

DOI: 10.32347/2786-7269.2023.5.258-267

УДК 528.4

к.т.н., доцент **Бачишин Б.Д.**,  
b.d.bachyshyn@nuwm.edu.ua, ORCID: 0009-0009-1961-7776,  
Національний університет водного господарства  
та природокористування м. Рівне,

## ГЕОДЕЗИЧНИЙ МОНІТОРИНГ КОРОТКОПЕРІОДИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ МОСТУ В М. РІВНЕ

*Безпечне функціонування мостів є умовою довготривалої та безаварійної експлуатації автомобільних доріг та залізниць. Мета цієї роботи – дослідження короткоперіодичних деформацій мосту. Актуальність цього питання полягає в тому, що короткоперіодична складова деформацій малодосліджена, тому що її моніторинг потребує безперервних спостережень за конструкцією мосту та вимагає облаштування стаціонарних станцій вимірювань. Малодослідженими залишаються і самі значення деформацій і їх вплив на безпечне функціонування конструкції. Для дослідження короткоперіодичних деформацій мосту по вулиці Поповича в м. Рівне використано електронний безвідбивний тахеометр Leica TCR 1205. Проведено 8 циклів спостережень протягом світлового дня з однієї станції. Результати вимірювань опрацьовувались як подвійні рівноточні виміри однорідних величин.*

*Результати моніторингу свідчать про те, що короткоперіодичні деформації балок мосту мають значну величину і їх можна зафіксувати геодезичними методами. Просторові деформації різних точок мосту в одному циклі значно різняться між собою. Максимальних значень деформації набувають в точках повернутих до сонячних променів. Присутні складні деформації балок, такі як поперечний вигин та кручення, що значно збільшує зусилля в конструктивних елементах мосту. Короткоперіодичні деформації набувають максимального значення в період з 13 до 16 години, а потім затухають. Вірогідною видається гіпотеза про те, що основною причиною короткоперіодичних деформацій є нагрівання конструкцій сонячним промінням. Моніторинг короткоперіодичних деформацій слід розглядати як невід’ємну складову мостової інформаційної системи (BrIM).*

*Ключові слова: геодезичний моніторинг; короткоперіодичні деформації; міст; електронний тахеометр.*

**Постановка проблеми.** Мости є невід’ємною складовою автомобільних залізничних та пішохідних доріг. Безпечне функціонування мостів є умовою довготривалої та безаварійної експлуатації таких шляхів сполучень.

Державними будівельними нормами [1] регламентуються планові періодичні обстеження мостів, проте до складу цих робіт не включені визначення короткоперіодичних деформацій мосту. А такі деформації можуть бути тією краплею, яка спричинить ситуацію, коли зусилля в певному елементі конструкції мосту перевищить опір, що може привести до руйнування цього елемента, і, як наслідок – до створення аварійної ситуації чи руйнування всієї конструкції мосту. Тому моніторинг короткоперіодичних деформацій мостів є цікавою та важливою науково-практичною задачею.

Під короткоперіодичними деформаціями ми будемо розуміти деформації, які виникають і зникають з періодом у 24 години. Основними причинами таких деформацій може бути:

- нагрівання конструктивних елементів мосту сонячними променями;
- вітрові навантаження;
- додаткові навантаження від опадів;
- короткоперіодичні навантаження транспортними засобами, які проїжджають по мосту;
- короткоперіодичні навантаження транспортними засобами, які рухаються під мостом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Інтерес до моніторингу деформацій мостових конструкцій є постійним та безперервним у різних куточках нашої планети, адже важливість безаварійної роботи мостів не потребує доказів.

Використання електронного тахеометра для визначення деформацій описані в [2, 3]. Виявлені поздовжні деформації залізничного мосту в 4 мм, а рейок – в 1 мм за допомогою тахеометра Trimble S6 HP авторами [2]. Дослідження в [3] проводилися на пішохідному мості через річку тахеометром LEICA TCR 407. Метод класичного геометричного нівелювання застосовано для обстеження мосту «Газела» в Белграді [4] та моніторингу залізничного мосту [5]. Дослідженню деформацій за 6 років великих бетонних двох паралельних мостових об'єктів довжиною 700 м присвячена праця [6]. Автори [7] рекомендують для визначення геометричних параметрів підвісного мосту виконувати комбіновані спостереження мосту трьома методами одночасно: зніманням електронним тахеометром, наземним лазерним скануванням та фотограмметричним зніманням.

