

Efektywna metoda monitoringu przemieszczeń pionowych obiektów budowlanych z wykorzystaniem niwelacji precyzyjnej

An effective method of monitoring vertical displacements of building objects with the use of precise leveling

dr inż. Jacek Sztubecki (ORCID: 0000-0003-1254-2176), Politechnika Bydgoska, dr hab. inż. Maria Mrówczyńska, prof. UZ (ORCID: 0000-0002-4762-3999), Uniwersytet Zielonogórski

DOI: 10.5604/01.3001.0054.3649

Streszczenie: Sposób prowadzenia monitoringu geodezyjnego zależy m.in. od rodzaju obiektu, warunków terenowych, prędkości zmian oraz metod pomiarowych. Istotne jest, aby poszukiwać rozwiązań ekonomicznych, pozwalających na spełnienie warunków dokładnościowych z jednoczesną możliwością prowadzenia szybkich pomiarów. W artykule zaprezentowano wyniki badań zmodyfikowanego podejścia do metody niwelacji precyzyjnej. Wyniki analiz potwierdziły przydatność metody, zwłaszcza w przypadkach pomiarów dla dynamicznej zmiany położenia punktów kontrolowanych, gdzie istotne jest wykonanie pomiarów w jak najkrótszym czasie oraz przy pomiarach sieci o gęstej i bardziej rozbudowanej strukturze.

Słowa kluczowe: przemieszczenia pionowe, monitoring geodezyjny, obiekty budowlane, ekonomika pomiarów.

Abstract: The method of doing geodetic monitoring depends, among others, on the type of structure, field conditions, speed of changes, and measurement methods. Therefore, it is crucial to look for economical solutions that meet the accuracy requirements with the simultaneous possibility of conducting quick measurements. The article presents the research results on a modified approach to the precise leveling method. The analysis results confirmed the method's usefulness, especially in the case of measurements for dynamic changes in the location of controlled points, where it is essential to perform measurements in the shortest possible time, and for measurements of networks with a dense and more extensive structure.

Keywords: vertical displacements, geodetic monitoring, building structures, the economics of measurements.

1. Wprowadzenie

Geodezyjny monitoring obiektów budowlanych to kompleksowy proces, pozwalający zidentyfikować przyczyny pogarszania się ich stanu technicznego oraz dostarczający informacji niezbędnych do planowania remontów i modernizacji. Sposób prowadzenia monitoringu geodezyjnego zależy od różnych czynników, ale istotne jest, aby pomiar obiektów metodami geodezyjnymi prowadzony był w sposób ekonomiczny, szybki i jednocześnie pozwalający na uchwycenie zmian. Zaproponowane zmodyfikowane podejście do metody niwelacji precyzyjnej pozwala na szybszą realizację prowadzonych pomiarów bez straty dokładności uzyskanych wyników. Analizy potwierdziły przydatność proponowanej metody w identyfikacji zmian o charakterze szybkozmiennym oraz przy pomiarach sieci pomiarowo-kontrolnych o gęstej i bardziej rozbudowanej strukturze.

Pomiary geodezyjne prowadzone są m.in. w celu określenia zmian na obiektach, jak również wyznaczenia ich wpływu

na tereny i obiekty sąsiednie. Identyfikacja deformacji i odkształceń obiektów budowlanych, bazująca na wcześniej przeprowadzonych pomiarach geodezyjnych, pozwala na ocenę ich stanu technicznego, planowanie remontów i modernizacji oraz szybką reakcję w przypadku zauważenia zmian będących sygnałem wskazującym na awarie obiektów, zwrócili na to uwagę autorzy prac [1, 2, 3]. Prowadzenie monitoringu geodezyjnego zależy w szczególności od rodzaju obiektu, warunków terenowych, prędkości zmian oraz metod pomiarowych jakie są możliwe do zastosowania, a to z kolei skutkuje sposobem prowadzenia obliczeń, na co zwrócono uwagę w pracy [4]. Autorzy publikacji [5] podkreślają, że nowoczesne geodezyjne metody pomiarowe pozwalają na wyznaczenie przemieszczeń i odkształceń z odpowiednią precyzją, ale istotne jest przy tym również, aby pomiar geodezyjny wykonywany na rzeczywistych obiektach prowadzony był w sposób ekonomiczny, szybki i jednocześnie pozwalający na uchwycenie zmian na obiektach, które mogą świadczyć o sytuacjach awaryjnych. W tym

