

Paweł ĆWIAKAŁA, Jacek KUDRYS

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE, WYDZIAŁ GEODEZJI GÓRNICZEJ I INŻYNIERII ŚRODOWISKA
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Porównanie wyników pomiarów czujnikami inklinometrycznymi z pomiarami GNSS w monitoringu permanentnym przemieszczeń obiektów

Dr inż. Paweł ĆWIAKAŁA

Adiunkt w Katedrze Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa. W 2005 roku ukończył studia magisterskie na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie, doktorat obronił w roku 2011. Jego zainteresowania naukowo-badawcze to geodezyjne pomiary przemieszczeń i odkształceń. Prowadzi badania w zakresie długo-okresowego monitoringu obiektów budowlanych między innymi na terenach podlegających wpływowi eksploatacji górniczej.



e-mail: pawelcwi@agh.edu.pl

Dr hab. inż. Jacek KUDRYS

Studia na Wydziale Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej ukończył w 1994 r. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2004 na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH. W 2012 roku uzyskał stopień naukowy doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie geodezja i kartografia, specjalność: geodezja wysza, satelitarna.

e-mail: jkudrys@agh.edu.pl

Streszczenie

W artykule omówiono wyniki pomiarów dwoma systemami. Jednym z nich pochłomierz elektroniczny, a drugim zestaw odbiorników GNSS. Urządzenia zamontowane są na jednym budynku. Opracowanie wyników polegało na obliczeniu zmian pochyleń obiektu rejestrowanych przez inklinometr i porównanie ich ze zmianami współrzędnych punktów wyznaczonych na podstawie pomiarów satelitarnych wykonanych techniką PPP. Analizy miały na celu wykazanie podobieństwa w rejestrowanych przez urządzenia deformacjach budynku.

Słowa kluczowe: pomiar wychyleń, pomiar przemieszczeń, GNSS-PPP, monitoring permanentny.

The comparison of results of surveys conducted by means of inclinometer sensors and GNSS in permanent monitoring of objects translocation

Abstract

In the paper the results of surveys conducted by means of two surveying systems are presented. One of the systems is a precise electronic inclinometer (Fig. 2), while the other is a set of two GNSS receivers. The devices are installed on one building. The study of the results consisted in calculating changes in the object's inclinations recorded locally by the inclinometer and comparing them with the changes of coordinates of points marked on the basis of satellite surveys conducted by means of the PPP technique. The analyses were aimed at revealing the similarities in the building deformations recorded by the devices. The surveys were performed on the building which belongs to the AGH University of Science and Technology in Krakow. In Fig. 1A the localisation of the building on the area of the university is presented, whereas Fig. 1B shows the approximate position of the surveying devices on the object. The study presents the results of observations related to the changes in the object's inclination which were recorded from 22nd March 2013 to 31st March 2013. The unprocessed observation data from the NIVEL device was processed by the comparison of changes in the object's inclinations in daily intervals. The coordinates of the KRAW and KRA1 points were marked by means of the PPP technique, also in a daily interval. The results of the comparison for the whole analysed period of time- after the subtraction of the average value- are presented in Fig. 4.

Keywords: inclination survey, translocation survey, GNSS-PPP, permanent monitoring.

1. Wstęp

W procesie mającym na celu uzyskanie informacji na temat deformacji i przemieszczania się obiektu budowlanego możemy wyróżnić kilka etapów: od koncepcji pomiaru, poprzez jego wdrożenie i prowadzenie obserwacji a skończywszy na analizie i interpretacji wyników. Do tej pory prowadzono wiele różnych badań

