

KRZYSZTOF ZDANOWICZ*

GEODEZYJNY MONITORING DEFORMACJI
POWIERZCHNI HIPERBOLOIDALNYCH
CHŁODNI KOMINOWYCH

GEODETIC MONITORING OF HYPERBOLIC COOLING
TOWERS DEFORMATIONS

Streszczenie

Artykuł zawiera krótki przegląd stosowanych dotychczas geodezyjnych metod inwentaryzacji kształtu i pomiaru deformacji chłodni kominowych. Przedstawione zalety i wady poszczególnych metod rozpatrywane są w kontekście optymalizacji sposobu pomiaru. Wyniki przeglądu pozwoliły sformułować tezę będącą podstawą do podjęcia dalszych badań w tym kierunku.

Słowa kluczowe: chłodnie kominowe, pomiary geodezyjne, metody pomiaru, metoda otaczających stycznych

Abstract

The paper contains a brief overview of the methods used to inventory of surveying and measuring deformation of the shape of cooling towers. Advantages and disadvantages for each method are considered in the context of the optimization method of surveying. Results of the review helped formulate a thesis which is the basis for further research in this direction.

Keywords: cooling towers, geodesy, surveying, geodetic survey method

* Mgr inż. Krzysztof Zdanowicz, doktorant, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Pośród konstrukcji budowlanych chłodnie kominowe wyróżniają się kształtem, rodzajem konstrukcji i gabarytami. Wielkość, będąca głównym wyróżnikiem ich geometrii, ma podstawowe znaczenie dla wydajności chłodzenia bloków energetycznych elektrowni. Na ogół wysokość konstrukcji przekracza 120 m przy średnicy podstawy 90 m, ale wysokość najwyższych chłodni osiąga nawet 200 m (Elektrownia Niederaussem). Co więcej, przy tak znacznych wysokościach grubość płaszcza w najcieńszych miejscach wynosi zaledwie 12 cm–18 cm [1, 2].

Ze względów bezpieczeństwa, chłodnie hiperboloidalne są poddawane okresowym badaniom mających na celu wykrycie odkształceń i przemieszczeń konstrukcji. Dla realizacji prac pomiarowych stosowane są technologie, które można określić mianem „standardowych”, są bowiem stosowane od wielu lat. Wyjątkowy rozwój technologii pomiarowych, który ma miejsce w ostatnich dwóch dekadach, w przypadku badań chłodni kominowych jest widoczny tylko w zakresie aparatury. Metody opracowane kilka dekad temu są nadal stosowane, jakkolwiek nieporównywalnie efektywniej – dzięki lepszym instrumentom, modyfikacjom, a w fazie analitycznego opracowania danych i wizualizacji wyników – dzięki technikom komputerowym.

Specyficzne kształty i gabaryty chłodni kominowych mają bezpośrednio wpływ na deformacje i przemieszczenia konstrukcji budowlanej, pośrednio natomiast na program i zakres pomiaru geodezyjnego. Właściwości geometrii obiektu powinny decydować w pierwszej kolejności o dokładności pomiaru, w drugiej o lokalizacji miejsc pomiaru i wyborze metody interpretacji wyników. Jak jednak pokazują studia literatury przedmiotu, ten oczywisty związek nie jest w praktyce dostatecznie eksponowany. Mając na uwadze kontekst racjonalnego podejścia do optymalizacji procesu pomiarowego, autor konfrontuje w artykule stosowane metody geodezyjnego pomiaru kształtu i deformacji chłodni kominowych z uwagami i poglądami konstruktorów. Ich efektem są praktyczne wnioski i sugestie dotyczące optymalizacji sposobu pomiaru obiektów jakimi są chłodnie kominowe.

2. Zakres i program monitoringu

Zakres i program badań obiektu budowlanego z reguły określany jest na podstawie norm i instrukcji, a przede wszystkim specjalistycznych zaleceń konstruktora. W przypadku chłodni kominowych wypracowanie standardowych zaleceń co do zakresu i metody badań okazuje się trudne, co wynika z wyjątkowych wymiarów i kształtu obiektu. Jako podstawowe elementy opisujące stan obiektu rutynowo przyjmowane są elementy opisujące zachowanie się konstrukcji w sposób zgeneralizowany, tj. translacje i rotacje. Ten zakres pomiarów zdominował programy geodezyjne na wiele lat. Tymczasem uważne studia problemu oraz analiza poszczególnych przypadków pokazuje, że pomiar powinien być w większym stopniu uszczegółowiony, ukierunkowany na kształt powłoki, a przede wszystkim na jego lokalne zmiany. Praktyka oraz analiza raportów dotyczących katastrof chłodni wskazują na celowość różnicowania uwagi, a więc i stopnia dokładności w zależności od usytuowania badanego fragmentu płaszcza konstrukcji. Większej uwagi wymaga zwłaszcza pomiar dolnej części płaszcza, w tym przede wszystkim poziomego pasa powłoki w okolicy 1/3 wysokości obiektu [3]. Przemawia za tym także fakt, iż cały ciężar

