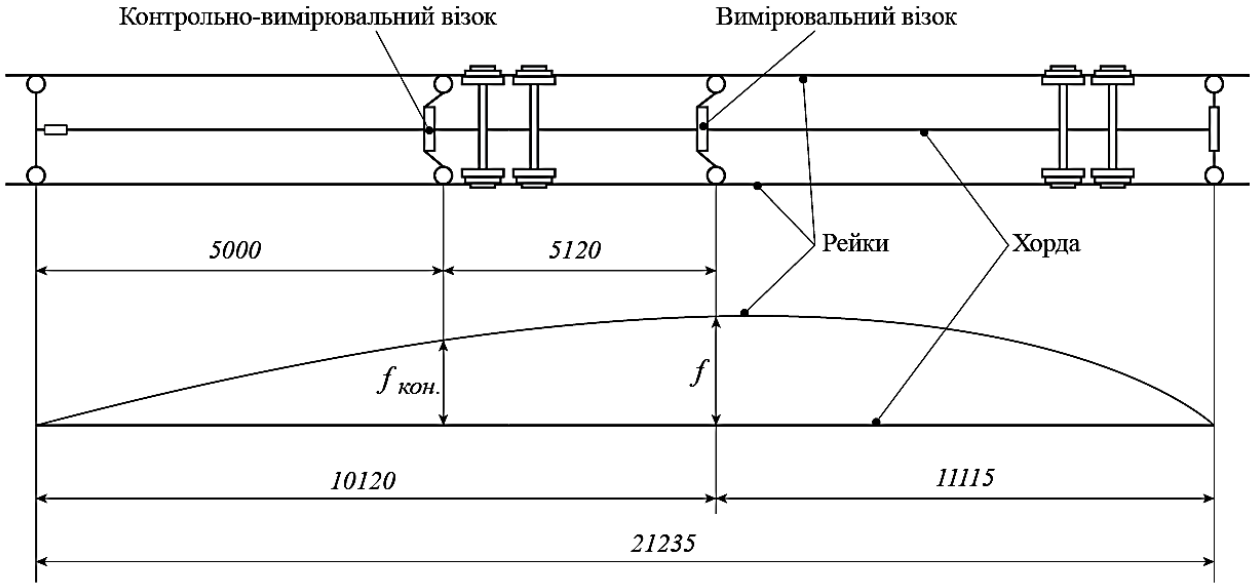

Рис. 1 — Схема триточкового та чотирьохточкового методу зйомки плану колії машиною типу ВПР

Технологія використання цих методів 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, що не забезпечувало потрібної точності.

Ця проблема набула особливого загострення в останні роки, тому що виникла необхідність підвищення швидкостей руху поїздів, при яких створена геометрія колії за її положенням (наявність довгих нерівностей колії і невідповідність

проектному положенню) є стримуючим фактором розвитку залізничного транспорту в цьому напрямку, що вимагає розв’язання задачі модернізації існуючих методів на підставі впровадженням автоматизованих систем зйомки, розрахунку і виправки колії в плані й поздовжньому профілі. Обов’язковим кроком для її вирішення стала оцінка достовірності визначення положення залізничної колії в плані й поздовжньому профілі з використанням існуючих вітчизняних автоматизованих систем і механізмів. Проведені дослідження дозволили зробити висновок про те, що дані зйомки мають високий ступінь повторюваності. Вихідний файл з автоматизованої системи машини ВПР формує масив даних стану колії з достатнім ступенем відповідності для подальшого використання та вводу в розрахункову модель (рис. 2).

