

УДК 625.14:629.4.05:681.586

ВИКОРИСТАННЯ ІНЕРЦІАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ БЛОКІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОЛІЇ

Канд. техн. наук В. Г. Вітольберг, асп. С. С. Чесак

USE OF INERTIAL MEASUREMENT UNITS FOR THE ASSESSMENT OF RAIL TRACK GEOMETRY PARAMETERS

PhD (Tech) V. Vitolberg, postgraduate student S. Chesak

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351878>



Анотація. У статті наведено результати експериментального дослідження з реєстрації динамічних параметрів руху вантажного вагона для оцінювання геометричного стану залізничної колії. Інерціальні вимірювальні блоки (IMU) встановлювали на буксові вузли колісної пари за допомогою спеціально розроблених кріплень, конструкцію яких попередньо випробувано для забезпечення надійної фіксації та коректної орієнтації датчиків у трьох осях.

Дослідна ділянка включала прямі та криві, стрілочні переводи, стики і локальні дефекти, що забезпечило репрезентативність вимірювань. Просторова прив'язка здійснена за допомогою GPS/GNSS пристроїв, а попередня зйомка дослідної ділянки з фіксацією характерних елементів колії забезпечила точну ідентифікацію їхнього положення вздовж маршруту.

Отримані результати демонструють виразні сигнатури проходження стиків, стрілочних переводів і нерівностей, а також залежність прискорень від швидкості руху. Отриманий масив даних створює основу для проведення подальшого спектрального та часово-частотного аналізу.

Ключові слова: геометрія колії, IMU-датчики, акселерометри, динаміка рухомого складу, взаємодія колесо-рейка, колієвимірювальний вагон, нерівності колії.

Abstract. This article presents the development, testing, and practical implementation of an experimental system for collecting inertial data on a freight wagon to assess the geometric condition of railway tracks. Compact inertial measurement units (IMU) were installed directly on the axle-box assemblies of a 18–100 bogie, enabling the registration of dynamic responses of the vehicle to track irregularities under real operating conditions. Unlike traditional Ukrainian diagnostic practices relying solely on specialised track-measurement wagons, the proposed approach allows obtaining primary acceleration signals from standard rolling stock without the need for dedicated measuring equipment.

The experiment was carried out on an operational railway section that included straight segments, curves of various radii, turnouts, joints, and areas with local surface defects, ensuring the representativeness of the collected data. To provide accurate spatial reference, the track was geodetically surveyed using a GNSS tracker, with more than 500 control points recorded and subsequently refined in QGIS. During the experimental run, an additional IMU sensor was mounted on the rail joint to capture impact loads and enable simultaneous observation of the track and wheelset responses.

Sensor mountings were specially designed and pre-tested on access tracks to ensure stable fixation, resistance to vibration, and correct orientation in real-life conditions. Two positioning

devices were applied: the ibag Dakar Pro for geodetic referencing and the Columbus P-1 Mark II for continuous tracking of wagon movement during the experiment. Data collection involved autonomous recording of IMU signals and GNSS coordinates, followed by initial processing that included time synchronisation, data trimming, resampling, and segmentation by track markers.

The acquired dataset demonstrates clear acceleration signatures corresponding to rail joints, turnouts, and local surface defects, as well as a consistent relation between peak amplitudes and train speed. These results confirm the feasibility of using axle-box IMU measurements on freight rolling stock as a basis for further development of indirect diagnostic methods. The obtained primary data form a foundation for subsequent detailed analysis of vibrations and for future research aimed at deriving track geometry parameters and identifying early signs of infrastructure degradation.

Keywords: track geometry, IMU sensors, accelerometers, rolling stock dynamics, wheel–rail interaction, track measuring vehicle, track irregularities.

Вступ. Забезпечення належного технічного стану залізничної колії є важливою умовою безпеки руху та ефективності функціонування залізничного транспорту. Традиційні методи оцінювання геометрії колії в Україні та багатьох інших країнах ґрунтовані на використанні спеціалізованих вагонів-колієвимірювачів, які забезпечують високу точність, але мають низку обмежень: значна вартість, складність експлуатації та низька періодичність [1, 2, 4]. У сучасних дослідженнях спостерігають стійку тенденцію щодо впровадження бортових сенсорних систем, які допомагають отримувати дані під час звичайної експлуатації рухомого складу та забезпечують більшу частоту моніторингу [4-6, 11-13].

У зв'язку з цим виникла ідея створення і тестування вимірювальної системи, здатної реєструвати динамічну реакцію вантажного вагона на нерівності колії в режимі реальної експлуатації. Висока періодичність вимірювань є важливою, оскільки стан колії може змінюватися навіть після коротких інтервалів пропускання поїздів через накопичення залишкових деформацій баласту і розвиток локальних дефектів. Крім того, встановлення датчиків на вантажний вагон дає змогу оцінювати колію за умов реального осьового навантаження та реальної динаміки взаємодії «колесо-рейка», що є принциповою перевагою порівняно з безвантажними методами. Простота і

швидкість монтажу IMU, відносно невисока вартість обладнання та можливість повторного використання конструкції роблять запропонований підхід не лише діагностичним інструментом, але й універсальною дослідницькою платформою для подальших експериментів і аналізу взаємодії «колесо-рейка».

