

В.П. Квасніков, д.т.н., проф.

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

Р.М. Запоточний, к.т.н.

Шльонський технічний університет, м. Глівіце, Польща

Про системи дистанційного моніторингу за технічним станом транспортних споруд

У час нестабільності економічних процесів в країні виникає необхідність у впровадженні ефективних інноваційних ідей. Розглядаючи дорожню галузь, на дорогах і вулицях міст функціонує велика кількість транспортних споруд, що потребують невідкладного ремонту або реконструкції. Кількість цих споруд з кожним роком зростає. Для запобігання руйнації таких транспортних споруд потрібно виконувати вимірювання, які пов'язані з оцінкою і прогнозуванням їх технічного стану. Вирішенням цієї проблеми може бути масове впровадження ефективних систем для дистанційного безперервного їх моніторингу. Для розбудови дорожньої інфраструктури у містах, що розміщені на берегах судноплавних рік, є актуальним будівництво нових великих мостів. При реалізації проектів з використанням нових конструкційно-технологічних рішень виникає потреба у їхньому науково-технічному супроводі, реалізувати який можна за допомогою впровадження систем безперервного дистанційного моніторингу. Отримання додаткової інформації про роботу транспортної споруди, на кожному етапі її життєвого циклу, дає можливість виконати прогноз, щодо технічного стану і цим самим попередити руйнування. Як приклад, розглянуто реалізовані системи дистанційного моніторингу за технічним станом великих мостів, які реалізовано на будівельних об'єктах в Азії. Сформульовано завдання, щодо необхідності розроблення для масового впровадження типових систем безперервного моніторингу мостових конструкцій дорожньої інфраструктури України.

Ключові слова: система моніторингу; передача даних, технічний стан; транспортні споруди.

Постановка проблеми. Дорожня інфраструктура виконує стратегічну, економічну і соціальну ролі в функціонуванні держави, у якій транспортні споруди є важливими елементами на шляхах сполучення. Їх частковий або повний вихід з ладу спричиняє призупинення функціонування ділянки дороги, на якій вони знаходяться. Це зумовлює виникнення додаткових економічних втрат, що пов'язані з об'їздом цієї ділянки дороги.

Для якісного забезпечення безвідмовної роботи нових, ремонтованих і реконструйованих транспортних споруд виникає необхідність в отриманні інформації, що стосується їх технічного стану, а також інформації про вплив на зовнішнє середовище. Таким чином, впровадження систем безперервного моніторингу уможливує вирішення завдань, які пов'язані з отриманням важливої інформації в режимі реального часу. У світовій практиці такі системи набувають все ширшого впровадження під час реалізації нових будівельних об'єктів, а також ремонтованих чи реконструйованих.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи моніторингу проектуються індивідуально для кожної транспортної споруди [11, 12, 16]. Це виникає з необхідності у врахуванні конструкційних та економічних умов, а також завдань, що поставлені замовником.

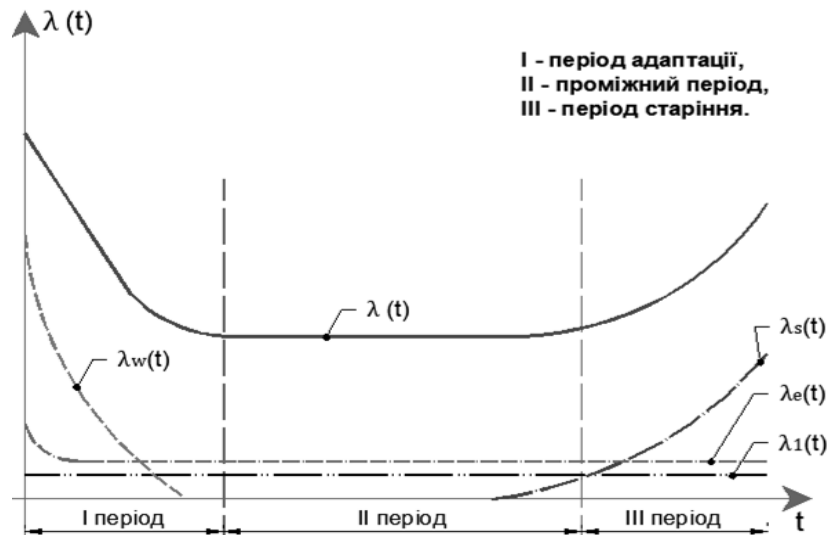
У статті розглянуто прилади і системи, що використано для побудови систем моніторингу для транспортних споруд:

