https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.279

УДК 625.7/.8

Терещенко Т. А., *канд. хім. наук, https://orcid.org/0000-0001-5206-9921*

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ WIM НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ. СВІТОВА ПРАКТИКА

Анотація

Вступ. Розглянуто загальну роль систем вагового контролю автомобільних транспортних засобів на дорозі методом зважування в русі (*WiM*, *Weght-in-Motion*) в забезпеченні збереженості транспортної інфраструктури та безпеки руху.

Проблематика. Проблематика статті стосується питань впровадження сучасних технологій зважування в русі на високій швидкості (*HS-WiM*, *High-Speed WiM*), де умови вимірювання навантаження від транспортного засобу спричиняють високу похибку вимірювання.

Мета. Основною метою статті є виконання аналітичного огляду методів вагового контролю транспортних засобів, конкурентних аспектів існуючих *WiM*-технологій, а також аналіз практики застосування *WiM*.

Результати. Виконання аналітичного огляду дозволило отримати наступні результати:

– показано, що основний принцип роботи систем *WiM* полягає у визначанні динамічного навантаження на колесо/вісь транспортного засобу, що передається на дорожнє покриття; отримані таким чином дані використовуються для виявлення транспортних засобів з навантаженням понад нормоване. Сучасні *WiM*-системи дають можливість отримувати дані щодо кількості осей, відстані між осями, довжини та швидкості транспортного засобу, динамічного навантаження на вісь (або колесо), кількості еквівалентів стандартного навантаження на вісь, а також дані щодо характеристик транспортного потоку;

– визначено, що *WiM*-системи можна розділити на два основних типи: системи, що працюють за низької швидкості руху транспортного засобу (до 15 км/год, *LS WiM*), і такі, що працюють за усталеної швидкості руху транспортного потоку (до 130 км/год, або висока швидкість, *HS WiM*). Системи *LS WiM* забезпечують точність вимірювання в діапазоні від 3 % до 5 % і відносяться до дозволених законодавчою метрологією методів вагового контролю транспортних засобів, як і статичне зважування. *HS WiM*-контроль є більш чутливим до зовнішніх факторів внаслідок ефекту динамічної дії транспортного засобу і тому не може забезпечити зазначену вище точність вимірювань, більше того, не може забезпечити належну точність для задовільної кількості вантажних транспортних засобів. Системи *HS WiM* не затверджені законодавчою метрологією;

– проаналізовано чинники впливу на точність вимірювання в системах *HS WiM*. Показано, що ефект динамічної дії транспортного засобу (та, відповідно, похибку вимірювань) може бути зменшено завдяки відповідності стану дорожнього покриття стандартним вимогам, які стосуються, головним чином, нерівності [шорсткості] поверхні дорожнього покриття.

Висновки. Сучасні *WiM*-технології, які базуються на системах *HS WiM*, ефективно застосовуються для контролювання, у багатьох аспектах, транспортного потоку, у цілях збору даних для проєктування та сталої експлуатації доріг і мостів, охоплюючи проєкти з відновлення інфраструктури. Усталена практика вчинення обмежень щодо транспортних засобів з навантаженням понад нормоване передбачає застосування систем *HS WiM* для попереднього

скринінгу, коли *HS* WiM підтримується системою *LS WiM* або статичним зважуванням. Внаслідок ефекту динамічної дії транспортного засобу *HS WiM*-контроль не може забезпечити точність вимірювань, яка дорівнює точності методів *LS WiM* або статичного зважування. Розвиток технологій *HS WiM* спрямований на уможливлення їх застосування для прямого вчинення обмежень щодо транспортних засобів з навантаженням понад нормоване, що може бути забезпечено виключно затвердженням *HS WiM* законодавчою метрологією.

Ключові слова: автомобільна дорога, системи *WiM*, напрямки застосування систем *WiM*, ділянка *WiM*-контролю, чинники впливу на точність вимірювань, характеристики поверхні покриття.

Вступ

Системи *WiM* (*Weigh-in-Motion,* зважування в русі) відносяться до систем, що описуються взаємодією «транспортний засіб – покриття».

Визначання маси транспортних засобів з допомогою систем *WiM* забезпечує безпосереднє контролювання транспортних навантажень на автомобільних дорогах, збереженість транспортної інфраструктури і безпеку учасників руху, допомагає запобігати передчасному руйнуванню дорожнього одягу внаслідок накопичення деформацій, дефектів, які в результаті призводять до втрати несної здатності.