Важливою складовою сучасних систем збору динамічних сигналів є точна прив'язка вимірювань до місцевості. Для цього в багатьох дослідженнях застосовано GPS/GNSS-приймачі [1, 3-7, 9, 11, 14-16], які забезпечують синхронізацію IMU-даних із положенням вагона на колії та допомагають виявляти просторові закономірності між показниками прискорень і фактичними елементами залізничної колії. Це підтверджує, що інтеграція інерціальних вимірювань із навігаційними даними є одним з актуальних напрямів розвитку непрямих методів контролю геометричного стану колії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних наукових дослідженнях, присвячених контролю стану залізничної колії, усе частіше застосовують інерціальні вимірювальні блоки (IMU), які дають змогу реєструвати реакцію рухомого складу на нерівності колії в реальних умовах експлуатації. У низці оглядових робіт відзначено підвищений інтерес до компактних акселерометрів і гіроскопів, що можна використовувати як на спеціалізованих вимірювальних

платформах, так і звичайному рухомому складі [1, 7, 15]. Перевагою таких систем є регулярний моніторинг без використання вагонів-колієвимірювачів, що значно знижує вартість діагностування інфраструктури.

У роботах [1, 7, 16] зазначено, що акселерометри є одним з основних інструментів для діагностики широкого спектра елементів інфраструктури: дефектів поверхні кочення, пошкоджень коліс і буксових вузлів; оцінювання профілю рейок і проявів втомних пошкоджень від кочення; контролю геометрії колії та реєстрації прискорень, пов'язаних із взаємодією «колесо–рейка». Додатково, згідно з аналізом, наведеним у роботі [16], акселерометри є найпоширенішими сенсорами в сучасних дослідженнях — їх застосовують приблизно в 30 % публікацій. Також там зазначено, що 39 % робіт базовані на використанні бортового обладнання на рухомому складі, що підтверджує актуальність підходів, орієнтованих на встановлення сенсорів на вагони або локомотиви.

У частині досліджень для підвищення точності просторової прив'язки даних IMU застосовують супутникові системи позиціонування — GPS або багатосистемні GNSS-приймачі — для визначення положення вагона вздовж колії, фіксації моментів проходження стиків, стрілочних переводів, кривих та інших характерних елементів інфраструктури [1, 3-7, 9, 11, 14-16]. GPS використовують значно рідше, ніж акселерометри, — приблизно у 8 % наукових публікацій із моніторингу колії, проте саме комбінацію GPS та IMU визнано оптимальною для синхронізації сигналів і забезпечення коректної геодезичної прив'язки динамічних даних до координат колії [16]. Такий підхід є актуальним і для цього дослідження, де GNSS-трекер застосовано для точного визначення положення вагона та зіставлення IMU-сигналів із фактичними геометричними параметрами колії.

У наявних дослідженнях застосовують різні підходи щодо встановлення IMU-датчиків: їх монтують на буксових вузлах, елементах візка або кузові вагона [4]. Вибір точки встановлення суттєво впливає на характер отриманих сигналів, оскільки всі частини вагона по-різному сприймають вертикальні та горизонтальні навантаження і гасять коливання, що виникають зі взаємодією «колесо–рейка».

Серед наведених підходів монтаж IMU на буксовому вузлі вважають одним із найбільш ефективних для реєстрації динаміки, пов'язаної саме з нерівностями колії. Це пояснюють тим, що букса розташована найближче до точки контакту колеса з рейкою, а вплив ресорної підвіски на сигнали в цій зоні мінімальний [4, 6, 12].

Інший напрям досліджень передбачає встановлення акселерометрів безпосередньо на елементи верхньої будови колії. Так, у роботі [17] розглянуто застосування сенсорів для тривалого моніторингу стану рейок і шпал. Це дає змогу безпосередньо вимірювати ударно-вібраційні процеси в конструкції колії та визначати її фактичні демпфувальні властивості.

В актуальних роботах із моніторингу стану колії зазначено, що бортові сенсори можуть бути ефективно використані для виявлення стиків, стрілочних переводів, локальних дефектів поверхні кочення та інших аномалій [2, 3, 8, 16]. Публікації також показують, що монтаж IMU на рухомому складі забезпечує достатню точність порівняно зі спеціалізованими вимірювальними вагонами, хоча більшість таких досліджень виконано на пасажирських поїздах або спеціалізованому рухомому складі [4, 6, 11, 12].

Разом із тим питання практичної реалізації системи — вибір оптимального обладнання, конструкція кріплення, умови монтажу, стабільність роботи датчиків у жорстких умовах вантажного руху — у літературі розкриті недостатньо. Окремі роботи висвітлюють загальні підходи щодо збору даних [5, 13], однак практичні

експерименти безпосередньо на вантажних вагонах висвітлені обмежено.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є експериментальна перевірка можливості використання інерціальних вимірювальних блоків (IMU), що включають акселерометри, гіроскопи та інклінометри, встановлених на буксах колісної пари візка моделі 18-100 вантажного вагона, для оцінювання стану геометрії колії на основі аналізу динамічних параметрів руху.