Застосуванню супутникових навігаційних систем для моніторингу деформацій мостових конструкцій присвячені роботи [8-10]. Об'єктом досліджень був міст через річку Янцзи в Китаї [8, 10]. Цей метод дозволяє отримувати безперервну інформацію про деформації в реальному часі з високою дискретністю та описувати деформацію конструкцій мосту як

безперервний динамічний процес. Саме такий підхід дає можливість виявити короткоперіодичні деформації. Автори [10] афішують створення системи «моніторингу здоров'я конструкцій» (SHM), невід'ємною складовою якої є метод мульти-GNSS інтеграції з комбінованою системою GPS/BDS/ГЛОНАСС.

Дослідження [11] виявило виникнення багатьох тріщин в балках мосту і значних вертикальних деформацій, як прогину ( $-4,2$  см), так і підйому ( $+2,5$  см). Моніторинг було здійснено технологією наземного лазерного сканування з високоточним нівелюванням. Результати дослідження підтвердили, що точність наземного лазерного сканування може досягати  $\pm 2,8$  мм при 95% довірчій імовірності.

Ефективним аспектом мостової інформаційної моделі – (BrIM), як аналогу BIM, буде інформація про теперішній стан мостових конструкцій [12]. Теоретичні рекомендації втілені в BrIM мосту на федеральній трасі В96 за даними наземного лазерного сканування, аерофотознімків та атрибутивної інформації з проектною документації.

Наземна фотограмметрія використана в якості методу досліджень деформацій сталевго арочного мосту під статичним навантаженням [13]. Метод наземного лазерного сканування (сканером Z + F Imager 5010) зі слів авторів [14] дозволяє визначити вертикальне зміщення сталевго залізничного мосту з точністю  $\pm 1$  мм. Такий же метод описано в статті [15], де приведені результати деформації пішохідного мосту через річку Малий Дунай у Братиславі.

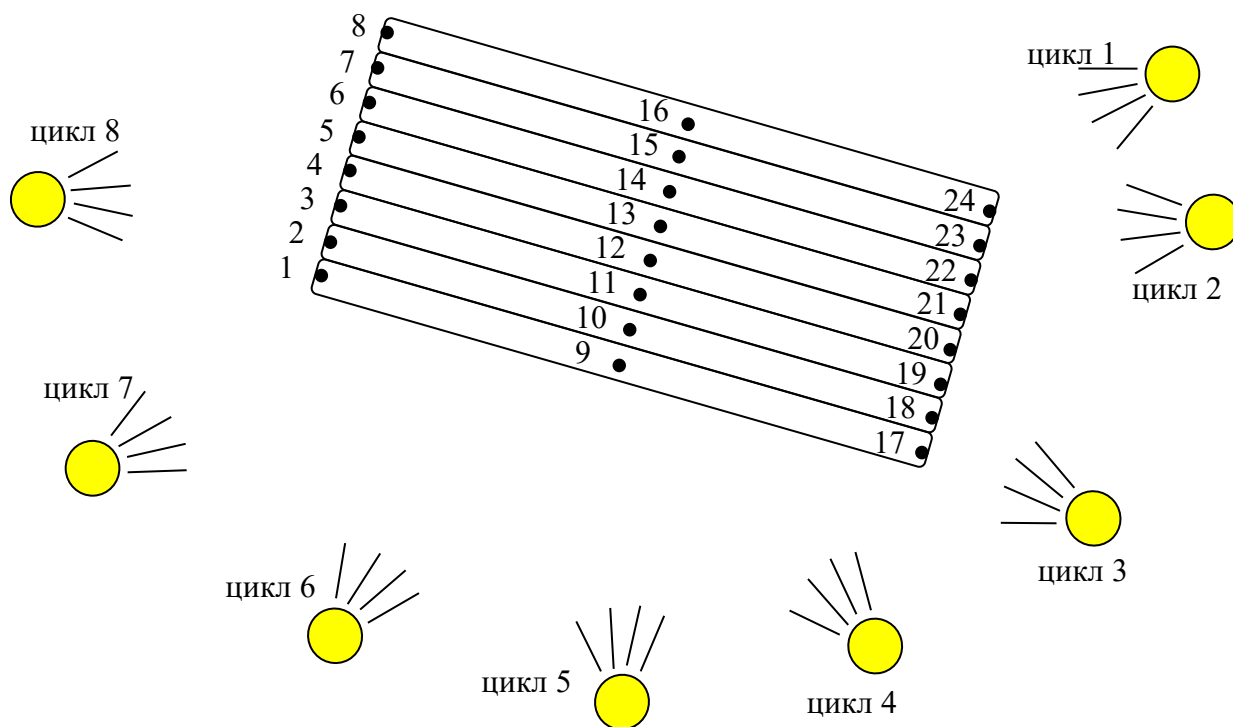
Переваги двох методів вимірювання поведінки елементів будівельних конструкцій поєднує в собі метод RGB+D [16], в якому інтегруються дані зображення (RGB) та лазерного сканування, де канал D є відстанню.

