

## ZASTOSOWANIE METOD ESTYMACJI ODPORNEJ W GEODEZYJNYCH POMIARACH PIONOWYCH PRZEMIESZCZEŃ OBIEKTÓW BUDOWLANYCH

Zbigniew Muszyński<sup>1</sup>, Krzysztof Mąkowski<sup>2</sup>, Edward Osada<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Wrocławska

<sup>2</sup> Akademia Rolnicza we Wrocławiu

**Streszczenie.** W pracy podjęto tematykę geodezyjnych pomiarów przemieszczeń pionowych. Badano możliwości szerszego wykorzystania metod estymacji odpornej, które dotychczas stosowano wyłącznie do identyfikacji stałych reperów odniesienia. W ramach przeprowadzonych analiz do ostatecznego wyrównania pomiarów okresowych wykorzystano trzy metody estymacji odpornej: Hubera, Hampela i liniową (dostępne w programie „Niwelacja” [Osada 2000]). Następnie wyznaczono wartości i istotności przemieszczeń oraz porównano je z wynikami otrzymanymi przy użyciu metod klasycznych. Jako obiekt badawczy przyjęto budynki mieszkalne przy ul. Traugutta we Wrocławiu, których fundamenty zostały podmyte w czasie powodzi w 1997 roku. Obliczenia przeprowadzono dla ośmiu pomiarów kontrolnych.

**Słowa kluczowe:** geodezyjne pomiary przemieszczeń pionowych, metody estymacji odpornej, osiadania budynków

### WSTĘP

Właściwe posadowienie obiektów budowlanych jest podstawą bezpiecznej i niezawodnej ich eksploatacji. Nagłe zmiany warunków gruntowo-wodnych oraz sąsiedztwo głębokich wykopów może przyczynić się do uszkodzeń budynków, a w skrajnych przypadkach spowodować katastrofę budowlaną. Sytuacja taka zaistniała we Wrocławiu po powodzi, która nawiedziła miasto w 1997 roku. Wśród zalanych obiektów znalazły się budynki mieszkalne położone przy ulicy Traugutta, aż do skrzyżowania z ulicą Kościuszki. Dodatkowo przy zbiegu wspomnianych ulic tuż przed powodzią prowadzono roboty budowlane związane z budową nowego budynku o charakterze plombowym. Nadchodząca powódź zalała wykonane wykopy oraz odsłonięty fundament sąsiedniego budynku znajdującego się przy ulicy Traugutta o numerze 147. Spowodowało to naruszenie stateczności posadowienia budynku i uszkodzenie jego konstrukcji, co uwidocz-

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Zbigniew Muszyński, Zakład Geodezji, Politechnika Wrocławska, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, tel. 0-71 3202297, e-mail: zbigniew.muszynski@pwr.wroc.pl

niło się wyraźnymi pionowymi pęknięciami. W ramach prac związanych z oceną szkód powodziowych, zrealizowano pomiar osiadań budynków przy zbiegu ulic Traugutta i Kościuszki. Pomiar wyjściowy wykonano w dniach 11-12 sierpnia 1997 roku, a pierwszy pomiar kontrolny w dniach 28-29 sierpnia tego samego roku. Pomimo znacznych osiadań, jakie wówczas wykryto, zleceniodawca zrezygnował z dalszego monitorowania obiektów. Z obawy przed możliwością katastrofy budowlanej badaniem przemieszczeń zagrożonych budynków zajęło się Studenckie Koło Naukowe Geodetów pod kierownictwem dr. inż. Krzysztofa Mąkolskiego. Do chwili obecnej przeprowadzono osiem pomiarów kontrolnych.

Przy geodezyjnych pomiarach przemieszczeń pionowych obiektów budowlanych ogromnie ważny jest układ odniesienia. Układ ten realizowany jest w terenie przez odpowiednio liczny zbiór punktów odniesienia – reperów, stabilizowanych poza strefą wpływów badanego obiektu, z którymi związany jest w sposób jednoznaczny układ współrzędnych, służący do zapisu pozycji badanych punktów i wektorów ich przemieszczeń [Bryś i Przewłocki 1998]. Aby zapewnić stabilność układu punkty odniesienia powinny zachować niezmiennosć swego położenia przez cały okres monitorowania obiektu, co w przypadku długotrwałych pomiarów jest dość trudne. W praktyce często zdarza się, że niektóre repery odniesienia, wskutek różnych czynników, ulegają przemieszczeniom. W skrajnym przypadku (przy utracie zbyt dużej ilości punktów) uniemożliwia to dalsze monitorowanie badanego obiektu przy użyciu klasycznego podejścia do wyznaczania przemieszczeń. Najczęściej weryfikację stałości reperów odniesienia przeprowadza się według kryterium wyrażonego nierównością (1) [Lazzarini i in. 1977].

$$(\Delta h' - \Delta h)_{\max} \leq 1,5 \cdot m_0 \sqrt{n + n'} \quad (1)$$

gdzie:  $\Delta h$  – różnice wysokości pomiędzy reperami z pomiaru wyjściowego,  
 $\Delta h'$  – różnice wysokości pomiędzy reperami z pomiaru aktualnego,  
 $m_0$  – średni błąd pojedynczego spostrzeżenia przed wyrównaniem z pomiaru wyjściowego i aktualnego,  
 $n$  – liczba stanowisk w ciągu łączącym repery odniesienia przy pomiarze wyjściowym,  
 $n'$  – liczba stanowisk w ciągu łączącym repery odniesienia przy pomiarze aktualnym.