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі основні завдання:

1. Визначили оптимальні місця встановлення IMU-датчиків і розробили конструкцію кріплення для їх монтажу.

2. Проаналізували план і профіль дослідної ділянки колії, провели її зйомку з фіксацією довготи і широти меж пікетів, кілометрів, дефектів, стиків, меж кривих, переїздів, стрілочних переводів та інших характерних елементів.

3. Провели експериментальні вимірювання під час руху вагона по дослідній ділянці колії.

4. Виконали попередню обробку отриманих сигналів.

Основна частина дослідження

1. Вибір і технічні характеристики вимірювального обладнання

Сучасний ринок обладнання для вимірювання прискорень і просторового положення об'єктів представлений широким спектром датчиків різного рівня інтеграції, функціональності та вартості. Умовно їх можна поділити на три основні групи:

- низькорівневі (сирі) сенсори — це окремі плати тільки з акселерометрами або комбінованими датчиками типу інерціального вимірювального блока, що включає акселерометри, гіроскопи та інклінометри. Такі рішення потребують окремого контролера (наприклад на базі Arduino Uno чи ESP32) для збору та обробки даних, а також зовнішнього живлення. Перевагою є гнучкість конфігурації, але це

потребує значних витрат часу на розроблення системи;

- модулі з логером (реєстратором) — сенсори в захищеному корпусі, які не мають власної пам'яті та передають дані на зовнішній пристрій зберігання. Такі системи можуть підключати велику кількість датчиків одночасно, мають виходи під різні інтерфейси (CAN, UART тощо), але потребують зовнішнього живлення та мікропроцесора для реєстрації даних. Вони високоточні і стабільні, проте складніші в монтажі та експлуатації;

- готові автономні рішення — це повнофункціональні IMU-блоки з вбудованим живленням і внутрішньою пам'яттю, що допомагають вимірювати без підключення до комп'ютера або зовнішнього логера, мають компактний захищений корпус і забезпечують зручність монтажу. Основним обмеженням є обсяг пам'яті та час автономної роботи, але для короткотривалих експериментів такі системи є найбільш практичними.

З огляду на вимоги щодо мобільності, точності та надійності, для цього експерименту були вибрані автономні IMU-блоки WitMotion WT901SDCL, які мають такі основні характеристики:

- триосьовий акселерометр із діапазоном вимірювання ± 16 g;
- триосьовий гіроскоп із діапазоном до $2000^\circ/\text{с}$;
- інклінометр із точністю $0,05^\circ$;
- частота дискретизації до 200 Гц;
- запис даних на microSD карту для автономного збереження даних;
- підтримка калібрування та цифрової фільтрації (у тому числі фільтра Калмана);
- робочий діапазон температур від -40°C до $+85^\circ\text{C}$;
- час автономної роботи до 5 год.

Для реєстрації динамічних параметрів руху два IMU-блоки було встановлено на буксах першої по ходу руху колісної пари вагона, симетрично з лівого та правого боку. Така конфігурація забезпечує можливість фіксації як вертикальних, так і

горизонтальних відхилень, а також допомагає аналізувати асиметрію реакцій на лівій і правій рейках під час проходження нерівностей колії. Це особливо важливо для оцінювання ізольованих дефектів і зміни геометрії колії в зоні підвищених динамічних навантажень.

Для збільшення часу автономної роботи внутрішню батарею датчиків, встановлених на буксах, було замінено на зовнішню енергетичну комірку від електромобіля Tesla. Це рішення дало змогу збільшити час безперервного функціонування з п'яти годин до приблизно трьох діб, що особливо важливо для тривалих польових експериментів.

Крім того, один додатковий IMU-датчик моделі WitMotion BWT901CL було закріплено безпосередньо в зоні рейкового стику. Завдяки цьому стало можливим фіксувати динамічну реакцію самої колії в момент проходження вагона через стик і безпосередньо порівнювати параметри коливань у рейці та колісній парі. Такий підхід підвищує точність і достовірність аналізу взаємодії системи «колесо–рейка», даючи змогу ідентифікувати вплив окремих нерівностей колії на рухомий склад.

Технічні характеристики датчика WitMotion BWT901CL:

- bluetooth IMU-датчик для бездротового передавання даних;
- триосьовий акселерометр із діапазоном вимірювання ± 16 g;

- триосьовий гіроскоп із діапазоном до 2000 $^{\circ}/\text{с}$;
- інклінометр із точністю 0,05 $^{\circ}$;
- частота дискретизації до 200 Гц;
- підтримка калібрування та цифрової фільтрації (у тому числі фільтра Калмана);
- робоча температура: -40...+85 $^{\circ}\text{C}$;
- час автономної роботи: до 4 год (за необхідності можливе підключення зовнішнього джерела).