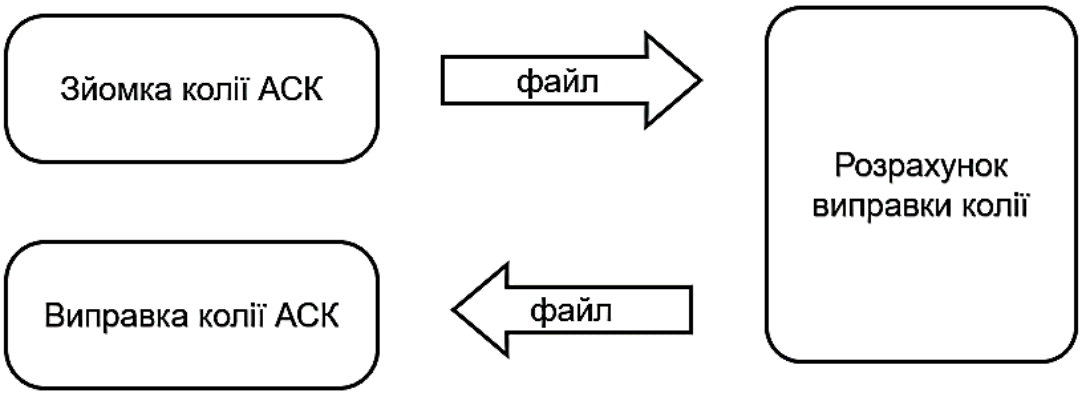

Рис. 2 — Схема роботи автоматизованої система керування (АСК) машиною типу ВПР з інтегрованим програмним комплексом розрахунків виправки колії

В дослідженнях були використані евольвентна та сплайнова моделі, які описують положення плану існуючої та проектної залізничної колії. За основу було прийнято рекурентну евольвенту модель плану, запропоновану доц. Корженевичем І. П..

Модель дозволяє визначати евольвенту в окремих точках кругової і перехідної кривої при будь-якій їх кількості за досить простими рекурентними формулами:

$$Экк_{n+1} = Экк_n + \frac{1}{2}\left[(s - S_n - l_n)(s - S_n) + \frac{l_n^3}{3}\right](k_{n+1} - k_n)$$

$$Эпк_n = Экк_n + \frac{(s - S_n)^3}{6l_n}(k_{n+1} - k_n)$$

З огляду на те, що в абсолютній більшості випадків сьогодні розрахунки виправки виконуються на комп'ютерах, вимога простоти моделей відступає на

другий план. Останнім часом в різних інженерних задачах широко використовуються сплайни. Аналіз сплайнових моделей показав, що для математичного опису плану існуючої колії найкращим чином підходять кубічні параметричні сплайни спеціального виду:

$$\dot{X} = \frac{X_{i+1} - X_i}{l_i} + l_i\left[\left(3\omega_i^2 - 1\right)\delta_{i+1} - \left(3\overline{\omega}_i^2 - 1\right)\delta_i\right]$$

$$\dot{Y} = \frac{Y_{i+1} - Y_i}{l_i} + l_i\left[\left(3\omega_i^2 - 1\right)\gamma_{i+1} - \left(3\overline{\omega}_i^2 - 1\right)\gamma_i\right]$$

$$\ddot{X} = 6\omega_i\delta_{i+1} + 6\overline{\omega}_i\delta_i$$

$$\ddot{Y} = 6\omega_i\gamma_{i+1} + 6\overline{\omega}_i\gamma_i .$$

Знаючи коефіцієнти сплайну, можна розраховувати кривизну, вектори нормалей і координати проміжних точок на плані існуючої колії, що дозволяє вирішувати ряд додаткових завдань при проектуванні виправки (перебудови) плану. Дана модель плану існуючої колії у вигляді кубічного параметричного сплайна реалізована здобувачем в автоматизованій системі виправки кривих в плані й поздовжньому профілі.

У четвертому розділі розроблена математична модель для удосконалення системи управління машинізованою виправкою колії в поздовжньому профілі. Необхідність такої моделі зумовлена тим що, існуючі методи розрахунку виправки колії призначені для виправки її в плані. За результатами досліджень встановлено, що оптимальною математичною моделлю, яка описує положення залізничної колії в профілі, є поліном згладжування по п’яти точках:

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

де n – номер останньої точки (ординати y_i)

Модель імплементована до алгоритму згладжування виміряних вертикальних стріл (рис. 3).