Як зазначають автори [1], можливі руйнування дорожнього покриття від одного великовагового транспортного засобу, наприклад з повною масою понад 30 т, можуть бути прирівняні до шкідливого впливу, що завдають десятки тисяч легкових автомобілів. Поряд з цим, кожен великоваговий транспортний засіб з навантаженням понад нормоване спричиняє значно більші руйнування покриття, ніж за його нормованого навантаження. Перевищення маси транспортного засобу понад допустиму і, відповідно, навантаження на вісь представляє небезпеку для всіх учасників руху — транспортний засіб втрачає маневреність, стійкість, виникає суттєвий ризик відмови гальмівної системи; висока кінетична енергія такого транспортного засобу спричиняє більш тяжкі наслідки у разі ДТП [2, 3].

Розвиток технологій та методів вагового контролю транспортних засобів на автомобільних дорогах набув особливої актуальності у зв'язку з негативним впливом економічних чинників, існуванням не завжди «здорової» конкуренції між різними видами вантажних перевезень. Згідно з [2] у Франції (дані 2010 р.) експлуатація кожного п'ятивісного (з причепом) вантажного транспортного засобу, за умови його цілорічної експлуатації з навантаженням у 20 % понад нормоване, забезпечувала щорічний прибуток у 25 000 євро.

Ваговий контроль транспортних засобів на автомобільних дорогах з допомогою *WiM*-технологій полягає в визначанні динамічних навантажень від коліс/осей транспортного засобу, що рухається, на поверхню покриття, з обчисленням статичних навантажень на колесо/вісь та статичної маси транспортного засобу, де остання приймається як критерій дотримання нормованого навантаження (значення повної маси транспортного засобу, *Gross Vehicle Weight, GVW*) [1]. Поряд з цим існують певні обмеження щодо застосування сучасних систем *WiM,* пов'язані з неминучим суттєвим негативним впливом зовнішніх чинників на точність вимірювання та, відповідно, з метрологічними аспектами.

З урахуванням викладеного вище в статті виконано порівняльний аналіз технологій та систем вагового контролю транспортних засобів, проаналізовано регульовані чинники впливу на ефективність *WiM* — технологій, зокрема точність вимірювань, а також розглянуто практику застосування систем *WiM*.

Розвиток технологій вагового контролю автомобільних транспортних засобів та напрямки їх застосування

У Європі (Франція) орієнтовно до середини 1990-х ваговий контроль автомобільних транспортних засобів, згідно законодавчо регульованого метрологічного контролю, виконувався статичним зважуванням, із застосуванням різних систем [2]:

– стаціонарні системи, монтовані в покритті, з бетонною облямівкою; платформні ваги;

– пересувні системи, де саме зважувальний прилад під'єднується, за потреби зважування, до інфраструктури (фундамент, живлення), стало монтованої на дорозі на ділянці зважування;

– переносні системи для визначання навантаження на вісь, колесо.

Проте з точки зору вагового контролю на дорозі статичне зважування не є прийнятним. Тривалість такого процесу становить (10–30) хв. для одного транспортного засобу, потребує команди операторів, суттєво ускладнює рух, не може забезпечити повне контролювання транспортного потоку [2]. Зазначені чинники, поряд із стрімким розвитком обсягу автомобільних перевезень, гостро поставили питання розвитку технологій вагового контролю транспортних засобів в русі.

Одним з етапів такого розвитку стала стандартизація систем *LS WiM* (*Low Speed Weigh-in-Motion*, зважування в русі за низької швидкості) для визначання маси транспортного засобу в русі за низької швидкості [2]. Міжнародна організація законодавчої метрології (англомовний термін — *The International Organization for Legal Metrology*; у стандартах вживають франкомовний термін *OIML — Organization Internationale de Métrologie Légale*) видала міжнародні рекомендації стосовно виконання випробувань з придатності та сертифікації автоматичних зважувальних приладів, застосовних в системах *LS WiM.* У Великобританії, а також в окремих североамериканських штатах та в провінціях Канади й Австралії системи *LS WiM* в 1978 р. було впроваджено для вчинення обмежень (*enforcement*) щодо транспортних засобів з навантаженням понад нормоване. Наприкінці 1990-х — на початку 2000-х системи *LS WiM* було аналогічно впроваджено в Японії та в окремих європейських державах (Німеччина, Франція, Бельгія та інші). У системах *LS WiM* застосовують прилади для вимірювання навантаження на колесо або вісь; зважувальні прилади та обладнання монтують у цементобетонній або асфальтобетонній (з матеріалу з високими показниками механічної міцності) платформі довжиною (30–40) м, швидкість руху транспортного засобу під час вимірювань становить (5–15) км/год. Точність систем *LS WiM* знаходиться в межах від 3 % до 5 % [2].

