



Geodezyjny monitoring budynku poddanego rektyfikacji

# Czas prostowania

Fot. Paweł Wiąckala

Do problemów, z którymi boryka się Górny Śląsk, należy osiadanie i przechyłanie się budynków pod wpływem działalności górniczej. Aby niwelować negatywne skutki tego zjawiska, coraz częściej wykonuje się ich rektyfikację. Polega ona na podniesieniu takich obiektów za pomocą siłowników i doprowadzeniu ich do pozycji pionowej.

## Paweł Wiąckala

**P**rowadzenie podziemnej eksploatacji górniczej niesie ze sobą negatywny aspekt związany z przekształceniami powierzchni terenu. Na obszarach zurbanizowanych może dochodzić do uszkodzeń i deformacji różnego rodzaju obiektów budowlanych, czyli tzw. szkód górniczych. Z problemem tym związana jest bezpośrednio kwestia odpowiedzialności za powstałe uszkodzenia. Zgodnie z polskim prawem (ustawa *Prawo geologiczne i górnicze*) zakład górniczy ma obowiązek naprawy wyrządzonych szkód poprzez przywrócenie stanu poprzedniego lub wypłatę odszkodowania. Dlatego geodezyjny aspekt prognozy i oceny przekształceń terenu nabiera coraz większego znaczenia.

W niniejszym artykule przedstawiony został przebieg i wyniki monitoringu geodezyjnego – bazującego na pomiarze tachimetrycznym, pomiarze GNSS oraz naziemnym skanowaniu laserowym – przeprowadzonego w trakcie wykonywania prac rektyfikacyjnych.

### • Wychylenie budynku

W Polsce za wychylenia pionowe zagrożące bezpieczeństwu budynku uznaje się te przekraczające 25 mm/m. Wtedy też niezbędne jest wykonanie rektyfikacji. W przypadku mniejszych wychyleń zazwyczaj wykonuje się tylko prace naprawcze mające na celu przywrócenie pełnej funkcjonalności budynku (np. regulacja spadków w rurach).

Rektyfikacja najczęściej polega na odpowiednim oderwaniu obiektu od fundamentów i podniesieniu go za pomo-

cą siłowników hydraulicznych (rys. 1). Szczelinę powstałą po podniesieniu budynku uzupełnia się – po uprzednim podparciu obiektu i usunięciu siłownika – zbrojeniem, a następnie zamurowuje.

Proces ten jest bardzo wymagający technicznie i bezpośrednio narusza statykę konstrukcji. Dlatego też konieczny jest pomiar inwentaryzacyjny stanu budynku przed rozpoczęciem prac naprawczych oraz po ich zakończeniu. Ostatnio wykonuje się rektyfikację coraz bardziej skomplikowanych gmachów (np. 11-piętrowy blok mieszkalny w Katowicach, zabytkowy neogotycki kościół w Bytomiu), dlatego uzasadniona wydaje się potrzeba prowadzenia pomiarów testowych, które pozwoliłyby na lepsze poznanie charakterystyki tego procesu i dopasowanie go do specyfiki naprawianego obiektu budowlanego.



## ● Obiekt pomiarowy i charakterystyka prac

Pomiarami został objęty czterokondygnacyjny budynek wielorodzinny znajdujący się w Piekarach Śląskich (fot. na stronie obok). Obiekt ten został wybudowany w latach 70. ubiegłego wieku i przed negatywnym wpływem działalności górniczej miała chronić go przerwa dylatacyjna pomiędzy dwoma segmentami konstrukcji oraz żelbetowa skrzynia piwniczna. Mimo to na skutek intensywnej działalności wydobywczej Zakładu Górniczego „Piekary” blok uległ znacznemu wychyleniu i z tego względu konieczne było przeprowadzenie procesu rektyfikacji.

Do monitoringu obiektu wykorzystano jeden z najnowszych instrumentów firmy Leica – Nova MS50 – łączący w sobie cechy tachimetru i skanera laserowego. Urządzenie wyposażono ponadto w liczne wspomagające pracę systemy (automatycznego celowania – ATR, wyszukiwania pryzmatu – Power Search, śledzenia pryzmatu – LOCK) oraz wydajne serwomotory, które pozwalają na wykonywanie szybkich i częściowo autonomicznych pomiarów.