Alternatywnym rozwiązaniem jest wykorzystanie metod estymacji odpornej do identyfikacji stałych punktów odniesienia. Możliwości takie posiada program „Niwelacja” [Osada 2000]. Zgodnie z zaleceniami zawartymi w opisie tego programu identyfikacja stałych punktów odniesienia przebiega następująco. W pierwszym kroku należy wyrównać sieć kontrolno-pomiarową w nawiązaniu do wszystkich punktów odniesienia, przyjmując dla nich jednakowe wielkości błędów położenia. W wyniku iteracyjnego wyrównania za pomocą metod estymacji odpornej wykryte zostaną punkty odstające, a więc te spośród punktów odniesienia, które utraciły niezmiennosć położenia. W celu przywrócenia bezbłędności punktów nawiązania w kolejnym kroku należy przeprowadzić klasyczne wyrównanie metodą najmniejszych kwadratów. Jako bezbłędne punkty dowiązania należy przyjąć tylko te punkty odniesienia, które przeszły test stałości przy użyciu metod estymacji odpornej.

Tematem niniejszego artykułu jest próba szerszego zastosowania metod estymacji odpornej w badaniu przemieszczeń pionowych. Podjęto następujące zagadnienia:

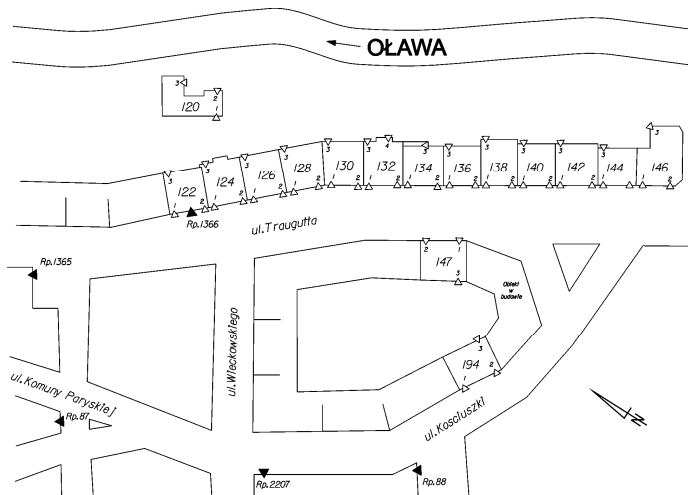
- porównanie wartości przemieszczeń wyliczonych z metody najmniejszych kwadratów i metod odpornych na przykładzie budynku wykazującego największe osiadania;
- porównanie istotności przemieszczeń wyliczonych z metody najmniejszych kwadratów i metod estymacji odpornej.

## OBIEKT BADAWCZY

Przedmiotem badań było kilkanaście budynków znajdujących się u zbiegu ulic Traugutta i Kościuszki we Wrocławiu. Obiekty te wybudowano w różnych okresach XX wieku. Najstarsze z nich wzniesiono na początku zeszłego stulecia, a najmłodszy został oddany do użytku w 2000 roku. Są to budynki wielorodzinne, wzniesione z cegły w technologii murowanej, posiadające pięć lub sześć kondygnacji naziemnych. Wyjątek stanowi budynek nr 196 przy ulicy Kościuszki, który posiada osiem kondygnacji. Kamienice te są w większości niepodpiwniczone, wyjątkiem są cztery budynki: 120 i 147 przy ulicy Traugutta oraz 194 i 196 przy ulicy Kościuszki. Większość budynków zlokalizowana jest w odległości 30–40 metrów od koryta rzeki Oławy. Ulice Traugutta i Kościuszki charakteryzują się dużym natężeniem ruchu kołowego (znaczna ilość samochodów ciężarowych). Dodatkowo na obu ulicach odbywa się komunikacja tramwajowa.

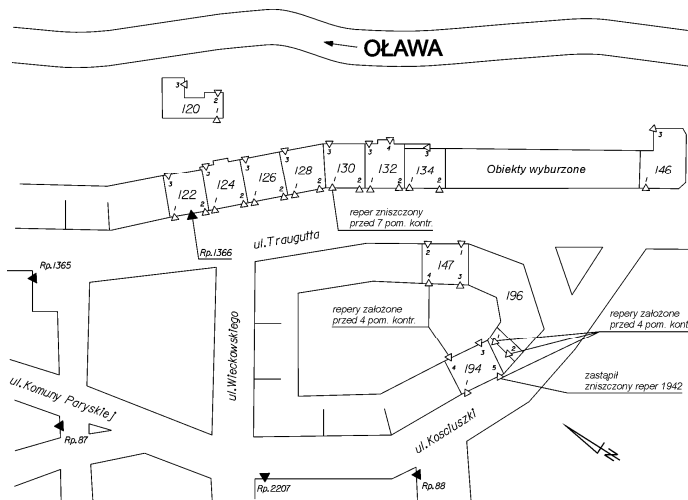
Geodezyjnymi pomiarami przemieszczeń pionowych objęto początkowo szesnaście budynków, w tym piętnaście położonych przy ulicy Traugutta (o numerach adresowych: 120, 122, 124, 126, 128, 130, 132, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146, 147) i jeden budynek przy ulicy Kościuszki o numerze 194. Pomiedzy drugim a trzecim pomiarem kontrolnym wyburzeniu uległo pięć budynków położonych przy ulicy Traugutta o numerach: 136, 138, 140, 142 i 144. Od czwartego pomiaru kontrolnego pomiarami objęto budynek nr 196 wybudowany przy ulicy Kościuszki. Sieć kontrolno-pomiarowa składała się z pięciu reperów państwowej osnowy wysokościowej o numerach i cechach: rp. 87 (W-1646), rp. 88 (W-177), rp. 1365 (W-1645), rp. 1366 (W-118) oraz rp. 2207 (W-116). Jako dodatkowy punkt odniesienia przyjęto punkt kontrolowany nr 1203. Reper ten znajduje się na budynku nr 120 przy ul. Traugutta, wybudowanym na wale ochronnym rzeki Oławy. Budynek ten posiada głębokie fundamenty i nie wykazuje osiadań, dlatego jeden z trzech mieszczących się na nim reperów postanowiono wziąć pod uwagę podczas badania stałości reperów. W pomiarze wyjściowym pomierzono czterdzieści dziewięć reperów kontrolowanych (rys. 1) zastabilizowanych metalowymi trzpieniami przy narożnikach budynków. Przyjęto następujący sposób numeracji reperów kontrolowanych – numer reperu poprzedzony jest numerem budynku, na którym się znajduje (np.: reper numer 2 na budynku o numerze adresowym 134 posiada oznaczenie 1342). Po wyburzeniu pięciu budynków liczba reperów kontrolowanych zmniejszyła się do trzydziestu czterech. Pomiedzy drugim a trzecim pomiarem kontrolnym zniszczeniu uległ reper 1462. W trzecim pomiarze kontrolnym nie pomierzono reperu 1473, mieszczącego się na zagrożonym budynku, ponieważ z powodu trwającej obok budowy był on wtedy niedostępny. W kwietniu 2000 roku założone zostały nowe repery (rys. 2) na budynkach: nr 147 przy ul. Traugutta (rp. 1474), nr 194 oraz 196 przy ul. Kościuszki (rp. 1944, rp. 1945, rp. 1961 i rp. 1962). Reper 1945 został założony