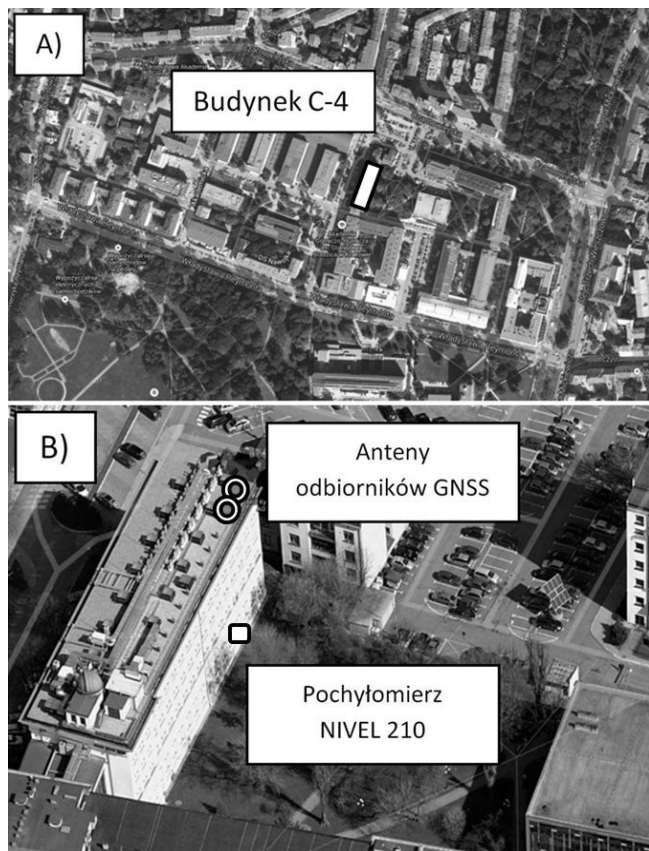
na temat ciągłego monitoringu przemieszczeń obiektów, których wyniki przedstawiane są szeroko w geodezyjnej literaturze technicznej. Biorąc pod uwagę tematykę niniejszego artykułu należy wspomnieć o projektach w których używano podobnych technik pomiarowych. Należy zwrócić uwagę na prace poświęcone pomiarom dynamicznym wysokich budynków ([1, 2, 7]) oraz długo-okresowym pomiarom zmian położenia obiektów ([4, 6]). Liczba tego typu publikacji wzrasta wraz z możliwościami akwizycji danych z różnych rodzajów czujników. Użyteczność i efektywność tych rozwiązań zależna jest od jakości danych oraz techniki analizy szeregów czasowych. W niniejszym artykule przedstawiono porównanie wyników pomiarów prowadzonych niezależnie przez 2 systemy. Jednym z nich jest precyzyjny pochłomierz optoelektroniczny NIVEL 210 firmy Leica, a drugim zespół odbiorników GNSS wykonujący permanentne obserwacje sygnałów satelitarnych w ramach sieci EUREF. Obydwa te systemy zainstalowane są na jednym obiekcie, dzięki czemu możliwe jest porównanie ich wskazań w długim okresie czasu. Wynikiem przeprowadzonych badań może być integracja wskazań obydwu systemów w dalszych pracach badawczych.

2. Obiekt Badań

Prace pomiarowe prowadzone były na budynku należącym do Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Budynek jest siedzibą Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska a jego oznaczenie w podziale AGH to C-4. Budowla powstała w latach 50 XX wieku, jej główna oś skierowana jest w azymucie ok. 23^g, długość budynku wynosi 63,70m, szerokość 16,80m, a wysokość ok. 24m. Obiekt posiada 7 kondygnacji, w tym jedną podziemną, w układzie podłużnym, z dylatacją w połowie swej długości. Na rysunku 1A przedstawiono położenie budynku na terenie uczelni, podczas gdy rysunek 1B przedstawia przybliżone położenie instrumentów pomiarowych na obiekcie.

Pochłomierz typu NIVEL 210 firmy Leica został zainstalowany w pomieszczeniu znajdującym się w podziemiu budynku. Pochłomierz został przymocowany do wewnętrznej ściany nośnej obiektu, tak aby kierunki obserwowanego wychylenia były zgodne z osiami głównymi budowli. Zapis danych odbywał się w specjalnie przygotowanym rejestratorze polowym z interwałem 1 – minutowym. W przeprowadzonych badaniach użyty został najdokładniejszy tryb pomiaru, w którym urządzenie pracuje w zakresie $\pm 1,5100$ mm/m z dokładnością pojedynczego odczytu $\pm 0,0047$ mm/m. Na rysunku 2 przedstawiono omawiane stanowisko pomiarowe. Ponieważ pomiarowi podlegają wychylenia należy zatem zwrócić uwagę na to, że zmiany wartości wskazań oznaczają obrót instrumentu. W tym przypadku wzrost wartości wskazań wzdłuż osi X oznacza przyrost wychylenia szczytu budynku w kierunku prostopadłym do jego osi podłużnej (w przybliżeniu

w kierunku wschodnim), a wzdłuż osi Y oznacza przyrost wychylenia szczytu budynku wzdłuż osi podłużnej (w przybliżeniu w kierunku północnym). W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki z obserwacji zmian wychylenia obiektu, które zarejestrowano w dniach od 22.03.2013 do 31.03.2013.