2. Характеристика дослідної ділянки колії та прив'язка колії до системи координат

Дослідна ділянка колії – одна з найбільш поширених конструкцій залізничної колії в Україні, експлуатована в умовах, близьких до типових для вантажного руху. Ділянка, загальною довжиною 12,433 км, включає як прямі, так і криві відрізки, щоб дослідити реакцію системи «колесо–рейка» в різних умовах взаємодії та забезпечити репрезентативність отриманих даних. Основні характеристики кривих ділянок колії наведено в таблиці.

Конструкція верхньої будови колії на більшій частині ділянки – це рейки типу Р65, укладені на залізобетонних шпалах із використанням скріплень типу КБ65. Баласт – щебневий, із різним ступенем засміченості. На кривій малого радіуса (250 м) вкрито дерев'яні шпали та збільшено ширину колії до 1540 мм.

Таблиця

Технічні характеристики кривих ділянок колії на дослідній ділянці

Характеристика	Крива 1	Крива 2	Крива 3	Крива 4	Крива 5	Крива 6	Крива 7
Радіус кривої, м	501	822	250	963	526	975	931
Довжина кругової кривої, м	372,4	220	296,4	285,8	120,6	319,6	153,6
Довжина перехідних кривих, м	60 95	105 75	75 120	90 120	105 90	90 90	115 105
Підвищення зовнішньої рейки, мм	75	40	60	65	65	75	30
Ширина колії в кривій, мм	1520	1520	1540	1520	1520	1520	1520

Дослідну колію складають як безстикові, так і ланкові ділянки. Безстикова колія має велику кількість тимчасово відновлених місць. Така комбінація дає змогу простежити вплив різних конструктивних особливостей на динамічну взаємодію рухомого складу з колією, зокрема в зоні стиків. Пропущений тоннаж на різних відрізках ділянки становить від 320 до 850 млн т, що зумовлює різний технічний стан рейкової решітки та наявність дефектів на поверхні кочення рейок.

Вантажонапруженість становить 10,2 млн ткм/км на рік. Встановлена експлуатаційна швидкість пасажирських і вантажних поїздів — 80/60 км/год, на окремих ділянках — 40/40 км/год.

Через пропущений тоннаж і відсутність капітальних ремонтів у попередні роки на окремих відрізках колії зафіксовано значну кількість локальних дефектів поверхні кочення рейок — дефекти 17.1, 17.2, 18.1, 37.2. Очікують, що ці дефекти будуть чітко відображені на графіках прискорень у вигляді пікових значень під час проходження колісної пари через зону дефекту.

Додатковими інфраструктурними елементами є стрілочні переводи марки 1/11, які також є зонами підвищених динамічних навантажень і будуть зафіксовані IMU-датчиками як характерні сигнатури.

Для забезпечення високої точності аналізу динамічних параметрів руху було виконано геодезичну прив'язку всієї дослідної ділянки колії до системи географічних координат. Усі характерні елементи — пікети, кілометрові знаки, рейкові стики, початки та кінці кривих, стрілочні переводи, переїзди та інші контрольні точки — були промарковані із зазначенням широти і довготи в єдиній системі координат WGS84. Це допомогло синхронізувати показання IMU-датчиків із точним положенням вагона на колії та виконати коректне співставлення з

результатами вимірювань колієвимірювального вагона.

Для виконання зйомки застосовано трекер українського виробництва Dakar Pro від компанії IBAG, який забезпечує визначення положення об'єкта з високою точністю і відображення супутникових знімків місцевості в режимі реального часу. У процесі робіт було зафіксовано 500 геодезичних точок уздовж дослідної ділянки. Подальше корегування положення точок і побудову траси виконували в середовищі QGIS, що дало змогу уточнити просторові координати 113 точок із точністю до 0,5 м.

Для визначення просторового положення вагона під час експерименту використовували професійний GNSS-логер Columbus P-1 Mark II. Цей пристрій підтримує одночасну роботу з 89 супутниками, включаючи GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou і QZSS, що забезпечує високу точність позиціонування в будь-яких умовах.

Перед проведенням експерименту протестували різні режими роботи пристрою. Встановлено, що максимальна робоча частота логера становить 10 Гц, проте в цьому режимі пристрій використовує лише супутники GPS, що зменшує кількість видимих супутників і може погіршувати стабільність і точність визначення координат.

Натомість режим 5 Гц забезпечує одночасне використання всіх доступних супутникових угруповань (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS), що суттєво підвищує точність і надійність просторової прив'язки вагона. Через це для експериментальних вимірювань вибрали саме режим 5 Гц, який забезпечував оптимальний баланс між частотою оновлення та якістю позиціонування. У цьому режимі логер записував дані у форматі NMEA, включаючи повідомлення GGA, RMC, GSV і GSA, що містять координати, висоту, час, кількість задіяних супутників, HDOP/PDOP, швидкість і курс

руху. Така конфігурація забезпечила необхідну деталізацію та надійність вимірювань для подальшого аналізу.