Автоматичні системи вагового контролю *HS WiM* (*High Speed Weigh-in-Motion*, визначання маси в русі за високої швидкості) передбачають застосування засобів та приладів, які призначені для попереднього вагового контролю транспортних засобів за усталеної швидкості руху транспортного потоку, згідно з даними [4] — за швидкості до 130 км/год. До загальних складових таких систем належать монтовані на дорозі датчики, з допомогою яких визначають динамічні навантаження колеса/вісі транспортного засобу, що передаються на покриття, а також інші параметри (кількість осей, відстань між осями, швидкість руху, довжину транспортного засобу, кількість еквівалентів навантаження на стандартну вісь), та які з'єднано з електронними мережевими засобами підтримки, спорядженими відповідним програмним забезпеченням для оброблення, сортування, аналізування та передачі зареєстрованих даних. До переваг систем *HS WiM* відносяться [2]:

– повна автоматизація процесу;

– можливість контролювання всіх транспортних засобів у потоці – не залежно від швидкості, кількості осей, часового відрізку доби;

– можуть бути вмонтовані в покриття або секцію дорожнього одягу належної якості;

– прийнятне відношення «ціна/ефективність».

Суттєвим обмеженням застосування систем *HS WiM* є залежність точності вимірювань від якості покриття, технічних характеристик підвіски транспортного засобу та інших чинників; строк

служби систем *HS WiM* може зменшуватися у разі виникнення проблем в конструкції дорожнього одягу, покритті тощо [2]. Також, автори [1] (дані 2018 р.) вказують на відсутність метрологічних стандартів (зокрема стандартів *OIML*) стосовно систем *HS WiM*, які мали б регламентувати їх безпосереднє, без допоміжних систем, застосування на автомобільних дорогах міжнародного значення для вагового контролю транспортних засобів.

Авторами [2] було окреслено такі напрямки застосування систем *HS WiM* та отримуваної бази даних:

– у цілях проєктування конструкцій дорожнього одягу, мостів – для моделювання навантажень, моніторингу транспортної інфраструктури в цілому, перевіряння ефективності застосованих стратегій (ремонт, реконструкція);

– у цілях реєстрації транспортного потоку з метою накопичення статистичних даних, а також, за потреби, для розрахунку/коригування плати за проїзд;

– здійснення скринінгу транспортного потоку з метою виявлення транспортних засобів з навантаженням понад нормоване для їх виведення на ділянки статичного зважування або *LS WiM* — контролю; спрямований таким чином вибір об'єктів додаткового контролю забезпечує високу ефективність роботи систем *WiM*. Наприклад, у роботі над проєктом [3] було показано, що перехід від не автоматизованого скринінгу транспортного потоку до застосування систем *HS WiM* привів до зростання підтверджених випадків виявлення транспортних засобів з навантаженням понад нормоване приблизно з 120 до 6 000 упродовж одного місяця.

У цілому сучасні системи *WiM*, поряд з інформацією щодо навантажень на колесо/вісь транспортного засобу, дозволяють реєструвати дані щодо швидкості, смуги руху транспортного засобу, дату та час проїзду, кількість осей, відстань між осями, а також виконувати класифікацію кожного транспортного засобу. Системи *WiM* є ефективним інструментом реєстрації змін інтенсивності руху та складу транспортного потоку [5, 6].

Зазначено також [2], що є відомими приклади застосування систем *HS WiM* для безпосереднього, без додаткового перевіряння, вчинення обмежень щодо транспортних засобів з навантаженням понад нормоване (Тайвань), де відхили точності [визначання повної маси транспортного засобу] сягали 30 %. Ймовірно, це може бути прийнятним у разі значних за величиною та частотою випадків навантаження транспортних засобів понад нормоване (наприклад, частка вантажних транспортних засобів з суттєвим навантаженням понад нормоване в транспортному потоці складає від 20 % до 50 % або інше). Проте таку практику застосовували протягом обмеженого періоду орієнтовно в 1998 р., невдовзі її було припинено.

У Північній Америці системи *HS WiM* встановлюють на під'їзді до станцій вагового контролю транспортних засобів (у технічному звіті Федеральної агенції доріг США (*Federal Highway Administration, FHWA*) [2] вжито термін "*weight enforcement station*"). На таких станціях, розташованих вздовж автомагістралей, улаштовано системи *LS WiM* або статичного зважування, а також місця паркування транспортних засобів, щодо яких, за результатом додаткового контролювання, вчинено обмеження.

У роботах [2, 6] наведено загальний опис концепції *Bridge — WiM* або *B — WiM*. Системи *B — WiM* у цій статті не розглядаються.

