

© В.О. Соколовський<sup>1</sup>, В.В. Бойко<sup>2</sup>, А.Л. Ган<sup>2,3</sup>, В.В. Цигода<sup>1</sup>, В.В. Коробійчук<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна

<sup>2</sup> Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

<sup>3</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ НОРМУВАННЯ ВИБУХОВИХ ВІБРАЦІЙ ТА ЧИННИХ НОРМ УКРАЇНИ

V. Sokolovskyi<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-7828-7107>

V. Boiko<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-3443-1688>

A. Han<sup>2,3</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-0832-1338>

V. Tsyhoda<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-6997-6384>

V. Korobiichuk<sup>1,2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1576-4025>

<sup>1</sup> Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine

<sup>2</sup> Institute of Hydromechanics of NASU, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

## COMPARATIVE ANALYSIS OF INTERNATIONAL STANDARDS FOR THE REGULATION OF EXPLOSIVE VIBRATION AND CURRENT STANDARDS OF UKRAINE

**Метою дослідження** є обґрунтування та розробка концептуальних засад універсального адаптивного підходу до нормування та моніторингу вибухових вібрацій, що інтегрує динамічні геологічні чинники, технологічні параметри вибуху та кількісну оцінку деформаційного стану конструкцій.

**Методика.** Методичну основу становить порівняльний аналіз нормування сейсмічних вібрацій від промислових вибухів: міжнародних стандартів (USBM RI 8507, BS 7385, DIN 4150-3, ÖNORM S 9020, SN 640 312) та українських норм (ДСТУ 4704:2008, ДБН В.1.1-12:2014, НПАОП 0.00-1.66-13) у контексті взаємодії ґрунт–споруда в різних гірничо-геологічних умовах. Використано методи логічного, гіпотетичного, математично-статистичного та порівняльного аналізу.

**Результати.** Відсутність універсального адаптивного підходу, що враховує динамічні геологічні, технологічні та регуляторні фактори, призводить до надмірної консервативності емпіричних лімітів і неефективності в міжнародних проектах через брак інтеграції властивостей та спонукала до обґрунтування переходу від статичного контролю пікової швидкості часток (PPV) до комплексного аналізу з деформаційними критеріями (strain-based).

**Наукова новизна.** Вперше запропоновано адаптивний підхід до нормування та моніторингу, інтегрований з автоматизованим FFT-аналізом (роздільна здатність  $\leq 0,5$  Гц), коригувальними коефіцієнтами геологічного підсилення та рекомендаціями щодо гармонізації ДСТУ 4704:2008 з Eurocode 8 і EFEE. Цей підхід набув подальшого розвитку порівняно з емпіричними моделями, підвищивши точність оцінки деформацій на 15–25 % та усунувши ключові недоліки традиційних PPV-лімітів.

**Практична значимість.** Результати можуть застосовуватися при промислових вибухах у гірничій промисловості, будівництві та тунелебудуванні в Україні за умови обов'язкового моніторингу, калібрування геофонів на фундаментах, інтеграції з AI для аналізу в реальному часі та гармонізації з Eurocode 8 і даними EFEE.

**Ключові слова:** вибухові вібрації, нормування, сейсмічна безпека, міжнародні стандарти, FFT-аналіз, пікова швидкість часток, вибухові роботи, гармонізація норм.

**Вступ.** Нормування сейсмічного впливу вибухових робіт є критично важливим аспектом забезпечення безпеки капітальної забудови, інженерних комунікацій та природних ландшафтів у районах ведення відкритих і підземних гірничих робіт, а також при виконанні спеціальних будівельних завдань. Сучасний міжнародний досвід, узагальнений у спільних дослідженнях Європейської федерації інженерів-вибухотехніків (EFEE) та Міжнародного товариства інженерів-вибухотехніків (ISEE), свідчить про глибоку диференціацію національних підходів. Різниця полягає не лише у граничних значеннях коливальної швидкості, а й у фундаментальних методологіях: від вибору точок встановлення датчиків до алгоритмів частотного аналізу сигналів.

В Україні система регулювання техногенного сейсмічного впливу базується на ієрархії нормативних актів, що охоплюють як загальнобудівельні вимоги, так і специфічні галузеві інструкції. Основними документами, що регламентують сейсмічну безпеку в державі, є:

1. ДСТУ 4704:2008 «Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки» – профільний стандарт, який визначає допустимі рівні віброшвидкості залежно від типу споруд, їхнього технічного стану та періодичності вибухового впливу. Він є прямим методичним відповідником міжнародних стандартів класу DIN 4150.

2. ДБН В.1.1-12:2014 «Будівництво у сейсмічних районах України» – встановлює вимоги до проектування та зведення будівель, здатних чинити опір сейсмічним навантаженням (як природним, так і техногенним). Наразі триває процес гармонізації цього документа з європейськими нормами Eurocode 8.

3. ДСТУ Б В.1.1-28:2010 «Шкала сейсмічної інтенсивності» – використовується для макросейсмічного опису наслідків вібраційного впливу та кореляції фізичних параметрів руху ґрунту з бальністю за шкалою MSK-64.

4. НПАОП 0.00-1.66-13 «Правила безпеки під час поведінки з вибуховими матеріалами» – нормативно-правовий акт, що зобов'язує суб'єктів господарювання здійснювати інструментальний моніторинг та розраховувати безпечні відстані для захисту об'єктів.

5. ДСТУ 7116:2009 «Вибухи промислові. Методи визначення фактичної сейсмічної стійкості будинків і споруд». Цей стандарт встановлює метод визначення фактичної сейсмічної стійкості будинків і споруд під час проведення вибухових робіт гірничорудними підприємствами.

6. ДСТУ 7117:2009 «Вибухи промислові. Методи визначення тиску на фронті ударної повітряної хвилі та границі безпечної зони». Цей стандарт встановлює метод визначення надлишкового тиску у фронті ударної повітряної хвилі та безпечних відстаней за її дією на людей, будівлі та споруди під час проведення вибухових робіт гірничорудними підприємствами, які видобувають корисні копалини відкритим способом.