w miejsce zniszczonego reperu 1942. Przed siódmym pomiarem kontrolnym uległ zniszczeniu reper 1301. Pomiary niwelacyjne przeprowadzano metodą niwelacji precyzyjnej przy użyciu niwelatora Ni 007, precyzyjnych łąt inwarowych z podpórkami z wykorzystaniem żabek jednorzędziowych. Przyjęto, że dopuszczalna różnica przewyżeń na stanowisku pochodząca z dwóch podziałów łąt nie powinna przekraczać 0.1 mm. Terminy wykonania kolejnych pomiarów i błędy średnie pomiaru pojedynczego stanowiska niwelacji precyzyjnej zestawiono w tabeli 1.



Źródło/source: [Wróblewska 2004]

Rys. 1. Szkic rozmieszczenia reperów w okresach 1-2  
Fig. 1. Diagram of bench marks' location in periods 1-2



Źródło/source: [Wróblewska 2004]

Rys. 2. Szkic rozmieszczenia reperów w okresach 3-8  
Fig. 2. Diagram of bench marks' location in periods 3-8

Tabela 1. Zestawienie wykonanych pomiarów z krótką charakterystyką dokładnościową  
 Table 1. Summary of surveys with characteristic of accuracy in levelling

Nazwa pomiaru Name of survey	Data pomiaru Date of survey	Średni błąd pomiaru pojedynczego stanowiska Survey's mean error of single levelling's station [mm]
Wyjściowy Initial Survey	11-12 sierpnia 1997 r. 11-12 August 1997 r.	0,17
1 kontrolny 1st check survey	28-29 sierpnia 1997 r. 28-29 August 1997 r.	0,30
2 kontrolny 2nd check survey	22-24 czerwca 1998 r. 22-24 June 1998 r.	0,05
3 kontrolny 3rd check survey	11-13 czerwca 1999 r. 11-13 June 1999 r.	0,14
4 kontrolny 4th check survey	28-29 września 2000 r. 28-29 September 2000 r.	0,17
5 kontrolny 5th check survey	6-7 kwietnia 2001 r. 6-7 April 2001 r.	0,11
6 kontrolny 6th check survey	23-25 kwietnia 2002 r. 23-25 April 2002 r.	0,13
7 kontrolny 7th check survey	25-27 kwietnia 2003 r. 25-27 April 2003 r.	0,17
8 kontrolny 8th check survey	16-17 kwietnia 2004 r. 16-17 April 2004 r.	0,12

Źródło/Source: [Wróblewska 2004]

## ZASTOSOWANE METODY OPRACOWANIA DANYCH TERENOWYCH

Zastanawiając się nad obecną sytuacją rozpatrywanej sieci kontrolno-pomiarowej należy zauważyć, że istnieje realna groźba utraty stabilności układu odniesienia. Analiza stałości punktów odniesienia przeprowadzona w pracy Wróblewskiej [2004] wykazała, że jedyną kombinacją przynajmniej trzech reperów, które zostały uznane jako stałe i która powtarza się we wszystkich okresach pomiarowych, są repery: 1365, 87 i 1203. W przypadku gdy kolejny punkt odniesienia utraci niezmiennność położenia niemożliwe stanie się dalsze monitorowanie osiadań badanych budynków. Dla sprawdzenia możliwości szerszego wykorzystania metod estymacji odpornej w badaniach przemieszczeń autorzy niniejszego artykułu podjęli próbę porównania wartości i istotności przemieszczeń obliczonych klasycznie i z wykorzystaniem metod estymacji odpornej. Przyjęto poniższe założenia:

- wybrane metody estymacji odpornej użyto nie tylko do identyfikacji stałych punktów odniesienia, ale do pełnego (ostatecznego) wyrównania każdego pomiaru okresowego w analizowanej sieci kontrolno-pomiarowej;
- jako punkty nawiązania przyjęto wszystkie repery odniesienia, niezależnie od spełnienia przez nie kryterium stałości położenia;
- przyjęto początkowy (niezbędny do prawidłowego działania iteracyjnych metod estymacji odpornej) błąd położenia punktów odniesienia na poziomie  $\pm 0,5$  mm;
- testowanymi metodami estymacji odpornej były: metoda Hubera, Hampela i liniowa, dostępne w profesjonalnej wersji programu „Niwelacja” [Osada 2000];

- przyjęto, że dla punktu przystającego wyliczona w wyniku wyrównania poprawka powinna mieścić się w pojedynczym przedziale ufności.