Загальний аналіз конфігурацій систем *WiM*

Згідно з технічним звітом [6], основним та найбільш важливим компонентом системи *WiM* є датчик, який забезпечує вимірювання навантаження від колеса транспортного засобу під час контакту (проїзду) із покриттям; отримані таким чином дані використовують для обчислення статичного навантаження на колесо/вісь транспортного засобу. У [6][1] описано використання різних

[1] Автори [6] наголошують, що надані матеріали та інформація не стосуються використання систем *WiM* для прямого вчинення обмежень щодо транспортних засобів із навантаженням понад нормоване.

типів та конфігурацій вимірювальних систем: зі сталевими прокладками з монтованими на нижній площині тензодатчиками (*weighpads*), з п'єзоелектричними датчиками інших конфігурацій.

У разі послідовного розташування двох комплектів датчиків для вимірювання навантаження на в'їзді та на виїзді з ділянки контролювання дані, зареєстровані на цих датчиках, можуть бути також використані для визначання швидкості руху транспортного засобу. У конфігурації системи *WiM* можуть бути використані індукційні рамки, які виявляють в'їзд/виїзд транспортного засобу та запускають і зупиняють процес вимірювання. Поряд з цим детектори на основі індукційних рамок можуть застосовуватися в цілях визначання швидкості руху, довжини транспортного засобу [6].

Системи зі сталевими прокладками дозволяють отримувати дані за повним відбитком колеса, можуть бути калібровані в широкому діапазоні значень чинників зовнішнього впливу, проте мають високу вартість монтажу, призводять до появи дефектів покриття, особливо на дорогах з високим транспортним навантаженням, та в окремих випадках можуть бути заборонені для використання [6].

У подальшому основною тенденцією стало застосування п'єзодатчиків — переважно з площею перетину не більше ніж кілька квадратних сантиметрів, укладених на всю ширину або половину ширини проїзної частини. З допомогою таких датчиків вимірюються коливання тиску або деформації, які, з урахуванням швидкості руху транспортного засобу, виводяться у вигляді параметрів навантаження [2, 6]. Такі типи датчиків є відносно дешевими, у тому числі в частині монтажних робіт та підтримання експлуатаційного стану покриття автомобільної дороги, але не забезпечують, внаслідок малих геометричних розмірів, реєстрацію даних за повним відбитком колеса, характеризуються високою чутливістю до впливу зовнішніх чинників. Відклик таких датчиків на навантажування суттєво залежить від характеристик матеріалу покриття, у першу чергу модулів пружності — та, відповідно, від погодно-кліматичних умов; проблемним є також питання їх калібрування.

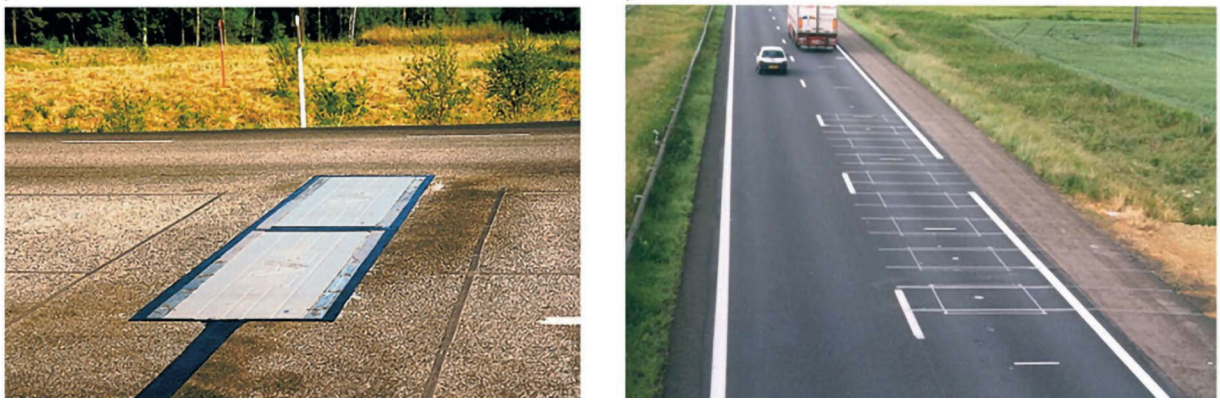
Поряд з комплектами датчиків, важливим компонентом системи *WiM* є різні конфігурації приладів і обладнання для класифікації та/або ідентифікації транспортного засобу. Класифікацію може бути здійснено з допомогою даних датчиків навантаження у разі описаної вище послідовної інсталяції двох комплектів датчиків. Не залежно від конфігурації системи *WiM*, для ідентифікації транспортних засобів використовують відеорегістратори [6].