**Актуальність цього дослідження** полягає в тому, що в геодезичних дослідженнях недостатньо уваги приділяється моніторингу короткоперіодичних деформацій. Цей аспект деформацій малодосліджений, тому що його реалізація потребує безперервних спостережень за конструкцією мосту, а це, в свою чергу, вимагає облаштування стаціонарних станцій вимірювань. Малодослідженими залишаються і самі значення деформацій і їх вплив на безпечне функціонування конструкції.

**Метою** цієї роботи є дослідження короткоперіодичних деформацій мосту.

**Виклад основного матеріалу.** Об'єктом дослідження є автомобільний міст через залізницю по вулиці Поповича в м. Рівне, який має 3 прольоти довжиною 16,3 м, 22,2 м та 16,3 м та загальну довжину 58,1 м. Ширина мосту – 15,5 м. Основними несучими елементами кожного з прольотів мосту є 8 залізобетонних балок-плит, які змонтовані на поперечні балки, а ті, в свою чергу опираються на 8 колон-паль.

Дослідження короткоперіодичних деформацій проводилися для 8-ми несучих балок-плит найдовшого прольоту. Для однозначної ідентифікації точок вимірювання на нижній частині балок були замарковані білою фарбою три точки для кожної плити: дві – на краях та одна по-середині прольоту. Нумерація точок показана на рис. 1.



Електронний тахеометр Leica TCR 1205 був встановлений так, щоб з однієї станції було видно всі 24 точки. Для мінімізації приладових похибок над тахеометром було встановлено геодезичну парасольку. Протягом світлового дня було здійснено 8 циклів спостережень. Середина циклів в часовому проміжку припадала на такі часові мітки: 1-й – 6 год 20 хв, 2-й – 7 год 20 хв, 3-й – 9 год 20 хв, 4-й – 11 год 20 хв, 5-й – 13 год 20 хв, 6-й – 15 год 20 хв, 7-й – 17 год 20 хв, 8-й – 19 год 20 хв. Положення деформаційних точок відносно сонця в різних циклах показано на рис.1. Польові вимірювання проводилися 26 липня 2022. Зафіксована температура: 6:20 – 13°C, 7:20 – 15°C, 9:20 – 20.2°C, 11:20 – 24.5°C, 13:20 – 26°C, 15:20 – 27.3°C, 17:20 – 27.5°C, 19:20 – 26.5°C.