- мосту Yeongjong в Південній Кореї [6];
- мосту Binzhou через Жовту річку у Китаї [9, 16].

Для отримання інформації щодо технічного стану транспортної споруди і особливості її роботи за дій різних типів навантаження використовують системи дистанційного безперервного моніторингу, які можуть складатися зі ста і більше вимірювальних датчиків, а також систем для опрацювання і передачі інформації щодо виконаних вимірювань.

Мета дослідження – висвітлити проблематику застосування систем моніторингу у транспортних спорудах дорожньої галузі, а також розглянути і описати основні її складові елементи.

Викладення основного матеріалу. На усіх етапах життєвого циклу транспортної споруди відбувається деградація технічного її стану. Випадкова функція інтенсивності пошкоджень конструкції (в результаті допущених помилок при будівництві – $\lambda w(t)$; за неправильної експлуатації – $\lambda e(t)$; фізичного старіння – $\lambda s(t)$; випадкових причин – $\lambda l(t)$) відображена графічно на рисунку 1.

Рис. 1. Випадкова функція пошкоджень $\lambda(t)$ транспортної споруди [10]

Проведення, у певному проміжку часу, контролюючих вимірювань уможливило виконання оцінки технічного стану споруди або її елементів тільки в той момент, коли їх проведено. У цьому випадку, для опису явищ, величини яких вимірюють, застосовують методи математичної статистики. Найчастіше користуються лінійною або лінійно-ламанною моделями. Варто зауважити, що такі зовнішні впливи, як: експлуатаційне навантаження, вітер, змінність температури та ін. не відбуваються у такий спосіб (рис. 2).

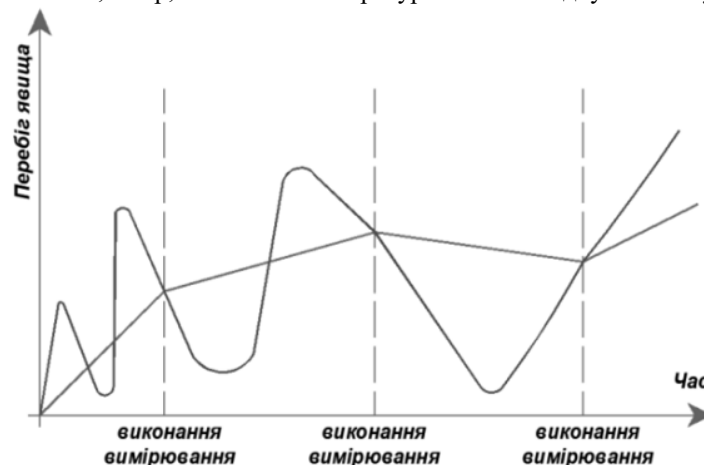


Рис. 2. Перебіг явища і моменти проведення контролюючих вимірювань [11]

Згідно з нормою [2] одним із елементів у системі науково-технічного супроводу при реалізації інноваційного конструкційно-технологічного рішення конструкції є моніторинг за її роботою, який проводять з метою:

- контролю та оцінки впливу природних, техногенних, антропогенних та інших факторів на технічний стан об'єкта, прилеглої забудови та оточуючого середовища;
- виявлення в об'єктах негативних змін напружено-деформованого стану, за наявності яких об'єкт варто детально обстежити для визначення і оцінки технічного стану;
- забезпечення безпечного функціонування об'єкта за рахунок своєчасного виявлення на ранній стадії негативних змін напружено-деформованого стану конструкцій та ґрунтів основ, які можуть спричинити перехід об'єктів у непридатний до нормальної експлуатації або аварійний стан;
- відстеження міри і швидкості зміни технічного стану об'єкта для здійснення у разі потреби екстрених заходів із запобігання його руйнуванню.