Rys. 1. Budynek poddany obserwacji: A - Położenie budynku na terenie uczelni; B - przybliżone rozmieszczenie instrumentów pomiarowych na budynku

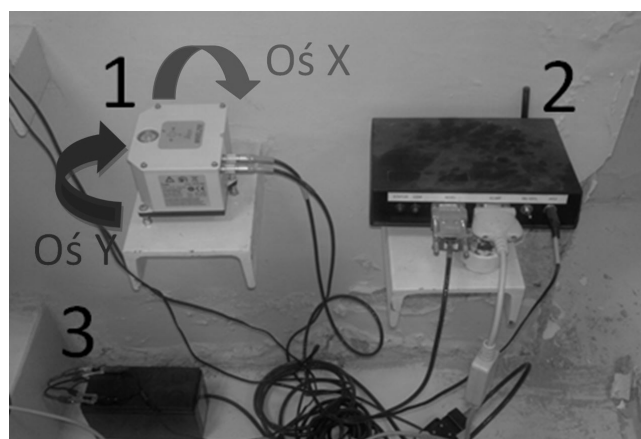
Fig. 1. The observed building: A - localisation of the building on the area of the university; B - approximate position of the surveying devices on the building

Anteny do odbioru sygnałów satelitarnych GNSS zainstalowane są w północnej części budynku C-4 (rys. 1B). Odbiorniki rejestrują dane obserwacyjne z interwałem 1 s. W niniejszej pracy, do porównania wartości przemieszczeń uzyskanych z obserwacji GNSS i pochyłomierza, wykorzystano obserwacje opracowane w trybie Precise Point Positioning (PPP), niezależnie dla każdego z odbiorników. Rozwiązanie takie charakteryzuje się stosunkowo dużymi szumami pomiarowymi, ale pozwala na uniezależnienie się od ewentualnych ruchów punktu nawiązania. W pracach porównawczych analizie poddano wyniki z opracowania sesji obserwacyjnych o długości 24 godz.

3. Opis zastosowanego pochyłomierza

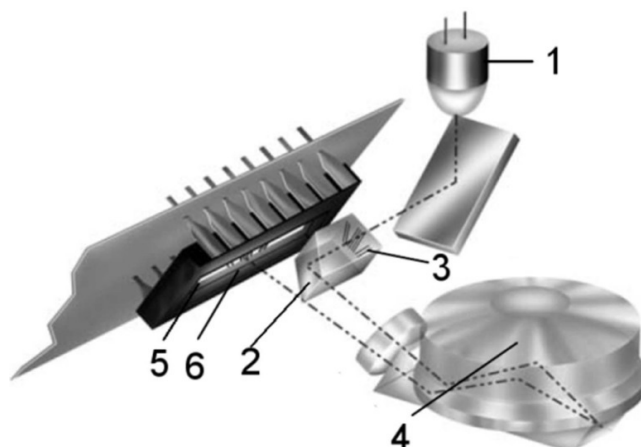
Czujniki pochylenia są dobrymi narzędziami do pomiaru chwilowych i ciągłych zmian wychylenia struktur w celu określenia deformacji na nich występujących. Pochyłomierze z rodziny Nivel 210/220 firmy Leica są precyzyjnymi instrumentami, które umożliwiają pomiar zmiany nachylenia w dwóch prostokątnych do siebie kierunkach. Czujnik posiada własny układ współrzędnych zdefiniowany względem urządzenia. Wyniki pomiarów uzyskiwane są wzdłuż osi X i Y. Zakres i dokładność pracy czujnika uzależniony jest od trybu pomiarowego. Wyróżnione są trzy zakresy pomiarowe i związane z nimi dokładności pomiaru wychylenia [8]. Dodatkowo rejestrowana jest temperatura otoczenia instrumentu.