Вимірювання на кожну точку у всіх циклах виконувалися двічі, що дало змогу опрацювати результати вимірювань, як подвійні рівноточні виміри однорідних величин. Спочатку вираховували середню квадратичну похибку різниць

$$m_d = \sqrt{[d^2]/n} , \quad (1)$$

де  $d = X_{i1} - X_{i2}$  – різниця двох визначень координати  $X$  на одну й ту ж точку в одному циклі. Наступний крок – вираховування систематичної складової результатів вимірювань

$$\delta = [d]/n \quad (2)$$

та оцінка істотності систематичного впливу

$$|\delta| \leq 0,2m_d. \quad (3)$$

Наступний крок – обчислення середньої квадратичної похибки середнього арифметичного з двох результатів в одному циклі

$$m = m_d / 2. \quad (4)$$

Результати обчислень за формулами (1)–(4) для кожної з просторових координат свідчать про відсутність систематичної складової в результатах визначень усіх трьох просторових координат точок та про високу точність вимірювань (див. табл.1).

Таблиця 1

Результати опрацювання подвійних рівноточних вимірів координат

	X	Y	Z	в плані	в просторі
$\delta$ , мм	-0,08	0,11	0,01		
$m_d$ , мм	1,36	1,40	0,35		
$m_d/5$ , мм	0,27	0,28	0,07		
$m$ , мм	0,68	0,70	0,17	0,98	0,99

Похибка визначення середнього арифметичного значення з двох вимірів в циклі координат  $X$ ,  $Y$  складає менше 0,7 мм, а висотної координати – менше 0,2 мм, похибки планового та просторового положення точки – менші 1,0 мм. Висока точність визначення просторового положення точки – є суттєвим позитивним фактором на користь знімання електронним тахеометром при виборі методу визначення деформацій.

Середні арифметичні значення координат в кожному циклі стали вихідними даними для обчислення характеристик короткоперіодичних деформацій поздовжніх балок-плит. Прогини середніх точок балок показані на графіку (рис.2). Прогини середніх точок усіх балок мають додатній знак, що свідчить про використання попередньо напружених елементів. Спостерігається добре виражена картина повільного зростання прогинів і досягнення максимального значення в 6 циклі (приблизно о 15:20), після чого йде повернення до початкових значень. Така картина корелюється з досягненням максимальної температури повітря в цей період та дозволяє схилитися до

гіпотези, що основною причиною короткоперіодичних деформацій в даному випадку є нагрівання елементів конструкцій сонячними променями.

