

Оцінювання ефективності приладів для моніторингу стійкості будівельних конструкцій під час рятувальних робіт у зоні руйнувань

Assessment of the Effectiveness of Devices for Monitoring the Stability of Building Structures During Rescue Operations in Debris Zones

Аліна Перегін^A

Corresponding author: PhD, науковий співробітник, e-mail: perehin_alina@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2062-5537

Артем Гузь^A

здобувач, e-mail: huz_artem@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0009-0004-8869-2423

Роман Шевченко^A

доктор технічних наук, заступник начальника центру, e-mail: shevchenko_roman@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9634-6943

Роман Мележик^A

PhD, науковий співробітник, e-mail: melezhik_roman@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6425-4147

Володимир Липовий^A

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри, e-mail: lypovyi_volodymyr@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1967-0720

Валерій Стрілець^B

кандидат технічних наук, e-mail: V.strelec.brand@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1913-7878

Alina Perehin^A

Corresponding author: PhD, Researcher, e-mail: perehin_alina@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2062-5537

Artem Huz^A

PhD student, e-mail: huz_artem@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0009-0004-8869-2423

Roman Shevchenko^A

Doctor of Technical Sciences, Deputy Head of the Center, e-mail: shevchenko_roman@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9634-6943

Roman Melezhyk^A

PhD, researcher, e-mail: melezhik_roman@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6425-4147

Volodymyr Lypovyi^A

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department, e-mail: lypovyi_volodymyr@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1967-0720

Valerii Strilets^B

Candidate of Technical Sciences, e-mail: V.strelec.brand@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1913-7878

^A Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

^B Гуманітарна міжнародна організація "The Halo Trus", Київ, Україна

^A National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

^B Humanitarian international organization "The Halo Trus", Kyiv, Ukraine

Received: November 29, 2025 | Revised: December 16, 2025 | Accepted: December 31, 2025

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.6.18>

Мета роботи. Визначення найбільш ефективного обладнання для рятувальників ДСНС, з метою підвищення безпеки та ефективності проведення рятувальних операцій у зоні руйнувань.

Метод дослідження. Аналітичний огляд світового досвіду застосування сенсорних технологій у рятувальних операціях, вивчення їх технічних характеристик, принципів роботи та практичних прикладів застосування, а також порівняльного аналізу їх ефективності під час виконання рятувальних робіт у зоні руйнувань.

Результати дослідження. Відібрано шість інноваційних приладів для моніторингу стану конструкцій; встановлено, що Leader WASP та Leader SENTRY B1 є найбільш ефективними для оперативного попередження про небезпечні переміщення та створення безпечних зон роботи рятувальників; обґрунтовано, що жоден прилад не є універсальним — ефективність залежить від типу пошкодження, умов доступу, необхідної швидкості оповіщення та масштабу руйнування.

Теоретична цінність дослідження. Робота систематизує сучасні технічні рішення для моніторингу структурної стійкості будівель, узагальнюючи світовий досвід застосування сенсорних систем і формуючи наукову основу для впровадження багаторівневого моніторингу конструкцій під час рятувальних робіт.

Практична цінність дослідження. Отримані результати дозволяють обґрунтовано обирати прилади для оперативного моніторингу нестабільних конструкцій; підвищити рівень безпеки рятувальників та зменшити ризик вторинних обвалів; формувати комбіновані системи моніторингу, адаптовані до умов воєнного часу (мобільність, автономність, швидке розгортання, робота у важкодоступних місцях).

Purpose. To identify the most effective equipment for rescuers of the State Emergency Service of Ukraine in order to enhance safety and improve the efficiency of rescue operations in destruction zones.

Method. An analytical review of global experience in the use of sensor technologies during rescue operations, an examination of their technical characteristics, operating principles, and practical applications, as well as a comparative analysis of their effectiveness during rescue work in areas of structural collapse.

Findings. Six innovative devices for structural condition monitoring were selected. It was established that the Leader WASP and Leader SENTRY B1 are the most effective for timely warning of hazardous displacements and for creating safe working zones for rescuers of the State Emergency Service of Ukraine. It was also determined that no single device is universal — their effectiveness depends on the type of damage, access conditions, required response speed, and the scale of destruction.