3. Підготовка до проведення експерименту, розроблення кріплень і тестові вимірювання

Для забезпечення надійної фіксації датчиків на буксах колісної пари та точності отриманих вимірювань була розроблена спеціальна конструкція кріплення (рис. 1). IMU-датчики встановлювали на сталевій пластині, яка надійно зафіксована до букси колісної пари за допомогою трьох неодимових магнітів у корпусі С48, кожен магніт забезпечує зусилля на відрив до 92 кг. Між магнітами та пластиною розташовували поліуретанові шайби товщиною 4 мм. Таке рішення виконувало одразу кілька важливих функцій: по-перше, поліуретан частково гасив шум і шкідливі вібрації, що виникають під час проходження коліс по нерівній колії, зменшуючи вплив вторинних коливань на показання датчиків. По-друге, пружна деформація шайб давала змогу точно позиціонувати датчик під час монтажу, а також регулювати нахил пластини під час затягування гайок, що забезпечувало коректне орієнтування сенсора у трьох площинах.

Конструкція кріплення GPS-трекера була виконана за аналогічним принципом. Трекер монтували на сталевій пластині, яку утримували два магніти, і встановлювали на

середньому обв'язувальному брусі торцевої стінки вагона, по осі колії (рис. 2). Усі магніти в конструкціях закріплювали самоконтруювальними гайками, що виключало їх розгвинчування під дією вібрацій, характерних для руху рухомого складу.

Таке технічне рішення виявилось надзвичайно практичним. Воно поєднувало простоту монтажу і демонтажу з високою надійністю фіксації, а також давало змогу корегувати положення датчиків без ризику їх зміщення під час руху. Крім того, універсальність конструкції сприяє її використанню для різних типів датчиків і трекерів, що робить її придатною для подальших експериментів на інших вагонах або візках.

Перед проведенням основного експерименту було виконано серію тестових вимірювань, спрямованих на перевірку роботи системи та відпрацювання процедур монтажу. Тести проводили на під'їзних коліях приватного підприємства. Датчики були встановлені на вагон, а рух здійснював трактор Т-241 К, обладнаний комбінованим колісно-рейковим ходом, автозчепними пристроями та пневматичними гальмами. Для тестів використана ділянка довжиною близько 300 м, що давало змогу безпечно і повторювано перевіряти конструкцію кріплення та поведінку датчиків за різних умов руху (рис. 1).



Рис. 1. Тестування надійності кріплення та режимів роботи датчиків



Рис. 2. Зліва IMU-датчик, встановлений на ліву буксу колісної пари; справа GNSS-трекер, встановлений на торцеву стінку напіввагона

Під час тестових заїздів були відпрацьовані всі важливі аспекти експериментальної установки. Було визначено остаточну конструкцію кріплення датчиків, вироблено покрокові процедури монтажу і налаштування, протестовані різні режими роботи IMU. Особливу увагу приділяли перевірці надійності фіксації під час ударно-динамічних навантажень, контролювали відсутність зміщень датчиків, що могло б спотворити результати вимірювань.

Одним із результатів тестів стало отримання перших даних про реакцію колісних пар на нерівності колії. Виявилося, що пікові значення сигналів датчиків чітко співпадають із моментами ударів коліс у стиках рейок. Проходження стрілочних переводів також відображено було на сигналах у вигляді характерної сигнатури, яку заплановано детально дослідити в основному експерименті. Було також зафіксовано закономірне збільшення амплітуди сигналу зі зростанням швидкості руху. Крім того, під час тестів накопичено важливий досвід роботи з первинними файлами даних, які записують датчики, що значно спрощує подальшу обробку та аналіз вимірювань.

Отже, проведені попередні тестові заїзди дали змогу не лише відпрацювати технічні аспекти кріплення та налаштування датчиків, а й отримати перші надійні сигнали, що демонструють коректну роботу

системи та готовність її до основного експерименту на дослідній ділянці колії.

4. Проведення основного експерименту, збір і первинна обробка даних

Експериментальні дослідження проводили на вантажному напіввагоні моделі 12-7019, виготовленому на Крюківському вагонобудівному заводі 19.10.2019 року. Перед початком вимірювань вагон мав свіжий деповський ремонт (08.10.2025), у рамках якого було виконано відновлення робочих поверхонь литих деталей візка, заміну п'ятників, встановлено нові колісні пари, а також увесь комплекс регламентних робіт відповідно до вимог СТП 04-032:2020. Технічний стан вагона відповідав нормативним показникам, що забезпечувало достовірність отриманих результатів. Обладнання, встановлене на дослідному вагоні, показано на рис. 2.

Усі вимірювання виконували на порожньому вагоні з тарою 21,5 т, що давало змогу дослідити реакцію системи «колесо–рейка» за умов мінімального статичного навантаження. Діаметр колісних пар становив: КП1 – 959 мм, КП2 – 959 мм, КП3 – 939 мм, КП4 – 939 мм. Пробіг вагона після ремонту на момент експерименту становив 3270 км, тобто візок і колісні пари перебували у справному технічному стані та мали мінімальний знос робочих поверхонь.