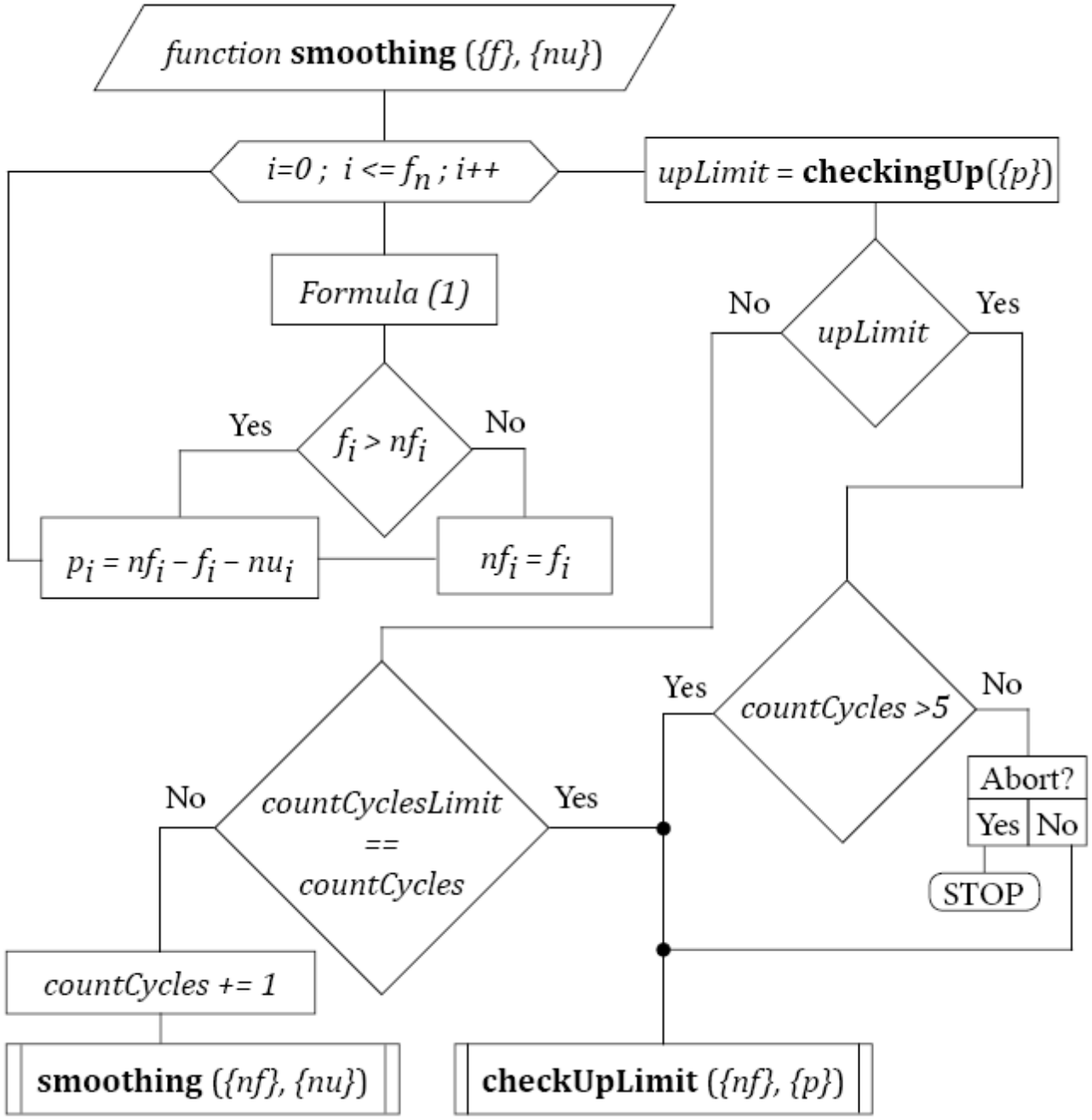

Рис.3 — Схема алгоритму згладжування виміряних вертикальних стріл (функція **smoothing**($\{f\},\{nu\}$)); *Formula (1)* — поліном згладжування по п’яти точках (1); **checkingUp**($\{p\}$) — функція перевірки «чистих» підйомок; **checkUpLimit**($\{nf\},\{p\}$) — функція перевірки достатності підйомки для забезпечення розрахункового підвищення.

На основі коефіцієнта згладжування була виконана оцінка адекватності обраної математичної моделі, яка описує положення залізничної колії в профілі (рис. 4).