Обов'язковими компонентами систем *WiM* є мережеве обладнання, оскільки робота мережі систем *WiM* пов'язана з активною комунікацією, телекомунікацією, збором даних, а також належне програмне забезпечення для виконання потрібних розрахунків [6].

Наприкінці 1980-хх було розроблено системи *WiM* з мультиплетною конфігурацією датчиків (*Multiple Sensor — WiM*, *MS — WiM*), які передбачають встановлення комплекту дорожніх датчиків з певними проміжками, вздовж секції автомобільної дороги довжиною від 10 м до 50 м [2]. Згідно з [4] в системах *MS-WiM* використовують п'єзоелектричні датчики. Послідовно розташовані датчики дозволяють визначати навантаження на кожну окрему вісь транспортного засобу та реєструвати в системі *MS-WiM* зміну значень параметрів зі зміною часу та відстані. Під час проєктування та монтажу систем *MS-WiM* окрему увагу приділяють розташуванню датчиків на ділянці, оскільки потрібно співвідносити частоту відбирання інформації щодо транспортного засобу та частоту сигналів системи *WiM*, ураховуючи при цьому усереднену швидкість руху та власної частоти [вібрації вузлів] транспортного засобу [2]]. Проте, згідно з даними [2], системи *MS-WiM* також застосовуються для попереднього контролювання транспортних засобів в потоці та для досліджень і не дозволяють розв'язати проблеми, пов'язані з метрологічними аспектами (див. «Розвиток технологій вагового контролю …»).

Вигляд ділянок з різними конфігураціями датчиків наведено на **рис. 1**.

а) *б)*



а) з монтованими в покритті сталевими прокладками;
б) з мультиплетною конфігурацією датчиків

Рисунок 1 — Ділянки *WiM*-контролю

Аналіз окремих чинників впливу на ефективність та точність роботи систем *WiM*

Ефективність роботи систем *WiM,* точність визначання маси транспортних засобів залежать від багатьох факторів. Оскільки система забезпечує відклик датчиків на динамічну складову навантажування, точність вимірювань суттєво залежить від швидкості руху, технічних характеристик підвіски транспортного засобу та якості поверхні покриття на ділянці вимірювання. В окремих випадках чинниками впливу є й технічні характеристики датчиків, особливо такий параметр, як неоднорідний розподіл чутливості датчика за його довжиною [1]. Також точність результатів роботи систем *WiM* визначається прийнятим алгоритмом обчислення статичного навантаження на колесо/вісь та повної маси транспортного засобу на підставі фактичних даних щодо динамічних навантажень [1, 6].

Вплив окремих чинників, таких як якість покриття та технічні характеристики підвіски транспортного засобу, на точність систем *WiM* проявляється у похибці вимірювання, що виникає внаслідок удару транспортного засобу в русі під час контакту з покриттям — т. зв. ефект динамічної дії транспортного засобу [2, 7].

Нижче розглянуто чинники впливу на ефективність роботи і точність систем *WiM,* пов'язані з конструкцією дорожнього одягу, станом поверхні покриття тощо.

У технічному звіті [6] вказується, що точність спрацьовування кожного окремого датчика та робота системи *WiM* у цілому залежать від температури та вологості покриття під час виконання вимірювань. Критичним параметром є температура, оскільки вона не тільки безпосередньо впливає на роботу датчиків, але й змінює властивості матеріалів дорожнього одягу, покриття.

Автори [6] зазначають, що саме коливання температури є джерелом систематичних похибок вимірювань у системах *WiM*. Датчики, монтовані в асфальтобетонному покритті, працюють за більш варіативних умов. Також більш варіативним є стан асфальтобетонних (у порівнянні з цементобетонними) ділянок покриття, розташованих до та після датчиків системи *WiM*, що негативно впливає на динаміку руху транспортного засобу безпосередньо в зоні розташування датчиків. Поряд з цим вказується [4], що відповідний стандарт системи *ASTM* (*American Society for Testing and Materials,* Американська спілка з випробувань та матеріалів) не встановлює вимоги до типу покриття дорожнього одягу або до показників міцності (жорсткості) матеріалу покриття на ділянці *WiM* — контролю, але містить положення про те, що рівність цементобетонних покриттів за умов значних транспортних навантажень на таких ділянках забезпечується протягом більш тривалого часу, ніж для асфальтобетонних покриттів. Також, описані вище негативні

впливи можуть бути зменшені завдяки розміщенню датчиків у рамці або в облямівці, що ізолює їх від суміжних ділянок покриття [6]. Проте вплив коливань температури на ефективність роботи системи *WiM* не може бути усунутий повністю, тому датчики й система повинні бути придатними для роботи і вимірювань у межах всього діапазону очікуваних температур.