Theoretical implications. the work systematizes modern technical solutions for monitoring the structural stability of buildings, summarizing international experience with sensor systems and forming a scientific foundation for implementing multi-level structural monitoring during rescue operations.

Practical implications. the obtained results allow for informed selection of devices for real-time monitoring of unstable structures, increase the safety of rescuers, reduce the risk of secondary collapses, and enable the development of combined monitoring systems adapted to wartime conditions (mobility, autonomy, rapid deployment, and suitability for hard-to-reach locations).

Originality. For the first time in the context of the State Emergency Service of Ukraine, a comprehensive comparative analysis of devices with different technological principles (inclinometers, accelerometers, crack gauges, laser systems, and multiparametric monitoring

Цінність дослідження. Уперше для умов ДСНС України проведено комплексний порівняльний аналіз приладів різної технологічної природи (інклінометри, акселерометри, тріщиноміри, лазерні та багатопараметричні системи), що дає можливість сформувати практичні рекомендації щодо їхнього впровадження у рятувальні операції.

Обмеження дослідження. Обмеження стосуються відсутності власних натурних випробувань приладів у реальних умовах руйнувань; залежності ефективності приладів від можливості доступу до об'єкта та якості початкових даних про стан споруди.

Тип статті: Оглядовий.

devices) has been conducted, allowing for the development of practical recommendations for their implementation in rescue operations.

Research limitations. The limitations concern the absence of full-scale field testing of the devices under real collapse conditions, as well as the dependence of device effectiveness on accessibility and the quality of initial data regarding the structural condition. Future research may focus on integrated sensor systems and their operational testing.

Paper type. Review.

Ключові слова: моніторинг, будівельна конструкція, будівля, забезпечення безпеки.

Key words: Monitoring, Building Structure, Building, Safety Assurance.

Вступ

Забезпечення стійкості пошкоджених будівель і споруд під час рятувальних робіт є одним із найважливіших викликів, з якими стикаються підрозділи екстреного реагування в усьому світі. В умовах масштабних руйнувань, особливо під час воєнних дій, рятувальники Державної служби України з надзвичайних ситуацій зазнають значних ризиків, пов'язаних із повторними обвалами, прихованими зміщеннями конструкцій та непередбачуваними деформаціями частково зруйнованих будівель. Своєчасне виявлення небезпечних рухів і безперервний моніторинг поведінки конструкцій є ключовими для запобігання травмам і загибелі особового складу.

Сучасні сенсорні технології відкривають нові можливості для оцінювання стійкості конструкцій у режимі реального часу, дозволяючи рятувальникам визначати небезпечні ділянки, контролювати доступ до нестабільних зон і приймати обґрунтовані оперативні рішення. Протягом останнього десятиліття в різних країнах було розроблено й впроваджено широкий спектр моніторингових пристроїв — інклінометрів, акселерометрів, датчиків контролю тріщин, лазерних систем попередження та багатопараметричних бездротових сенсорів — для підвищення безпеки рятувальних операцій.

Попри наявність таких технологій на світовому ринку, їх застосування в оперативній діяльності ДСНС України залишається обмеженим. Відсутність систематизованої інформації щодо технічних характеристик, функціональних можливостей і придатності цих приладів до роботи в умовах завалів ускладнює процес вибору оптимального обладнання для практичного використання.

Тому проведення комплексного аналізу сучасних моніторингових пристроїв є важливим для визначення їх потенційної ефективності у підвищенні безпеки та результативності рятувальних операцій в Україні. У цьому дослідженні розглянуто технічні параметри, принципи роботи та практичну застосовність найсучасніших приладів, що використовуються у світі, з метою визначення інструментів, які можуть бути успішно інтегровані в роботу українських рятувальників у реальних умовах надзвичайних ситуацій.