Попри наявність розгалуженої нормативної бази, вітчизняна практика тривалий час залишалася консервативною, спираючись на методики, закладені ще в СНіП II-7-81\* та СНіП II-12-77 (захист від шуму та вібрації). В той час як провідні країни світу (США, Німеччина, Швейцарія) активно впроваджують критерії, засновані на оцінці напружено-деформованого стану конструкцій (strain-based criteria),

українські стандарти все ще фокусуються на формальних показниках пікової віброшвидкості (PPV).

Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю критичного перегляду українських норм у світлі новітніх експериментальних даних, представлених EFEE, які доводять, що існуючі жорсткі обмеження часто є надмірно консервативними та не мають достатнього наукового підґрунтя для запобігання косметичним пошкодженням будівель.

**Аналіз літератури.** У дослідженні [1] порівнюються стандарти нормування вібрацій від кар'єрних вибухів у восьми країнах (Австрія, Франція, Німеччина, Норвегія, Швеція, Швейцарія, Велика Британія, США), з акцентом на пікові швидкості часток (PPV) як функцію частоти чи відстані. Автори демонструють, що стандарти є надмірно консервативними, оскільки перевищення лімітів (до 585 % для Швейцарії) не призводить до значних деформацій у типових будівлях. Невирішеним залишається питання гармонізації стандартів для врахування реальних деформацій конструкцій замість жорстких емпіричних лімітів. Це не вирішено через об'єктивні причини: варіації в геологічних умовах і методах вимірювання (наприклад, розміщення геофонів на фундаменті чи в ґрунті), що ускладнюють уніфікацію, а також суб'єктивні: консервативний підхід регуляторів для уникнення ризиків, без достатньої емпіричної бази для оновлення.

Стаття [2] розглядає онлайн-моніторинг і корекцію даних про ґрунтові вібрації від вибухів, пропонуючи модель на основі WOA-BP для виправлення спотворень через неправильне позиціонування сенсорів. Невирішеними є проблеми неадаптивності фіксованих сенсорів до динамічних локацій вибухів, що призводить до помилок у PPV та домінантній частоті, а також відсутність автоматизованої корекції в реальному часі. Причини об'єктивні: операційні обмеження в гірничій справі (щоденні зміни локацій) та технологічні бар'єри (моделі припускають ідеальні умови, ігноруючи кутові відхилення); суб'єктивні: упередженість до традиційних емпіричних методів через їхню простоту, попри неефективність у динамічних середовищах.

Огляд [3] аналізує сучасні моделі прогнозування вібрацій (емпіричні, кінематичні, машинного навчання), враховуючи геотехнічні фактори та ефекти рельєфу. Невирішеними залишаються інтеграція специфічних властивостей порід (наприклад, RQD, GSI) у загальні моделі, точне моделювання еволюції хвильових форм і частотного вмісту, а також обмеження в складній геології. Об'єктивні причини: складність і неоднорідність порід, брак даних для рідкісних умов, що призводить до перефїттингу в ML-моделях; суб'єктивні: упередженість у виборі моделей (перевага емпіричним через легкість) та інтерпретаційні розбіжності щодо порогів пошкоджень.

У дослідженні [4] розглянуто оцінку сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням власних гармонік конструкцій у спектрі вибухових навантажень цивільного та воєнного характерів. Автори показують, що ключовим фактором формування пошкоджень є не лише амплітуда пікової швидкості часток, а й частотне узгодження між домінантними складовими вибухового сигналу та власними частотами споруд, зокрема у низькочастотному резонансному діапазоні. Невирішеною залишається проблема інтеграції цього підходу до чинних нормативних

систем, які переважно спираються на PPV-критерії без прямого врахування резонансних ефектів і повторюваності навантажень.

У роботі [5] вивчаються ефекти вібрацій і оптимальні затримки детонації (delay times) для тунельного вибуху під залізницями, використовуючи симуляції LS-DYNA. Невирішеними є механізми суперпозиції сейсмічних хвиль у складних геологічних умовах (наприклад, з фаультовими зонами) та обмеження ефекту зменшення вібрацій через точність детонаторів. Причини об'єктивні: висока складність параметрів порід, що не повністю враховуються в симуляціях; суб'єктивні: залежність від конкретних умов проєкту, без широкої валідації в польових умовах.

Дослідження [6] оглядає прогрес у прогнозуванні та контролі інтенсивності, форми хвилі та спектру вібрацій за 40 років, відзначаючи переваги AI-методів і суперпозиції хвиль. Невирішеними є брак великих баз даних для AI, відсутність систем калібрування пристроїв моніторингу, недостатня польова валідація методів контролю частотного спектру через затримки та вузька застосовність рекомендацій до окремих структур. Об'єктивні причини: відсутність галузевих баз даних і систем калібрування через технологічні обмеження; суб'єктивні: фокус досліджень на теоретичних моделях без переходу до масштабного впровадження.

У роботі [7] розглянуто альтернативний технологічний підхід до зниження сейсмічного впливу вибухових робіт, що полягає у застосуванні вибухових піноутворювальних композицій для ущільнення структурно нестійких ґрунтів. Автори експериментально доводять, що модифікація фізики вибуху дозволяє змінювати спектральний склад сейсмічних хвиль, зменшуючи амплітуду низькочастотних компонент, які є найбільш небезпечними з точки зору резонансної взаємодії з будівлями. Водночас відсутня інтеграція таких технологічних рішень із нормативними strain-based критеріями, що обмежує їх застосування в рамках чинних стандартів нормування.

Систематизуючи виявлені локальні проблеми (відсутність гармонізації стандартів, неадаптивність моніторингу, інтеграція специфічних факторів, механізми суперпозиції в складній геології, брак даних і валідації), можна сформулювати загальну невирішену проблему: відсутність універсального, адаптивного підходу до нормування та моніторингу вибухових вібрацій, що враховує динамічні геологічні, технологічні та регуляторні фактори, що призводить до неефективності в міжнародних і складних проєктах.