chłodni kominowej spoczywa na dolnej części płaszcza, natomiast górny pierścień komina oraz słupy ukośne tworzą stałe podparcie wiotkiej powłoki w kierunku radialnym. Z opublikowanych raportów dotyczących katastrof chłodni kominowych w światowej energetyce wynika, że: „Wspólną cechą wszystkich awarii chłodni było to, że linia załamania przebiegała wzdłuż obszaru jednego cyklu z nielicznymi wyrwami, na wysokości około 30–40 m od dolnego brzegu powłoki” [4].

Wśród czynników mających wpływ na poprawność i efektywność pomiaru geodezyjnego specjalne znaczenie mają warunki zewnętrzne. Powinny być korzystne, a przede wszystkim stabilne, oddziałują bowiem zarówno na aparaturę geodezyjną, jak i konstrukcję.

Jednym z czynników mającym wpływ na konstrukcję są wahania temperatury. Wahania te wywołują zginanie i powstawanie w powłoce hiperboloidalnej naprężeń, jak również są przyczyną występowanie momentów zginających w słupach skośnych, co z kolei powoduje powstawanie dodatkowych zaburzeń u podstawy jej powłoki. Najniekorzystniejszy stan zachodzi latem, kiedy chłodnia nie pracuje. Nagrzana w słońcu powłoka żelbetowa w nocy ostyga. Zakres wahań temperatury ocenia się wówczas na 40°–50°C. Przy normalnej pracy chłodni pojawiają się różnice temperatur na grubości ścianki. Największa różnica temperatur wystąpi w porze zimowej, jej wielkość również oceniana jest na 40°–50°C. Podane różnice temperatur nawiązują do temperatury środowiska [1].

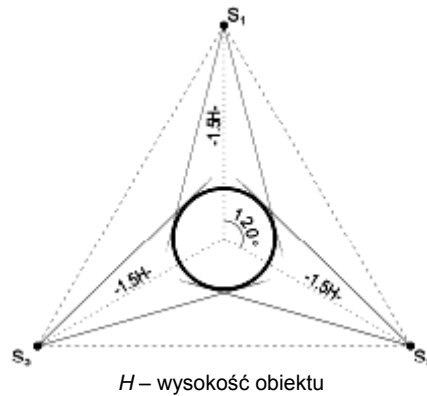
Trudno określić, jaki wpływ na wielkość odkształceń ma to, czy chłodnia pracuje czy też nie. W pomiarach okresowych warto jednak, aby zwrócić uwagę również na ten element dbając o stałość warunków zewnętrznych.

3. Geodezyjne metody pomiaru geometrii płaszcza chłodni

W praktyce geodezyjnej znanych jest kilka metod pomiaru chłodni kominowych. Różnią się one szczegółami procedur prac polowych oraz koncepcją opracowania. Najczęściej stosowana jest metoda otaczających stycznych, polegająca na obserwacji kierunków stycznych do konturów obiektu w arbitralnie wytypowanych przekrojach poziomych.

Pierwszy etap prac pomiarowych w tej metodzie obejmuje wyznaczenie osnowy i stanowisk obserwacji. Sieć obserwacyjna musi być oparta na takiej liczbie punktów, aby za pomocą stycznych można było obserwować całą powierzchnię chłodni. Zazwyczaj przyjmuje się 3–5 stanowisk. Należy je tak usytuować, aby kąty pionowe nie przekraczały 50° [5]. Stanowiska powinny być rozmieszczone wokół chłodni symetrycznie, w jednakowych odległościach od osi chłodni, w przybliżeniu $1,5 H$ (gdzie H jest wysokością obiektu). Wskazane jest, aby usytuowane były na kierunkach zawierających między sobą ten sam kąt. Spełnienie tych warunków pozwoli równomiernie otoczyć każdy z obserwowanych przekrojów celowymi stycznymi oraz ułatwi ich identyfikację w kolejnych pomiarach [6]. Przykładowe rozmieszczenie stanowisk przedstawiono na ilustracji rys. 1.

Pomiary kątowe prostych stycznych do konturów chłodni są wykonywane z każdego punktu odniesienia w dwóch położeniach lunety, przy czym celowanie w drugim położeniu realizujemy, nastawiając odczyt koła pionowego odpowiadający odczytowi pierwotnemu. Wysokość osi obrotu lunety określamy w nawiązaniu do punktów osnowy, dokonując odczytów z łąty niwelacyjnej przy poziomym ustawieniu lunety.