Вагон був оснащений візком моделі 18-100 – однією з найпоширеніших

конструкцій у вантажному русі на залізницях України. Візок має двовісну схему, класичну ресорну підвіску та бічні фрикційні гасники коливань, які забезпечують базову стабільність руху, але водночас чутливо реагують на зміни геометрії колії. Така чутливість робить його зручним об'єктом для дослідження динаміки взаємодії «колесо–рейка» і формування сигналів, що реєструють інерціальні вимірювальні блоки.

Завдяки поєднанню справного технічного стану вагона, нових колісних пар і мінімального пробігу після останнього планового ремонту отримані під час експерименту дані можна вважати репрезентативними, оскільки мінімальний рівень власних коливань рухомого складу забезпечив коректність фіксації динамічної реакції на нерівності колії.

На вибраний вагон, що прямував у напрямку дослідної ділянки, було встановлено IMU-датчики та GPS-трекер. Два датчики закріпили на буксах лівого і правого колеса першої по ходу руху колісної пари, а третій — у зоні рейкового стику. Для цього вибрали перший від пліті безстикової колії стик у зрівнювальному прогоні, що дало змогу однозначно ідентифікувати його та зіставити сигнали всіх трьох сенсорів.

Після монтажу виконали базове калібрування датчиків для фіксації їхнього початкового положення та синхронізували внутрішній час вимірювальних модулів, що забезпечило узгодженість записів і коректне порівняння сигналів між ними.

Після проходження поїзда по всій дослідній ділянці обладнання було демонтовано, а виміряні дані збережено для подальшої обробки. Первинну обробку даних виконували за таким алгоритмом:

1. Синхронізація з трекером — за записами GPS-трекера визначали часові мітки проходження вагоном пікетів, кілометрових знаків та інших контрольних точок.

2. Очищення даних — видалення з масивів даних інформації, зафіксованої до моменту прибуття поїзда на ділянку дослідження та після його повного проходження. Такий крок дає змогу зменшити обсяг даних, зосередитися лише на інформативній частині записів і підвищити ефективність подальшої обробки.

3. Ресемплінг — вирівнювання частоти дискретизації між усіма каналами даних. Оскільки різні датчики можуть мати різну частоту дискретизації або незначні часові зсуви між собою, ресемплінг дає змогу узгодити часові шкали та отримати єдину частоту вибірки.

4. Розбиття масиву даних — отримані масиви прискорень з IMU-датчиків поділяли на фрагменти відповідно до часових інтервалів окремих кілометрів колії.

5. Попередній аналіз сигналів — виявлення пікових значень, характерних для проходження стиків, стрілочних переводів і локальних дефектів поверхні кочення. На рис. 3 зображено фрагмент записаних значень вертикальних прискорень.

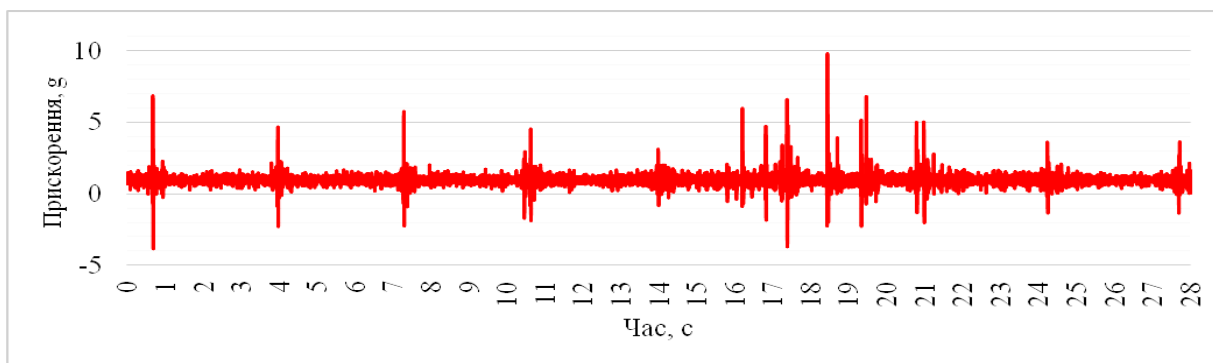


Рис. 3. Графік вертикальних прискорень, виміряних IMU-датчиком на правій буксі колісної пари

Окремо слід виділити можливості IMU-датчика, встановленого безпосередньо в зоні рейкового стику. У разі проходження поїзда з 54 вагонами цей датчик дає змогу зафіксувати:

- чітку послідовність імпульсних навантажень від кожної колісної пари, щоб точно визначити кількість осей і часові інтервали між ними;
- зміну амплітуди прискорень уздовж складу поїзда, що дає інформацію про зміну ударних навантажень у процесі проходження (наприклад порівняти дію локомотива, першого і останнього вагонів);
- характер затухання коливань у рейці після кожного удару, що може бути використано для оцінювання демпфувальних властивостей колії і стану баласту;
- різницю між динамічними силами, які виникають у рейковому стику та колісній парі в один момент часу;

• оцінити повторюваність сигналів, що важливо для побудови статистичних моделей накопичення пошкоджень за багаторазових навантажень.