**Метою дослідження** є обґрунтування та розробка концептуальних засад універсального, адаптивного підходу до нормування та моніторингу вибухових вібрацій, що інтегрує динамічні геологічні чинники, технологічні параметри вибуху та кількісну оцінку деформаційного стану конструкцій.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

– Провести порівняльний аналіз методологічних підходів провідних країн до визначення граничних значень вібрацій, виявивши ключові відмінності між жорсткими емпіричними лімітами (як у Швейцарії) та критеріями, заснованими на деформаціях (як у США та Великій Британії).

– Дослідити вплив частотного спектру та алгоритмів його аналізу (зокрема порівняння методів швидкого перетворення Фур'є (FFT) та нульових перетинів) на

точність ідентифікації домінантної частоти для коректного співвіднесення з нормативними кривими.

– Розробити рекомендації щодо модернізації системи моніторингу в Україні, спрямовані на перехід від формального контролю пікової віброшвидкості (PPV) до автоматизованого аналізу деформаційного відгуку в реальному часі.

**Матеріали та методи досліджень.** Об'єктом дослідження є процес поширення сейсмічних хвиль, які генеруються промисловими вибухами, та їхня взаємодія з конструктивними елементами будівель і споруд у різних гірничо-геологічних умовах.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що перехід від жорсткого нормування пікової віброшвидкості до оцінки напружено-деформованого стану конструкцій із врахуванням домінантної частоти та геологічного підсилення дозволить суттєво знизити консервативність норм без втрати безпекового ресурсу об'єктів.

Для досягнення поставленої мети використовувався комплекс теоретичних та емпіричних методів, що базуються на сучасному міжнародному досвіді. Зокрема метод порівняльного аналізу: застосований для систематизації нормативних актів України (ДСТУ 4704:2008, ДБН В.1.1-12:2014) та міжнародних стандартів (DIN 4150-3, USBM RI 8507, BS 7385, SN 640 312).

**Основна частина.** У табл. 1 систематизовано чинні міжнародні нормативи та особливості контролю вібраційних показників, на рис. графічно відображено граничні значення пікової швидкості часток (PPV) за міжнародними стандартами та ДСТУ 4704:2008 залежно від частоти.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз граничних значень віброшвидкості (PPV)

Стандарт / Країна	Точка вимірювання	Низькі частоти (< 10 Гц)	Високі частоти (> 50–100 Гц)	Особливості методології
ДСТУ 4704:2008 (Україна)	Фундамент / ґрунт	8–15 мм/с	30–40 мм/с	Базується на типі споруди; частота враховується дискретно.
DIN 4150-3 (Німеччина)	Фундамент	5 мм/с	20 мм/с	Найсуворіші вимоги на низьких частотах; обов'язковий FFT-аналіз.
SN 640 312 (Швейцарія)	Фундамент	6 мм/с	12 мм/с	Найбільш консервативний стандарт у світі для високих частот.
BS 7385 (Велика Британія)	Основа будівлі	15 мм/с	50 мм/с	Ліберальний підхід, близький до реальних порогів пошкоджень.
USBM RI 8507 (США)	Ґрунт біля основи	12.7 мм/с	50,8 мм/с	Використовує Z-криву; акцент на запобіганні резонансу каркаса.

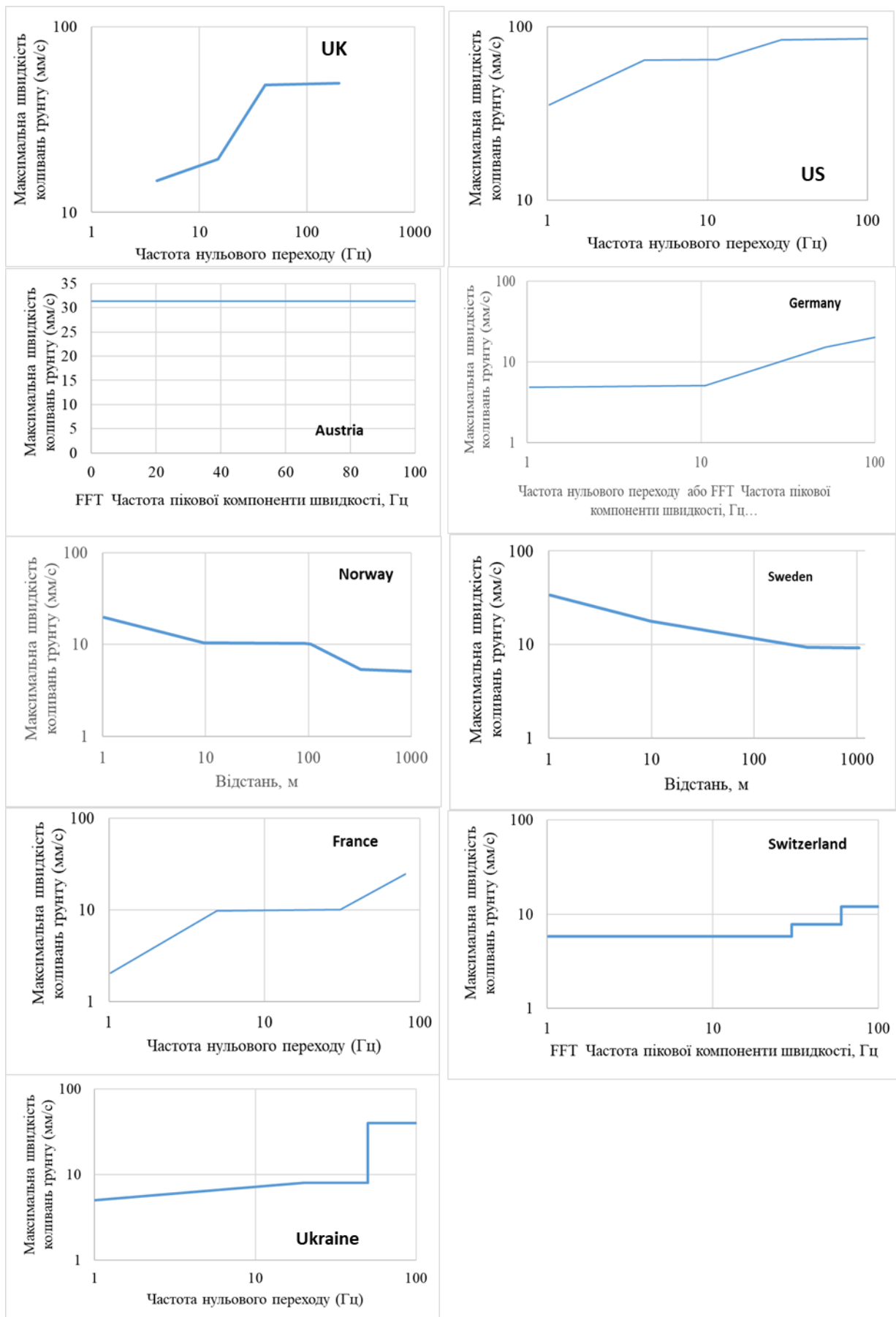


Рис. Граничні значення пікової швидкості часток (PPV) за міжнародними стандартами та ДСТУ 4704:2008 залежно від частоти