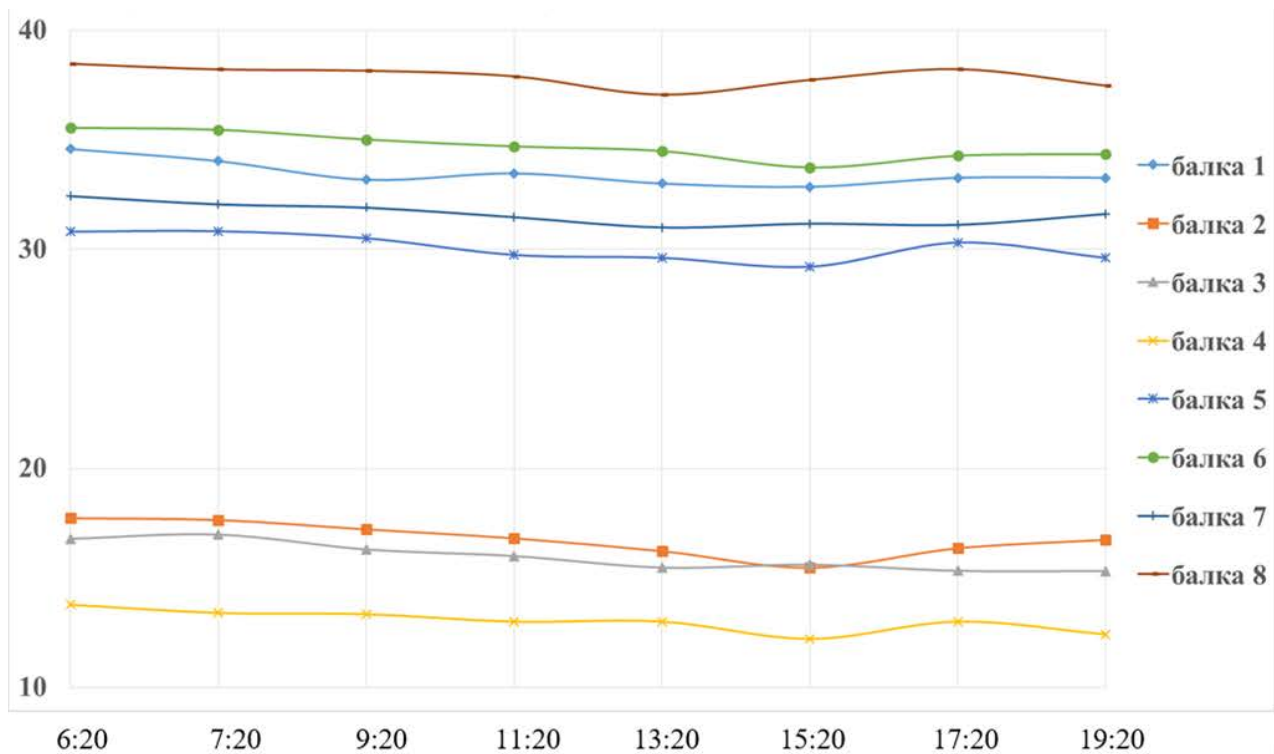


Рис.2. Динаміка прогинів середніх точок балок протягом дня

Максимальні значення короткоперіодичної складової прогину склали - 1,7 мм – для 1-ї балки, -2,3 мм – для другої, -1,5 мм – для третьої, -1,6 мм – для четвертої і п'ятої, -1,8 мм – для шостої та -1,4 мм – для сьомої і восьмої балки. Якщо ці значення порівняти з похибкою визначення висотної координати, то можна зробити висновок про значущість короткоперіодичних деформацій.

Другим показником короткоперіодичних деформацій, який ми застосували – це просторове зміщення кожної з 24-х деформаційних точок та побудова просторової моделі деформації прольоту мосту. Загалом, планові деформації в кілька разів більші за прогини в кожному циклі. Деформації різних точок мосту є нерівномірними. Просторові деформації точок з південної сторони мосту (№ 1, 9, 17, 2, 10, 18) є максимальними в кожному циклі і сягають 10-14 мм, що спонукає зробити висновок, що основною причиною короткоперіодичних деформацій є сонячні промені. Просторові моделі короткоперіодичних деформацій для усіх циклів побудовані в програмному середовищі Digital (рис.3-4). Чорним прямокутником позначено положення деформаційних точок в 1-му циклі, оливковим кольором – положення відповідних точок в певному циклі спостережень. Масштаб по осі Z збільшено в 3 рази.

Наявні складні деформації балок мосту – поперечний вигин та кручення.



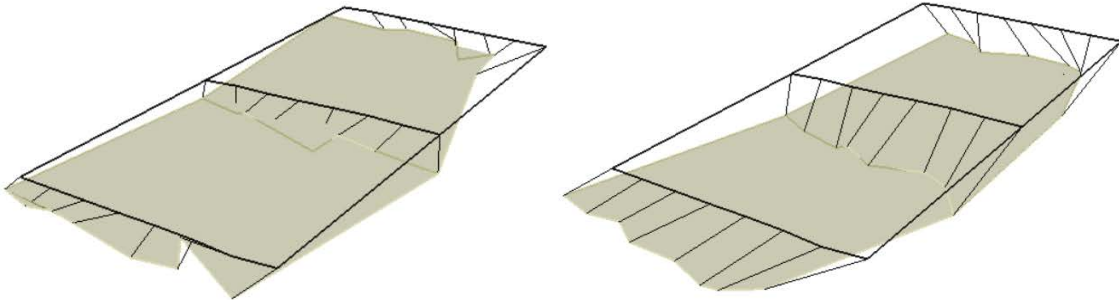


Рис.3. Просторова модель короткоперіодичних деформацій мосту в 2-му та 3-му циклах