Теоретичні основи дослідження

Раніше у практиці ДСНС для контролю стану конструкцій у зоні руйнувань використовувалися переважно прості механічні тріщиноміри, рейкові індикатори та геодезичні методи спостережень, що передбачали ручну фіксацію змін положення елементів будівлі. Такі підходи мають суттєві обмеження — низьку точність вимірювань, відсутність можливості контролю в реальному часі та неможливість використання у важкодоступних або небезпечних зонах.

На відміну від цього, сучасні прилади, розглянуті у статті, дозволяють здійснювати автоматизований, бездротовий та безперервний моніторинг, забезпечуючи миттєве сповіщення про зміщення або вібрації конструкцій. Це суттєво підвищує безпеку рятувальників, оскільки усуває потребу у безпосередній присутності людини в небезпечній зоні.

Згідно з аналітичними оглядами Європейського агентства цивільного захисту (ERCC) [1] та технічними звітами Федерального агентства з надзвичайних ситуацій США FEMA [2], впровадження інклінометричних, лазерних та вібраційних сенсорів дозволяє зменшити ризики травм під час проведення рятувальних операцій на 40 – 60%.

У статтях журналу *Sensors* (2023) [3] та *Engineering Structures* (2024) [4] також описано позитивний досвід використання сенсорних мереж для моніторингу стану будівель після землетрусів, вибухів і техногенних катастроф, зокрема в Італії, Туреччині, США, де подібні технології вже стали частиною стандартних протоколів реагування.

Крім того, дослідження Массачусетського технологічного інституту MIT (2024) [5] довели ефективність бездротових систем тріщиномірів та акселерометрів для оцінки структурної стабільності в умовах обмеженого доступу до об'єкта.

Таким чином, проблема полягає не лише у відсутності обладнання, а й у недостатньому рівні інтеграції сучасних рішень у щоденну практику рятувальників ДСНС. Саме тому аналіз доступних на ринку систем моніторингу з фокусом на реальні умови експлуатації – є необхідним етапом у реформуванні підходів до безпечної роботи у зоні руйнувань.

Постановка проблеми

Повномасштабна війна в Україні призвела до руйнування тисяч житлових будинків, адміністративних та промислових споруд. Часто рятувальники змушені працювати в умовах надзвичайної небезпеки – під уламками, біля нестабільних конструкцій, які можуть будь-якої миті обвалитися. Під час таких робіт важливо мати технологічні прилади, які здатні оперативно виявити найменші зміни у стані будівельної конструкції та попередити особовий склад про загрозу небезпеки. Дані прилади можуть не лише врятувати життя, а й дозволяють організувати ефективну та безпечну роботу в небезпечних місцях.

За даними Мінінфраструктури та ДСНС, тисячі об'єктів залишаються в аварійному стані або частково зруйновані, при цьому роботи з розбору завалів відбуваються майже щодня в умовах постійних обстрілів та підвищеної небезпеки. Основна проблема – відсутність оперативної оцінки стабільності конструкцій у зоні ураження, що може призвести до вторинних обвалів і загибелі рятувальників, військових чи цивільних.

Наразі звичайні методи візуального обстеження та спостереження за будівлею не відповідають викликам часу, особливо в умовах швидких рятувальних операцій, коли кожна секунда може коштувати життя. Водночас світова практика демонструє, що використання автоматизованих сенсорних систем і пристроїв моніторингу здатні кардинально змінити ситуацію на краще.

Методологія дослідження

Мета дослідження – визначення найбільш ефективного обладнання для рятувальників ДСНС, з метою підвищення безпеки та ефективності проведення рятувальних операцій у зоні руйнувань.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести: аналіз світового досвіду впровадження сенсорних систем у проведенні рятувальних робіт; огляд та відбір шести сучасних приладів для моніторингу структурних рухів, вібрацій і деформацій від провідних виробників Франції, США та Німеччини; порівняльний аналіз технічних характеристик.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення безпеки рятувальників під час виконання робіт у зоні руйнувань будівель та споруд.

Предметом дослідження є сучасні прилади і системи моніторингу структурних рухів, вібрацій та деформацій будівельних конструкцій у реальному часі.