Rys. 1. Przykład rozmieszczenia stanowisk przy trzech punktach (S_1, S_2, S_3) sieci obserwacyjnej

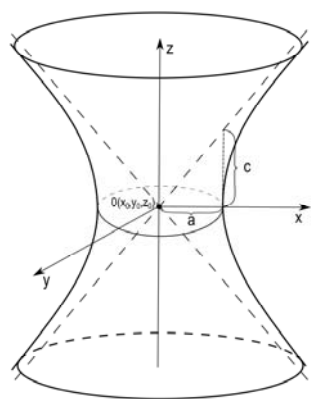
Fig. 1. Example of traverse network based on three survey points (S_1, S_2, S_3)

Wyniki pomiarów geodezyjnych są opracowane w jednym lub w dwóch etapach. W pierwszym przypadku, na podstawie obserwacji kierunków stycznych do konturów chłodni kominowej, metodą aproksymacji wyznaczane jest ogólne równanie powierzchni stopnia drugiego (kwadryki). Ponieważ z założenia chłodnia kominowa jest powierzchnią hiperboloidalną jednopowłokową mającą w płaszczyźnie poziomej przekrój kołowy, zatem równanie obserwowanej powierzchni hiperboloidy jednopowłokowej ma postać

$$\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{a^2} - \frac{(z-z_0)^2}{c^2} = 1$$

gdzie:

- (x_0, y_0, z_0) – współrzędne środka symetrii,
- a, c – parametry hiperboloidy (półoś właściwa i niewłaściwa).



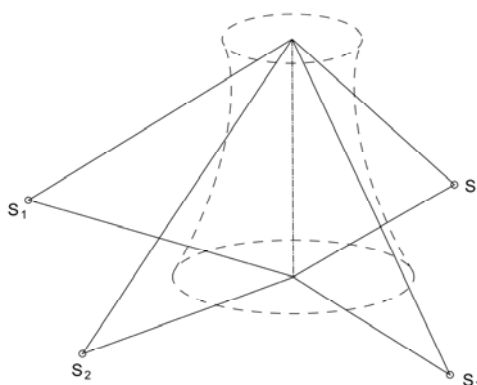
Rys. 2. Graficzne przedstawienie parametrów hiperboloidy

Fig. 2. Graphical representation of the parameters of the hyperboloid

W procesie opracowania w pierwszej kolejności wyznacza się przybliżone współrzędne środka symetrii i parametry hiperboloidy, a następnie wyniki pomiarów geodezyjnych aproksymuje się ogólnym modelem matematycznym powierzchni stopnia drugiego. Efektem opracowania są parametry modelu szukanej powierzchni, kąt odchylenia geometrycznej osi chłodni od linii pionu, azymut tego wychylenia oraz odchyłki radialne i styczne, które opisują punktowy stan zniekształceń badanej powierzchni chłodni kominowej w odniesieniu do jej wyaprosymowanej powierzchni. Odchyłki można wyznaczyć jedynie w obserwowanych przekrojach chłodni.

Szczegółowy opis sposobu wyznaczenia opisanych wielkości znajduje się w podanej literaturze [7].

Dwuetafowe opracowanie obserwacji, nazywane „metodą wcięć stożkowych”, charakteryzuje się tym, że nie wymaga identyfikacji tych samych punktów obiektu z różnych stanowisk obserwacyjnych. W pierwszym etapie określa się położenie geometryczne osi chłodni kominowej w geodezyjnym układzie współrzędnych. Określenie położenia osi głównej chłodni w przestrzeni sprowadza się do wyznaczenia równania tej osi przy założeniu, że jest ona linią prostą (krawędzią) powstałą w wyniku przecięcia się szeregu płaszczyzn przechodzących przez stanowiska obserwacyjne (rys. 3) [8].



Rys. 3. Sposób wyznaczenia osi chłodni kominowej będącej krawędzią płaszczyzn przechodzących przez stanowiska obserwacyjne

Fig. 3. Method to determine the axis of the cooling tower which is intersection of the planes passing through the position of observation

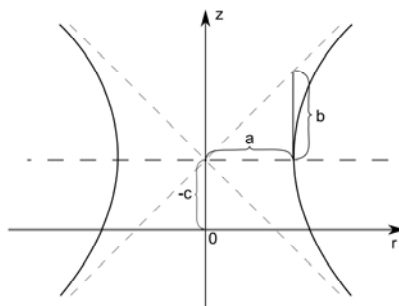
W drugim etapie budowany jest model geometryczny obiektu. Jednowłokowa hiperboloida obrotowa usytuowana w układzie współrzędnych $oxyz$, której oś obrotu pokrywa się z osią oz wyraża się równaniem postaci

$$\frac{r}{a^2} - \frac{(z-c)^2}{b^2} = 1 \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

gdzie:

r – promień poziomego (kołowego) przekroju hiperboloidy na wysokości z .