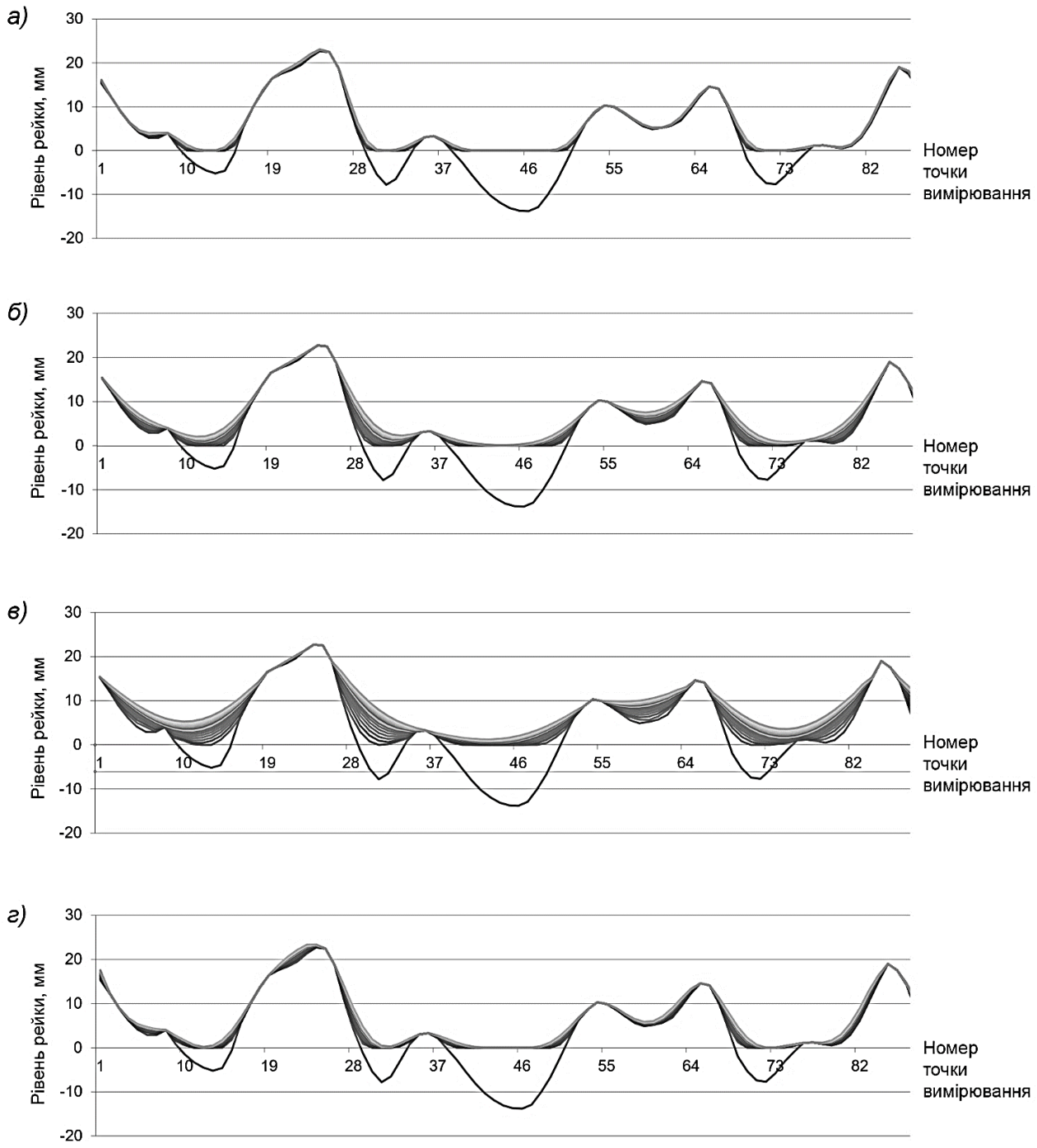

Рис. 4 — Порівняння моделювання обрису профіля різними поліномами: *а* —поліном згладжування по п’яти точках; *б* — лінійний поліном згладжування по трьох точках; *в* — лінійний поліном згладжування по п’яти точках; *г* — лінійний поліном згладжування по семи точках

Було розроблено додаткові алгоритми розрахунку поправок величин підйомок колії у поздовжньому профілі з урахуванням їх можливих обмежень.

Ці алгоритми є складовою математичного інструменту для розрахунку виправки залізничної колії в поздовжньому профілі. Цей математичний інструмент було імплементовано до автоматизованої системи виправки колії в плані й поздовжньому профілі у вигляді модуля комп'ютерної програми (рис. 5).