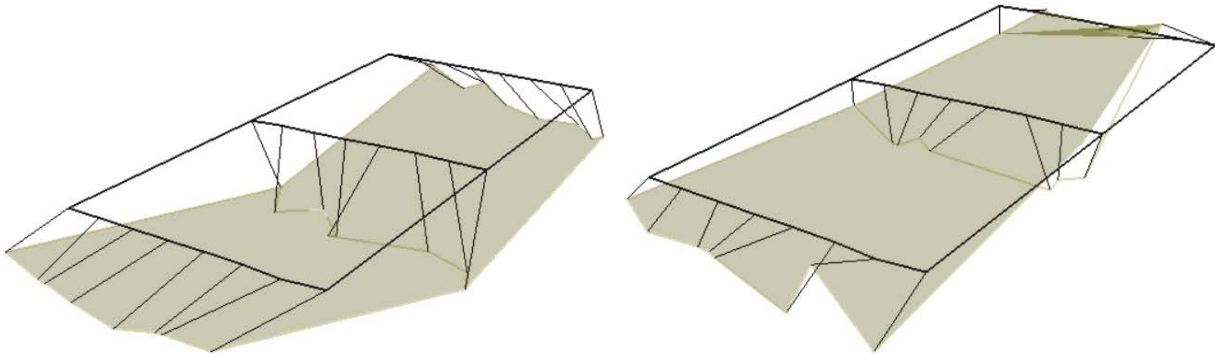


Рис.4. Просторова модель короткоперіодичних деформацій мосту в 5-му та 7-му циклах

**Висновки.** Безвідбивний метод знімання електронним тахеометром Leica TCR 1205 забезпечує високу точність визначення просторового положення точки з середньою квадратичною похибкою меншою 1 мм на віддальях до 50 м.

Короткоперіодичні деформації балок мосту мають значну величину і їх можна зафіксувати геодезичними методами. Просторові деформації різних точок мосту в одному циклі значно різняться між собою. Максимальних значень деформації набувають в точках повернутих до сонячних променів. Присутні складні деформації балок, такі як поперечний вигин та кручення, що значно збільшує зусилля в конструктивних елементах мосту.

Короткоперіодичні деформації набувають максимального значення в період з 13 до 16 години, а потім затухають.

Вірогідною видається гіпотеза про те, що основною причиною короткоперіодичних деформацій є нагрівання конструкцій сонячним промінням.

Моніторинг короткоперіодичних деформацій слід розглядати як невід'ємну складову мостової інформаційної системи (BrIM).

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.3-6:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування: – К.: Мінрегіонбуд України. – 2009. – 63 с.