Interpretację geometryczną parametrów a , b oraz stałej c przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Graficzne przedstawienie parametrów a , b oraz stałej c równania hiperboloidy

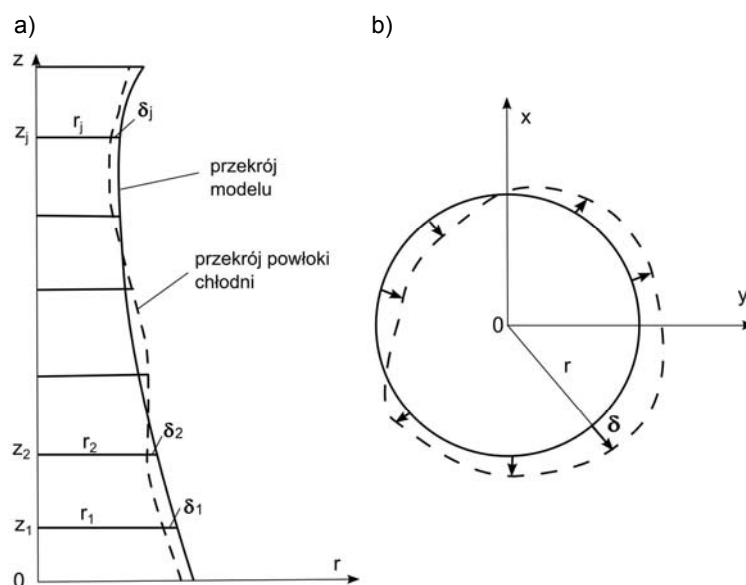
Fig. 4. Graphical representation of the parameters a , b and constant c of the hyperboloid

Aby równanie było adekwatne względem badanego obiektu, należy dokonać transformacji układu współrzędnych, przesuując jego początek do punktu (X_0, Y_0) , który jest punktem przebicia płaszczyzny poziomej układu współrzędnych przez pionową oś chłodni kominowej, a następnie pochylić oś układu współrzędnych tak, aby pokryła się z osią główną chłodni. Do nowego układu transformowane są współrzędne punktów sieci oraz zredukowane obserwacje kątowe. Wyrażone w nowym układzie współrzędne stanowisk obserwacyjnych oraz elementy orientacji linii celowych zostaną wykorzystane do aproksymacji parametrów a , b , c hiperboloidy, na podstawie których stworzony zostanie model chłodni. Wykonane obliczenia umożliwiają wyznaczenie wielkości odchylenia punktów powłoki od jej modelu geometrycznego oraz graficzne przedstawienie bryły chłodni w wybranych przekrojach pionowych i poziomych (rys. 5).

Inną metodą pomiaru chłodni kominowych jest metoda przestrzennych wcięć kątowych. Przestrzenne wcięcie jest konstrukcją łączącą kątowe wcięcie w przód z trygonometrycznym wyznaczeniem wysokości wcinanego punktu. W metodzie tej wykonuje się pomiar kątów poziomych i pionowych z przynajmniej dwóch lub trzech (co daje możliwość kontroli) stanowisk pomiarowych do zasygnalizowanych (np. tarcze celownicze, plamka lasera) lub charakterystycznych punktów na obiekcie. Bazę wcięcia lokalizuje się tak, aby kierunki wcinające przecinały się pod kątem mieszczącym się w granicach 50° – 150° . Wynik wcięcia jest najdokładniejszy, gdy boki wcinające przecinają się pod kątem 100° . Metoda ta pozwala uzyskać współrzędne punktów usytuowanych bezpośrednio na powierzchni płaszcza chłodni.

Skanowanie laserowe 3D, będące kolejną z metod, można opisać jako metodę przeniesienia kształtu rzeczywistych obiektów trójwymiarowych do postaci cyfrowej. Produktem skanowania jest chmura punktów reprezentująca badaną powierzchnię w postaci trójwymiarowego modelu. Zasada działania skanera laserowego jest analogiczna do działania tachimetru, gdzie przestrzenne współrzędne punktów wyznaczane są za pomocą pomierzonych kątów poziomych i pionowych oraz odległości. Skanery laserowe są urządzeniami w pełni zautomatyzowanymi, zakres czynności obserwatora sprowadza się do uściślenia zarysu mierzonego obszaru i rozdzielczości siatki. Gęstość obserwacji ustalana jest przez ustawienie określonego interwału kąтового lub odległościowego. W celu uzyskanie trój-

wymiarowego modelu obserwowanego obiektu przeprowadza się skanowanie z kilku stanowisk, zakładając na obiekcie punkty dostosowania, a następnie łączy się otrzymane chmury punktów w jedną całość.