Wymienione funkcje okazały się kluczowe podczas prac terenowych. Umożliwiły precyzyjny pomiar sieci punktów kontrolowanych, wykonanie pomiaru ciągłego w trakcie podnoszenia budynku oraz zeskanowanie całego obiektu. Dodatkowo wykonane zostały statyczne pomiary GNSS (w pracy wykorzystano dwa odbiorniki Leica GRX1200) mające na celu dołączenie pomiarów klasycznych do zewnętrznego układu współrzędnych. W ten sposób – dzięki integracji tych trzech technik pomiarowych – możliwa była inwentaryzacja początkowego i końcowego stanu obiektu oraz precyzyjne wyznaczenie przemieszczeń i odkształceń powstających w trakcie podnoszenia budynku.

Opisane dalej pomiary wykonano podczas rektyfikacji jednego z dwóch segmentów bloku.

## ● Sieć punktów kontrolowanych

Pierwszym etapem prac terenowych była stabilizacja na badanym budynku 16 punktów kontrolowanych (po 8 na

segment) – 8 na dachu i 8 na ścianach. Rozmieszczono je tak, aby jak najlepiej oddawały charakterystykę przemieszczeń monitorowanego obiektu oraz aby na sąsiednich stanowiskach pomiarowych (usytuowanych równomiernie wokół budynku) widocznych było jak najwięcej tych samych punktów.

Uzyskanie maksymalnej oczekiwanej dokładności pomiaru wymagało zstabilizowania punktów kontrolowanych w sposób, który zapewniał ich stałość oraz eliminację wpływu błędów centrowania poprzez jednoznaczna i powtarzalną możliwość zamontowania sygnałów pomiarowych. Dla trzech punktów na dachu, które miały zostać pomierzone nie tylko tachimetrycznie, ale również techniką GNSS, zaprojektowano specjalne płytki z gwintem 5/8” zamocowane następnie w narożach budynku. W ten sposób otrzymano punkty wymuszonego centrowania, na których można było zamontować spodarke i pryzmat dalmierczy oraz spoziomować antenę GPS. Do stabilizacji pozostałych punktów wykorzystano 12-centymetrowe pręty gwintowane M10 osadzone w otworach wywierconych w ścianach budynku oraz specjalne bolce, na których mocowano sygnał (rys. 2).

## ● Pomiary w terenie

W ramach prac terenowych wykonano trzy serie pomiarowe w trzech terminach:

- I epoka (30 czerwca 2015 r.) – pomiar wyjściowy, wyznaczenie współrzędnych punktów kontrolowanych, inwentaryzacja stanu obiektu metodą skanowania laserowego;

- II epoka (29 września 2015 r.) – pomiar wykonany dzień przed planowaną rektyfikacją i mający na celu kontrolę stanu obiektu;

- III epoka (30 września 2015 r.) – ciągły pomiar tachimetryczny w trakcie rektyfikacji budynku, wyznaczenie współrzędnych punktów kontrolowanych po zakończeniu procesu prostowania, inwentaryzacja stanu obiektu metodą skanowania laserowego po zakończeniu prostowania.

Same prace pomiarowe zasadniczo można podzielić na cztery grupy:

- 1. Pomiar statyczny GNSS (I i II epoka).** Pomiar opierał się na trzech sesjach statycznych trwających od 1 do 2 godzin. Z powodu ograniczeń czasowych (przez większość dnia na punktach kontrolowanych zamontowane były pryzmaty) oraz utrudnionego dostępu do dachu ze względu na prowadzone prace nie wykonano pomiaru satelitarnego w III epoce.