2. Braun J., Štroner M. Geodetic measurement of longitudinal displacements of the railway bridge. *Geoinformatics FCE CTU 12*. – Praha. – 2014. – P.16-21. DOI:10.14311/gi.12.3. Режим доступу: [https://www.fig.net/resources/proceedings/2014/2014\\_ingeo/TS7-02\\_Braun.pdf.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/2014/2014_ingeo/TS7-02_Braun.pdf.pdf)
3. Chirilă C., Albu-Budusanu R.M. Applying trigonometric levelling for monitoring the vertical deformations of engineering structures. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18 (9). – 2019. – P. 1859–1866.
4. Zhang L., Zha X. Monitoring and result analysis of temporary railway bridge construction. *Journal of Geomatics*, 43 (6), – 2018. – P. 113–116. DOI:10.14188/j.2095-6045.2016427.
5. Gučević J., Delčev S., Ogrizović V., Pejič M., Popović J. and Pejović M. Geodetic works during the estimation of the vertical displacement of a bridge under a load test. *INGEO 2014*. – Belgrade. – 2014. – P.237-242.
6. Bárta L., Bureš J., Otakar Švábenský O, Geodetic monitoring of bridge structures in operation. *Contributions to International Conferences on Engineering Surveying*. – 2020. – P. 198–210.
7. Beben D., Anigacz W. Examine changes in geometric parameters of a suspension bridge using various geodetic methods. *Proc. 19th Int. Geodätische Woche Obergurgl 2017*, ed K Hanke and T Weinold. – Berlin: Wichmann. – 2017. – P. 21-30
8. Xi R., Jiang W., Meng X., Chen H., Chen Q. Bridge monitoring using BDS-RTK and GPS-RTK techniques. *Measurement*, 2018 – Elsevier Volume 120. – 2018. – P. 128-139
9. Xinpeng W., Qingzhi Z., Ruijie X., Chenfeng L., Guanqing L., Ling L., Review of bridge structural Health Monitoring Based on GNSS: from displacement monitoring to dynamic characteristic identification. *IEEE ACCESS. VOLUME 9*. – 2021. – P. 80043-80065
10. Xi R., He Q., Meng X., Bridge monitoring using multi-GNSS observations with high cutoff elevations: A case study. *Measurement*, vol. 168. – 2021. Art. no. 108303
11. Ellmann A., Idnurm J., Kiisa M., Idnurm S.. Geodetic monitoring of bridge deformations occurring during static load testing. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 10 (1). – 2015. – P.17-27. DOI:10.3846/bjrbe.2015.03/
12. Romanovskyi A., Lisnyk O. Application of BIM in bridge construction. *Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва, випуск II (44)*. – 2022. – С. 49-52 DOI: [www.doi.org/10.33841/1819-1339-2-44-49-52](http://www.doi.org/10.33841/1819-1339-2-44-49-52)
13. Taşçi L. Deformation monitoring in steel arch bridges through close-range photogrammetry and the finite element method. *Experimental Techniques*, 39. – 2015 – P. 3–10. <https://doi.org/10.1111/ext.12022>.
14. Gawronek P., Makuch M. TLS measurement during static load testing of a railway bridge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8 (1). –2019. – art. no. 44.
15. Erdélyi J., Kopáček A., Lipták I., Kyrinovič P. Pedestrian bridge monitoring using terrestrial laser scanning. *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies. Proceedings of the International Conference on Engineering Sciences and Technologies, ESaT*. – 2016. – P. 51–56.



16. Peroš J., Paar R., Divić V. Application of Fused Laser Scans and Image Data – RGB+D for Displacement Monitoring. Contributions to International Conferences on Engineering Surveying. – 2021. – P. 157-168.

candidate of technical sciences **Bohdan Bachyshyn**,  
associate professor of the Department of Geodesy and cartography  
National university of Water and Environmental Engineering, Rivne

## **GEODESIC MONITORING OF SHORT-TERM BRIDGE DEFORMATIONS IN RIVNE**

The safe bridges functioning is a condition for long-term and accident-free operation of highways and railways. This work object is to study the short-term deformations of the bridge. The relevance of this problem is that the short-period component of deformations understudied, because its monitoring requires continuous observations of the bridge structure and requires the installation of stationary measurement stations. The very values of the deformations and their influence on the safe functioning of the structure remain little researched. A Leica TCR 1205 electronic reflection-free total station was used to study the short-term deformations of the bridge along Popovycha Street in Rivne. Eight cycles of observations were conducted during daylight hours from one station. The measurement results were processed as double exact measurements of homogeneous quantities.

The monitoring results indicate that the short-term deformations of the bridge beams are significant and can be recorded by geodetic methods. Spatial deformations of different points of the bridge in one cycle differ significantly from each other. The maximum deformation values obtained at the points turned towards the sun's rays. There are complex deformations of the beams, such as transverse bending and torsion, which significantly increases the forces in the structural elements of the bridge. Short-term deformations reach their maximum value at the period from 1 to 4 p.m., and then subside. The hypothesis that the main cause of short-term deformations is the heating of structures by solar rays seems reliable. Short-term deformation monitoring should be considered as an integral part of the bridge information system (BrIM).

Keywords: geodetic monitoring; short-term deformations; bridge; electronic total station.