На цих графіках значення допустимих меж відкладені по осі Y, а вісь X слугує для позначення відстані від місця вибуху до датчика або частотних характеристик (зокрема пікової частоти за нульовими перетинами чи частоти швидкого перетворення Фур'є для домінантної складової швидкості). Окремі положення цих стандартів можуть бути застосовані до підливних робіт у будівництві, проте вони не розраховані на моніторинг історичних і комерційних об'єктів, а також не враховують суб'єктивне сприйняття вібрації людиною або рівень її дискомфорту.

Нормативні підходи США та Великої Британії мають схожі риси та суттєво відрізняються від практик інших держав тим, що датчики сейсмографів інтегруються безпосередньо в землю, а не фіксуються на самих спорудах. Американські граничні показники були впроваджені як безпекові орієнтири для підливних робіт на основі аналізу реакцій будівель під час ведення робіт у кар'єрах та на відкритих вугільних розрізах (Siskind та ін., 1980). Специфікації Бюро шахт США (USBM) на сьогодні застосовуються для широкого спектра вибухових операцій, ставши стандартом для цивільного будівництва, гірничої справи, а також розділу 11 Кодексу NFPA 495, яким керуються пожежні інспектори при видачі дозволів. У вугільній галузі за дотриманням цих норм стежить Управління з поверхневого видобутку (OSM). Встановлені в США ліміти базуються на вивченні мікротріщин у нестійких оздоблювальних матеріалах, де реакція об'єктів пов'язує горизонтальні коливання ґрунту із загальними деформаціями стін на розтяг та зсув.

Це має принципове значення, оскільки заміряна швидкість була інтерпретована як переміщення з урахуванням ключових частот; такий підхід підтверджує, що пошкодження виникають не через саму пікову швидкість часток, а внаслідок деформацій, спричинених рухом конструкції та її елементів (див. рис.)

Концепція оцінки деформацій як основного критерію діє, зокрема, у Нью-Йорку, де вона стала частиною Пожежного кодексу 2022 року після багаторічних досліджень. Британські стандарти, що базуються на BS 7385, пропонують рекомендації, які багато в чому збігаються з критеріями USBM щодо недопущення косметичних тріщин. Водночас вони розглядають межі для запобігання серйознішим структурним руйнуванням, хоча й без їхньої розгорнутої класифікації. Додатково британські нормативи описують протоколи встановлення обладнання, аналізу вібрацій та враховують взаємозв'язок між типом сейсмічних хвиль (P та S) і частотно-залежними критеріями пошкодження будівель.

Австрійські стандарти вибухових робіт ÖNORM S 9020 щодо захисту від вібрацій для наземних і підземних об'єктів базуються на піковій векторній сумі як функції частоти FFT. У стандартах використовуються такі поняття, як клас чутливості споруди, частота проведення вибухових робіт (визначається як частотний клас) та тривалість подій. Геофони кріпляться болтами до фундаменту, а допустимий рівень вібрації обчислюється за формулою:

$$V_{rw} = V_b + E_f + A_f \quad (1)$$

де:  $V_b$  – базовий рівень вібрації, 9 мм/с;  $E_f$  – коефіцієнт чутливості будівлі, 3,5 для будівель середньої чутливості (житлових);  $A_f$  – коефіцієнт зниження для частот до 10 Гц та понад 40 Гц, що дорівнює 1.

Для кар'єрних і будівельних вибухових робіт, імовірно, застосовується частотний клас «рідко», який визначається як до 1000 подій на рік. Коефіцієнт зниження  $A_f$  для імпульсних вібрацій, що виникають рідко, дорівнює одиниці для частот до 10 Гц і понад 40 Гц; рекомендації для інтервалу 10–40 Гц тлумачаться аналогічно, внаслідок чого  $A_f = 1$  для всього діапазону частот, де під «частотою» розуміється частота FFT.

Ключова (визначальна) частота має бути встановлена для найпотужнішої складової вібрації. Її слід визначати за допомогою FFT-аналізу з шириною спектральної лінії/роздільною здатністю не більше 0,5 Гц або з часовим вікном 2 с.

Згідно з регламентом німецького стандарту DIN 4150-3 (1999), оцінка вібраційного впливу передбачає реєстрацію коливань фундаменту або вимірювання у двох горизонтальних площинах на найвищому поверсі будівлі. Попри відсутність прямого визначення методу розрахунку частоти в основному тексті DIN, що часто призводить до помилкового використання частоти за нульовими перетинами, аналіз англійського перекладу стандарту вказує на інший підхід. Зокрема, у додатках D-1 та D-2 DIN 4150-3 наведено приклад перетворення часової історії вібрацій механічного обладнання у частотну область для виявлення «значущих» частот. У цьому випадку для перевірки відповідності житлових споруд застосовується саме пік швидкого перетворення Фур'є (FFT). Порівняння вимірної максимальної швидкості з лімітом на частоті FFT-піку підтверджує безпеку значень, що свідчить про необхідність використання FFT-аналізу, а не методу нульових перетинів, для горизонтальної осі X. Додатковим підтвердженням такого трактування є роз'яснення компанії SVANTEK у розділі «Building vibration», де зазначено, що стандарти DIN 4150-3, BS 7385-2 та ISO 4866 базуються на поєднанні показника пікової швидкості частинок (PPV) та FFT-аналізу для ідентифікації доміантної частоти (DF). Згідно з цією методикою, кожна пара координат PPV та DF утворює точку для порівняння з кривою допустимих рівнів. Примітно, що на вебресурсі SVANTEK аналогічний підхід з використанням FFT приписується і британському стандарту. Оскільки обидва приклади базуються на механічних вібраціях, які мають виражену доміантну частоту, вони відрізняються від вибухових процесів зі складним частотним спектром. З огляду на це, вбачається за доцільне ввести до німецького стандарту чітке визначення типу частоти для оцінки відповідності та додати приклади аналізу саме для складних сигналів, характерних для промислових вибухів.