kontekście celowe jest poszukiwanie rozwiązań technologicznych i obliczeniowych pozwalających na spełnienie warunków dokładnościowych z jednoczesną możliwością prowadzenia szybkich prac pomiarowych [6].

We wcześniejszych badaniach zmodyfikowanej metody niwelacji precyzyjnej, opisanych w pracy [7], założono czysto teoretyczny model, któremu jednak brakuje pewnych cech występujących przy okazji rozwiązywania tego typu problemów w rzeczywistości. W dotychczasowych badaniach, których wyniki zostały przedstawione w pracy [8], przeprowadzono jedynie rozważania teoretyczne, dlatego w prezentowanych w artykule badaniach celem było sprawdzenie skuteczności zmodyfikowanej metody na obiektach rzeczywistych. Prowadzone badania bazowały na kilku modelach rzeczywistych, które pogłębiły zasób wiedzy oraz poszerzyły obraz analizowanej metody i możliwości jej zastosowania do pomiaru przemieszczeń pionowych obiektów budowlanych.

2. Metoda badawcza

W monitoringu geodezyjnym obiektów budowlanych, prowadzonym w celu wyznaczenia przemieszczeń pionowych, niezbędne jest uzyskanie różnic wysokości pomiędzy punktami sieci pomiarowo-kontrolnej, w większości przypadków metodą niwelacji precyzyjnej. Pomiar różnic wysokości metodą niwelacji precyzyjnej poprzedzony jest wykonaniem projektu sieci pomiarowo-kontrolnej, której punkty (repery kontrolowane) stabilizowane są na monitorowanym obiekcie w sposób zapewniający ich stabilność i bezpieczeństwo, umożliwiając wykonanie pomiarów w wielu cyklach pomiarowych oraz pozwalający na identyfikację wielkości i prędkości zmian zachodzących na obiekcie. Jak powszechnie jest definiowane, niwelacja jest pomiarem różnicy wysokości pomiędzy dwoma punktami A, B, na których ustawiono łąty niwelacyjne a w środku mierzonego odcinka niwelator [9, 10, 11]. Po wykonaniu odczytów na łątach różnicę wysokości w klasycznej niwelacji obliczamy jako:

$$\Delta h_{A-B} = H_B - H_A = O_W - O_P \quad (1)$$

gdzie:

Δh_{A-B} – różnica wysokości pomiędzy punktami A i B;

H_B, H_A – wysokości punktów;

O_W, O_P – odczyty na łątach odpowiednio: wstecz i w przód.

We wcześniejszych badaniach zaproponowano wprowadzenie zmodyfikowanej obserwacji niwelacyjnej, wyznaczonej na podstawie różnicy pomiędzy wysokością osi celowej H_L a wysokością punktu niwelowanego H_B [7, 8], która pozwala na wyznaczenie różnicy wysokości jako:

$$\Delta h_{S-B} = R^{obs} - D_{S-B} \tan \varepsilon \quad (2)$$

gdzie:

R^{obs} – odczyt łąty;

D_{S-B} – długość celowej (odległość pomiędzy stanowiskiem

niwelatora a łątą);