Результати

У процесі дослідження було відібрано шість сучасних приладів для моніторингу стану будівельних конструкцій, що можуть застосовуватися в умовах проведення рятувальних робіт в Україні. До переліку увійшли системи з Франції, США та Німеччини, які забезпечують контроль нахилу, вібрацій, тріщин, переміщень та структурних рухів у реальному часі.

Пристрій Leader WASP (рис. 1.) призначений для моніторингу та оповіщення про небезпеку. Даний пристрій завчасно попереджає рятувальників про рух конструкції, дозволяючи їм усвідомити, що їхні дії можуть призвести до обвалу нестабільної конструкції.



Рисунок 1 – Система оперативного моніторингу нестабільних конструкцій Leader WASP

Контролер стабільності Leader WASP є високотехнологічним приладом для моніторингу руху та вібрацій нестабільних конструкцій у режимі реального часу. Основним завданням пристрою є підвищення рівня безпеки особового складу під час виконання пошуково-рятувальних робіт у зонах із потенційною загрозою обвалу. Прилад забезпечує безперервне відстеження навіть мінімальних зміщень та вібрацій конструкцій, до яких він прикріплений.

Під час рятувальних робіт пристрій Leader WASP закріплюють безпосередньо на елементах конструкції або техніці, що створює загрозу зміщення. Наприклад, у випадку з екскаватором, який перебував у нестійкому положенні (рис. 2.), сенсор закріпили на основі стріли біля осі обертання. Це дозволило контролювати навіть мінімальні рухи машини, що могли призвести до додаткового обвалу або травмування особового складу. Система подавала звукові та світлові сигнали при перевищенні заданого порогу коливань, що дало можливість рятувальникам оперативно відступити у безпечну зону.

Технічні можливості Leader WASP включають:

виявлення обертальних рухів понад 360° у трьох напрямках;

фіксацію вібрацій у діапазоні від 0,5 Гц до 100 Гц;

миттєве сповіщення про перевищення допустимого порогу руху за допомогою потужної звукової та візуальної сигналізації.

Магнітна основа забезпечує швидке та надійне кріплення пристрою до металевих поверхонь, а додаткові монтажні аксесуари дозволяють встановлювати його на скляних, бетонних та інших типах конструкцій. Компактність, мала вага та простота використання роблять Leader WASP ефективним інструментом для оперативного розгортання у польових умовах.

На рис. 2 відображено застосування Leader WASP в реальних умовах.



Рисунок 2 – Практичне застосування Leader WASP

Практичне застосування даного приладу було продемонстровано наприкінці травня під час рятувальної операції, проведеної підрозділами SDIS 06 (Пожежно-рятувальна служба департаменту Приморських Альп, Франція). У ході інциденту потерпілий опинився під екскаватором, що перебував у нестійкому положенні. Закріплений на будівельній машині Leader WASP здійснював постійний контроль її рухів і вібрацій, миттєво попереджаючи про небезпечні зміщення [6].

Завдяки цьому рятувальна команда змогла зосередитися на евакуації постраждалого, мінімізувавши ризики для власної безпеки та запобігти можливому вторинному обвалу. Досвід цієї операції підтверджує, що використання систем моніторингу руху, таких як Leader WASP, є важливим елементом сучасних технологій безпеки у пошуково-рятувальних роботах.

Leader SENTRY B1 – високоточний телеметр для моніторингу руху нестабільних конструкцій і попередження про загрозу їхнього обвалу (рис. 3.). Пристрій розроблений для використання під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, таких як: землетруси, пожежі, вибухи, дорожні аварії та інші надзвичайні ситуації, або де є ризик руйнування будівлі.