Nivel 210/220 jest optyczno-elektronicznym czujnikiem pochylenia działającym bez użycia części ruchomych. Pozioma płaszczyzna odniesienia jest realizowana przez substancję płynną, która z założenia jest prostopadła do kierunku pionu. Główne elementy tego czujnika to: źródło światła, układ optyczny (zawierający pryzmat, soczewki i powierzchnie odbijające), zbiornik oleju i czujnik (rys. 3). Pomiarowi podlega różnica kąta pomiędzy poziomem, a powierzchnią do której przymocowany jest instrument.



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe: 1- NIVEL 210, 2 - rejestrator, 3 - akumulator żelowy służący jako zapasowe źródła zasilania

Fig. 2. The surveying site: 1- NIVEL 210, 2 - recorder, 3 - gel battery serving as a spare source of power supply



Rys. 3. Schemat działania instrumentów z serii NIVEL 210/220, [3], [6]:

1 - źródło światła (dioda LED), 2 - pryzmat, 3 - siatka linii na jednej z powierzchni pryzmatu (2), 4 - mały zbiornik zawierający olej silikonowy, 5 - detektor w formie linii czujników CCD, 6 - system odczytowy

Fig. 3. The diagram of operation of the NIVEL 210/220 series devices: 1 - source of light (LED), 2 - prism, 3 - a grid of lines on one of the prism areas (2), 4 - a small container holding silicon oil, 5 - a detector in the form of lines of CCD sensors, 6 - reading system

Pomiar polega na analizie zmian położenia obrazu siatki, znajdującej się w układzie optycznym urządzenia (oznaczonej na schemacie numerem 3), naświetlanej na linii CCD (5). Światło generowane przez diodę LED (1) przechodzi przez siatkę linii (3) i kierowane jest do wnętrza zbiornika wypełnionego płynem (4), który utrzymuje się w poziomie. Płynem tym jest chemicznie i termicznie stabilny olej silikonowy pozwalający na niezakłóconą transmisję światła w paśmie widzialnym. Promienie światła przechodzącego przez ciecz ulegają załamaniu i po odbiciu się od znajdujących się w zbiorniku pryzmatów kierowane są na linie fotodetektorów. Linia ta nie jest naświetlana w miejscach przesłonięcia źródła światła poprzez linie siatki. Porównanie obrazu aktualnie naświetlanego z obrazem odpowiadającym położeniu

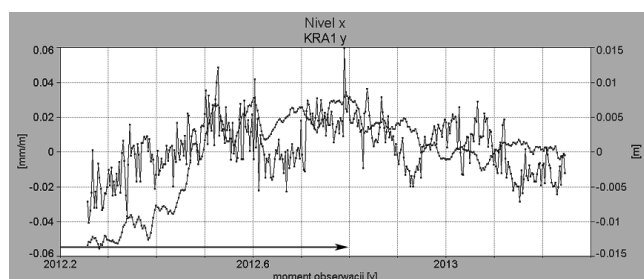
poziomemu instrumentu, które zapisane jest w systemie rozpoznawania obrazu, pozwala na określenie wychylenia.

4. Opis zastosowanych algorytmów obliczeń GNSS - precise point positioning

Technika pomiarowa Precise Point Positioning (PPP) jest techniką nieróżnicową. Pomiar wykonywany jest pojedynczym odbiornikiem, a współrzędne punktu wyznaczone są w układzie współrzędnych realizowanym przez satelity systemu GNSS, bez nawiązania do stacji referencyjnej. W celu uzyskania wymaganej dokładności wyznaczenia współrzędnych punktu w trybie PPP, niezbędne są dodatkowe dane: precyzyjne orbity oraz precyzyjne poprawki do zegarów satelitów. Z takimi dodatkowymi danymi możliwe jest określenie poziomych współrzędnych punktu na poziomie milimetrów z obserwacji dobowych [9]. W pracach związanych z niniejszym opracowaniem wykorzystano obserwacje do satelitów systemu GPS.