Zadaniem zastosowanych metod było wykrycie odstających (niestałych) reperów odniesienia i wyrównanie całej sieci w nawiązaniu do wszystkich reperów odniesienia przy odpowiedniej minimalizacji wpływu punktów odstających na końcowe wyniki. Minimalizacja ta przeprowadzana jest poprzez odpowiednie wagowanie obserwacji, odmienne dla każdej z zastosowanych metod, których krótkie charakterystyki zamieszczono poniżej.

#### a) Metoda Hubera

Metoda Hubera jest jedną z najbardziej znanych i najczęściej stosowanych metod estymacji odpornej. Powstała jako połączenie metody najmniejszych kwadratów i metody najmniejszego odchylenia przeciętnego. Funkcja wagowa metody Hubera (o charakterze rekurencyjnym) wyraża się wzorem (2), [Kamiński i Wiśniewski 1992].

$$p(v) = \begin{cases} \frac{1}{2}p & \forall |v| \leq b \\ \text{sign}(v) \cdot p \cdot b \cdot \frac{1}{2 \cdot v} & \forall |v| > b \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:  $p$  – waga obserwacji,  $v$  – poprawka,  $b$  – parametr funkcji tłumienia.

#### b) Metoda Hampela

Metoda ta powstała jako rozwinięcie metody Hubera. W odróżnieniu od poprzedniej posiada bardziej złożoną funkcję wagową o postaci (3), [Kamiński i Wiśniewski 1992]. Jest to rekurencyjna funkcja sklejana, posiadająca trzy parametry graniczne:  $b$ ,  $c$ ,  $d$ .

$$p(v) = \begin{cases} \frac{1}{2}p & \forall |v| \leq b \\ \text{sign}(v) \cdot p \cdot b \cdot \frac{1}{2 \cdot v} & \forall b < |v| \leq c \\ \left[ \frac{-p \cdot b}{d - c} \cdot \left( \frac{1}{2} - \text{sign}(v) \cdot d \cdot \frac{1}{2 \cdot v} \right) \right] & \forall c < |v| \leq d \\ 0 & \forall |v| > d \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:  $p$  – waga obserwacji,  $v$  – poprawka,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – parametry funkcji tłumienia.

#### c) Metoda liniowa

Metoda liniowa została opisana w podręczniku Osady [2002]. W odróżnieniu od poprzednich metod modyfikacje nie dotyczą bezpośrednio wag obserwacji, lecz pośrednio – poprzez zmianę wartości błędów średnich dla poszczególnych spostrzeżeń. Początkową graniczną wartością poprawek, po przekroczeniu której następuje modyfikacja błędów, jest wartość odchylenia standardowego poprawek (4) uzyskanych z metody najmniejszych kwadratów. Po stabilizacji rozwiązania granicą zostaje podwójna wartość błędu średniego danego spostrzeżenia. Dla poprawki przekraczającej wartość graniczną, błąd średni danego spostrzeżenia powiększa się o wartość równą przekroczeniu przez tę poprawkę przyjętego dla niej przedziału ufności, zgodnie ze wzorem (5).

$$k = \begin{cases} \frac{\sigma}{m} & \text{- start iteracji} \\ 2 & \text{- stabilizacja} \end{cases} \quad (4)$$

$$m(v) = \begin{cases} m & \forall |v| \leq k \cdot m \\ m + |v| - k \cdot m & \forall |v| > k \cdot m \end{cases} \quad (5)$$

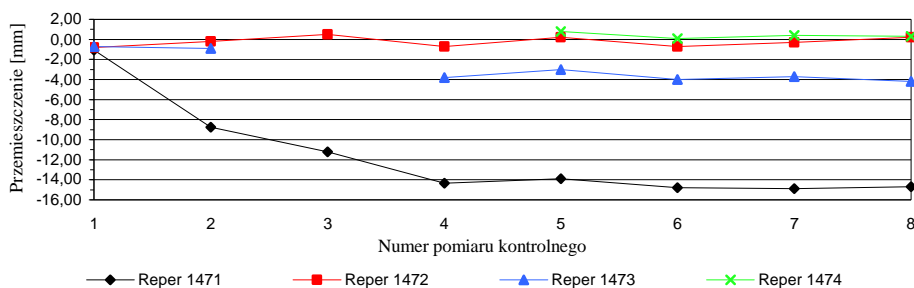
gdzie:  $v$  – poprawka,  $\sigma$  – odchylenie standardowe poprawek,  $m$  – błąd średni spostrzeżenia,  $k$  – parametr graniczny.

Aby przeanalizować wartości przemieszczeń (otrzymanych dla poszczególnych punktów kontrolowanych) wyznaczonych metodami estymacji odpornej obliczono odchyłki tych wartości od wartości przemieszczeń wyznaczonych klasycznie (metodą najmniejszych kwadratów w nawiązaniu do reperów odniesienia: 1365, 87 i 1203 – przyjętych jako bezbłędne). Ze względu na dużą ilość reperów kontrolowanych charakterystykę otrzymanych odchyłek ograniczono do danych zawartych w tabeli 2. Do szczegółowych analiz wybrano budynek nr 147 położony przy ulicy Traugutta, wykazujący największe osiadania w dotychczasowych pomiarach. Wykres przemieszczeń pionowych tego budynku wyznaczonych techniką klasyczną przedstawia rysunek 3, a wartości odchyłek przemieszczeń obliczonych z metod odpornych ilustruje rysunek 4.