- 2. Pomiar tachimetryczny sieci kąto-liniowej (I, II i III epoka).** Z ośmiu stanowisk swobodnych pomierzono wszystkie widoczne punkty kontrolowane (w tym 3 punkty nawiązania pomierzone uprzednio statycznie). W ten sposób uzyskano sieć modułarną, gdzie punkty wy-



Rys. 1. Obiekt w Piekarach Śląskich – jeden z podnośników hydraulicznych i fundamenty wzmocnione profilami stalowymi

Fot. Radosław Zajdel





Rys. 2. Sygnał pomiarowy zamontowany na punkcie kontrolowanym

tryb pomiaru o częstotliwości 1000 Hz. Średnia odległość pomiędzy stanowiskiem a badanym obiektem wynosiła 30 m, a czas pomiaru na jednym stanowisku – od 10 do 30 minut.

**4. Pomiar ciągły tachymetryczny (III epoka).** Wyznaczenie przemieszczeń i odkształceń budynku powstających podczas jego prostowania było najważniejszym zadaniem prowadzonych badań. Biorąc pod uwagę, że proces podnoszenia jest stosunkowo dynamiczny (osiąga prędkość do kilkudziesięciu milimetrów na minutę) realizacja tego typu zadania wymagała zastosowania odpowiedniej technologii pozwalającej na ciągłą obserwację maksymalnej liczby punktów przy minimalnym interwale czasowym pomiędzy kolejnymi seriami pomiarowymi.

Pomiarem – wykorzystującym tryb monitoringu z interwałem 90 sekund – objęto 9 punktów: 6 kontrolowanych zlokalizowanych na podnoszonym segmencie budynku, 2 punkty kontrolne umieszczone na sąsiedniej części bloku oraz 1 punkt na statywie zlokalizowany z dala od obiektu. Pomiar rozpoczęto około godziny 7 rano, na godzinę przed rozpoczęciem rektyfikacji, a zakończono o 12:20, czyli godzinę po zakończeniu podnoszenia budynku. W tym czasie wykonano 147 serii pomiarowych. Niestety, dopiero po zakończeniu pracy odkryto, że w pewnym momencie instrument przestał rejestrować obserwację dla niektórych punktów. W wyniku ich znacznego przemieszczenia wyszły one poza zakres działania systemu ATR, a tym samym instrument nie był w stanie zidentyfikować środków przyzmatów. Problem wziął się stąd, że przed rozpoczęciem pomiaru ciągłego nie wyłączono trybu „dokładnego celowania” ATR, który zawęził zakres działania systemu.



znaczone były jednocześnie punktami łącznymi dla kolejnych stanowisk. Pomiar wykonywano w minimum 3 seriach i dwóch położeniach lunety w celu wyeliminowania wpływu błędów instrumentalnych. Uzyskanie wysokich dokładności i zautomatyzowanie pomiaru było możliwe dzięki wykorzystaniu instrumentu wyposażonego w serwomotory oraz system automatycznego celowania ATR, a także zestawu ośmiu przyzmatów GPR1.

**3. Skanowanie laserowe (I, II i III epoka).** Chmury punktów zarejestrowano na wszystkich stanowiskach tachymetrycznych zaraz po zakończeniu pomiaru klasycznego. Rozdzielczość skanowania wynosiła 20 x 20 mm przy maksymalnej odległości do badanego obiektu (otrzymano quasi-regularną siatkę punktów, w której odległość pomiędzy poszczególnymi punktami nie przekraczała 2 cm). Do pomiaru wykorzystano najszybszy

Tab. 1. Różnice współrzędnych punktów kontrolowanych znajdujących się na rektyfikowanym obiekcie