5. Opracowanie wyników i dyskusja

Dane obserwacyjne z instrumentu NIVEL poddano obróbce zestawiając zmiany pochylenia obiektu w interwałach tygodniowych i dobowych. Kolejne wartości wychylenia od wartości początkowej obliczono jako wartość średnią z danego tygodnia lub doby. Zestawiono łącznie 54 położenia w interwałach tygodniowych oraz 369 położenia w interwałach dobowych. W kolejnym kroku przeprowadzono redukcję wartości wychylenia na pierwszą epokę pomiarową. Na rysunku 4 przedstawiono zmiany pochylenia budynku w interwałach dobowych. Dla obydwu przypadków wychylenia podano w mm/m.



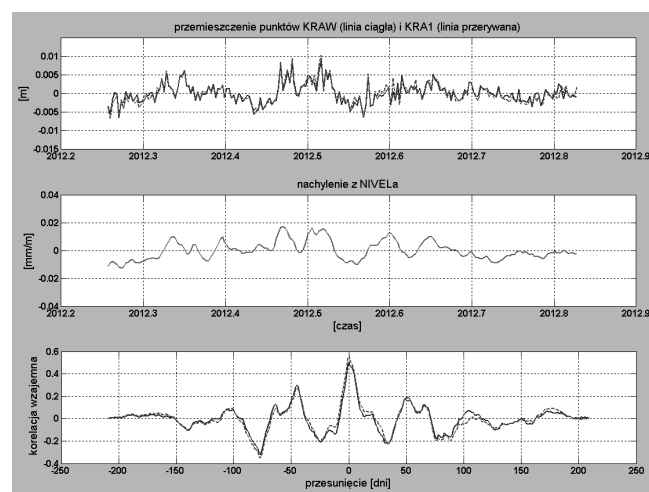
Rys. 4. Porównanie wskazań pochylomierza oraz współrzędnych uzyskanych z obserwacji na stacji KRA1. Rysunek górny – oś poprzeczna, dolny – oś podłużna budynku. Do dalszej analizy wykorzystane zostały obserwacje z okresu czasu zaznaczonego strzałką

Fig. 4. Comparison of the indications of the inclinometer with the coordinates obtained by observation on the KRA1 station. The upper figure – the transverse axis, the lower – the longitudinal axis of the building. Observations from the period of time marked with the arrow were used for further analysis

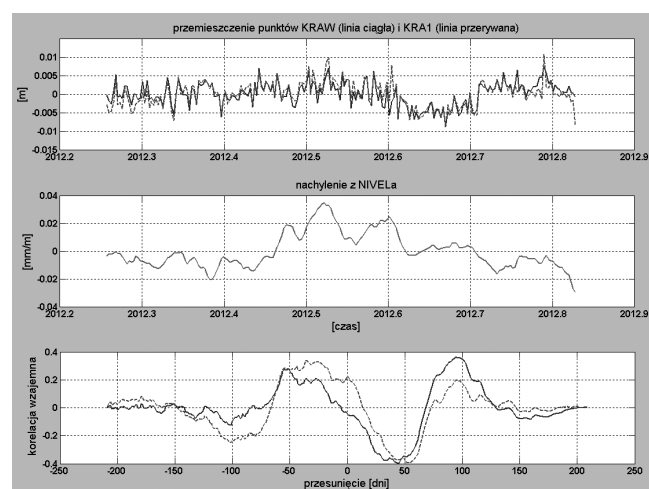
Współrzędne punktów KRAW i KRA1 wyznaczono metodą PPP w interwale dobowym. Do obliczeń wykorzystano oprogramowanie Bernese 5.0, [5]. Wyniki przedstawiono w układzie współrzędnych ETRF2000 na epokę obserwacji, a następnie przetransformowano do układu lokalnego z początkiem w danym punkcie – oddzielnie dla stacji KRAW i KRA1. W celu porównania wyznaczonych współrzędnych ze wskazaniami pochylomierza,

uzgodniono osie układów współrzędnych – pochylomierza oraz układu, w którym wyznaczono współrzędne z obserwacji GNSS – poprzez obrót układu współrzędnych lokalnych odbiorników GNSS tak by oś X nowego układu pokrywała się z osią podłużną budynku. Wyniki porównania dla całego analizowanego okresu czasu – po odjęciu wartości średniej – przedstawia rys. 4. Do dalszej analizy porównawczej wykorzystano okres pierwszych 210 dni obserwacji. Od tego momentu praktycznie nie występują zmiany we wskazaniach pochylomierza (zwłaszcza w osi podłużnej budynku). Z kolei obserwacje GNSS obciążone są zwiększonymi błędami natury meteorologicznej.