Rys. 5. Graficzne przedstawienie odchyłeń mierzonych punktów od modelu geometrycznego: a) przekrój pionowy; b) przekrój poziomy (r – promień przekroju, δ – odchyłka promieniowa, z – wysokość mierzona od przekroju zerowego)

Fig. 5. Graphical representation of the deviations of the measured points from the geometric model: a) vertical section; b) horizontal section (r – radius of section, δ – radial deviation, z – height measured from the zero level)

Zbliżoną metodą do skanowania laserowego jest metoda biegunowa z wykorzystaniem tachimetrów bezzwierciadłanych. Zastosowanie bezzwierciadłanego pomiaru odległości pozwala na przeprowadzenie pomiaru klasyczną metodą biegunową, bez konieczności umieszczania na obiekcie znaczków celowniczych. Odległość mierzona jest, podobnie jak w skanerach laserowych, za pomocą wiązki lasera, co teoretycznie umożliwia pomiar dowolnego typu elementów z wyjątkiem źródeł światła i elementów przezroczystych. Danymi pozyskiwanymi podczas pomiaru są współrzędne biegunowe dające się przetworzyć na dowolny układ.

4. Ocena metod

Spośród wymienionych sposobów obserwacji kształtu chłodni kominowych, najczęściej stosuje się metodę otaczających stycznych, dzięki ekonomiczności i szybkości pomiaru wynikającej z braku konieczności sygnalizowania mierzonych punktów na obiekcie.

Główną jej wadę stanowi jednak dość niska dokładność. Metoda ta generuje wiele błędów, które w różnym stopniu mają wpływ na ostateczny wynik pomiarów.

Dokładność pomiarów wykonywanych tą metodą ogranicza m.in. błąd celowania spowodowany lokalnymi nierównościami powłoki, konstrukcyjnymi lub powstałymi przy torkretowaniu (np. w przypadku remontu chłodni) oraz wpływ refrakcji bocznej [9].

Identyfikacja tych samych przekrojów z różnych punktów osnowy jest niemożliwa, jeśli dla wszystkich stanowisk nie zostaną zachowane jednakowe odległości od chłodni. Niezachowanie jednakowych odległości wpłynie bezpośrednio na model hiperboloidy i wartości wyznaczonych odchyłek. Przykładowo, przy chłodni kominowej o parametrach.

$$H = 90 \text{ m}, \quad r_{\min} = 18 \text{ m}, \quad r_0 = 35 \text{ m}$$

gdzie:

- H – wysokość chłodni kominowej,
- r_{\min} – długość minimalnego promienia przekroju poziomego (długość półosi a hiperboloidy),
- r_0 – długość promienia na poziomie zero

zmiana wysokości przekroju w punkcie przegięcia względem przekroju zerowego przy niekorzystnym układzie stanowisk i kącie pochylenia lunety $\varphi = 40^\circ$ osiągnie wartość 2,4 m [6].

W metodzie otaczających stycznych źródłem błędu jest również samo opracowanie wyników.

Założenie, że obserwowana chłodnia kominowa jest powierzchnią obrotową o osi obrotu wzdłuż linii pionu, idealizuje rzeczywisty kształt obiektu, nie uwzględnia bowiem wpływu błędów wykonawstwa budowlanego oraz pomija lokalne deformacje płaszcza mogące mieć wpływ na stabilność obiektu.

W rzeczywistości żelbetowa powłoka chłodni nie jest geometrycznie powierzchnią regularną. Tworzą ją stożki ścięte o wysokości 1,20 m [10]. Generalizowanie powłoki modelem kwadryki wprowadza pewne przekłamanie. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że kształt hiperboli projektowej (realizowanej przez wykonawców) posiada powierzchnia wewnątrz płaszcza (niewidoczna dla mierzącego z zewnątrz), natomiast odchyłki radialne liczone są względem modelu wyaprosymowanego na podstawie obserwacji zewnętrznego płaszcza chłodni.