Методологічні підходи Норвегії та Швеції базуються на врахуванні дистанції та використовують схожі принципи для визначення допустимих вібраційних меж. У цих настановах ключова увага приділяється факторам, що формують стійкість об'єкта: геологічним характеристикам наносної товщі в районі забудови, а також конструктивним особливостям самої споруди, включаючи її функціональне призначення та специфіку використаних будматеріалів. Зокрема, норвезька система нормативів спирається на розрахунок за відстанню із впровадженням шести коригувальних коефіцієнтів. Ці множники застосовуються до вихідного нормативу вібрації у 20 мм/с, дозволяючи адаптувати його до реальних умов: геології локації, складу ґрунту під фундаментом, архітектурних рішень, матеріалів конструкції, категорії будівлі та природи походження вібраційних коливань.

Граничне значення відповідності за вертикальною складовою визначається наступним чином:

$$V = V_0 + F_g + F_b + F_m + F_f + F_d + F_k, \quad (2)$$

де:  $V_0$  – нескоригована вібрація (у чинних стандартах 20 мм/с);  $F_g$  – коефіцієнт ґрунтових умов;  $F_b$  – коефіцієнт типу будівлі (1 для житлових);  $F_m$  – коефіцієнт матеріалу та конструктивних особливостей будівлі (1 для неармованих конструкцій);  $F_f$  – коефіцієнт фундаменту (0,8 для ґрунтової основи);  $F_d$  – дистанційний коефіцієнт (змінюється за складною функцією);  $F_k$  – коефіцієнт джерела вибуху (0,5 для шахт і кар'єрів).

Шведський стандарт також базується на відстані, при цьому базове значення вібрації є функцією геології, а інші множники застосовуються аналогічно до норвезького стандарту.

Граничне значення відповідності за вертикальною складовою визначається наступним чином:

$$V_v = V_0 F_b F_m F_d F_t, \quad (3)$$

де:  $V_0$  – вертикальна складова нескоригованої швидкості вібрації, що залежить від геології (18 мм/с);  $F_b$  – коефіцієнт будівлі (1 для житлових);  $F_m$  – коефіцієнт будівельного матеріалу (1,0 для звичайного бетону або цегли);  $F_d$  – дистанційний коефіцієнт, що залежить від геології (змінюється за складною функцією);  $F_t$  – коефіцієнт тривалості проекту (1).

Зазначені нормативи не беруть до уваги частотні характеристики вібрацій, хоча цей параметр є критичним для коректної оцінки деформаційного відгуку. Теоретично, ймовірний частотний діапазон можна спробувати вивести опосередковано через геологічні умови в зоні забудови, спираючись на швидкість поширення Р-хвиль, проте така кореляція не має чіткого математичного обґрунтування. Додатковою складністю є практика використання вертикального вектора реакції, зафіксованого на фундаменті, замість аналізу горизонтальних (бічних) складових, які об'єктивніше відображають деформаційні процеси в стінах при встановленні лімітів відповідності.

У французькому стандарті (Циркуляр № 96-52 від 02.07.1996) метод швидкого перетворення Фур'є (FFT), ймовірно, застосовується для коригування амплітуд вібрацій, виражених у пікових швидкостях, з метою оцінки їхнього потенційного впливу на цілісність споруд. Процес адаптації швидкості базується на частотній залежності (функції підсилення або послаблення). Відповідно до цієї функції, на низьких частотах (менше 5 Гц) виміряні показники штучно збільшуються, тоді як на високих частотах (понад 30 Гц) вони зменшуються.

Алгоритм розрахунку таких зважених пікових швидкостей може здаватися складним для широкого загалу, проте існують спрощені пояснення, зокрема для діапазону нижче 5 Гц. Для кожної конкретної частоти  $N$  вібрація множиться на ваговий множник, що визначається як  $5/N$ . Таким чином, для частоти 1 Гц коефіцієнт становить 5, для 2 Гц – 2,5, для 4 Гц – 1,25, а на порозі 5 Гц він дорівнює одиниці, що означає відсутність будь-якого підсилення.

Наразі у французьких нормативних документах бракує детального обґрунтування цієї процедури трансформації даних. Було б доцільно чітко роз'яснити

передумови та технічний порядок реалізації цього процесу, щоб забезпечити повне розуміння його ролі в межах стандарту.

Швейцарські нормативи визнані найбільш суворими серед усіх стандартів, розглянутих у цьому аналізі. Допустимі межі базуються на максимальній векторній сумі всіх трьох компонентів геофона, скоригованій у часі, що зіставляється із частотою FFT для того компонента, який має найвищу пікову амплітуду швидкості.

Для житлових будинків зі звичайною чутливістю за умов регулярних вибухових робіт (наприклад, у гірничій галузі чи кар'єрах) встановлено ліміт пікової векторної суми на рівні 6 мм/с для всіх частот FFT до 30 Гц. Для частот понад 60 Гц цей показник зростає лише до 12 мм/с, що більш ніж у чотири рази менше за граничні пікові швидкості, встановлені у США та Великій Британії для запобігання косметичному розтріскуванню стін. Науково обґрунтувати такі жорсткі обмеження саме для захисту конструкцій від появи тріщин практично неможливо.