Tabela 2. Charakterystyka odchyłek wartości przemieszczeń wyznaczonych metodami estymacji odpornej w odniesieniu do przemieszczeń wyznaczonych klasycznie

Table 2. Characteristic of deviations between displacements' values obtained in classical and robust estimation methods

Metoda Method	Charakterystyka odchyłek Characteristics of deviations [mm]	Numer pomiaru kontrolnego Check survey's number								Wszystkie pomiaru łącznie All surveys jointly
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Metoda Hubera Huber's method	Średnia Mean	0,22	0,25	-0,22	0,01	0,05	0,26	0,18	0,26	0,14
	Odchylenie stand. RMS deviation	0,05	0,10	0,15	0,09	0,13	0,09	0,07	0,08	0,18
	Maks. wart. bezwzgl. Max. absolutely value	0,32	0,42	0,61	0,32	0,41	0,49	0,39	0,49	0,61
Metoda Hampela Hampel's method	Średnia Mean	0,22	0,25	-0,22	0,01	0,05	0,28	0,18	0,25	0,14
	Odchylenie stand. RMS deviation	0,04	0,10	0,15	0,09	0,13	0,06	0,07	0,07	0,18
	Maks. wart. bezwzgl. Max. absolutely value	0,32	0,42	0,61	0,32	0,41	0,49	0,39	0,49	0,61
Metoda liniowa Linear method	Średnia Mean	0,09	0,28	-0,13	0,12	0,12	0,17	0,25	0,33	0,16
	Odchylenie stand. RMS deviation	0,08	0,09	0,12	0,10	0,10	0,09	0,07	0,06	0,16
	Maks. wart. bezwzgl. Max. absolutely value	0,27	0,42	0,41	0,42	0,41	0,39	0,49	0,49	0,49



Rys. 3. Wykres przemieszczeń pionowych budynku nr 147 uzyskanych z metody klasycznej  
Fig. 3. Diagram of vertical displacements obtained in classical method for building no. 147

Porównanie istotności przemieszczeń wyznaczonych klasycznie i metodami estymacji odpornej (dla poszczególnych reperów kontrolowanych) przedstawiają rysunki 5a i 5b.

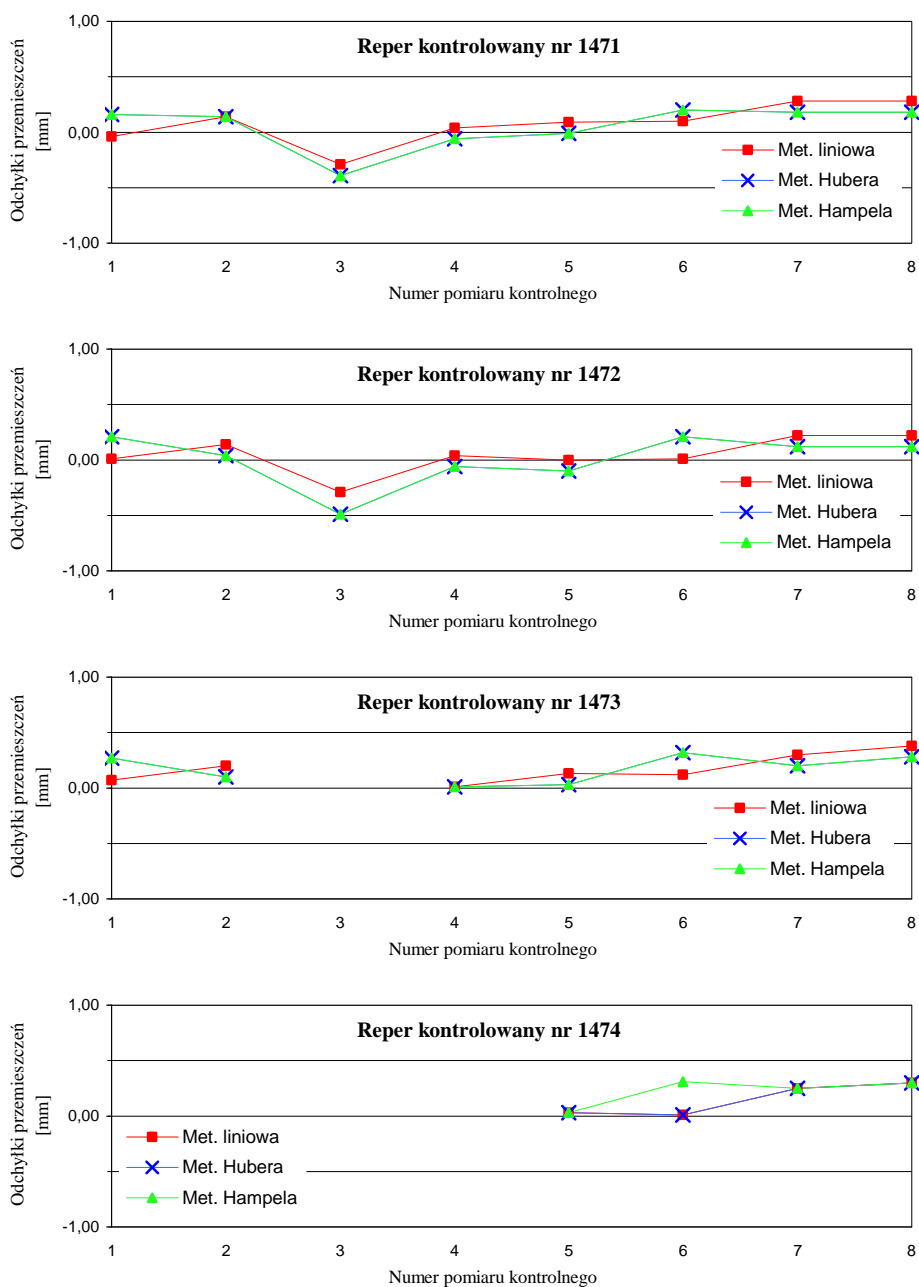
## ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Rozpatrując przemieszczenia pionowe budynku nr 147 należy stwierdzić, że największe wartości osiadań zarejestrowano dla reperu 1471 (dochodzące do -15 mm) oraz dla reperu 1473 (w granicach -4,5 mm). Pozostałe dwa repery (w tym reper 1474 mierzony od czwartego pomiaru kontrolnego) wykazują znikome przemieszczenia mieszczące się w granicach dokładności pomiaru.