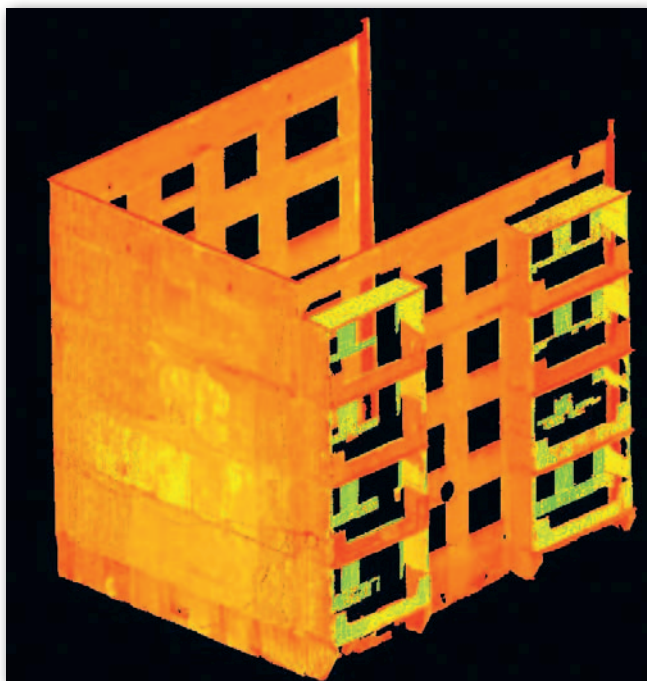
Numer punktu	Porównanie współrzędnych między II i I epoką pomiarową			Porównanie współrzędnych między III i I epoką pomiarową		
	dX [mm]	dY [mm]	dH [mm]	dX [mm]	dY [mm]	dH [mm]
3	-3,1	-0,1	-2,4	-37,2	-19,4	349,5
4	-3,1	2,7	-3,5	-51,2	-21,7	269,6
5	-1,3	1,7	-3,4	-50,5	-14,6	41,0
6	-4,6	1,8	-2,5	-49,1	-14,5	77,4
23	-2,6	0,3	-3,0	-305,6	-122,8	345,9
24	-2,7	2,7	-3,3	-309,4	-122,0	273,2
25	-1,1	2,1	-2,3	-310,0	-122,3	43,4
26	-0,7	0,5	-3,9	-307,9	-123,2	107,0

● **Opracowanie wyników pomiarów GNSS i tachymetrycznych**

Pierwszy etap obliczeń polegał na wyznaczeniu współrzędnych punktów kontrolowanych w zewnętrznym układzie współrzędnych dla wszystkich trzech epok pomiarowych. W tym celu w ramach postprocessingu obliczono wektory GNSS w nawiązaniu do stacji KATO (Katowice) sieci ASG-EUPOS oraz uśredniono obserwacje z pomiarów klasycznych.

Wykorzystanie zautomatyzowanego tachimetru bardzo przyspieszyło pomiar, ale jednocześnie spowodowało





Rys. 3. Połączona i oczyszczona chmura punktów

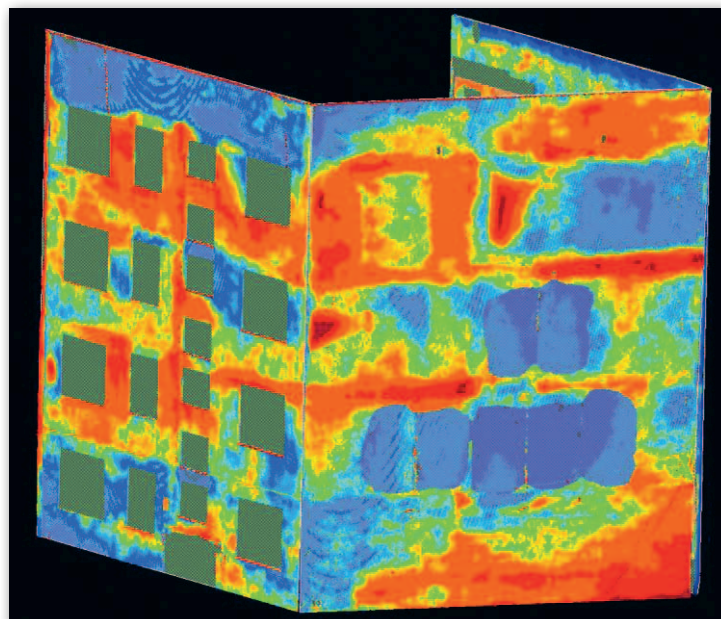
uzyskanie dużego zbioru obserwacji. Aby odpowiednio go uśrednić i przeanalizować, zdecydowano się napisać prosty program w języku Visual Basic for Application. Wykonał on jednoczesne uśrednienie obserwacji z kilku serii oraz ich analizę dokładnościową. Dzięki temu możliwe było wyłączenie z dalszych obliczeń wartości odstających (obserwacji obciążonych błędami grubymi). Odpowiednio przygotowane dane bezpośrednio wyeksportowano do programu C-GEO.