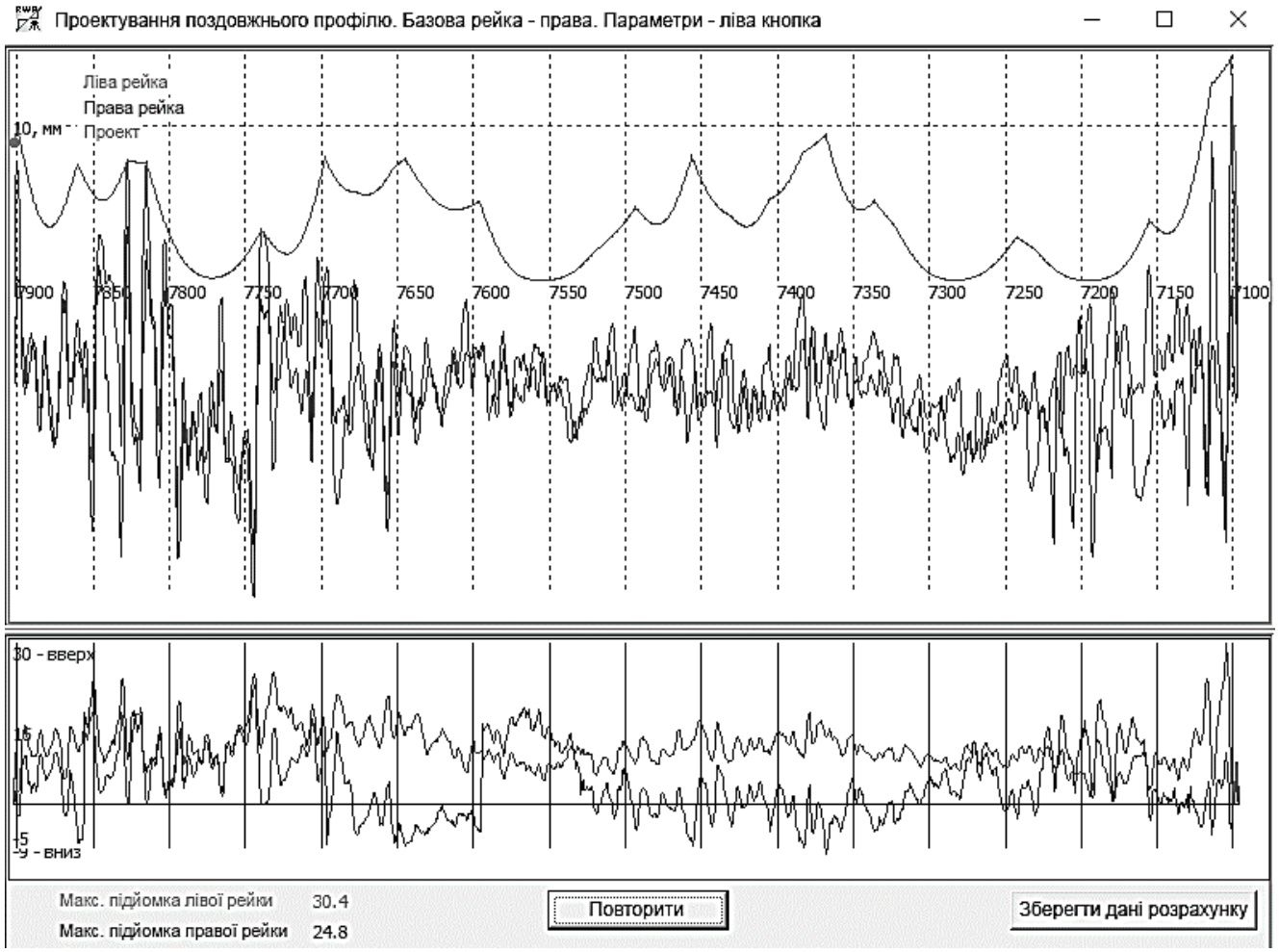

Рис. 5 — Зображення процесу роботи модуля комп'ютерної програми, імплементованої до автоматизованої системи виправки колії

У п'ятому розділі викладені результати експериментальних досліджень геометричного положення залізничної колії в кривих.

На штатну систему роботи машини типу ВПР значно впливає людський фактор, тому результати виправки кривих можуть бути незадовільними для вирішення задач підвищення швидкості руху поїздів. При проведенні експерименту машина переводилась зі штатного в автоматизований режим роботи, складовою якого є програмні модулі розрахунку виправки колії в плані й поздовжньому профілі.

Був випробуваний наступний алгоритм дій виправки залізничної колії із застосуванням автоматизованої системи: натурна зйомка плану залізничною колії

«методом стріл»; проведення вимірювального заїзду та запис геометрії колії у файл; розрахунок виправки колії з використанням програмного комплексу; проведення заїзду з виправкою колії в розрахункове положення; контрольний вимірювальний заїзд для запису геометрії колії після її виправки.