## **REFERENCES**

1. DBN V.2.3-6:2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennja I vyprovovuvannja: – K.: Minregionud Ukrajinjy. – 2009. – 63 s. {in Ukrainian}

2. Braun J., Štroner M. Geodetic measurement of longitudinal displacements of the railway bridge. *Geoinformatics FCE CTU 12.* – Praha. – 2014. – P.16-21. DOI:10.14311/gi.12.3. Режим доступу: [https://www.fig.net/resources/proceedings/2014/2014\\_ingeo/TS7-02\\_Braun.pdf.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/2014/2014_ingeo/TS7-02_Braun.pdf.pdf). {in English}
3. Chirilă C., Albu-Budusanu R.M. Applying trigonometric levelling for monitoring the vertical deformations of engineering structures. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18 (9). – 2019. – P. 1859–1866. {in English}
4. Zhang L., Zha X. Monitoring and result analysis of temporary railway bridge construction. *Journal of Geomatics*, 43 (6), – 2018. – P. 113–116. DOI:10.14188/j.2095-6045.2016427. {in English}
5. Gučević J., Delčev S., Ogrizović V., Pejič M., Popović J. and Pejović M. Geodetic works during the estimation of the vertical displacement of a bridge under a load test. *INGEO 2014.* – Belgrade. – 2014. – P.237-242. {in English}
6. Bárta L., Bureš J., Otakar Švábenský O, Geodetic monitoring of bridge structures in operation. *Contributions to International Conferences on Engineering Surveying.* – 2020. – P. 198–210. {in English}
7. Beben D., Anigacz W. Examine changes in geometric parameters of a suspension bridge using various geodetic methods. *Proc. 19th Int. Geodätische Woche Oberurgl 2017*, ed K Hanke and T Weinold. – Berlin: Wichmann. – 2017. – P. 21-30. {in English}
8. Xi R., Jiang W., Meng X., Chen H., Chen Q. Bridge monitoring using BDS-RTK and GPS-RTK techniques. *Measurement*, 2018 – Elsevier Volume 120. – 2018. – P. 128-139. {in English}
9. Xinpeng W., Qingzhi Z., Ruijie X., Chenfeng L., Guanqing L., Ling L. Review of bridge structural Health Monitoring Based on GNSS: from displacement monitoring to dynamic characteristic identification. *IEEE ACCESS. VOLUME 9.* – 2021. – P. 80043-80065. {in English}
10. Xi R., He Q., Meng X. Bridge monitoring using multi-GNSS observations with high cutoff elevations: A case study. *Measurement*, vol. 168. – 2021. Art. no. 108303. {in English}
11. Ellmann A., Idnurm J., Kiisa M., Idnurm S. Geodetic monitoring of bridge deformations occurring during static load testing. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 10 (1). – 2015. – P.17-27. DOI:10.3846/bjrbe.2015.03. {in English}
12. Romanovskyi A., Lisnyk O. Application of BIM in bridge construction. *Suchasni dosjagnennja geodezychnoji nauky i vyrobnyctva, vypusk (44).* – 2022. – S. 49-52 DOI: [www.doi.org/10.33841/1819-1339-2-44-49-52](http://www.doi.org/10.33841/1819-1339-2-44-49-52). {in English}
13. Taşçi L. Deformation monitoring in steel arch bridges through close-range photogrammetry and the finite element method. *Experimental Techniques*, 39. – 2015 – P. 3–10. <https://doi.org/10.1111/ext.12022>. {in English}
14. Gawronek P., Makuch M. TLS measurement during static load testing of a railway bridge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8 (1). –2019. – art. no. 44. {in English}
15. Erdélyi J., Kopáčík A., Lipták I., Kyrinovič P. Pedestrian bridge monitoring using terrestrial laser scanning. *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies. Proceedings of the International Conference on Engineering Sciences and Technologies, ESaT.* – 2016. – P. 51–56. {in English}
16. Peroš J., Paar R., Divić V. Application of Fused Laser Scans and Image Data – RGB+D for Displacement Monitoring. *Contributions to International Conferences on Engineering Surveying.* – 2021. – P. 157-168. {in English}