ε – szczytkowy kąt pomiędzy osią celową a linią poziomą. Jeżeli przyjmiemy, że obserwowana wartość odczytu na łącie Robs jest zmienną niezależną wówczas:

$$R^{obs} = H_B - H_L + D_{S-B} \tan \varepsilon \quad (3)$$

Natomiast równie poprawki $v_{R^{obs}}$, niezbędne do przeprowadzenia wyrównania obserwacji geodezyjnych z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów, wynikające z (3) i uwzględnieniem rozwinięcia w szereg Taylora do elementów pierwszego rzędu zapiszemy jako [12]:

$$v_{R^{obs}} = dH_B - dH_S + D_{S-B} \tan \varepsilon + L_R \quad (4)$$

wyraz wolny L_R wyznaczmy z zależności:

$$L_R = (R^{prz} - R^{obs}) \quad (5)$$

gdzie:

$R^{prz} = H_S^{prz} - H_B^{prz}$, H_S, H_B – wysokości nad poziomem odniesienia niwelowanych punktów;

dH_B, dH_S – poprawki do przybliżonych wysokości;

H_S^{prz}, H_B^{prz} – przybliżone wartości wysokości horyzontu instrumentu oraz punktów podlegającego pomiarowi.

Rozwiązanie zadania przeprowadza się metodą najmniejszych kwadratów, w której na podstawie zestawu równań poprawek w postaci liniowej wykonuje się wyrównanie ścisłe zgodnie z poniższą zależnością:

$$dD = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (6)$$

gdzie:

A – macierz współczynników,

P – macierz wag,

L – macierz wyrazów wolnych,

dD – przemieszczenie pionowe.

Po wykonaniu niezbędnych kontroli obliczeń oblicza się błąd średni m_0 :

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{T^T P V}{n - r}} \quad (7)$$

gdzie:

$V = A \cdot dD + L$,

n – liczba obserwacji,

r – liczba niewiadomych.

3. Rezultaty badań i dyskusja

W celu przeprowadzenia analizy efektywności ekonomicznej i czasowej zaproponowanej metody, która miała również zapewnić wymaganą dokładność uzyskiwanych wyników, a w następstwie odpowiednią dokładność wyznaczenia przemieszczeń pionowych, wykonano pomiar trzech konstrukcji inżynierskich w postaci łączników budynków Politechniki Bydgoskiej, których lokalizacja została przedstawiona



Rys. 1. Lokalizacja obiektów badań



Rys. 2. Widok obiektu nr 1

na rysunku 1. Na tych obiektach zaprojektowano i zastabilizowano sieci reperów kontrolowanych.

W celu zachowania stałości punktów pomiarowych przez cały okres prowadzonych badań, punkty zastabilizowano jako repery ściennie (rys. 2). Punkty kontrolowane zastabilizowano na podporach łączników, natomiast punkty odniesienia na budynkach sąsiadujących z łącznikami. Projekt sieci uwzględnił również zróżnicowaną geometrię układu osi celowych.

Pomiary sieci wykonywane były metodą niwelacji precyzyjnej z zastosowaniem niwelatora precyzyjnego. Badania realizowano z wykorzystaniem niwelatora precyzyjnego Ni 007 firmy Zeiss.

W trakcie badań wykorzystano metody klasyczną (tradycyjną) i proponowaną metodę zmodyfikowaną. Uzyskane wyniki zostały poddane analizie numerycznej, podczas której wykonano obliczenia dla klasycznej metody niwelacji przy minimalnej