Суттєвий вплив на ефективність і точність роботи систем *WiM* мають геометричні параметри автомобільної дороги на ділянці контролювання, а також якість/стан покриття [6]. Згідно з даними [6] (ураховуються положення системи стандартів *ASTM*), критичний вплив має нерівність [шорсткість] поверхні покриття, що визначається як відхили від істинно плоскої поверхні, значення яких впливають на динаміку руху транспортного засобу та якість їзди. Виявлені таким чином нерівності поверхні покриття призводять до коливань осі транспортного засобу (нерівність поверхні покриття в межах короткої профілоїди), а також всього корпусу транспортного засобу під час руху (нерівність поверхні покриття в межах довгої профідоїди), впливають на динаміку руху та на характер контакту з покриттям в місці розташування датчиків, що потребує дотримання певних вимог до нерівності [шорсткості] поверхні покриття на ділянці контролювання.

Згідно з даними [6] стандарти системи *ASTM* та посібники з виконання робіт установлюють вимоги до поверхні покриття на ділянках певної довжини до та після місця розташування датчиків систем *WiM*; такі вимоги можуть бути установлені, наприклад, на ділянці довжиною 60 м (200 футів) до місця розташування датчиків системи та 30 м (100 футів) після місця розташування датчиків, проте дотримання таких вимог може потребуватися й на більш протяжних ділянках.

У першоджерелі [4] проаналізовано також окремі вимоги до деформаційних характеристик конструкцій дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям та шорсткості поверхні покриття на ділянці *WiM*-контролю згідно з результатами звіту за виконанням європейського проєкту *COST 323*. Проте, як зазначено в першоджерелах [4, 6], у світовій практиці широко застосовуються саме положення стандартів системи *ASTM*.

Ілюстративними, з точки зору впливу характеристик поверхні покриття на взаємодію «транспортний засіб – покриття» є дані [2], згідно з якими співвідношення значень динамічного та статичного навантаження [внаслідок ефекту динамічної дії] становить 1,10 та 1,15 у разі обчислення статичного навантаження на вісь та статичної маси транспортного засобу за умов дотримання вимог до рівності покриття, та 1,20 та 1,25 (або більше) на «середньостатичному» або низької якості покритті.

Перспективи розвитку *WiM*-технологій

Як свідчить аналіз результатів розглянутих робіт, системи *HS WiM* застосовуються переважно для скринінгу транспортного потоку в напрямку станцій вагового контролю з метою виявлення потенційних об’єктів додаткового контролювання. Поряд з цим, безсумнівно актуальною та складною задачею *WiM* – технологій є реалізація таких конфігурацій систем *HS WiM,* які дозволять впровадити вимоги *OIML* та законодавче забезпечення застосування систем *HS WiM* безпосередньо для вчинення обмежень щодо транспортних засобів з навантаженням понад нормоване — так, як це здійснюється у випадку перевищення обмежень за швидкістю руху [2]. Згідно з даними [7], дослідження та роботи з розвитку *WiM* – технологій спрямовано на забезпечення визначання *GVW* з точністю ± 5 % — так, як це встановлено для законодавчо впровадженого контролю з використанням систем статичного зважування або систем *LS WiM* — для (99–100) % транспортних засобів, на відміну від фактично забезпечуваних в європейській мережі (90–95) %.

Перспективним є подальший розвиток систем *MS-WiM*, які, згідно з даними [2], можуть містити до 16 датчиків по одній смузі руху. Автори [2] наголошують на потребі подальшого розвитку *WiM*-технологій, які передбачають синхронну взаємодію дорожніх комплексів *WiM*

та бортових датчиків навантаження на вісь транспортних засобів. Такий підхід уможливлює калібрування систем *WiM* з використанням фактичних даних щодо навантаження на колесо, отриманих від бортових датчиків.

Висновки

1. Згідно зі світовою практикою, системи *HS WiM* ефективно застосовують для скринінгу транспортного потоку в цілях виявляння транспортних засобів — вантажних, великовагових, згідно з окремими джерелами — комерційних — з потенційно перевищеним навантаженням, з подальшим додатковим ваговим контролем за допомогою систем статичного зважування або *LS WiM* на окремо влаштованих ділянках, станціях.