Основними функціями безперервного моніторингу технічного стану транспортних споруд або її елементів можна назвати такі:

- перевірка прийнятих засад побудови розрахункової моделі;
- виконання контролю за напружено-деформованим станом елементів конструкції;
- отримання інформації про фактичну роботу конструкції;
- зіставлення отриманих в різному проміжку часу контролюючих параметрів технічного стану конструкції;

- документування впливів виняткових навантажень: землетрусу, сильного вітру, аварії з транспортним засобом та ін.;
- звіт про технічний стан і його прогноз на найближчий період;
- забезпечення безпечного функціонування транспортної споруди під час будівництва, ремонту, реконструкції і експлуатації шляхом прийняття при необхідності заходів з підсилення чи заміни пошкоджених несучих елементів;
- зменшення коштів при експлуатації і консервації конструкції;
- отримання даних, які можуть бути використані для розвитку теорії мостів при проектуванні і будівництві транспортних споруд.

Впровадження ефективних систем моніторингу може призвести до зменшення витрат щодо утримання штучних споруд на автомобільних і залізничних шляхах сполучення. Основними цілями таких систем є знаходження дефектів і фіксація їх розвитку; збір, аналіз та збереження даних з вимірювань; прогнозування залишкового ресурсу транспортної споруди або її окремих елементів.

Програма системи безперервного моніторингу містить:

- перелік відповідальних елементів конструкції і їх вузлів (згідно з проектом);
- параметри контролю і максимально допустиме їх значення;
- перелік робіт, пов'язаних з монтажем і обслуговуванням системи;
- вибір системи спостереження і її оснащення.

Для отримання повної картини поширення в часі явища уможлиблюється із застосуванням систем безперервного, квазі-постійного автоматизованого дистанційного моніторингу, який може гарантувати безпеку експлуатації транспортних споруд, коли існує велика ймовірність виникнення аварій в результаті поєднання різних силових факторів. Його головною метою є підвищення безпеки для користувачів транспортної споруди.

З практики відомо, що застосування систем моніторингу, для контролю за технічним станом транспортної споруди, є індивідуальним проектним рішенням.

Найчастіше системи безперервного моніторингу за технічним станом конструкцій мостів застосовують при прийнятому нетиповому конструкційно-технологічному рішенні, експериментальному будівництві, а також після проведення ремонтних робіт і робіт, пов'язаних з реконструкцією.

Комплекс системи моніторингу найчастіше складається з таких елементів: датчиків для вимірювання фізичних величин; системи передачі сигналів (даних); модулів перетворення сигналів; центрального модуля (головного комп'ютера) (рис. 3).