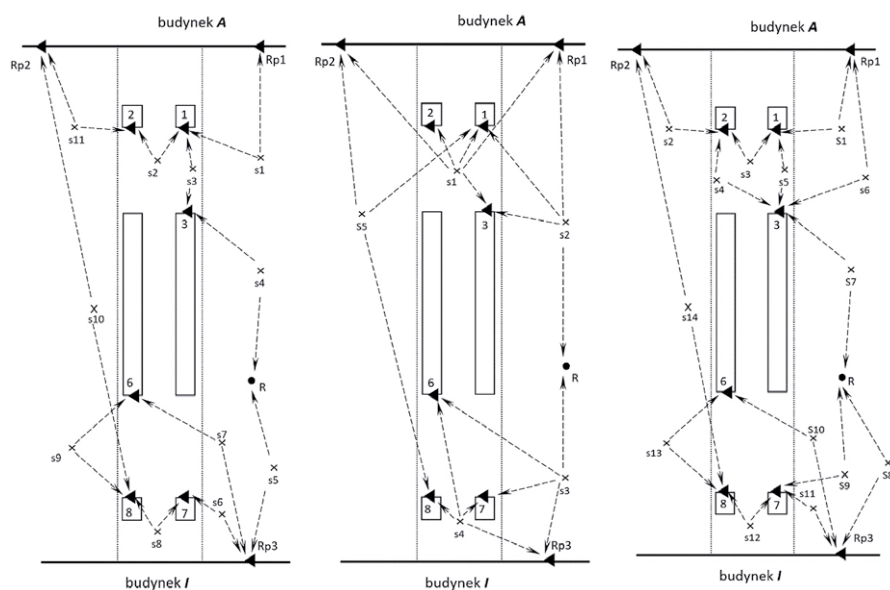
liczbie stopni swobody (Wariant I), wykorzystując metodę zmodyfikowaną (Wariant II) oraz dla klasycznej metody niwelacji przy zwiększonej liczbie stopni swobody (Wariant III). Schemat pomiarowy sieci dla łącznika 1 przedstawiono na rysunku 3.

Przeprowadzono trzy pomiary kontrolne każdej z sieci. W procesie obliczeń dla każdego z badanych łączników otrzymano wartości przemieszczeń oraz ich błędów średnich w poszczególnych seriach pomiarowych w rozbiciu na poszczególne warianty. Analiza uzyskanych wyników wykazała, że wartości przemieszczeń uzyskane w Wariacie II nie wykazują istotnych rozbieżności w stosunku do wyników uzyskanych w Wariacie III. Nie zauważono również istotnej straty dokładności wyznaczania przemieszczeń pionowych. Wartości przemieszczeń dla Wariantów I oraz II porównano z Wariantem III. Obliczono wartości pierwiastka błędu średniokwadratowego MSE.

Dla każdego z wariantów w każdej z serii pomiarowych, określono również czas, w jakim możliwe było wykonanie pomiarów niwelacyjnych dla analizowanych sieci. W określeniu czasu trwania pomiarów uwzględniono wszystkie etapy wykonania pomiarów. Zestawienie czasów niezbędnych do przeprowadzenia analizy czasochłonności pomiarów zaprezentowano w tabeli 1.

Dla łącznika 1 Wariant I ma 11 stanowisk. Wariant II ma 5 stanowisk, w którym na pierwszym obserwowano 5 punktów kontrolowanych, na stanowiskach drugim, trzecim i czwartym po 4 punkty, a na piątym 3 punkty. Wariant III, który jest metodą klasyczną, ale o zwiększonej liczbie obserwacji ma 14 stanowisk.

Dla łącznika 2 Wariant I ma 6 stanowisk. Wariant II ma 3 stanowiska, w którym na pierwszym obserwowano 6 punktów kontrolowanych, a na drugim 2, a na trzecim 3 punkty. Wariant III, który jest metodą klasyczną, ale o zwiększonej liczbie obserwacji ma 7 stanowisk.