Рисунок 3 – Монітор стійкості Leader SENTRY B1

Технічні можливості Leader SENTRY B1 включають [7]:

високу чутливість – виявляє рух конструкції розміром від 1 мм на відстані до 50 м;
точне наведення – телескопічний приціл (2.5x / 10x, Ø 40 мм) допомагає точно направити лазер на цільову нестабільну конструкцію;
сигналізація – потужний звуковий сигнал 105 дБ та 360° світлова індикація миттєво сповіщають про рух конструкції;
регулювання порогу чутливості – від 2 мм до 100 мм з точністю 1 мм;
відображення даних – OLED-дисплей з високою контрастністю, зручний для роботи навіть у рукавичках;
можливість підключення двох лазерів – для одночасного моніторингу двох напрямків (дротово або бездротово, до 100 м);
підтримка живлення від мережі (110 – 240 V) або автомобіля (12/24 V);
міцність – ступінь захисту IP55, стійкість до падіння з 2 м на бетон;
комплектації – від базового набору з одним лазером до розширених польових комплектів з дистанційним керуванням і додатковими акумуляторами.
На рис. 4 відображено застосування Leader SENTRY B1 в реальних умовах.



Рисунок 4 – Практичне застосування Leader SENTRY B1

Практичне застосування даного приладу було продемонстровано у Люневелі (Франція) вантажний автомобіль врізався в житловий будинок (рис. 4.). За допомогою монітору стійкості Leader SENTRY B1 було забезпечено безпечну зону для проведення рятувальної операції. Даний пристрій дозволяє рятувальникам отримувати візуальну та звукову сигналізацію про виявлення навіть незначного руху конструкції.

Безпечна зона у даному випадку створювалася завдяки точному визначенню меж руху конструкції. Лазерний промінь Leader SENTRY B1 фіксував навіть мінімальні зміщення стіни, на яку він був спрямований, і при перевищенні порогу чутливості вмикав сигналізацію. Це дало змогу рятувальникам встановити конкретну межу, в межах якої можна було безпечно проводити евакуацію постраждалих.

Використання цього пристрою дозволяє знизити небезпеку для рятувальників і підвищити ефективність пошуково-рятувальних операцій.

Ще одним прикладом високотехнологічних рішень для моніторингу нестабільних конструкцій є бездротовий інклінометр SenSpot™ (Resensys, США) (рис. 5.). Прилад призначений для точного вимірювання нахилу, прогину, вигину та осідання опор, пілонів, настилів і прольотів. Він здатний фіксувати навіть найменші зміни у вертикальному та горизонтальному положенні конструкційних елементів, забезпечуючи раннє виявлення небезпечних деформацій.



Рисунок 5 – Бездротовий датчик нахилу/схилу SenSpot™

Технічні характеристики SenSpot™ [8]:

вага близько 400 г;

автономна робота без заміни батареї – понад 10 років;

монтаж без свердління (самоклеюча основа для сталі) або з фланцевим кріпленням (для бетону), час встановлення – 1-2 хвилини;

висока точність: вузький діапазон – $\leq 0,0003^\circ$, середній – $\leq 0,003^\circ$;

робочий температурний діапазон – від -40 до +65 °C;

дальність бездротового зв'язку – до 1 км у вільному просторі;

додаткові параметри: температура, напруга акумулятора.

Завдяки компактності, простоті встановлення, автономності та точності SenSpot™ може бути ефективно інтегрований у роботу підрозділів ДСНС для моніторингу будівель та споруд, що перебувають у нестабільному стані.

Однак сам по собі контроль лише нахилу не дає повної картини про стан конструкції, особливо коли йдеться про динамічні навантаження. Для цього доцільно доповнювати систему бездротовим датчиком вібрації та акселерометра SenSpot™, (рис. 6.)



Рисунок 6 – Бездротовий датчик вібрації та акселерометра – SenSpot™

Даний датчик призначений для моніторингу коливань конструкцій. Забезпечує високоточне вимірювання вібрацій у режимі реального часу, що дає змогу виявляти потенційні пошкодження на ранній стадії та оперативно реагувати.

Технічні характеристики даного приладу включають:
термін служби без заміни батареї: мінімум 10 років;
вага: близько 120 г;
просте встановлення: самоклеюче або фланцеве кріплення;
робочий температурний діапазон: від -40°C до +65°C;
дальність зв'язку: до 1 км у вільному просторі;
додаткові дані: температура, напруга батареї.

Бездротовий датчик вібрації та акселерометра дозволяє відслідковувати коливання та вібраційні впливи на будівлю. Його висока чутливість дає змогу виявляти навіть слабкі сейсмічні хвилі або механічні удари. Як і датчик нахилу, він має тривалий ресурс автономної роботи, працює в широкому температурному діапазоні та передає дані у реальному часі.