Після вимірювального заїзду була проведена оцінка точності експериментальної виправки колії в плані й поздовжньому профілі. Методика надає технологію оцінки точності зйомки плану залізничної колії автоматизованими системами (рис. 6).

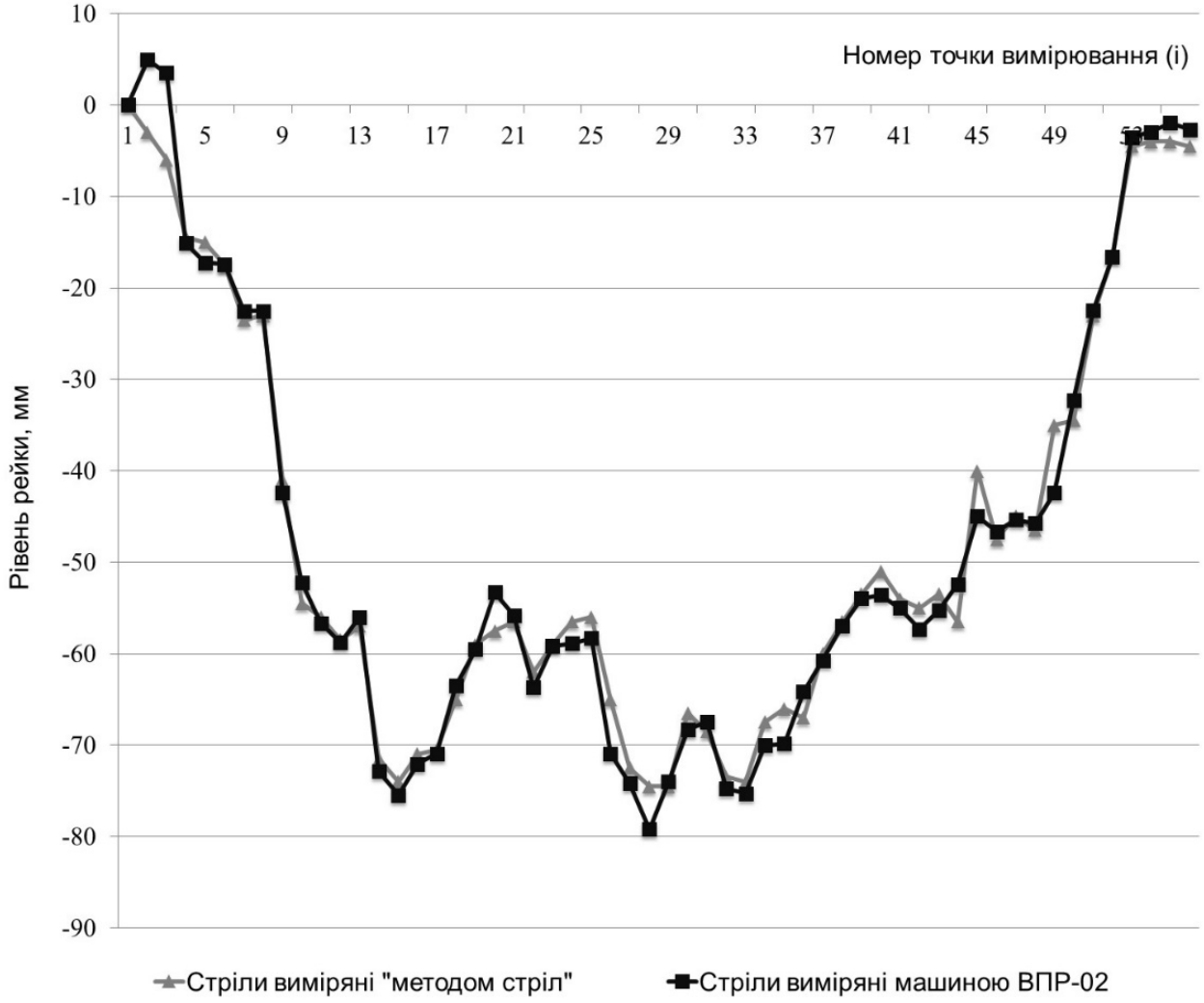

Рис. 6 — Суміщений графік вимірювань «методом стріл» та результатів вимірювального заїзду машини типу ВПР після виправки залізничної колії.

Використання розробленого математичного інструмента дозволило розрахувати необхідну виправку колії в поздовжньому профілі для отримання її нової геометрії (рис.7).