Ostatecznie dla każdej z epok pomiarowych wykonano jednorzędowe wyrównanie ściśle w module „Wyrównanie ściśle osnów 3D i GNSS” oprogramowania C-GEO. W ten sposób uzyskano współrzędne punktów kontrolowanych w zewnętrznym układzie współrzędnych, które pozwoliły na wyznaczenie przemieszczeń bezwzględnych pomiędzy kolejnymi seriami (tab. 1).

Obserwacje wykonane podczas III epoki pomiarowej nawiązano do współrzędnych wyznaczonych techniką GNSS podczas II epoki.

### • Opracowanie wyników skaningu

Kolejnym etapem opracowania było przetworzenie danych pochodzących ze skanowania laserowego. Na ich podstawie postanowiono wyznaczyć zgeneralizowane wartości wychyleń budynku, które byłyby najistotniejszą informacją z perspektywy procesu rektyfikacji. W tym celu najpierw połączono i odpowiednio przefiltrowano uzyskane chmury punktów w programie Leica Cyclone (rys. 3), a następnie przystąpiono do za-



Rys. 4. Chmura punktów uzyskana w trakcie pierwszej sesji pomiarowej z wpasowanymi płaszczyznami oraz zaznaczonymi wartościami odchyłek od płaskości

Tab. 2. Ostateczne wartości wychyleń budynku od pionu

	Maksymalne wychylenie obiektu $T_{MAX}$ [mm/m]	Azymut maksymalnego wychyleń [g]	Błąd wyznaczenia maksymalnego wychyleń [mm/m]
Epoka I	24,0	217,7369	2,0
Epoka II	23,9	218,1699	2,1
Epoka III	3,3	134,4269	2,4

sadniczej analizy w programie Cloud-Compare. Proces wyznaczania wartości wychyleń składał się z następujących czynności:

- podzielenie chmury punktów na trzy zbiory zawierające kolejne ściany budynku (czwarta ściana w przerwie dylatacyjnej nie była dostępna do pomiaru);
- aproksymacja każdej ze ścian za pomocą płaszczyzny;
- wyznaczenie odchyłek od płaskości – odległości ortogonalnych pomiędzy punktami chmury punktów a wpasowaną płaszczyzną (rys. 4);
- usunięcie punktów odstających (są to punkty, które nie zostały wyczyszczone w procesie filtracji, np. fragmenty ram okiennych, piorunochron, odstające kawałki tynku);
- obliczenie maksymalnego wychyleń i jego azymutu dla całego obiektu na podstawie wektorów normalnych trzech

płaszczyzn (ostatecznie wpasowanych w ściany po usunięciu punktów odstających); składowa  $N_z$  wektora normalnego  $N(N_x, N_y, N_z)$  określa wartość wychyleń od pionu, natomiast na podstawie składowych  $N_x$  i  $N_y$  można obliczyć azymut tego wychyleń.