Проте, коли мова йде про контроль вже наявних пошкоджень – тріщин, деформаційних швів чи локальних зміщень, – найбільш ефективним стає використання бездротового вимірювача переміщення/тріщиноміра SenSpot™, (рис.7).



Рисунок 7 – Бездротовий вимірювач переміщення/тріщиномір SenSpot™

Пристрій призначений для контролю прогресу існуючих тріщин, деформаційних швів та інших змін геометрії конструкцій. Використовує ковзний елемент, що реагує на структурні зміщення.

Технічні характеристики тріщиноміра включають:
тривалий термін роботи без заміни батареї: до 10 років;
вага: бездротовий передавач – 120 г; датчик переміщення – 100 г;
просте встановлення (самоклеюче або фланцеве кріплення);
висока точність: роздільна здатність 0,01 мм;
робочий температурний діапазон: від -40°C до +65°C;
дальність бездротового зв'язку: до 1 км у вільному просторі;
додаткові дані: температура, напруга батареї.

Цей пристрій здатний фіксувати зміни з роздільною здатністю до 0,01 мм, що дає змогу оцінювати динаміку розвитку дефектів із максимальною точністю. Завдяки бездротовому передавачу та автономному живленню прилад можна встановлювати навіть у важкодоступних місцях без прокладання кабелів.

У реальних умовах підрозділи цивільного захисту можуть розміщувати сенсори SenSpot™ безпосередньо на тріснутих опорах, перекриттях або стінах, які становлять загрозу обвалу. Завдяки малим габаритам і можливості монтажу без свердління пристрій можна встановити за 1–2 хвилини, а дані передаються на мобільну станцію або планшет. Це забезпечує контроль стабільності конструкцій навіть під час виконання пошуково-рятувальних дій у зоні зруйнувань.

Водночас у випадках, коли необхідно отримати комплексну інформацію про вібраційні процеси в масштабах усього об'єкта, варто застосовувати більш потужні системи, такі як MENHIR (модульний покращений інтелектуальний реєстратор) (рис. 8.).



Рисунок 8 – MENHIR – модульний покращений інтелектуальний реєстратор

На відміну від окремих сенсорів SenSpot™, MENHIR здатен одночасно збирати великі масиви даних, передавати їх через WLAN для онлайн-аналізу та інтегрувати у централізовані системи моніторингу [9]. Він ефективний для екологічного моніторингу, промислових та транспортних об'єктів. Таким чином, логіка побудови сучасної системи моніторингу в реальному часі може ґрунтуватися на поєднанні кількох типів приладів: датчики нахилу для раннього виявлення деформацій, акселерометри для аналізу динамічних впливів, тріщиноміри для точного відстеження локальних пошкоджень і комплексні реєстратори для збору та аналізу багатопараметричних даних. Такий підхід дозволяє створити багаторівневу систему, здатну вчасно сигналізувати про небезпеку, зменшувати ризики для рятувальників та підвищувати безпеку об'єктів.

Здійснивши огляд шести сучасних приладів із Франції, США та Німеччини встановлено, що кожен із них має власні переваги та обмеження у контексті використання під час рятувальних операцій. Наприклад, Leader WASP та Leader SENTRY B1 відзначаються високою точністю та миттєвим оповіщенням про зміщення, проте їх ефективність більше орієнтована на контроль локальних зон нестабільності. Натомість серія сенсорів SenSpot™ (інклінометри, акселерометри та тріщиноміри) забезпечує автономність, мобільність і тривалий час роботи без обслуговування, що робить їх зручними для розгортання у зонах з обмеженим доступом.

Водночас багатофункціональний реєстратор MENHIR вирізняється здатністю збирати великі масиви даних і формувати цілісну картину стану об'єкта, проте його застосування вимагає більшої підготовки та наявності мережевої інфраструктури.