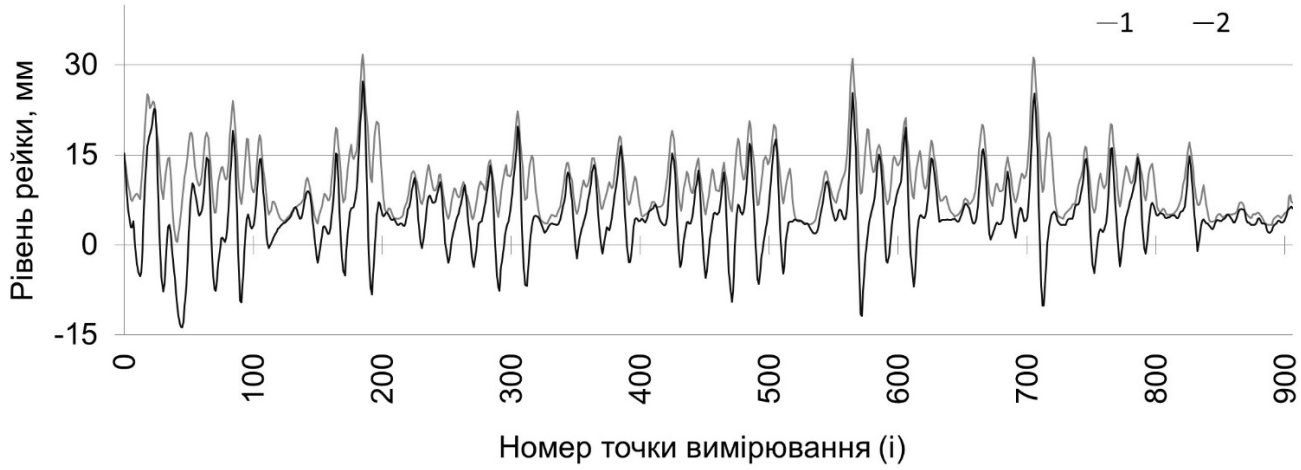

Рис. 7 — Суміщений графік результатів натурної зйомки та розрахунків виправки залізничної колії в поздовжньому профілі; 1— розрахункове положення колії; 2 — вихідне положення колії.

Оцінка точності виправки колії в поздовжньому профілі проводилась на підставі порівняння контрольно-вимірювального заїзду та розрахункової моделі (рис.8).

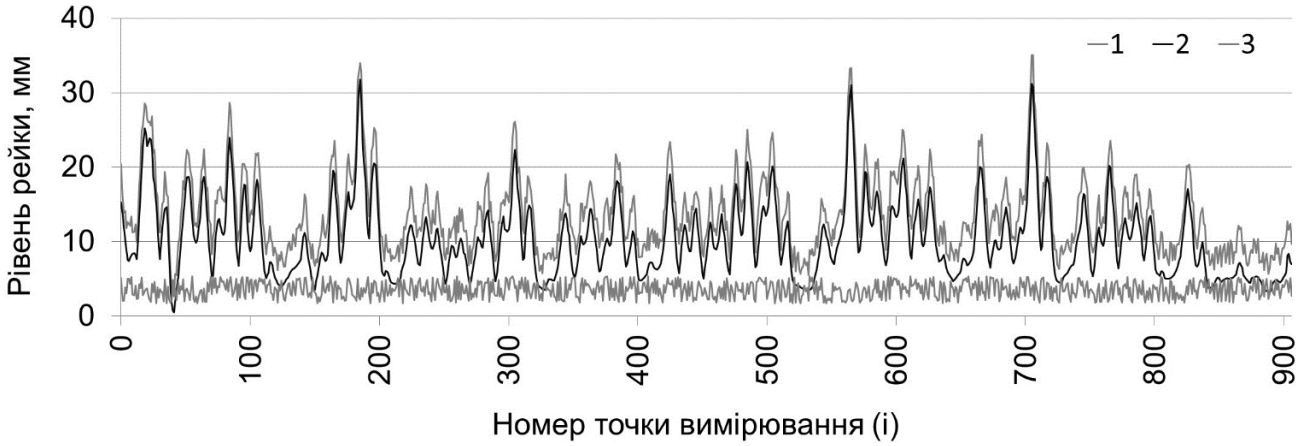

Рис. 8 — Суміщений графік розрахункової моделі виправки колії в профілі, контрольних вимірювань машиною ВПР та різниці між ними; 1 — результати контрольних вимірювань машиною ВПР; 2 — розрахункове положення колії; 3 — різниця між розрахунковим та контрольним положенням колії.