Przyjęto się, że styczna w układzie poziomym jest prostopadła do promienia przekroju konkretnych obserwacji, co powoduje, że metoda otaczających stycznych daje mniej dokładne wyniki w porównaniu z metodą wcięć przestrzennych. Obliczenia w tej metodzie opierają się na założeniu, że długość stycznej do rzeczywistej powłoki hiperboloidalnej jest równa długości stycznej do aproksymowanej powierzchni matematycznej hiperboloidy. W zależności od wielkości mierzonego obiektu, stopnia deformacji powłoki, wychylenia osi głównej chodni, jak również lokalizacji stanowisk pomiarowych, faktyczna długość stycznej jest dłuższa lub krótsza niż odległość określona w sposób przyjęty w tej metodzie, a wyznaczone współrzędne punktów styczności, jak również środka symetrii badanych przekrojów, stanowią jedynie pewne przybliżenie modelu płaszcza. Ponieważ praktycznie niemożliwe jest określenie wpływu tego założenia, nie można też przeprowadzić ścisłej analizy dokładnościowej uzyskanych parametrów kształtu i położenia chłodni kominowych badanych tą metodą. Wydaje się, że metoda otaczających stycznych nie jest odpowiednią

metodą do inwentaryzacji kształtu i badania deformacji powłok hiperboloidalnych chłodni kominowych [11, 12].

W metodzie wcięć stożkowych (opierającej się na metodzie otaczających stycznych) nie ma konieczności pomiaru tych samych przekrojów poziomych z różnych stanowisk, wobec czego na wyaprosymowany model nie ma wpływu niedokładność związana z ich identyfikacją. Nie eliminuje to jednak błędu celowania, a samo opracowanie wyników oparte na modelu hiperboloidy generuje podobne błędy, co opracowanie jednoetapowe. Jak już zostało wspomniane, jest to metoda ekonomiczna i szybka, jednak mało dokładna. Model geometryczny zbudowany na tej podstawie upraszcza rzeczywisty kształt chłodni.

Wysoką dokładnością wyznaczania współrzędnych punktów wcinanych charakteryzuje się metoda przestrzennych wcięć kątowych. Zaletą ta nie rekompensuje jednak listy wad, do której zaliczamy:

- konieczność sygnalizacji bardzo dużej liczby znaczków celowych na powłoce chłodni kominowej (nawet kilkaset);
- potrzebę założenia precyzyjnej osnowy odniesienia;
- wykonanie pracochłonnych wcięć przestrzennych, co czyni tę metodę nieekonomiczną.

Mierzone punkty można również sygnalizować za pomocą wiązki laserowej, mierząc kąty po wycelowaniu na plamkę. Ten sposób obarczony jest czynnikami wpływającymi niekorzystnie na pomiar zwiększając tym samym błąd celu:

1. Dokładność pomiaru determinują wymiary plamki laserowej. Ponieważ wielkość plamki zwiększa się wraz z odległością, przy długich celowych jednoznaczne zlokalizowanie środka plamki jest trudne. Przy długich celowych pojawiają się zwykle drgania (wibracje) i rozmycie konturów plamki.
2. Promień laserowy musi padać na powłokę pod kątem zbliżonym do prostego. Przy ostrych kątach padania plamka lasera wydłuża się, co utrudnia celowanie. Kształt plamki jest również deformowany przez lokalne nierówności powierzchni powłoki [13].
3. Współcześnie niektóre tachimetry ze względów bezpieczeństwa posiadają filtry pochłaniające promieniowanie laserowe, co uniemożliwia ten sposób oznaczania celu [14].

Należy pamiętać, że przy pomiarze chłodni kominowej trzeba zadbać o stałość warunków zewnętrznych (brak słońca, brak wiatru) oraz ich powtarzalność przy kolejnych pomiarach. Konieczność spełnienia powyższych warunków wydaje się eliminować metodę wcięć przestrzennych, a przynajmniej podważać pogląd o jej wysokiej wartości, ponieważ pomiar kilkuset punktów będzie trwał na tyle długo, że zmiany kształtu chłodni, podczas trwania pomiaru, przestaną być zanedbywane [3].

Korzystną alternatywę dla zaprezentowanych metod pomiaru daje zastosowanie skanerów laserowych. Technologia skanowania umożliwia w relatywnie krótkim czasie uzyskać bardzo duży zbiór danych w postaci chmury punktów reprezentującej mierzony obiekt. Szybkość pomiaru i rejestracji punktów waha się w granicach 5000–500 000 punktów na sekundę. Metoda ta dostarcza nam nieuporządkowane informacje w postaci chmury punktów, które aby były użyteczne, muszą zostać przetworzone w toku post-processingu. Jego pierwszym, bardzo istotnym etapem, jest odfiltrowanie danych nie należących do badanego obiektu. W porównaniu w pracami polowymi, przy dużej ilości danych, post-processing może okazać się bardzo czasochłonny.