Таким чином, стає очевидним, що жоден із розглянутих приладів не є універсальним рішенням для всіх сценаріїв. Їхня ефективність визначається конкретними умовами експлуатації – масштабом руйнування, доступністю об'єкта, часом, який рятувальники можуть витратити на встановлення обладнання, а також рівнем загроз у зоні надзвичайної ситуації. Саме тому доцільно перейти до порівняльного аналізу технічних характеристик та функціональних можливостей цих пристроїв, що дозволить оцінити їхню придатність для використання у практиці ДСНС.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз приладів для моніторингу стану будівель

№ з/п	Прилад	Точність	Автономність	Монтаж/ мобільність	Придатність до умов України
1.	Leader WASP (Франція)	Виявлення обертальних рухів >360°; вібрації 0,5–100 Гц	Живлення від батарей, обмежений час	Магнітна основа, компактний, швидке кріплення	Швидке розгортання, сигналізація у реальному часі
2.	Leader SENTRY B1 (Франція)	Виявлення руху від 1 мм на відстані до 50 м; точність 1 мм	Живлення від мережі/авто; акумулятори	Телескопічне наведення, стаціонарна установка	Ефективний у точкових рятувальних операціях
3.	SenSpot™ інклінометр (США)	≤0,0003° (вузкий діапазон), ≤0,003° (середній)	До 10 років без заміни батареї	Самоклеюча/фланцева основа, монтаж 1–2 хв	Мобільність, робота у бойових умовах
4.	SenSpot™ акселерометр (США)	Висока чутливість до слабких вібрацій	До 10 років без заміни батареї	Самоклеюча/фланцева основа, вага 120 г	Для виявлення вібрацій і ударів у реальному часі
5.	SenSpot™ тріщиномір (США)	Роздільна здатність 0,01 мм	До 10 років без заміни батареї	Самоклеюча/фланцева основа, вага 220 г	Для контролю тріщин у небезпечних зонах
6.	MENHIR (Німеччина)	Багатопараметричні дані; точність залежить від сенсорів	Живлення від мережі; потребує WLAN	-	Для збору великих масивів даних

Проведений аналіз сучасних приладів для моніторингу стану будівельних конструкцій у реальному часі показав, що використання таких технологій є критично необхідним для забезпечення безпеки рятувальників у зоні руйнувань. Кожен із розглянутих пристроїв має свої переваги: системи Leader WASP та Leader SENTRY B1 забезпечують високу точність та оперативне сповіщення про небезпечні зміщення; сенсори SenSpot™ вирізняються автономністю, мобільністю та тривалим терміном роботи без обслуговування; комплексна система MENHIR надає можливість багатопараметричного аналізу в масштабах великих об'єктів.

Найбільш ефективним підходом є поєднання декількох типів сенсорів і систем у єдиній багаторівневій мережі моніторингу, що дозволяє контролювати як локальні деформації, так і загальний стан конструкцій. Це дає можливість своєчасно попереджати особовий склад про небезпеку, знижувати ризик вторинних обвалів та організовувати більш безпечні й ефективні рятувальні операції.

Незважаючи на переваги, кожен із розглянутих приладів має певні обмеження. Leader WASP та Leader SENTRY B1 потребують ретельного налаштування перед використанням і можуть бути менш ефективними за умов сильних вібрацій або пилу. Серія SenSpot™ характеризується високою точністю, але потребує наявності стабільного бездротового зв'язку, що може бути проблемою у зонах активних руйнувань. Система MENHIR, попри широкі аналітичні можливості, вимагає підготовленого персоналу та доступу до мережевої інфраструктури, що обмежує її застосування у польових умовах.

Водночас в Україні поки що відсутні офіційні методики використання таких систем у діяльності ДСНС, що ускладнює їх оперативне впровадження. Саме тому подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку методичних рекомендацій щодо практичного застосування пристроїв моніторингу під час рятувальних операцій.

Висновки

Моніторинг конструкцій у реальному часі відіграє критично важливу роль у забезпеченні безпеки під час рятувальних операцій, будівництва та експлуатації об'єктів. Технологічні прилади, представлені у даній статті, демонструють високий рівень розвитку систем раннього попередження, які поєднують точність, автономність та оперативне реагування.