Porównując wartości przemieszczeń wyznaczonych wybranymi metodami estymacji odpornej z przemieszczeniami wyznaczonymi klasycznie należy stwierdzić, że:

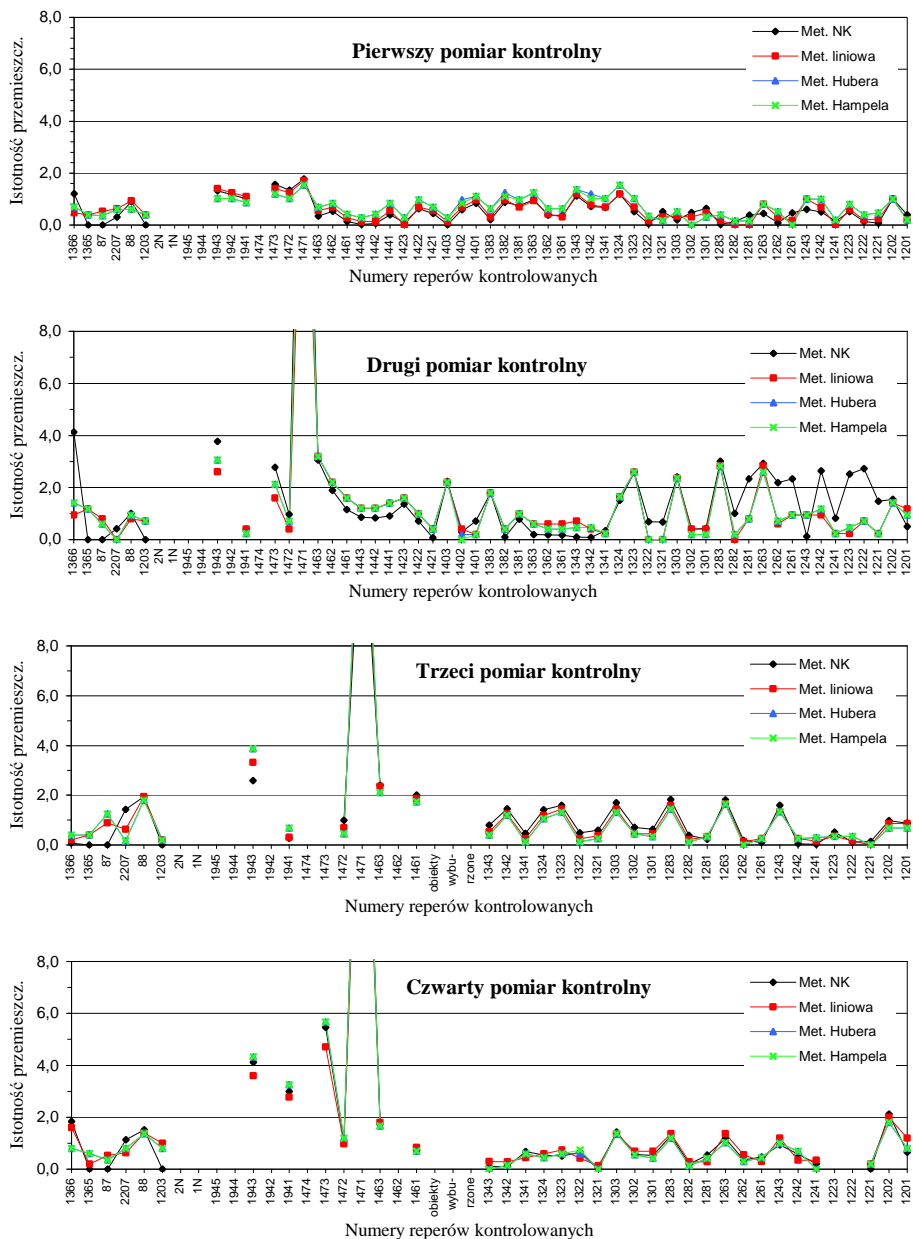
- wartości otrzymanych odchyłek nie mają ścisłego charakteru, co wynika ze specyfiki metod estymacji odpornej. W przeciwieństwie do metody najmniejszych kwadratów opisywane w artykule wykorzystanie metod estymacji odpornej musi uwzględniać błędy reperów odniesienia;
- wartości odchyłek otrzymanych dla reperów znajdujących się na budynku nr 147 kształtują się na tym samym poziomie co dla pozostałych reperów kontrolowanych analizowanej sieci kontrolno-pomiarowej (por. tab. 2);
- zarówno dla dużych wartości przemieszczeń (rp. 1471 i rp. 1473), jak i małych (pozostałe dwa repery budynku nr 147) otrzymane odchyłki (przedstawione na rys. 4) mają podobne wartości i wahają się w granicach  $\pm 0,4$  mm. Wyjątek stanowi reper 1472, gdzie w trzecim pomiarze kontrolnym wartość odchyłki osiągnęła -0,5 mm dla dwóch metod odpornych;
- istnieje duże podobieństwo pomiędzy odchyłkami otrzymanymi z poszczególnych metod estymacji odpornej. W szczególności dla trzech z czterech analizowanych reperów budynku nr 147 odchyłki z metody Hubera i Hampela są prawie identyczne. Dla reperu 1474 wszystkie użyte metody dały identyczne rozwiązanie z wyjątkiem szóstego pomiaru kontrolnego, gdzie odchyłka z metody Hampela odbiega nieznacznie od wyników z pozostałych metod.