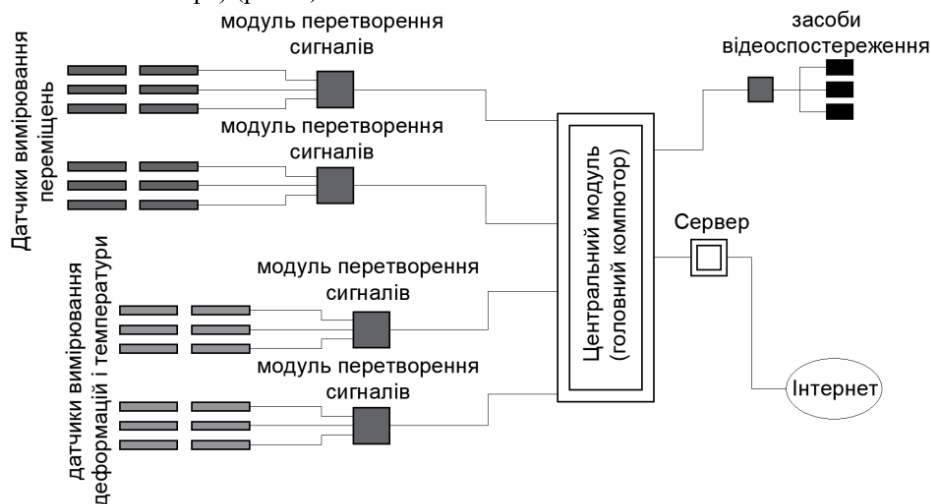


Рис. 3. Схема підключення датчиків з центральним модулем [14]

Дані з датчиків, що перетворені в модулях вимірювання, відсилаються до центрального комп'ютера. Пересилання даних може бути виконано в дротовий або бездротовий спосіб. За функціонування цілої системи відповідальний промисловий центральний комп'ютер. Зареєстровані, синхронізовані і нагромаджені дані можуть бути передані до сервера, які локалізовані у довільній відстані від будівельного об'єкта. За допомогою впроваджених в систему алгоритмів розрахунку можна отримати комплексні і точні дані, щодо статичних і динамічних параметрів конструкції.

Працівники, що відповідальні за моніторинг технічного стану транспортної споруди, мають доступ до сервера за допомогою мережі Інтернет. Це дає можливість отримати інформацію щодо роботи конструкції з будь-якого куточка світу. Також є можливим пересилання даних у вигляді щоденних, щотижневих звітів або повідомлень, щодо перевищення допустимого значення вимірювальної фізичної величини.

Одним із варіантів проектного розв'язання системи моніторингу є застосування автономних безпроводних вимірювальних модулів (рис. 4.).



Рис. 4. Безпроводна система моніторингу роботи будівельних конструкцій [10]

Автономний вимірювальний модуль дозволяє вимірювати різні фізичні величини. Коливання вимірюються за допомогою акселерометрів MEMS, також є можливість вимірювати деформації. Такий модуль може виконувати вимірювання параметрів зовнішнього середовища – температуру і вологість, що може значно вплинути на реєстрацію приладами даних. Він перетворює вимірювальні дані на цифрові, виконує обчислення за заданими алгоритмами, компенсує і пересилає результати до базової станції. Пересилання даних відбувається в безпроводний спосіб. Компактна будова корпусу (130 мм x 85 мм x 42 мм), невелика вага (620 г) і висока опірність на впливи агресивного зовнішнього середовища дають можливість широко його застосовувати.

Оснащення системи моніторингу транспортної споруди має відповідати особливостям конструкції із врахуванням її таких характеристик:

- величин геометричних параметрів;
- статичної схеми;
- основних матеріалів, з яких вона виконана;
- способу її експлуатації.

Міст Yeongjong (Південна Корея), що з'єднує м. Сеул з міжнародним аеропортом м. Інхон виконаний металевим підвісним. Його будівництво завершили у листопаді 2000 року.

Міст має три підвісні прогоны: $125,0 + 300,0 + 125,0 = 550,0$ м. Ромбоподібні сталеві пілони мають висоту 104,6 м. Двоповерхова прогонова будова призначена для перепуску автомобільного і залізничного транспорту. Фото моста представлено на рисунку 5.



Рис. 5. Міст Yeongjong у Південній Кореї [15]

На цьому будівельному об'єкті впроваджено систему безперервного моніторингу. Вона складається із 383 датчиків, які описують статично-динамічну роботу конструкції, а також 23 реєстраторів даних.