Rys. 3. Schematy pomiarowe sieci założonej na łączniku 1

Tabela 1. Zestawienie czasów niezbędnych do wykonania pomiarów

Opis czynności	Metoda tradycyjna	Metoda zmodyfikowana
	Czas [s]	Czas [s]
Przejsie niwelatora na stanowisko pomiarowe	120	120
Poziomowanie sprzętu	60	60
Wykonanie pierwszego pomiaru	45*k	45*k
Przejsie z łatą między mierzonymi punktami	60	45*k
Ponowne poziomicowanie sprzętu	90	90
Wykonanie drugiego pomiaru	45*k	45*k
Przejsie z łatą między mierzonymi punktami	60	45*k

k – liczba punktów niwelowanych na danym stanowisku

Dla łącznika 3 Wariant I ma 8 stanowisk. Wariant II ma 4 stanowiska, w którym na pierwszym obserwowano 3 punkty kontrolowane, na drugim 4 punkty, na trzecim 5 punktów, a na stanowisku czwartym 2 punkty kontrolowane. Wariant III ma 9 stanowisk.

Zestawienie uzyskanych błędów MSE oraz czasochłonność pomiarów zaprezentowano tabeli 2.

Na podstawie tabeli 2 wartość pierwiastka błędu średniokwadratowego (MSE) będącym wskaźnikiem porównawczym Wariantów I i II z Wariantem III w większości przypadków wypada korzystniej dla Wariantu II (metody zmodyfikowanej). Dla każdego z łączników, podejście zmodyfikowane (Wariant II) okazało się czasowo najkrótszym. Wariant I charakteryzuje się pośrednimi wartościami czasochłonności pomiarów. Należy jednak zaznaczyć, że w Wariacie I geometria sieci jest mniej stabilna niż ta zbudowana w Wariacie III, co prowadzi do zmniejszenia dokładności wyznaczonych przemieszczeń. Porównując jedynie czasochłonność, Wariant II (zmodyfikowany) jest metodą najszybszą z porównywanych. Zmniejszenie liczby stanowisk pozwala na zaoszczędzenie czasu związanego z przejściem między stanowiskami. Metoda ta sprawdzi się najlepiej w sytuacjach, gdy

Tabela 2. Zestawienie wartości błędu MSE oraz czasu wykonanych pomiarów

Nr łącznika	Błąd MSE [mm]				Czas pomiaru [min]		
	Pomiar 0 – Pomiar 1		Pomiar 0 – Pomiar 2				
	Wariant I	Wariant II	Wariant I	Wariant II	Wariant I	Wariant II	Wariant III
Łącznik 1	0,058	0,031	0,096	0,049	105	83	133
Łącznik 2	0,070	0,052	0,009	0,022	67	50	76
Łącznik 3	0,048	0,044	0,074	0,091	76	63	86

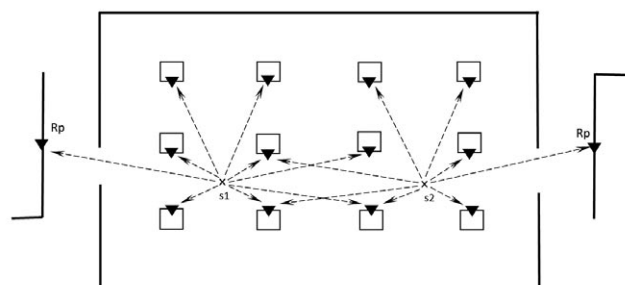
przemieszczenia badanych obiektów zachodzą dynamicznie i konieczne jest przeprowadzenie pomiarów w możliwie najkrótszym czasie. Największą oszczędność czasu uzyskano dla łącznika 1 i wynosi ona ponad 37% w stosunku do Wariantu III o zwiększonej liczbie stopni swobody.