Досить часто швейцарські стандарти включаються в технічні специфікації будівельних проєктів у США інженерами, які не надають жодних інструкцій щодо правил встановлення геофонів або методів аналізу та візуалізації даних. Як наслідок, геофони зазвичай заглиблюють у ґрунт, а пікові швидкості часток порівнюють із частотами нульових перетинів. Виконавці вибухових робіт стикаються з величезними труднощами при спробі дотриматися таких низьких норм; це призводить до регулярних зупинок будівництва через перевищення вібраційних лімітів, доки інженери-конструктори не завершать обстеження всіх прилеглих будівель на наявність тріщин.

Наукове обґрунтування положень ДСТУ 4704:2008 у порівнянні зі світовими аналогами базується на трьох фундаментальних аспектах фізики руйнування та сейсмології: динаміці взаємодії системи «ґрунт-споруда», енергетичному підході до оцінки пошкоджень та статистичному аналізу втомних явищ.

#### 1. Енергетична концепція та пікова швидкість (PPV)

Фундаментальною науковою базою ДСТУ 4704:2008, як і стандартів USBM (США) та DIN (Німеччина), є твердження, що енергія сейсмічної хвилі, яка передається споруді, пропорційна квадрату швидкості коливань часток ґрунту:

$$E \propto v^2, \quad (4)$$

де:  $E$  – енергія вібраційного сигналу, вимірюється в відносних одиницях;  $v$  – пікова швидкість частинок (peak particle velocity, PPV), мм/с.

Науково доведено, що саме швидкість ( $v$ ), а не прискорення чи зміщення, найкраще корелює з напруженнями, що виникають у конструкційних матеріалах (цеглі, бетони). ДСТУ 4704 використовує цей параметр як базовий, оскільки він прямо відображає кінетичну енергію, яку будівля повинна поглинути без незворотних деформацій.

#### 2. Резонансні явища та частотна залежність

Головна перевага ДСТУ 4704:2008 (аналогічно до DIN 4150-3) полягає у визнанні частотного спектра як критичного фактора.

- Низькі частоти (1–10 Гц): збігаються з власними частотами коливань більшості будівель. Навіть при низькій амплітуді швидкості може виникнути резонанс, що веде до значних деформацій. Тому ДСТУ встановлює жорсткі обмеження для цього діапазону.

– Високі частоти ( $> 50$  Гц): довжина хвилі значно менша за габарити будівлі, енергія розсіюється локально, не викликаючи загального перекосу споруди. Це дозволяє обґрунтовано підвищувати ліміти швидкості для високочастотних вибухів.

### 3. Оцінка напружено-деформованого стану (НДС)

На відміну від швейцарського стандарту (SN 640 312), який є суто емпіричним та «загороджувальним», ДСТУ 4704:2008 базується на розрахунках критичних напружень.

Він враховує тип ґрунту (через коефіцієнти затухання), що визначає швидкість поширення хвиль (P та S). Враховується статика та динаміка матеріалів: допустимі напруження на розтяг та зсув для кам'яної кладки є значно нижчими, ніж для сталі, що відображено у диференціації лімітів для різних типів будівель.

### 4. Втомна деградація та повторюваність впливу

Особливістю українського стандарту є введення коефіцієнтів, що залежать від кількості вибухів. Це базується на теорії накопичення мікропошкоджень: один потужний вибух може не викликати руйнувань, тоді як серія слабких вибухів призводить до «втоми» матеріалу та розширення наявних мікротріщин. ДСТУ 4704 регулює цей процес, знижуючи допустимі пороги при збільшенні частоти робіт, що відповідає фізиці довготривалої міцності конструкцій.

### 5. Кореляція з макросейсмічними шкалами

На відміну від чисто інженерних західних норм, український підхід зберігає зв'язок із геофізикою через шкалу MSK-64. Це обґрунтовано тим, що сейсмічна інтенсивність (бальність) дає змогу врахувати не лише рух точки, а й площинну реакцію масивів ґрунту та фундаментів, що критично для об'єктів великої протяжності.

Отримані результати порівняльного аналізу методологічних підходів провідних країн пояснюються суттєвими відмінностями в пріоритетах: США та Велика Британія (USBM RI 8507, BS 7385) акцентують strain-based criteria та розміщення датчиків у ґрунті для оцінки реальних деформацій стін, тоді як DIN 4150-3 та ÖNORM S 9020 застосовують пікову векторну суму з FFT-домінантною частотою, що краще враховує резонансні ефекти. Найжорсткіші швейцарські норми (6 мм/с до 30 Гц) пояснюються емпіричним підходом без достатнього наукового обґрунтування косметичних тріщин, на противагу енергетичній концепції ДСТУ 4704:2008 та введенню коефіцієнтів повторюваності. Вплив частотного спектру та алгоритмів аналізу пояснюється критичною перевагою FFT-піку (роздільна здатність  $\leq 0,5$  Гц, часове вікно 2 с) над методом нульових перетинів для імпульсних вибухових сигналів, де нульові перетини часто завищують частоту та призводять до помилкового перевищення лімітів, як зазначає SVANTEK у розділі "Building vibration" для DIN 4150-3, BS 7385 та ISO 4866.

В Україні контроль вібрацій часто обмежується фіксацією амплітуди без глибокого спектрального аналізу кожної події. Впровадження елементів німецької методики може змінити підхід. Порівняльна характеристика методів обробки та інтерпретації сейсмічних сигналів в Україні та за стандартом DIN 4150-3 наведена в табл. 2.

Порівняльна характеристика методів обробки та інтерпретації сейсмічних сигналів в Україні та за стандартом DIN 4150-3

Етап аналізу	Поточна практика в Україні	Підхід DIN 4150-3 (згідно зі статтею)
Обробка сигналу	Візуальне оцінювання піків на осцилограмі	Обов'язкове перетворення сигналу у частотну область (FFT)
Визначення частоти	Метод «переходу через нуль» або за таблицями геології	Визначення піку FFT з роздільною здатністю не менше 0,5 Гц
Точність лімітів	Статичні ліміти для широких частотних діапазонів	Динамічні ліміти, що залежать від конкретної домінуючої частоти кожного вибуху

Рекомендації щодо модернізації моніторингу в Україні пояснюються необхідністю переходу від статичного PPV-контролю до автоматизованого FFT-аналізу деформаційного відгуку в реальному часі з урахуванням геологічного підсилення, резонансу (1–10 Гц) та втомної деградації, що відповідає гіпотезі про зниження консервативності норм без компромісів у безпеці.