Найбільш перспективними є бездротові сенсори з довготривалим терміном служби та високою точністю. Водночас пристрої з функцією звукового та світлового оповіщення мають перевагу в екстрених ситуаціях.

Відповідно до проведеного аналізу, встановлено, що перспективним напрямом для ДСНС є впровадження комбінованих систем моніторингу, які враховують специфіку умов воєнного часу: обмежений час на розгортання обладнання, високу мобільність, потребу в автономності та можливість роботи у важкодоступних місцях. Це дозволить суттєво підвищити рівень безпеки та зменшити кількість втрат серед рятувальників і цивільного населення.

Порівняння з традиційними засобами моніторингу, які раніше застосовувалися у підрозділах ДСНС, підтвердило суттєву перевагу сучасних сенсорних систем – як за точністю, так і за оперативністю передачі даних. Вони дозволяють перейти від суб'єктивних візуальних оцінок до цифрового моніторингу, який дає змогу своєчасно попереджати про небезпеку і мінімізувати людський фактор у прийнятті рішень.

Отримані результати свідчать, що найбільш ефективними для оперативного реагування у зоні руйнувань є пристрої Leader WASP та Leader SENTRY B1, оскільки вони забезпечують миттєве оповіщення про зміщення та дозволяють швидко створювати безпечну зону для роботи рятувальників.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Центр координації реагування на надзвичайні ситуації [Електронний ресурс]. – URL: <https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/what/civil-protection/emergency->

response-coordination-centre-ercc.eu.

2. Федеральне агентство з надзвичайних ситуацій США [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.fema.gov/about/reports-and-data>.
3. Статті журналу Sensors [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.mdpi.com/journal/sensors>.
4. Engineering Structures – Інженерні споруди [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/engineering-structures>.
5. Массачусетський технологічний інститут MIT [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.mit.edu/>.
6. Система моніторингу руху LEADER WASP [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.leader-group.com/en/news/generales/use-leader-wasp-stability-controller-during-search-and-rescue-operation>.
7. Телеметр руху конструкцій Leader SENTRY [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.leader-group.com/en/safety-and-monitoring-equipment/structural-movement-monitor-telemeter-stability-controller/structural-movement-telemeter-leader-sentry-b1>.
8. Бездротовий датчик нахилу/схилу SenSpot™ [Електронний ресурс]. – URL: <https://resensys.com/r20/wireless-products-senspot/structural-movement-tilt-deformation-damage-detection.html/>.
9. Прилад для вимірювання вібрацій MENHIR [Електронний ресурс]. – URL: <https://semex-engcon.com/en/measuring-equipment/menhir>.

References

1. European Commission. (n.d.). *Emergency Response Coordination Centre (ERCC)*. https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/what/civil-protection/emergency-response-coordination-centre-ercc_en
2. Federal Emergency Management Agency. (n.d.). *Reports and data*. <https://www.fema.gov/about/reports-and-data>
3. MDPI. (n.d.). *Sensors*. <https://www.mdpi.com/journal/sensors>
4. Elsevier. (n.d.). *Engineering Structures*. <https://www.sciencedirect.com/journal/engineering-structures>
5. Massachusetts Institute of Technology. (n.d.). *MIT*. <https://www.mit.edu/>
6. LEADER Group. (n.d.). *Use LEADER WASP stability controller during search and rescue operations*. <https://www.leader-group.com/en/news/generales/use-leader-wasp-stability-controller-during-search-and-rescue-operation>
7. LEADER Group. (n.d.). *Structural movement telemeter LEADER SENTRY B1*. <https://www.leader-group.com/en/safety-and-monitoring-equipment/structural-movement-monitor-telemeter-stability-controller/structural-movement-telemeter-leader-sentry-b1>
8. Resensys. (n.d.). *SenSpot™ wireless tilt sensor*. <https://resensys.com/r20/wireless-products-senspot/structural-movement-tilt-deformation-damage-detection.html>
9. Semex EngCon. (n.d.). *MENHIR vibration measurement device*. <https://semex-engcon.com/en/measuring-equipment/menhir>