2. Точність визначання статичної маси транспортного засобу в системах *HS WiM* певною мірою залежить від ефекту динамічної дії транспортного засобу, який виникає внаслідок удару транспортного засобу, що рухається, під час контакту з покриттям, та призводить до похибки вимірювання. На прояву ефекту динамічної дії та, відповідно, на похибку вимірювань суттєво впливає нерівність [шорсткість] покриття на ділянці контролювання, яка повинна відповідати певним вимогам.

3. Згідно з даними розглянутих першоджерел, вимірювання в системах *HS WiM* не охоплюються законодавчо регульованим метрологічним контролем (стандартами *OIML*). Актуальною задачею розвитку *WiM* — технологій є реалізація таких конфігурацій систем *HS WiM,* які дозволять впровадити вимоги *OIML* та в перспективі — застосування систем *HS WiM* безпосередньо для вчинення обмежень щодо транспортних засобів з навантаженням понад нормоване.

4. Системи *HS WiM* ефективно застосовуються для реєстрації та накопичення даних щодо характеристик транспортного потоку, дозволяють обробляти дані щодо транспортних засобів у потоці: швидкість руху, кількість осей, навантаження на колесо/вісь, кількість еквівалентів навантаження на стандартну вісь або інше, залежно від конфігурації комплексу. Отримані дані призначаються для використання в цілях проєктування конструкцій дорожнього одягу і мостів, перевіряння ефективності застосованих стратегій (ремонт, реконструкція), а також для моніторингу транспортних потоків в цілому.

Список літератури

1. Burnos, P., Gajda, J., and Sroka, R. Accuracy criteria for evaluation of weigh-in-motion systems. Metrology and Measurement Systems, 2018. Vol. 25, No 4. P. 743–754 URL: https://www.researchgate.net/publication/330082613 (дата звернення: 05.01.2023).

2. Jacob, B., and Feypell-de la Beaumelle, V. Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research.* 2010. 34. P. 9–15. URL: https://www.sciencedirect.com (дата звернення: 09.01.2023).

3. Karim, M. R., Ibrahim, N. I., Saifizul, A. A., Yamanaka, H. Effectiveness of vehicle weight enforcement in a developing country using weigh-in-motion sorting system considering vehicle by-pass and enforcement capability. *IATSS Research.* 2014. 37. P. 124–129. URL: https://www.sciencedirect.com (дата звернення: 06.01.2023).

4. High speed weigh-in-motion system calibration practices. Synthesis of highway practice. NCHRP Synthesis 386. 2008. *Transportation Research Board.* Washington, DC. 412 p. URL: http://nap.nationalacademies.org/23062 (дата звернення: 09.01.2023).

5. Вознюк А. Б., Райковський В. Ф., Каськів В. І., Загорняк О. В. Дослідження даних системи зважування в русі з метою актуалізації коефіцієнтів зміни інтенсивності руху. *Дороги і мости.* Київ, 2022. Вип. 26. С. 228–238. URL: http://dorogimosti.org.ua/ua/vipusk-26 (дата звернення: 06.01.2022).

6. Al-Qadi, I., Wang, H., Ouyang, Y., Grimmelsman, K., and Purdy, J. LTBP Program's Literature Review on Weigh-in-Motion Systems. Report No. FHWA-HRT-16-024. U. S. Department of Transportation, federal Highway Administration, Turner-Fairbank Highway Research Center. USA, VA. June 2016. 46 p. URL: https://www.fhwa.dot.gov (дата звернення: 09.01.2022).

7. Jacob, B., Cottineau, L. – M. Weigh- in-Motion for direct enforcement of overloaded commercial vehicles. *Transportation Research Procedia.* 2016. Vol. 14. P. 1413–1422. URL: https://www.sciencedirect.com (дата звернення: 05.01.2023).

References

1. Burnos, P., Gajda, J., and Sroka, R. Accuracy criteria for evaluation of weigh-in-motion systems. Metrology and Measurement Systems, 2018. Vol. 25, No 4. P. 743–754 URL: https://www.researchgate.net/publication/330082613 (Last accessed: 05.01.2023) [in English].

2. Jacob, B., and Feypell-de la Beaumelle, V. Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research.* 2010. 34. P. 9–15. URL: https://www.sciencedirect.com (Last accessed: 09.01.2023) [in English].

3. Karim, M. R., Ibrahim, N. I., Saifizul, A. A., Yamanaka, H. Effectiveness of vehicle weight enforcement in a developing country using weigh-in-motion sorting system considering vehicle by-pass and enforcement capability. *IATSS Research.* 2014. 37. P. 124–129. URL: https://www.sciencedirect.com (Last accessed: 06.01.2023) [in English].