Dokładność wyznaczenia położenia mierzonych punktów zależy od odległości obiektu od skanera, jak również koloru i rodzaju materiału, z którego wykonany jest obiekt. Aktualnie skanery laserowe są w stanie wyznaczyć pozycję z dokładnością 5 mm oraz

odległość z dokładnością 2 mm, przy zasięgu do 25 m i albedo¹ na poziomie 90%; dokładność ta maleje ze wzrostem odległości. Zasięg większości skanerów waha się w granicach 130–350 m, przy czym dokładność wyznaczenia pozycji przy odległości 100 m jest na poziomie 12 mm [15]. Należy tutaj wspomnieć, że są to dokładności, które osiąga instrument w warunkach podanych przez producenta, tj. przy braku mgły, zachmurzeniu i umiarkowanym świetle słonecznym z bardzo lekkim drganiem żaru powietrza. Pole widzenia skanerów jest bardzo szerokie, w poziomie 360°, natomiast w pionie 270°.

Użycie skanerów laserowych do pomiaru chłodni kominowych determinuje m.in.:

- zasięg, który może być niewystarczający przy pomiarze tego typu obiektów (przeciętna wysokość chłodni kominowej to ok. 120 m, natomiast najwyższa obecnie chłodnia kominowa w Polsce ma wysokość ok. 180 m);
- mała dokładność pomiaru przy długich celowych;
- cena urządzenia, kosztami przewyższające kilkukrotnie tachimetry skanujące.

Ograniczenia skanerów laserowych 3D rekompensują tachimetry bezzwierciadlane (skanujące). Do zalet metody biegunowej z wykorzystaniem tachimetrów bezzwierciadlanych (skanowanie tachimetryczne) należą:

- duża dokładność wyznaczania położenia mierzonych punktów oraz pomiaru odległości;
- zasięg wynoszący nawet kilkaset metrów;
- automatyzacja procesu pomiaru, dzięki wbudowanym serwomotorom i programowi skanowania (obserwator ustala obszar skanowania, zadaje poziomy oraz pionowy interwał siatki pomiarowej, a także może podać maksymalną odległość, po przekroczeniu której obserwacje zostaną odrzucone);
- szybkość pozyskiwania danych;
- tachimetry skanujące coraz częściej stanowią podstawowy sprzęt zespołu geodezyjnego;
- możliwość kontrolowania każdej procedury (w przeciwieństwie do skanerów 3D) oraz wysoka niezawodność technologii;
- opracowanie na podstawie uzyskanych danych modelu chłodni złożonego z siatki figur płaskich, która jest bliższa rzeczywistemu kształtowi chłodni powłoki niż model hiperboloidy.

5. Wnioski

W poprawnym określeniu geometrii hiperboloidalnych chłodni kominowych główna trudność wynika stąd, że deformacje obiektu zależą od czynników zmiennych w czasie. Do takich należy wpływ wiatru, temperatury otoczenia, nasłonecznienia itp. Prawdopodobne jest również, że niektóre czynniki uaktywniają się nieprzewidzianie. Jakkolwiek nie ma możliwości wyeliminowania wpływu tych zjawisk, to możliwe jest minimalizowanie ich oddziaływania poprzez zapewnienie stałych warunków pomiaru. Ważne jest również, aby metoda pomiaru była szybka i ekonomiczna. Takie kryteria spełnia metoda otaczających

¹ Albedo (białość) – to stosunek ilości promieniowania odbitego do padającego, jest parametrem określającym zdolność odbijania promieni przez daną powierzchnię (dla koloru białego albedo = 100, dla czerni = 0).

stycznych, w efekcie jest to metoda najczęściej stosowana w praktyce, jakkolwiek z punktu widzenia dokładności pomiaru należy ją ocenić negatywnie.

Modelowanie chłodni kominowej za pomocą bryły obrotowej i wyznaczenie odchyłek stycznych oraz promieniowych (radialnych) nie jest w stanie przedstawić nam rzeczywistego kształtu obiektu. Zgeneralizowanie kształtu chłodni pomija lokalne deformacje powierzchniowe, ukazując jedynie odchylenia punktowe powłoki. Ze względu na procedurę wyznaczania w metodzie otaczających stycznych przekrojów poziomych, co kilka metrów, metoda ta wskazuje jedynie występowanie wypukłości lub wklęsłości, nie obrazując samego przejścia pomiędzy nimi, co może okazać się niewystarczające. Z analizy opublikowanych raportów dotyczących katastrof chłodni kominowych wynika, że w chłodniach przed awarią obserwowano wyraźne linie brzegowe ostrych przejść wypukłości we wklęsłości [4]. Na zjawisko to wskazuje Zespół Politechniki Opolskiej. Zwraca się jednocześnie uwagę, że analizowana powłoka zmieniła swą strukturę z hiperboloidy na wielościenne. Zjawisko to zostało opisane już wcześniej w pracy Wianeckiego [16], który zauważa, że przejście powłoki hiperboloidalnej w powierzchnię zbliżoną do powierzchni wielościennej poprzedza utratę stateczności badanego modelu chłodni kominowej.