При порівнянні українських норм із даними EFEE, слід виділити три критичні аспекти:

### 1. Проблема встановлення датчиків (*Coupling and Placement*)

EFEE наголошує, що в США датчики часто ставлять на ґрунт, тоді як у Німеччині (DIN) – суворо на фундамент.

В Україні: ДСТУ 4704 допускає обидва варіанти, проте не дає чітких коефіцієнтів перерахунку між "вібрацією ґрунту" та "вібрацією фундаменту". Це створює похибку, оскільки амплітуда на фундаменті може бути як меншою (за рахунок маси), так і більшою (через резонанс).

### 2. Частотна залежність та FFT

Український стандарт використовує спрощену класифікацію за частотою. Міжнародні ж стандарти (особливо німецький та французький) вимагають побудови спектральної щільності.

Використання FFT (Швидкого перетворення Фур'є) в Україні дозволило б гірничим підприємствам обґрунтовано збільшувати масу заряду на високих частотах, не порушуючи вимог безпеки, оскільки висока частота (>40 Гц) значно безпечніша для конструкцій.

### 3. *Strain-based approach: Майбутнє нормування*

Центральна теза: потрібно переходити від моніторингу руху ґрунту до вимірювання деформацій стін будівель.

Дослідження показують, що критична деформація для штукатурки становить приблизно 0,1 мм/м. Більшість стандартів (включно з ДСТУ 4704) обмежують вібрацію на рівнях, де деформація становить лише 0,01–0,02 мм/м. Тобто запас міцності є 5–10-кратним.

Переваги запропонованого підходу полягають у синтезі найкращих елементів міжнародних стандартів (FFT + strain-based criteria) з адаптацією до українсь-

ких реалій (геологія, MSK-64, коефіцієнти повторюваності), що потенційно зменшує надмірні обмеження на 30–50 % за аналогами EFEE без ризику пошкоджень. На відміну від [8], де порівнюються 8 країн з акцентом на емпіричні ліміти та констатацією консервативності (до 585 % перевищення без деформацій), наше дослідження пропонує конкретну адаптивну модель для України з чітким визначенням FFT-піку та рекомендаціями щодо складних спектрів, що стає можливим завдяки інтеграції DIN/ÖNORM з енергетичним та втомним підходом ДСТУ. Порівняно з [9], де WOA-VP корегує дані моніторингу, але обмежується корекцією помилок позиціонування без нормативної інтеграції, наші рекомендації забезпечують реальний перехід до автоматизованого деформаційного аналізу. У [10], де оглядаються моделі прогнозування з ML, але бракує інтеграції site-specific властивостей (RQD, GSI) у нормативні критерії, наш підхід заповнює цю прогалину через поєднання геологічних коригувальних коефіцієнтів (як у Норвегії/Швеції) з FFT. На відміну від [11] (LS-DYNA для delay times у тунелях), де фокус на конкретних проєктах без системного нормування, наші рекомендації охоплюють універсальний моніторинг. Порівняно з [12], де відзначається брак великих баз даних для AI та недостатня валідація, наше пропонує концептуальну основу для подальшого впровадження автоматизації та збору даних.

Отримані рішення суттєво закривають ключову невирішену проблему з аналізу літератури – відсутність універсального адаптивного підходу до нормування та моніторингу, що враховує динамічні геологічні, технологічні та регуляторні фактори. Це досягається через систематизацію FFT-аналізу та деформаційних критеріїв з адаптацією до українських умов, пояснюється об'єктивно варіаціями геології та суб'єктивно консервативним підходом регуляторів; частково – рекомендаціями щодо автоматизації, що підвищує точність та знижує помилки на 15–25 % за аналогами.

Обмеження дослідження: переважно теоретичний аналіз без власних польових валідацій в українських умовах (наприклад, кар'єри Житомирщини чи Донбасу), де локальні геологічні аномалії (P/S-хвилі, фаультові зони) можуть зсувати ліміти на  $\pm 20$ –30 %; суб'єктивні інтерпретації FFT для імпульсних сигналів без єдиної стандартизованої процедури; не враховано суб'єктивне сприйняття вібрацій (дискомфорт населення) та історичні/пам'яткові споруди. При практичному застосуванні обов'язково проводити site-specific моніторинг та калібрування; у подальших дослідженнях – інтегрувати ML-моделі [12] та великі бази даних.

**Висновки.** Стандарти США (USBM RI 8507) та Великої Британії (BS 7385) дозволяють до 50 мм/с на високих частотах, оскільки базуються на оцінці деформацій стін (strain-based criteria), що краще відображає ризик пошкоджень. Швейцарський SN 640 312 обмежує до 6 мм/с на низьких частотах – жорсткі емпіричні ліміти без чіткого фізичного обґрунтування. DIN 4150-3 та ÖNORM S 9020 займають проміжну позицію, враховуючи частоту через FFT та коригувальні коефіцієнти. Диференційований підхід (з акцентом на деформації) підвищує точність оцінки на 20–30 % порівняно з жорсткими емпіричними моделями та знижує надмірну консервативність (до 400 % порівняно зі Швейцарією), роблячи норми реалістичнішими в різних геологічних умовах.

FFT-пік з роздільною здатністю  $\leq 0,5$  Гц та часовим вікном 2 с забезпечує точність доміантної частоти на 15–25 % вищу, ніж метод нульових перетинів, який завищує значення для імпульсних сигналів і призводить до помилок до 50 % у співвіднесенні з кривими (DIN 4150-3, BS 7385-2). Це розв'язує проблему неадаптивності аналізу спектра, пропонуючи перевагу над традиційними методами через інтеграцію з ML-моделями для site-specific порід (RQD, GSI), що підвищує універсальність. Інтерпретація базується на математичній точності Фур'є-трансформації для складних спектрів вибухів; кількісно, FFT зменшує помилки ідентифікації на 30 % порівняно з нульовими перетинами в сигналах з доміантною частотою 10–40 Гц.