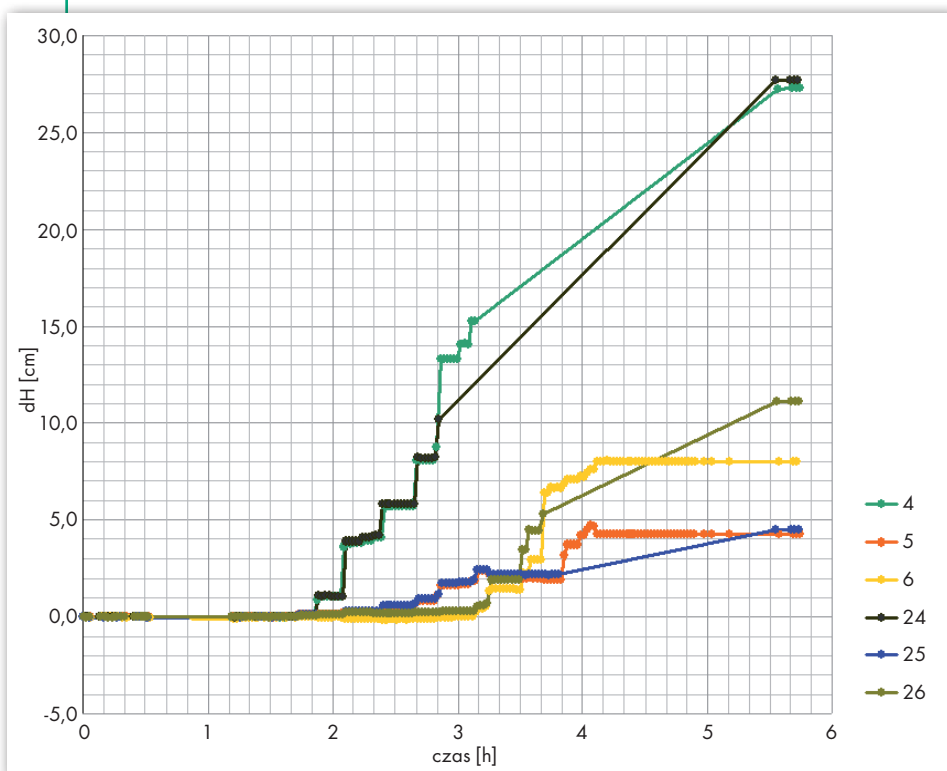
### • Opracowanie wyników pomiaru ciągłego

Ostatnim etapem prac było wyznaczenie przemieszczeń i odkształceń powstających w trakcie podnoszenia budynku. W tym celu na podstawie uzyskanych obserwacji z pomiaru ciągłego obliczono współrzędne sześciu badanych punktów kontrolowanych dla każdej serii pomiaru, a na ich podstawie:

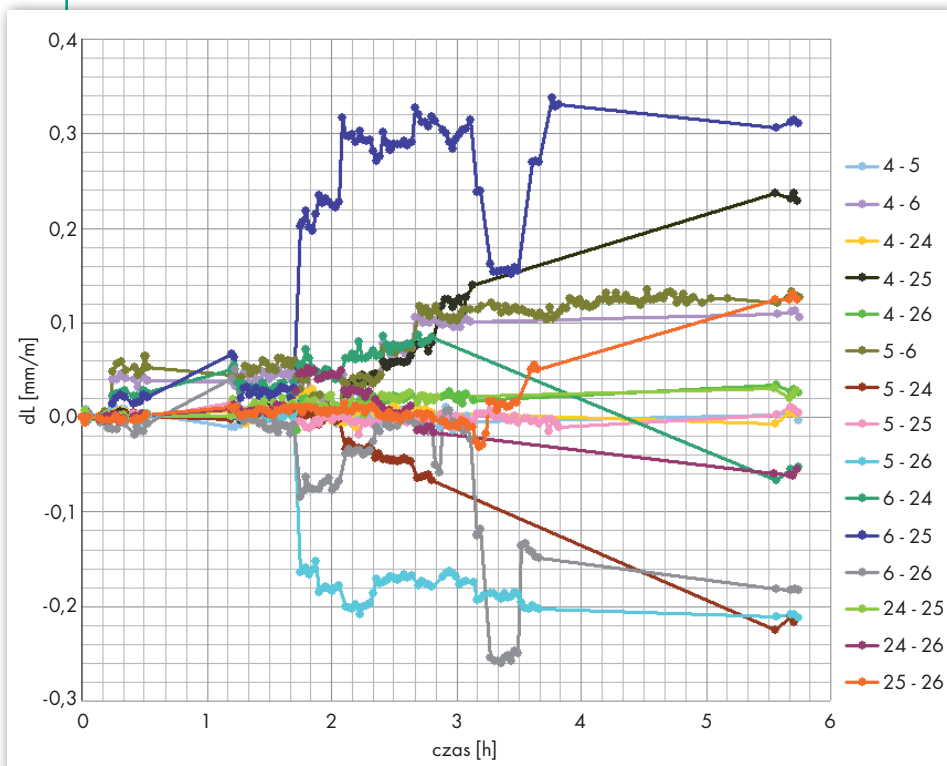
- obliczono względne przemieszczenia poziome i pionowe poszczególnych punktów kontrolowanych w trakcie rektyfikacji;