4. High speed weigh-in-motion system calibration practices. Synthesis of highway practice. NCHRP Synthesis 386. 2008. *Transportation Research Board.* Washington, DC. 412 p. URL: http://nap.nationalacademies.org/23062 (Last accessed: 09.01.2023) [in English].

5. Andrii Vozniuk, Vitalii Raikovskyi, Volodymyr Kaskiv, Oleh Zahornyak. Doslidzhennia danykh systemy zvazhuvannia v rusi z metoiu aktualizatsii koefitsiientiv zminy intensyvnosti rukhu [Study of weigh in motion data for traffic volume coefficients updating]. *Dorogi i mosti [Roads and bridges]*. Kyiv, 2022. Iss. 26. P. 228–238 [in Ukrainian] URL: http://dorogimosti.org.ua/ua/vipusk-26 (Last accessed: 06.01.2022) [in Ukrainian].

6. Al-Qadi, I., Wang, H., Ouyang, Y., Grimmelsman, K., and Purdy, J. LTBP Program's Literature Review on Weigh-in-Motion Systems. Report No. FHWA-HRT-16-024. U. S. Department of Transportation, federal Highway Administration, Turner-Fairbank Highway Research Center. USA, VA. June 2016. 46 p. URL: https://www.fhwa.dot.gov (Last accessed: 09.01.2022) [in English].

7. Jacob, B., Cottineau, L. – M. Weigh- in-Motion for direct enforcement of overloaded commercial vehicles. *Transportation Research Procedia.* 2016. Vol. 14. P. 1413–1422. URL: https://www.sciencedirect.com (Last accessed: 05.01.2023) [in English].

Tetiana Tereshchenko, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0001-5206-9921*
M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine

THE EFFICIENCY OF WIM-SYSTEMS APPLICATION ON MOTOR ROADS. WORLD-WIDE PRACTICE

Abstract

Introduction. The introduction to the paper highlights the general role of the weight control of motor vehicles on roads by WiM – methods (Wegh-in-Motion) in the assurance of the traffic safety and in the transportation infrastructure preservation.

Problem statement. The issues of the paper concern the problems of implementation of contemporary technologies of the High-Speed WiM (HS-WiM) where the conditions of the measurements of the loads from the vehicle generate high measurement error.

Purpose. The main goal of the paper is to perform an analytical review of methods of the weight control of vehicles and of competitive aspects of existing WiM technologies and also the analysis of the practice of WiM application.

Results. The analytical reviewing led to the following results:

it was revealed that the basic principle of WiM systems operation consists in determining the dynamic wheel/axle loading of a vehicle transmitted to the pavement; data thus obtained shall be used to reveal the overloading. Modern WiM systems give possibilities to obtain data concerning axle number, axle spaces, vehicle length and speed, axle (or wheel) dynamic loading, number of equivalents of standard axle loading, and also data regarding the traffic flow characteristics;

it was concluded that WiM systems can be divided into two main types: the systems operating at low speed of a vehicle (up to 15 km/h, LS WiM) and those operating at steady speed of the traffic flow (up to 130 km/h, or high speed, HS WiM). LS WiM ensure the accuracy of the measurement in a range from 3 % to 5 % and belong to the methods of weight control of motor vehicles approved by the legal metrology as well as the static weighing does. HS WiM control is more sensitive to the external factors due to the effect of a vehicle dynamic and thus cannot assure the above stated accuracy of measurements, moreover, cannot assure the appropriate accuracy for the satisfactory number of trucks. HS WiM systems are not approved by the legal metrology;

factors affecting the accuracy of measurements in HS WiM systems were analyzed. It was revealed that the effect of a vehicle dynamic on the measurement error can be mitigated assuring the compliance of the road pavement surface condition with the standard requirements mainly with those concerning pavement surface roughness.

Conclusion. Contemporary WiM technologies based on HS WiM systems are effectively used for screening, in many aspects, the traffic flow, for roads and bridges operating or designing including projects on infrastructure rehabilitation. Common practice of overloaded vehicles enforcement covers application of HS WiM systems for preliminary screening where HS WiM control is assisted with a LS WiM system or with the static weighing. Due to the effect of a vehicle dynamic HS WiM control cannot assure the accuracy of measurements equals that performed by LS WiM systems or by static weighing. The development of HS WiM technologies is aimed at enabling their usage for overloaded vehicles enforcement that can be ensured only after an acceptance of HS WiM by the legal metrology.

Keywords: motor road, WiM systems, WiM systems application, section of WiM control, road pavement surface characteristics, factors affecting the accuracy of measurements.