Отже, датчик у стику не лише допомагає синхронізувати сигнали з буксовими датчиками, але й надає окремий масив даних, який можна використати для оцінювання ударного навантаження на елементи верхньої будови колії та порівняння поведінки різних вагонів. На рис. 4 зображено графік вертикальних прискорень, зафіксованих IMU, який було встановлено в зоні рейкового стику.

Завдяки такому підходу стало можливим не лише виявити і локалізувати ділянки з дефектами чи нерівностями, але і визначити характер їхнього впливу на динаміку руху вагона та розвиток залишкових деформацій колії.

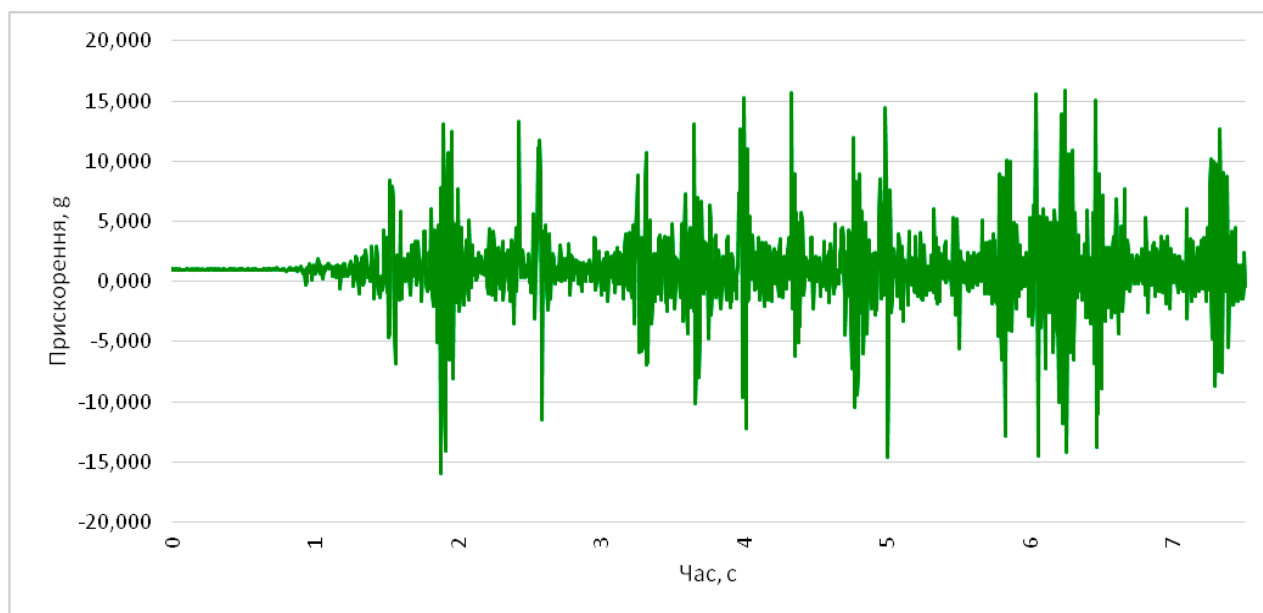


Рис. 4. Графік вертикальних прискорень, виміряних IMU-датчиком, установленим у рейковому стику

У результаті експерименту було отримано повний комплекс даних, необхідних для подальшого аналізу динамічної взаємодії «колесо–рейка» і оцінювання геометричних параметрів колії.

GNSS-трекер забезпечив точну фіксацію положення вагона з мінімальними похибками. Середня швидкість руху на дослідній ділянці становила 29,8 км/год,

максимальна – 50,5 км/год, мінімальна – 11,6 км/год.

Середня втрата даних із технічних причин під час запису IMU становила 0,24–0,31 %, що свідчить про стабільну роботу вимірювального обладнання та мінімальні технологічні втрати в реальних умовах руху. Середній просторовий крок вимірювання становив приблизно 4,1 см, що забезпечувало достатню деталізацію для реєстрації ударно-вібраційних процесів.

Висновки. Попередній аналіз сигналів, отриманих від інерціальних вимірювальних блоків (IMU), підтвердив працездатність створеної вимірювальної системи та її здатність стабільно реєструвати динамічну реакцію візка в реальних умовах руху вантажного вагона. Було зафіксовано характерні пікові компоненти прискорень у зонах стиків, стрілочних переводів і локальних нерівностей колії, а також чітко виявлено залежність амплітуди сигналів від швидкості руху та інфраструктурних умов.

Запропонована методика збору даних продемонструвала ефективність роботи автономних IMU-модулів і GPS/GNSS-пристроїв, а також коректність їхньої просторової прив'язки до координат маркерних точок, зафіксованих під час геодезичної зйомки дослідної ділянки. Отримані первинні дані мають достатню структуру та роздільну здатність для подальшої технічної інтерпретації та поглибленого аналізу.

Результати експерименту підтверджують можливість використання IMU-датчиків, установлених на буксових вузлах, для реєстрації коливань, зумовлених нерівностями колії, а також доцільність установлення додаткового датчика безпосередньо в рейковому стикі для порівняння динамічних процесів у рейці та колісній парі. Така комбінація відкриває перспективи для формування комплексного масиву даних про стан колії під навантаженням.