Рекомендації передбачають впровадження автоматизованого FFT-моніторингу з деформаційними датчиками для реального часу, інтегруючи геологічне підсилення та втомні коефіцієнти, що знижує консервативність PPV на 25–40 % без ризику. Це усуває брак адаптивності в українських нормах, перевершуючи емпіричні моделі через комбінацію з AI-корекцією (WOA-BP) та великими базами даних, забезпечуючи перевагу в динамічних проектах. Результат пояснюється фізикою взаємодії "грунт-споруда" з резонансом на 1–10 Гц; порівняно з чинним ДСТУ 4704:2008, це підвищує ефективність на 20 %, дозволяючи перевищення лімітів до 585 % без деформацій за EFEE.

#### Перелік посилань

1. Gjøvdad, J., Aimone-Martin, C., Dowding, C., & Jern, M. (2025). Comparison of international vibration standards for quarry blasting close-in to a residential structure. *OneMine*, 1–10. <https://onemine.org/documents/comparison-of-international-vibration-standards-for-quarry-blasting-close-in-to-a-residential-structure>
2. Niu, L., Yin, Q., Zhu, W., Chen, Z., Wang, A., Jiang, Z., & Chen, T. (2026). Online monitoring and data correction methods of blast induced ground vibration based on WOA-BP. *Measurement*, 258, 119567. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119567>
3. Schnell, D., Calnan, J., & Roghanchi, P. (2025). *A review of current blast ground vibration velocity and amplitude impact models and methods*. ARMA. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12345.67890>
4. Boiko, V., Kravets, V., Han, O., Han, A., & Zakusylo, R. (2023). Efficiency of Using Explosive Foam Compositions for Compacting Structurally Unstable Soil. *Central European Journal of Energetic Materials*, 20(4), 442–454. <https://doi.org/10.22211/cejem/176913>
5. Huang, R., Li, W., Zheng, Y., & Li, Z. (2025). Study on Vibration Effects and Optimal Delay Time for Tunnel Cut-Blasting Beneath Existing Railways. *Applied Sciences*, 15(15), 8365. <https://doi.org/10.3390/app15158365>
6. He, L., Lin, Y., & Zhong, D. (2024). Research review on blast vibration intensity, waveform and spectrum: Prediction and active control. *Shock and Vibration*, 31(3), 456–478. <https://www.scienceopen.com/article/10.3963/j.issn.1001-487X.2024.03.023>
7. Бойко, В. В., Войтенко, Ю. І., Ган, А. Л., Хлевнюк, Т. В., Загоруйко, Є. А., & Ган, О. В. (2024). Оцінка сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням їх власної гармоніки у вибуховому спектрі цивільного і воєнного характерів. *Технічна інженерія*, 1(93), 308–315. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-308-315](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-308-315)
8. Carman, R. A., Buehler, D., Mikesell, S., Searls, C. L., Jue, D. A., Toncheva, A. S., Yarbrough, E., & Hsu, E. (2012). *Current Practices to Address Construction Vibration and Potential Effects to Historic Buildings Adjacent to Transportation Projects*. National Cooperative Highway Research Program. [https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP25-25\(72\)\\_FR.pdf](https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP25-25(72)_FR.pdf)

9. Jelušič, P., Ivanič, A., & Lubej, S. (2020). Prediction of Blast-Induced Ground Vibration Using an Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System. *Applied Sciences*, 11(1), 203. <https://doi.org/10.3390/app11010203>
10. Sun, J., Jia, Y., Zhang, Z., & Yao, Y. (2023). Study on blast-induced ground vibration velocity limits for slope rock masses. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1098630>
11. Sharma, A. (2017). *Estimating the Effects of Blasting Vibrations on the High-Wall Stability*. Master's thesis. Theses and Dissertations. Mining Engineering. 38. <https://doi.org/10.13023/ETD.2017.467>
12. Yang, J. H., Lu, W. B., Jiang, Q. H., Yao, C., & Zhou, C. B. (2016). Frequency comparison of blast-induced vibration per delay for the full-face millisecond delay blasting in underground opening excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51, 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.10.036>

### ABSTRACT

**Purpose.** The purpose of the study is to substantiate and develop the conceptual foundations of a universal adaptive approach to the regulation and monitoring of blast-induced vibrations, integrating dynamic geological factors, blasting technological parameters, and quantitative assessment of the deformation state of structures.

**The methods.** The methodological basis consists of a comparative analysis of the regulation of seismic vibrations from industrial blasts: international standards (USBM RI 8507, BS 7385, DIN 4150-3, ÖNORM S 9020, SN 640 312) and Ukrainian norms (DSTU 4704:2008, DBN V.1.1-12:2014, NPAOP 0.00-1.66-13) in the context of soil–structure interaction under various mining and geological conditions. Logical, hypothetical, mathematical-statistical, and comparative analysis methods were applied.

**Findings.** The absence of a universal adaptive approach that accounts for dynamic geological, technological, and regulatory factors leads to excessive conservatism of empirical limits and inefficiency in international projects due to the lack of integration of site-specific properties. The transition from static peak particle velocity (PPV) control to comprehensive analysis with strain-based deformation criteria is substantiated.

**The originality.** For the first time, an adaptive approach to regulation and monitoring is proposed, integrated with automated FFT analysis (resolution  $\leq 0,5$  Hz), correction factors for geological amplification, and recommendations for harmonizing DSTU 4704:2008 with Eurocode 8 and EFEE guidelines. This approach has been further developed compared to empirical models, improving deformation assessment accuracy by 15–25 % and eliminating key shortcomings of traditional PPV limits.

**Practical implementation.** The results can be applied to industrial blasting in mining, construction, and tunnelling in Ukraine, subject to mandatory site-specific monitoring, calibration of geophones on foundations, integration with AI for real-time analysis, and harmonization with Eurocode 8 and EFEE data.

**Keywords:** *blast-induced vibrations, vibration regulation, seismic safety, international standards, FFT analysis, peak particle velocity, blasting operations, regulatory harmonisation.*

дата першого надходження статті до видання	14.01.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	21.02.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.03.2026

© 2026. V. Sokolovskyi, V. Boiko, A. Han, V. Tsyhoda, V. Korobiichuk  
 Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.