Analizie porównawczej poddano zmiany wskazań obu systemów pomiarowych, zarówno w kierunku osi podłużnej jak i poprzecznej. Z szeregów czasowych wskazań pochylomierza oraz współrzędnych punktów GNSS usunięto na wstępie trend liniowy. Na wykresach analizowanych danych przedstawionych na rysunkach 5 i 6 widać wyraźnie, że zmiany współrzędnych wyznaczonych techniką satelitarną są praktycznie takie same na obu punktach GNSS.



Rys. 5. Korelacja wzajemna przemieszczeń punktów GPS i wskazań pochylomierza w kierunku osi podłużnej budynku
Fig. 5. Correlation between the translocations of the GPS points and the indications of the inclinometer towards the longitudinal axis of the building

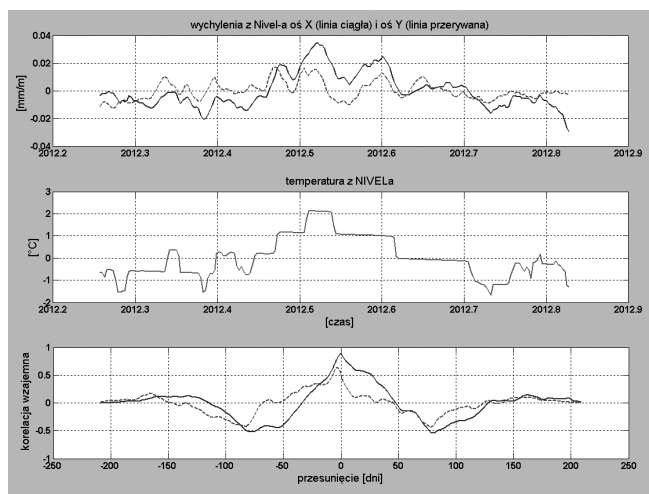


Rys. 6. Korelacja wzajemna przemieszczeń punktów GPS i wskazań pochylomierza w kierunku osi poprzecznej budynku
Fig. 6. Correlation between the translocations of the GPS points and the indications of the inclinometer towards the transverse axis of the building

Ponieważ opracowanie obserwacji GNSS odbywało się niezależnie dla każdego z punktów, świadczy to o jednakowym wpływie czynników zewnętrznych na wyznaczone współrzędne. Do czynników tych można zaliczyć w tym przypadku nie w pełni uwzględnione warunki meteorologiczne, które mają charakter błędów przypadkowych oraz rzeczywiste przemieszczenia punktu.

Porównując wykresy zmian wskazań obu systemów pomiarowych, można zauważyć w niektórych momentach czasu podobne zmiany we wskazaniach pochylomierza oraz współrzędnych punktów GNSS, występujące w zasadzie tylko w składowej podłużnej. Obliczony współczynnik korelacji wzajemnej tych dwóch szeregów czasowych osiąga wartość ok. 0.5 dla przesunięcia 0 dni, dla obu punktów pomiarowych. Ze względu na występowanie stosunkowo dużego szumu w wynikach obserwacji GNSS w porównaniu z gładką funkcją zmian nachylenia z NIVEL-a, należy tę wartość uznać za znaczącą i potwierdzającą podobny charakter zmian uzyskanych z obu systemów pomiarowych.

Na uwagę zasługuje także zależność pomiędzy wychyleniami i temperaturą rejestrowanymi przez pochylomierz (rys. 7). Pierwszy wykres pokazuje zarejestrowane wychylenia w kierunku osi podłużnej i poprzecznej budynku. Na kolejnym wykresie przedstawione są zmiany temperatury zarejestrowane przez układ pochylomierza. Korelacja wzajemna wychyleń i temperatury osiąga wartości 0.9 dla osi poprzecznej i ok. 0.6 dla osi podłużnej. Tak duża korelacja może świadczyć o występowaniu trendu związanego ze zmianami temperatury w odczytach przyrządu, dla całego analizowanego okresu czasu.