Tab. 3. Średnie wartości przemieszczenia obiektu oraz jego obrotu wokół poszczególnych osi

dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	$d\alpha_x$ [°]	$d\alpha_y$ [°]	$d\alpha_z$ [°]
-219,91	-54,72	144,66	0,3187	-1,2954	-0,028



Rys. 5. Wykres przemieszczeń pionowych 6 punktów kontrolowanych w trakcie rektyfikacji budynku



Rys. 6. Wykres wszystkich odkształceń liniowych pomiędzy punktami badanego obiektu (15 odcinków) w trakcie rektyfikacji

- wygenerowano szeregi czasowe i wykresy przemieszczeń punktów;
- obliczono odkształcenia liniowe (wydłużenie względne) i postaciowe (zmiana kąta) pomiędzy poszczególnymi punktami;
- wygenerowano wykresy odkształceń liniowych i postaciowych;

- przeprowadzono analizę zachowania się obiektu jako bryły sztywnej;
  - na podstawie analizy bryły sztywnej wyznaczono średnie wartości przemieszczenia oraz obrotu obiektu (tab. 3).
- Podczas prowadzenia monitoringu obiektu istotne jest jak najszybsze uzyskanie informacji o wartości deformacji,

dlatego też wskazana jest automatyzacja procesu obliczeniowego. W tym celu, podobnie jak w przypadku wstępnej analizy obserwacji klasycznych, zdecydowano się napisać program z wykorzystaniem Excela i języka VBA. Pozwoliło to na skrócenie czasu opracowania kameralnego, dzięki czemu zaraz po wykonaniu pomiarów możliwe było uzyskanie pełnych wyników opracowania wraz z prezentacją graficzną w postaci wykresów.

Przykładowe wykresy (rys. 5 i 6) pokazują charakterystykę przemieszczeń w trakcie rektyfikacji. Jak można łatwo zaobserwować, proces ten ma charakter skokowy wywołany pojedynczymi ruchami siłowników. Maksymalne przemieszczenia wywołane jednym skokiem siłownika dochodzą nawet do 5 cm, natomiast maksymalne odkształcenia liniowe klasyfikują się na poziomie poniżej 0,4 mm/m.

## • Materiał do dalszych opracowań i analiz

Dzięki wykorzystaniu tachimetru skanującego możliwa była integracja trzech technik pomiarowych, co pozwoliło na precyzyjne wyznaczenie przemieszczeń i odkształceń powstających w trakcie procesu rektyfikacji budynku. Uzyskane wyniki dostarczają bardzo cennych informacji na temat wpływu prowadzonych prac na sposób zachowywania się budynku i pozwolą na lepsze dopasowanie procesu rektyfikacji do specyfiki naprawianego obiektu. Na ich podstawie odpowiedni specjaliści mogą wykonać szczegółową weryfikację skuteczności podjętych działań oraz ich wpływu na bezpieczeństwo konstrukcji. Jednocześnie automatyzacja procesu obliczeniowego pozwoliła na szybkie uzyskanie ostatecznych parametrów deformacji i ich prezentacji graficznej.

**Paweł Wiącek**

Na podstawie pracy inżynierskiej pt. „System monitoringu obiektów budowlanych poddanych procesowi rektyfikacji” napisanej przez autora w Katedrze Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa WGGiI AGH w Krakowie pod kierunkiem dr. inż. Pawła Ćwiakły Jak informował GEODETA, podczas 11. edycji Międzynarodowej konferencji młodych naukowców pt. „Współczesne problemy związane z wykorzystaniem zasobów naturalnych” w Sankt Petersburgu autor zajął drugie miejsce w sekcji „Zastosowanie nowoczesnych technologii w pracach budowlanych na terenach górniczych” za referat bazujący na niniejszej pracy inżynierskiej