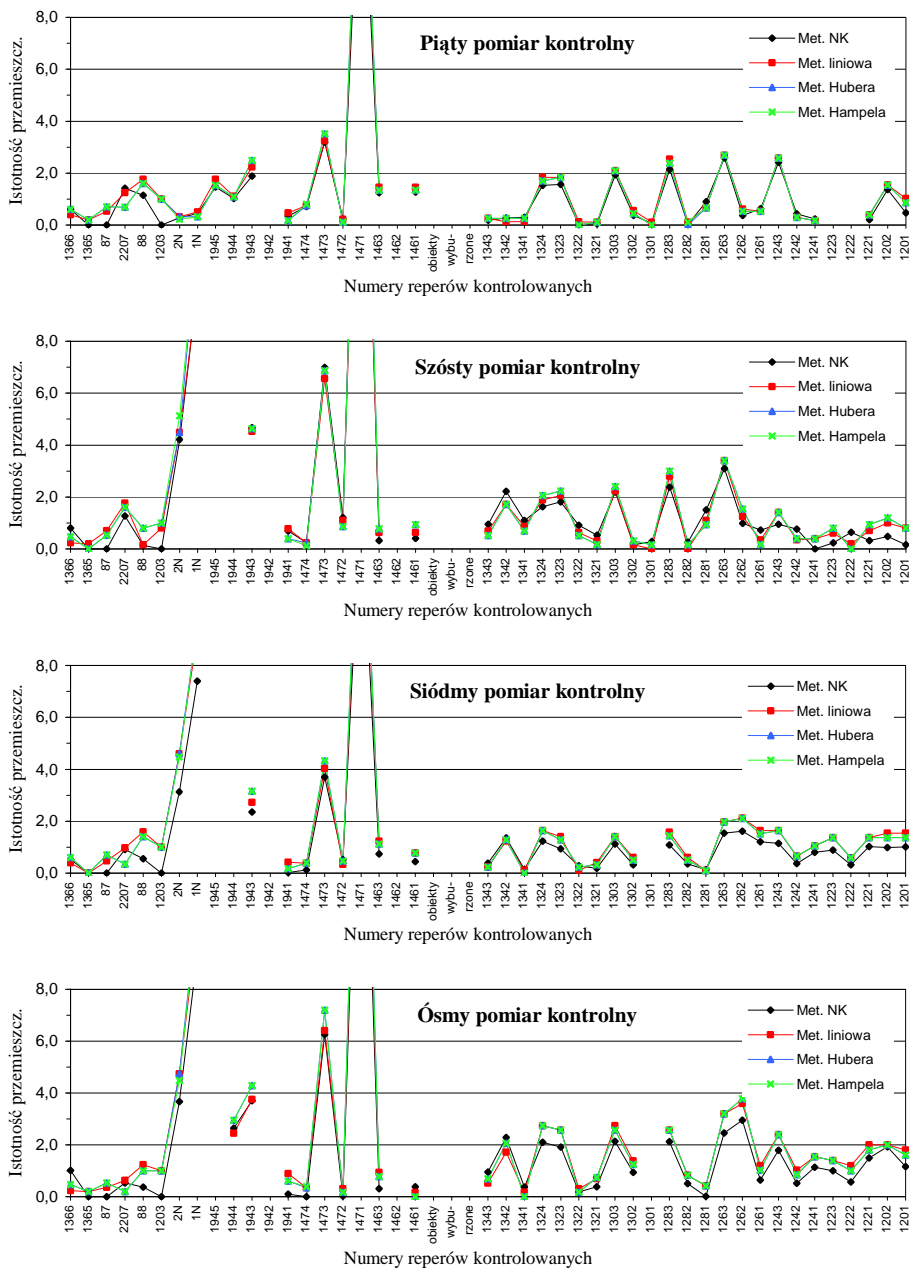


Rys. 4. Wykres odchyłek wartości przemieszczeń reperów budynku nr 147 uzyskanych z metod odpornych w odniesieniu do metody klasycznej

Fig. 4. Diagram of deviations between displacements' values obtained in classical and robust estimation methods



Rys. 5a. Wykres istotności przemieszczeń reperów kontrolowanych  
 Fig. 5a. Diagram of bench marks' displacements' significance



Rys. 5b. Wykres istotności przemieszczeń reperów kontrolowanych  
 Fig. 5b. Diagram of bench marks' displacements' significance

Ze względu na wspomniany wcześniej przybliżony charakter obliczonych odchyłek dla pełniejszej interpretacji otrzymanych wyników obliczono współczynniki istotności przemieszczeń przedstawione na rysunku 5a i 5b. Porównując istotności przemieszczeń otrzymanych z analizowanych metod należy zauważyć, że:

- w większości przypadków współczynnik istotności przemieszczeń wyliczonych z metod estymacji odpornej był zbliżony do współczynnika istotności przemieszczeń wyliczonych z klasycznej metody najmniejszych kwadratów. Wyjątek stanowią repery: 1366, 1281, 1262, 1261, 1242, 1223 i 1222, dla których w drugim pomiarze kontrolnym współczynnik istotności obliczony na podstawie przemieszczeń pochodzących z metody najmniejszych kwadratów miał znacznie wyższą wartość niż pozostałe współczynniki istotności obliczone dla tych punktów;
- współczynniki istotności pochodzące z różnych metod estymacji odpornej kształtują się na podobnym poziomie. Metody: Hubera i Hampela dają prawie identyczne wyniki. Jedynie w pierwszym pomiarze kontrolnym dla trzech reperów: 1402, 1382 i 1342 występują niewielkie różnice pomiędzy współczynnikami istotności pochodzącymi z tych metod;
- dla przyjętego na poziomie 2 progu istotności przemieszczeń w większości przypadków istnieje zgodność klasyfikacji przemieszczeń tych samych punktów przez różne metody. Wyjątek stanowią wspomniane wcześniej repery: 1366, 1281, 1262, 1261, 1242, 1223 i 1222, których przemieszczenia pochodzące z metody najmniejszych kwadratów zostały uznane za istotne, podczas gdy istotność przemieszczeń tych punktów obliczonych metodami estymacji odpornej jest dość niska (w granicach 1-1,5). Poza tym w kilkunastu przypadkach współczynnik istotności kształtuje się na poziomie zbliżonym do 2 z niewielkimi wahaniami jego wartości w zależności od metody użytej do wyliczenia przemieszczeń. Przy sztywnym kryterium istotności (przyjętym na poziomie 2) występują wówczas różnice w klasyfikowaniu przemieszczeń jako istotnych i nieistotnych. Sytuacja taka występuje dla następujących punktów: 1473 i 1462 – w drugim pomiarze kontrolnym, 1461 – w trzecim pomiarze kontrolnym, 1202 – w czwartym pomiarze kontrolnym, 1943 i 1303 – w piątym pomiarze kontrolnym, 1342, 1324 i 1323 – w szóstym pomiarze kontrolnym, 1263 i 1262 – w siódmym pomiarze kontrolnym oraz 1342, 1323 i 1243 – w ósmym pomiarze kontrolnym.

## PODSUMOWANIE

Geodezyjny pomiar przemieszczeń pionowych ma ogromne znaczenie dla prawidłowej i bezpiecznej eksploatacji monitorowanych obiektów budowlanych. Ważnym etapem opracowania każdego pomiaru okresowego jest analiza stałości punktów odniesienia. Oprócz klasycznej procedury identyfikacji wykorzystującej nierówność (1) coraz częściej z powodzeniem stosuje się w tym celu metody estymacji odpornej.

Niniejsza praca jest próbą szerszego wykorzystania metod odpornych do pełnego wyrównania okresowych pomiarów sieci kontrolno-pomiarowej. Należy jednak pamiętać, że ze względu na różnice w kwestii bezbłądności punktów odniesienia nie jest moż-

liwe bezpośrednio porównywanie wartości przemieszczeń wyznaczonych klasycznie i przy użyciu metod estymacji odpornej. Dużą zgodność wykazują natomiast współczynniki istotności przemieszczeń wyznaczonych klasycznie i z wykorzystaniem metod estymacji odpornej.

Proponowane rozwiązanie, pomimo wspomnianych ograniczeń, umożliwia kontynuowanie monitorowania obiektu nawet wówczas, gdy sieć kontrolno-pomiarowa utraciła stabilność układu odniesienia i zawiodą klasyczne metody wyznaczania przemieszczeń.

## PIŚMIENNICTWO

- Bryś H., Przewłocki S., 1998. Geodezyjne metody pomiarów przemieszczeń budowli. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kamiński W., Wiśniewski Z., 1992. Analiza wybranych, odpornych na błędy grube, metod wyrównania obserwacji geodezyjnych. Cz. II Analiza. Geodezja i Kartografia, XLI, 3-4.
- Lazzarini T. i in., 1977. Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia. PPWK, Warszawa.
- Osada E., 2000. Niwelacja – program komputerowy do obliczeń geodezyjnych. Wersja edukacyjna dostępna na płycie CD dołączonej do podręcznika [Osada 2002].
- Osada E., 2002. Geodezja. Podręcznik elektroniczny w Mathcadzie 2001 i. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Wróblewska M., 2004. Geodezyjne pomiary osiadań dla ustalenia stanu bezpieczeństwa obiektów budowlanych na przykładzie budynków położonych przy ul. Traugutta we Wrocławiu. Praca magisterska, Akademia Rolnicza, Wrocław.

## APPLICATION OF ROBUST ESTIMATION METHODS TO GEODETIC SURVEYS OF BUILDINGS' VERTICAL DISPLACEMENTS

**Abstract.** The paper refers geodetic surveys of vertical displacements. The possibilities of wider use robust estimation methods were studied. Till now these methods were used only to identification of constant reference points. In the paper there are following methods: Huber's, Hampel's and linear (provided in geodetic software: „Niwelacja” [Osada 2000]) which were used to periodical surveys' final adjustment. Then the values and significances of displacements were calculated and they were compared with the results from classical method. The calculations were done for eight check surveys of residential buildings localized in Traugutta Street in Wrocław, which were flooded in 1997.

**Key words:** geodetic surveys of vertical displacements, robust estimation methods, buildings' settlement

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 28.10.2005