Наукові підходи, використані в математичній моделі, дозволили скоротити роботу машин у «вікно», спростити роботу обслуговуючого персоналу, створити інформаційну базу параметрів колії, встановити раціональні параметри кривих при виправці.

Проведені експериментальні дослідження дозволили зробити однозначний висновок що для системної паспортизації плану і профілю колії необхідна перевірка

організаціями, які виконували проектування залізничної колії, перевіряли стан геометричного положення колії після виконання робіт машинами типу ВПР. При наявності негативних результатів такої перевірки організація, яка виправляла колію, повинна виконати додаткові роботи, щоб довести параметри плану до проектних значень.

Точність виконаних вимірювань та постановки колії у розрахункові чи (або) проектні параметри розглянутими машинами є недостатньою з огляду на вимоги завдань впровадження швидкісного руху, але у зв'язку з великим попитом на машинізацію колійного господарства Укрзалізниці та постійною роботою провідних інженерів над модернізацією автоматизованих систем по виправці плану й поздовжнього профілю є реальна перспектива швидкого розвитку таких систем.

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.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях та збірниках наукових праць, що включені до міжнародних наукометричних баз:

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.
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.
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 съемка 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» — Харьків — 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

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 методу реконструкції колії з використанням удосконаленої технології машинної виправки залізничної колії в плані й поздовжньому профілі на підставі аналізу її геометричного положення в кривих. У роботі проаналізовано теорію і практику технології виправки залізничної колії з використанням сучасних колійних машин. Запропоновано нову методику дослідження геометричного положення залізничної колії в кривих, яка дає можливість оцінювати її відхилення і прогнозувати розвиток цих відхилень в залежності від умов експлуатації залізничної колії

В дисертації набуло подальшого розвитку визначення оцінки точності положення залізничної колії в плані і профілі з використанням автоматизованих систем на підставі результатів експерименту. Значно розширена доказова база адекватності застосування евольвентної та сплайнової моделей розрахунків виправки кривої в плані. Розроблена математична модель для управління машинізованою виправкою колії в поздовжньому профілі. Запропоновані напрямки розвитку вимірювальних засобів сучасних колійних машин на прикладі застосування комп'ютерної системи виправки колії для машин типу ВПР. Результати дисертаційної роботи 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.

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

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 14% тривалість «вікон».

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

The dissertation for the degree of the candidate of technical sciences in the specialty 05.22.06 — railway (27 — transport) — Dnipro National University of Railway transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, 2021.

The dissertation is devoted to development of a method of reconstruction of a track with use of the advanced technology of machine correction of a railway track in the plan and a longitudinal profile on the basis of the analysis of its geometrical position in curves. The theory and practice of railway track straightening technology with the use of modern track machines are analysed in the work. A new method of studying the geometric position of the railway track in the curves is proposed, which makes it possible to estimate its deviations and predict the development of these deviations depending on the operating conditions of the railway track.

In the dissertation the definition of estimation of accuracy of position of a railway track in the plan and a profile with use of the automated systems on the basis of results of experiment has got further development. The evidence base for the adequacy of the application of involute and spline models of curve correction calculations in the plan is significantly expanded. A mathematical model for the control of mechanized track straightening in the longitudinal profile has been developed. The directions of development of measuring means of modern track machines on the example of application of computer system of track correction for tamping machine type machines are offered. The results of the dissertation will be useful for planning track repairs in order to increase the smoothness of trains, ride comfort, reduce the cost of track work, and the introduction of accelerated and high-speed train traffic.

Experimental researches of the developed mathematical tool for calculation of correction of a track in the plan and a longitudinal profile by cars like tamping machine are carried out. The experiment showed the adequacy of the developed mathematical tool.

The use of a tamping machine with an automated track straightening system in the plan and longitudinal profile and a mathematical tool implemented in it allowed to reduce the qualification requirements of service personnel, increased the speed of work, reduce the duration of the "window" for these works to 14%.

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.

ГАВРИЛОВ МАКСИМ ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПРАВКИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ В ПЛАНІ Й ПОЗДОВЖНЬОМУ ПРОФІЛІ

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Формат 60×84 1/16.
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 100 пр.
Замовлення №

Видавництво Дніпровського національного
університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.03

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010