Alternatywą dla tradycyjnego podejścia jest skanowanie laserowe lub metoda biegunowa wykorzystująca tachimetry skanujące. Technologie te spełniają kryteria ekonomiczne i dokładnościowe, jakkolwiek nie bez zastrzeżeń. Na szczególną uwagę zasługuje możliwość automatyzacji w przypadku stosowania tachimetrów skanujących [17]. W szczególności opcja skanowania eliminuje bardzo kłopotliwą identyfikację tych samych przekrojów poziomych z różnych stanowisk pomiarowych, czynności, które przy stosowaniu metod tradycyjnych były uciążliwe i obniżały dokładność pomiaru.

Zestawienie zalet i wad przedstawionych metod oraz instrumentów pomiarowych pozwala sformułować tezę, że metoda biegunowa z wykorzystaniem tachimetrów skanujących jest najbardziej efektywną metodą inwentaryzacji kształtu i pomiaru deformacji chłodni kominowych.

Literatura

- [1] Ledwoń J., Golczyk M., *Chłodnie kominowe i wentylatorowe*, Warszawa 1967.
- [2] *Structural Design of Cooling Towers*, VGB-R610Ue, VGB PowerTech e.V., Essen 2005 (materiały Biura Studiów i Projektów Chłodni Energetycznych „Projchłod” Sp. z o.o. w Gliwicach).
- [3] Majde A., *Konwersatorium „Metody pomiarów chłodni kominowych” – przebieg, problemy, wnioski*, Przegląd Geodezyjny, nr 10, 1991, s. 13-15.
- [4] Abramek W., Centkowski J. i in., *Analiza bezpieczeństwa żelbetowych chłodni kominowych z uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych*, Inżynieria i Budownictwo, nr 6, 1993, s. 247-250.
- [5] Buśko M., *Metody geodezyjnych badań przemieszczeń i odkształceń budowli wieżowych*, Przegląd Geodezyjny, nr 8, 1991, s. 14-16.
- [6] Gocał J., *Zasady prowadzenia geodezyjnych badań hiperboloidalnych chłodni kominowych*, Zeszyty Naukowe AGH, Geodezja, z. 61, 1980, s. 63-85.

- [7] Czaja J., *Uogólniona metoda wyznaczania położenia i kształtu budowli obrotowych o powierzchni stopnia drugiego*, Geodezja i Kartografia, nr 3, 1984, s. 105-131.
- [8] Kadaj R., *Metodyka geodezyjnej inwentaryzacji budowli o kształcie jednopowłokowej hiperboloidy obrotowej*, Zeszyty Naukowe AGH, nr 377, Geodezja z. 23, 1973, s. 65-87.
- [9] Kasprzycki K., *Metody wyznaczania rzeczywistego kształtu przestrzennych konstrukcji powłokowych*, Przegląd Geodezyjny, nr 7, 1978, s. 217-221.
- [10] Bernasik J., Mikrut S., *Fotogrametria Inżynierska*, Kraków 2003.
- [11] Preweda E., Jasińska E., *A Few Comments on Determining the Shapes of Hyperboloid Cooling Towers by the Means of Ambient Tangents Method*, Geodezja, t. 10, z. 1, 2004, s. 19-29.
- [12] Preweda E., *System pomiaru, obliczeń i wizualizacji zmian geometrycznych obiektów powłokowych o powierzchni stopnia drugiego*, rozprawa doktorska, AGH, Kraków 1994.
- [13] Kasprzycki K., *Metody i dokładność geodezyjnego tyczenia i kontroli kształtu budowli powłokowych*, rozprawa doktorska, AGH, Kraków 1981.
- [14] Lenda G., *Zastosowanie funkcji sklepanych w zautomatyzowanym procesie geodezyjnej kontroli kształtu powierzchni obiektów budowlanych*, rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2005.
- [15] <http://www.leica-geosystems.com/>; <http://www.trimble.com/>; <http://www.topcon-positioning.eu/>; aktualizacja 20.07.2010.
- [16] Wiancki J., *Stateczność obrotowej powłoki hiperboloidalnej obciążonej osiowo-symetrycznie na brzegach*, rozprawa doktorska, IPPT, Warszawa 1962.
- [17] Toś C., Wołski B., Zielina L., *Tachimetry skanujące. Aplikacje technologii skanowania w budowie szczegółowych modeli obiektów inżynierskich*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2010.