До складу системи моніторингу конструкцій моста застосовано такі датчики і прилади:

- 33 термометри – для вимірювання температури середовища;
- 5 анемометрів – для вимірювання напрямку і швидкості вітру;
- 3 акселерометри 3D – для вимірювання сейсмічних прискорень;
- 5 лазерних датчиків – для вимірювання вертикальних і горизонтальних переміщень прогонової будови;

- 10 інклінометрів – для вимірювання похилень пілонів;
- 4 потенціометри – для вимірювання переміщень в деформаційних швах;
- 12 акселерометрів 2D – для вимірювання прискорень елементів конструкції у двох напрямках;
- 122 тензометри для вимірювання деформацій конструкції;
- 175 тензометри для вимірювання динамічних деформацій конструкції.

Для системи моніторингу індивідуально запроєктовано комп'ютеризовану систему. Вона відповідає за віддалене перетворення і нагромадження даних з виконаних вимірювань за допомогою датчиків цієї системи, які вмонтовані на елементи конструкції. Також на мості є 8 реєстраторів статичних даних і 15 реєстраторів динамічних даних. Вся інформація зібрана в центральному промисловому комп'ютері, який знаходиться на мості. Під час первинного опрацювання отриманих даних здійснюється пересилання їх через мережу Інтернет до сервера і індивідуальних утримувачів. Особи, які відповідальні за спостереженнями мостової конструкції, мають доступ до даних у режимі реального часу.

Будівництво *моста Binzhou (Kumai)* над Жовтою рікою закінчено у 2004 році (рис. 6).



Рис. 6. Вигляд на міст Binzhou у Kumai [9]

Міст виконаний підвісним, прогонова будова якого виготовлена залізобетонною попередньо напруженою з величинами прогонів: $42 + 42 + 300 + 300 + 42 + 42 = 768,0$ м. За допомогою вант конструкція прогонової будови є підвішеною до трьох залізобетонних пілонів. Висота центрального пілону становить 125,28 м, а двох бокових по 75,78 м. На мості розміщено чотири смуги руху для автомобільного руху.

Складна система моніторингу за технічним станом мосту Binzhou складається з 140 вимірювальних датчиків і приладів.

Датчики і прилади, які застосовано в системі моніторингу даного мосту:

- 96 датчиків FBG, які інтегровані з датчиками температури – для вимірювання деформацій і температури конструкції;
- приймачі GPS – для вимірювання горизонтальних і вертикальних переміщень (4 од. обладнання: 2 на прогоновій будові і 1 на пілоні, а також 1 референційна станція);
- 39 акселерометрів 1D і 3D для вимірювання прискорень пілону і прогонової будови;
- 2 анемометри для вимірювання напрямку і швидкості вітру.

Система моніторингу складається з локальної підсистеми, що відповідає за збір інформації про стан конструкції і віддаленого операційного центру, що знаходиться на відстані 9 км від мосту. Передача даних відбувається за допомогою безпроводної локальної мережі (WLAN). Отримані дані з вимірювань, що переслані до операційного центру, опрацьовуються і записуються у базу даних.

Доступ до інформації про роботу конструкції можна отримати з усіх куточків світу за допомогою Інтернет-браузера. Для працівників, які відповідальні за спостереженнями роботи транспортної споруди, одержані і опрацьовані результати з виконаних вимірювань можуть відображатися за допомогою графіків або числових значень.

У світовій практиці системи дистанційного моніторингу за технічним станом несучих елементів транспортних споруд набувають все більшого застосування. Їх впроваджують, у більшості випадків, на унікальних, індивідуальних, великомасштабних будівельних об'єктах. Але розвиток технологій, пов'язаних із приладобудуванням, способами виконання вимірювань, перетворення і пересилання даних (сигналів), а також опрацюванням і аналізу отриманої інформації спонукає до більш широкого їх впровадження.

Варто розглянути науково-практичні задачі, які пов'язані із розробленням типових рішень складових систем дистанційного моніторингу за технічним станом мостових об'єктів, що перебувають у перед аварійному, аварійному стані або ж перед чи після проведених робіт із ремонту чи реконструкції.