Rys. 7. Korelacja wzajemna wychyleń w obu osiach i temperatury rejestrowanej przez pochylomierz

Fig. 7. Correlation between the inclinations on both axes and the temperature recorded by the inclinometer

6. Podsumowanie

Permanentne pomiary przemieszczeń i deformacji budynków znajdują zastosowanie w sytuacjach, w których zagrożona może zostać stateczność konstrukcji. W omawianym przypadku nie wykazano większych przemieszczeń obiektu. Instrumenty NIVEL są stosowane do badania stabilności filarów obserwacyjnych. W tych sytuacjach montowane są one w niedużej odległości pionowej od anten GNSS. Obliczając przemieszczenia anten z przyrostów pochylenia w omawianym przypadku pomierzono wartość różnicy wysokości, wynosiła ona 24,8 m. Otrzymano zatem wartości przemieszczeń na poziomie 0,8 mm w osi poprzecznej bu-

dynku i 0,4 mm w osi podłużnej budynku. Wartości te obliczono przy założeniu, że budynek wychyla się jako bryła sztywna. Większa wartość wychylenia w osi poprzecznej budynku może być spowodowana tym, iż pochylomierz jest zainstalowany na podłużnej ścianie budynku. Wyniki uzyskane na podstawie obliczeń z systemu GNSS wykazały przemieszczenia sięgające 10 mm w tych samych momentach czasu, w których zarejestrowano największe przemieszczenia obliczone na podstawie pomiarów inklinometrem. Rezultaty te są różniące się o rząd wartości, wskazywać to może na brak sztywności konstrukcji obiektu. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że obydwa systemy wykazywały podobne zachowania przy w momentach zmiany kierunku wychylenia i przemieszczania co może potwierdzać przydatność w monitoringu w zakresie zmian krótkotrwałych, następujących w szybkim czasie. Planowane są dalsze prace badawcze ukierunkowane na rozszerzenie obliczeń GNSS poprzez nawiązanie pomiarów do sieci EPN oraz zastosowanie rozwiązań kinematycznych. Dodatkowo planowane jest wykonanie analizy zmian rozstawu szczelin dylatacyjnych oraz cykliczny pomiarów reperów zainstalowanych na budynku. Biorąc pod uwagę sztywność konstrukcji oraz jej niewielką wysokość uznano za bezcelowe zastosowanie pomiarów z użyciem akcelerometrów.

Badania przeprowadzono ze środków Grantu Dziekańskiego Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie o numerze: 15.11.150.205 oraz badań statutowych nr 11.11.150.006.

7. Literatura

- [1] Brownjohn J., Rizos C., Tan G.H., Pan T.C.: Real-Time Long-Term Monitoring of Static and Dynamic Displacements of an Office Tower, Combining RTK GPS and Accelerometer data. 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, 2004.
- [2] Çelebi, M. Sanli, A.: GPS in Pioneering Dynamic Monitoring of Long-Period Structures. *Earthquake Spectra*, Vol. 18(1):47-61, 2002.
- [3] Chrzanowski A., Secord J.M.: Tilt Measurement. Chapter 15 in *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. CRC Press, ISBN 0849383471, s. 15/1-15/11, 1999.
- [4] Ćwiąkała P.: Monitoring of displacements of building structures subjected to effects of underground mining exploitation. *Geodesy and mine surveying, Photogrammetry and remote sensing*, STEF92 Technology Ltd., s. 331-338, 2013.
- [5] Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M.: *Bernese GPS Software Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern, 2007.
- [6] Henriques M. J., Lima J. N., Oliveira S. B.: Measuring Inclinations in Cabril Dam with an Optoelectronic Sensor. *Dam and Reservoir Engineering Surveying, Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage*, s. 1-15, 2012.
- [7] Inal C., Yigit C. O., Yetkin M.: Monitoring of tall building's dynamic behaviour using precision inclination sensors. 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, Lisbon, 2008.
- [8] Leica Geosystems AG.: *Nivel 210/Nivel220 User Manual*. Leica Geosystems AG. Switzerland, 2007.
- [9] Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M., Webb F. H.: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, vol. 102(B3), s. 5005-5017, 1997.

otrzymano / received: 30.12.2013

przyjęto do druku / accepted: 03.02.2014

artykuł recenzowany / revised paper