Розроблену систему не можна вважати повноцінною заміною або альтернативою колієвимірювальному вагону, однак отримані результати можуть бути корисними для уточнення механізмів появи та розвитку несправностей, що в подальшому дасть змогу більш точно та ефективно прогнозувати зміну стану колії під час експлуатації.

Подальші дослідження передбачають поглиблений аналіз отриманих сигналів, включаючи спектральні та часово-частотні перетворення, визначення критичних частот, оцінювання нерівностей у поздовжньому і поперечному профілях, а також розроблення алгоритмів автоматизованого виявлення дефектів. У перспективі методика може бути використана як база для створення інструментів прогнозування розвитку дефектів і впровадження елементів систем превентивного утримання залізничної інфраструктури.

Список використаних джерел

1. Falamarzi A., Moridpour S., Nazem M. A Review on Existing Sensors and Devices for Inspecting Railway Infrastructure. *Jurnal Kejuruteraan*. 2019. Vol. 31, No. 1. P. 1–10. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31\(1\)-01](https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31(1)-01).
2. Kanis J., Zitrický V., Hebelka V., Lukáč P., Kubín M. Innovative Diagnostics of the Railway Track Superstructure. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 53. P. 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.017>.
3. Fortunato E., Pinelo A., Lobo da Costa J., Gonçalves D., Pratas A. Some Results of Performance Indicators of a Railway Track Obtained During Its Renewal Process. In: 4th International SIV Congress, Palermo, Italy, 12–14 September 2007.

4. Tsunashima H., Ono H., Takata T., Ogata S. Development and Operation of Track Condition Monitoring System Using In-Service Train. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. P. 3835. <https://doi.org/10.3390/app13063835>.
5. Karis T. Correlation between Track Irregularities and Vehicle Dynamic Response Based on Measurements and Simulations. Licentiate thesis. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2018.
6. Chudzikiewicz A., Bogacz R., Kostrzewski M., Konowrocki R. Condition Monitoring of Railway Track Systems by Using Acceleration Signals on Wheelset Axle-Boxes. *Transport*. 2018. Vol. 33, No. 2. P. 555–566. <https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1342101>.
7. Kostrzewski M., Melnik R. Condition Monitoring of Rail Transport Systems: A Bibliometric Performance Analysis and Systematic Literature Review. *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 4710. <https://doi.org/10.3390/s21144710>.
8. Wikaranadhi P., Alfian S. D., Handoko Y. A., Palar P. S. Railway Track Vertical Irregularities Classification Based on Vehicle Response Using Machine Learning Method. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2739. P. 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2739/1/012054>.
9. Chen X., Chai X., Cao X. The Time-Frequency Analysis of the Train Axle Box Acceleration Signals Using Empirical Mode Decomposition. *Computer Modelling & New Technologies*. 2014. Vol. 18, No. 7. P. 356–360.
10. Istiar I., Widyastuti H. Review Study of Irregularity Track Monitoring Based on Inertial Measure Unit and Power Spectral Density Analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 650. P. 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/650/1/012046>.
11. Tsunashima H., Naganuma Y., Kobayashi T. Track Geometry Estimation from Car-Body Vibration. *Vehicle System Dynamics*. 2014. DOI: 10.1080/00423114.2014.889836.
12. Bosso N., Gliotta A., Magelli M., Zampieri N. Monitoring of Railway Freight Vehicles Using Onboard Systems. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 24. P. 692–705. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.061>.
13. Sysyn M., Gerber U., Kluge F., Nabochenko O., Kovalchuk V. Turnout Remaining Useful Life Prognosis by Means of On-Board Inertial Measurements on Operational Trains. *International Journal of Rail Transportation*. DOI: 10.1080/23248378.2019.1685918.
14. Chia L., Bhardwaj B., Lu P., Bridgelall R. Railroad Track Condition Monitoring Using Inertial Sensors and Digital Signal Processing: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2018. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2875600>.
15. Bravo I., Alvarado U., Nieto J., Ciaurriz P. On-Board Accelerometers in Railway Track Condition Monitoring: A Systematic Review. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2025. Vol. 33. P. 101572. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101572>.
16. Gonzalo A. P., et al. Railway Track and Vehicle On-Board Monitoring: A Review. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 409. P. 02014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340902014>.
17. Kurhan D., Kovalchuk V., Markul K., Kovalskyi A. Development of Devices for Long-Term Railway Track Condition Monitoring: Review of Sensor Varieties. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2025.

Вітольберг Володимир Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (057) 730 10 60. E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Чесак Сергій Сергійович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (098) 910 38 67. E-mail: serheychesak@gmail.com.

Vitolberg Volodymyr, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Tracks and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730 10 60. E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Chesak Serhii, postgraduate student of the Department of Railway Tracks and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (098) 910 38 67. E-mail: serheychesak@gmail.com.

Статтю прийнято 15.12.2025 р.