Вмонтована система на несучі елементи транспортної споруди, яка перебуває в перед аварійному стані дасть можливість відстежити і попередити загрози, щодо можливості її руйнування. А також контролювати фізичні параметри технічного стану конструкцій у період виконання робіт пов'язаних із ремонтом, реконструкцією чи перебудовою. Також покращить інформацію щодо якості виконання ремонтних робіт перед впровадженням до експлуатації і впродовж терміну експлуатації. Такі системи моніторингу мають бути надійними, точними і довговічними. Сучасні рішення вимірювальних систем дають можливість їх застосовувати в широкому діапазоні температур (від -40 до 80 °C) і характеризуються кілька десятилітнім періодом експлуатації.

Розроблення приладової системи для моніторингу за технічним станом транспортних споруд з типових конструкційних розв'язань уможливить, за необхідності, одну й ту саму систему застосовувати на побідних за своїми параметрами будівельних об'єктах.

Подальша робота авторів полягатиме у створенні концепційного типового вирішення системи моніторингу для впровадження на штучних спорудах дорожньої галузі України із врахуванням вимог сьогодення і на майбутнє.

Висновки:

1. Системи дистанційного моніторингу за технічним станом транспортних споруд дають можливість отримати в режимі реального часу інформацію щодо контролюючих параметрів її роботи.

2. Отримання інформації системою безперервного дистанційного моніторингу щодо перевищень контролюючих вимірювальних параметрів роботи транспортної споруди дозволяють вжити запобіжні заходи для попередження її руйнування.

3. За остатні десятиліття світової практики мостобудування із реалізації масштабних будівельних об'єктів з індивідуальними проектно-конструкційними рішеннями застосовують складні системи дистанційного безперервного моніторингу, які можуть складатися з понад двохсот основних і допоміжних їх компонентів.

4. Науковий і практичний інтерес викликає розроблення і масове впровадження на типових перед аварійних штучних спорудах дорожньої галузі автономних вимірювальних систем для моніторингу за їх технічним станом.

Список використаної літератури:

1. Давиденко О.О. Оцінка технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів / О.О. Давиденко // Автошляховик України. – 2014. – № 1. – С. 29–34.
2. Науково технічний супровід будівельних об'єктів : ДБН В.1.2-5:2007. – [Чинний від 2008-01-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2007. – 16 с.
3. Споруди транспорту: Мости та труби. Обстеження та випробування : ДБН В.2.3-06:2009. – [Чинні від 2010-03-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 42 с.
4. Квасніков В.П. Моніторинг роботи мостових конструкцій експериментального будівництва / В.П. Квасніков, Р.М. Запотоchnий // Вісник інженерної академії України. – 2018. – № 1. – С. 206–208.
5. Bergmeister K. Structural Health Monitoring of Concrete Bridges / K.Bergmeister // Interferometry in Speckle Light. – 2000. – P. 633–640.
6. Health monitoring system of a self-anchored suspension bridge (planning, design and installation/operation) / S.P. Chang, S.Kim, J.Lee, I.Bae // Structure and Infrastructure Engineering. – 2008. – Vol. 4. – P. 193–205.
7. Hongwei L. Remote deformation monitoring system for a cable-stayed bridge using wire less internet –based GPS technology / L.Hongwei, O.A. Jinping. – Baden. – 2006.
8. Hildebrand M. Monitoring mostów podwieszonych / M.Hildebrand, M.Malinowski, K. Żółtowski // «Mosty». – 2009. – № 3. – P. 16–24.
9. Migdalski J. Inżyniera Niezawodności : poradnik / J.Migdalski. – Poland : ATR Bydgoszcz, 1992.
10. Karsznia K.Z. Głową w chmurach - zintegrowane systemy monitoringu geodezyjnego w badaniu dynamiki konstrukcji inżynierskich obiektów budowlanych / K.Karsznia, M.Wrona // «Geodeta». – 2009. – № 3. – P. 20–24.
11. Sieńko R. Systemy monitorowania obiektów mostowych / R.Sieńko // «Materiały budowlane». – 2008. – № 4. – P. 65–66.
12. Uhl T. Technologie bezprzewodowe w systemach monitorowania mostów / T.Uhl, A.Harc, K.Tworkowski // «Mosty». – 2008. – № 3. – P. 26–31.
13. Zapotochnyi R.M. Computerized systems of continuous monitoring of the technical condition of bridge constructions / Zapotochnyi R.M. Kvasnikov V.P. // AVIATION IN THE XXI-st CENTURY: Safety in Aviation And Space Technologies. – Kyiv, – P. 2–43.
14. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://bridgeworld.net/bridge/japan/2001/yeong.jpg>.
15. [Electronic resource]. – Access mode : www.micronoptics.com.