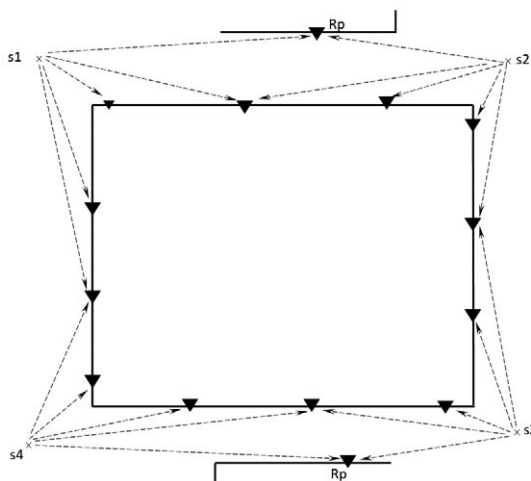
3.1. Przykłady zastosowań

Jak wykazały zaprezentowane wcześniej wyniki badań, przedstawiona metoda pozwala na szybsze przeprowadzenie pomiaru sieci niwelacyjnej, przy braku konieczności realizowania pomiarów z zachowaniem równych długości celowych na stanowisku pomiarowym. Przykładem zastosowania prezentowanej metody mogą być sieci o zagęszczonej strukturze i łatwym dostępie do kilku punktów kontrolowanych z jednego stanowiska.

W praktyce inżynierskiej wymienić można wiele obiektów, na których korzystne byłoby zastosowanie tej metody. Obiektami, na których wykorzystanie tego rozwiązania byłoby wskazane, są hale przemysłowe o zagęszczonym rozkładzie słupów nośnych. Widok przykładowej hali oraz przykład geometrii sieci pokazano na rysunkach 4 i 5. Struktura sieci zaprezentowanej na rysunku 5 składa się z 2 reperów odniesienia i 12 reperów kontrolowanych, a jej pomiar z zastosowaniem zaproponowanej zmodyfikowanej metody niwelacji precyzyjnej można wykonać z dwóch stanowisk pomiarowych.

Zaproponowana metoda może być również zastosowana dla punktów sieci zastabilizowanych na zewnątrz budynku zagrożonego awarią, gdzie wskazane jest duże zagęszczenie punktów kontrolowanych. Przykład takiej sieci z rozmieszczeniem stanowisk pomiarowych oraz planowanych celowych przedstawiono na rysunku 6.

**Rys. 4.** Widok hali przemysłowej**Rys. 5.** Propozycja struktury sieci kontrolno-pomiarowej



Rys. 6. Propozycja struktury sieci zastabilizowanej na zewnątrz budynku

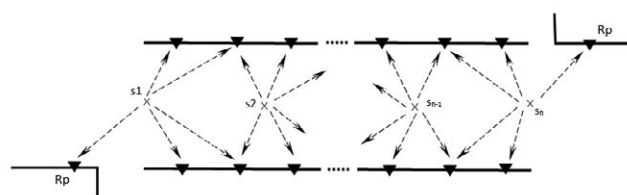
Innym przykładem obiektów, dla badania których zastosowanie metody byłoby korzystne, są obiekty o wydłużonej geometrii. Obiektami tymi mogą być mosty, tunele, przepusty czy kładki piesze. Przykładową sieć dla tego typu obiektów pokazano na rysunku 7.

Ważnym powodem zastosowania zaproponowanego w artykule rozwiązania są pomiary związane z próbnym obciążeniem obiektów mostowych. Przesunięcia punktów kontrolowanych wykonywane w tym celu charakteryzują się dużą dynamiką zmian. Określenie ich przemieszczeń pionowych wymaga zastosowania szybkich i niezawodnych pomiarów niwelacyjnych. Pomiary takie najkorzystniej jest wykonać z jak najmniejszej liczby stanowisk, na których obserwacje charakteryzować się będą różną długością celowych. Schemat tego typu pomiaru przedstawiono na rysunku 8.