References:

1. Davydenko, O.O. (2014), «Ocinka tehničnogo stanu i prognozuvannja zalyshkovogo resursu avtodorozhnikh mostiv», *Avtoshljahovyk Ukrainy*, No. 1, pp. 29–34.
2. Minregionbud Ukrainy (2007), *Naukovo tehničnyj suprovid budivel'nyh ob'ektiv*, chynnyj vid 2008-01-01, K., 16 p.
3. Minregionbud Ukrainy (2009), *Sporudy transportu: Mosty ta truby. Obstezhennja ta vyprobuvannja. Derzhavni budivel'ni normy*, chynni vid 2010-03-01, K., 42 p.
4. Kvasnikov, V.P. and Zapotochnij, R.M. (2018), «Monitoryng roboty mostovyh konstrukcij eksperymental'nogo budivnytva», *Visnyk inženernoi akademii Ukrainy*, No. 1, pp. 206–208.
5. Bergmeister, K. (2000), «Structural Health Monitoring of Concrete Bridges», *Interferometry in Speckle Light*, pp.633–640.
6. Chang, S.P., Kim, S., Lee, J. and Bae, I. (2008), «Health monitoring system of a self-anchored suspension bridge (planning, design and installation/operation)», *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 4, pp. 193–205.
7. Hongwei, L. and Jinping, O. (2006), *A remote deformation monitoring system for a cable-stayed bridge using wireless internet-based GPS technology*, Baden.
8. Hildebrand, M., Malinowski, M. and Żółtowski, K. (2009), «Monitoring mostów podwieszonych», *Mosty*, No. 3, pp. 16–24.
9. Migdalski, J. (1992), *Inżyniera Niezawodności*, poradnik, ATR Bydgoszcz, Poland.
10. Karsznia, K. and Wrona, M. (2009), «Z głową w chmurach - zintegrowane systemy monitoringu geodezyjnego w badaniu dynamiki konstrukcji inżynierskich obiektów budowlanych», *Geodeta*, No. 3, pp. 20–24.
11. Sieńko, R. (2008), «Systemy monitorowania obiektów mostowych», *Materiały budowlane*, No. 4, pp. 65–66.
12. Uhl, T., Harc, A. and Tworkowski, K (2008), «Technologie bezprzewodowe w systemach monitorowania mostów», *Mosty*, No. 3, pp. 26–31.
13. Zapotochnyi, R.M. and Kvasnikov, V.P. (2018), «Computerized systems of continuous monitoring of the technical condition of bridge constructions», *AVIATION IN THE XXI-st CENTURY: Safety in Aviation And Space Technologies*, Kyiv, pp. 2–43.
14. [Online], available at: <http://bridgeworld.net/bridge/japan/2001/yeong.jpg>
15. [Online], available at: www.micronoptics.com

Квасніков Володимир Павлович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного Авіаційного Університету (Україна).

Наукові інтереси:

- метрологія;
- інформаційні технології.

E-mail: kvp@nau.edu.ua.

Запотоchnий Роман Миколайович – кандидат технічних наук, асистент кафедри механіки і мостів Шльонського Технічного Університету (Польща).

Наукові інтереси:

- метрологія;
- штучні споруди на дорогах.

E-mail: r.zapotochnyi@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 09.04.2019.