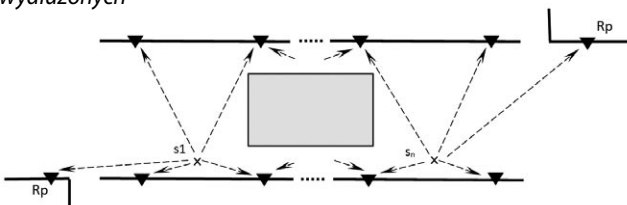
4. Podsumowanie

W artykule została zaproponowana zmodyfikowana metoda niwelacji precyzyjnej do pomiaru i identyfikacji wartości przemieszczeń pionowych punktów sieci pomiarowo-kontrolnej. Prowadzenie monitoringu geodezyjnego z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody pozytywnie wpływa na określenie przemieszczeń pionowych sieci punktów kontrolowanych poprzez:

- eliminację wpływu ewentualnego nachylenia osi celowej spowodowanego niedokładnym zrektyfikowaniem przyrządu,
- zmniejszenie liczby stanowisk niwelatora poprzez obserwację większej liczby punktów kontrolowanych z jednego ustawienia instrumentu,
- zminimalizowanie problemu określenia miejsca lokalizacji stanowiska niwelatora, które spełniałoby warunek równej długości celowej,
- skrócenie czasu przeprowadzenia pomiaru sieci, co skutkuje zmniejszeniem kosztów jego wykonania.



Rys. 7. Propozycja struktury sieci zastabilizowanej na obiektach wydłużonych



Rys. 8. Propozycja struktury sieci dla pomiaru przemieszczeń przy próbnym obciążeniu

Analiza wyników potwierdza przydatność zmodyfikowanej metody niwelacji precyzyjnej w przypadkach, gdzie istotne jest wykonanie pomiarów w jak najkrótszym czasie. Metodę zastosujemy przy dynamicznych przemieszczeniach punktów kontrolowanych (np. próbne obciążenia mostów, estakad i wiaduktów). Kolejnym pozytywnym aspektem tej metody jest jej możliwość zastosowania przy pomiarach sieci pomiarowo-kontrolnych o zagęszczonej geometrii, gdzie konieczne jest wykonanie dużej liczby obserwacji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ziolkowski P., Szulwic J., Miskiewicz M., Deformation analysis of a composite bridge during proof loading using point cloud processing. *Sensors* 18(12)2018
- [2] Błaszczak-Bąk W., Suchocki C., Janicka J., Dumalski A., Duchnowski R., Sobieraj-Złobińska A., Automatic threat detection for historic buildings in dark places based on the modified OPTD method. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9(2)2020, str. 23
- [3] Nowogońska B., Mielczarek M., Renovation management method in neglected buildings. *Sustainability* 13(2)2021, str. 929
- [4] Mrówczyńska M., Sztubecki J., Zięba Z., Wilczyńska I., The model identification of buildings horizontal displacements with the use of a free geodetic network, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 906(16)2021, str. 012056
- [5] Bryn M. J., Afonin D. A., Bogomolova N. N., Geodetic Monitoring of Deformation of Building Surrounding an Underground Construction, *Procedia Engineering* 189, 2017
- [6] Zienkiewicz M., Deformation Analysis of Geodetic Networks by Applying Msplit Estimation with Conditions Binding the Competitive Parameters. *Journal of Surveying Engineering* 145(2)2019
- [7] Sztubecki J., Mrówczyńska M., Vertical displacement monitoring using the modified leveling method, *Measurement* 206(8)2022
- [8] Tang Y-j, Kujawski E., Sztubecki J., Improved Leveling Approach and Its Application in Civil Engineering. *Journal of Surveying Engineering* 144(4)2018, 06018002
- [9] Kujawski E., Tang Y. J., Spatial stability research of ancient stone – Buildings on Duobao pagoda, In *Proceedings of the international symposium on protection of Longyou grottoes in China*. Beijing: Culture Relics Publishing House. (ISBN:7-5010 — 8 - KSCE Journal of Civil Engineering 1885-5), 2006, str. 342–346
- [10] Punmia B. C., Kumar Jain A., *Surveying*, New Delhi, India: Laxmi Publications, 2016
- [11] Schofield W., Breach M., *Engineering surveying*. 6th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2007
- [12] Wiśniewski Z.: *Rachunek wyrównawczy dla geodetów*. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Olsztyn 2014