

**AUTOMATYZACJA PROCESU POMIARU OBJĘTOŚCI ZBIORNIKÓW
CYLINDRYCZNYCH W OPARCIU O NORMĘ ISO-7507**

**THE AUTOMATION OF CYLINDRICAL TANK VOLUME MEASUREMENT
PROCESS BASED ON ISO -7507 STANDARD**

Rafał Kocierz

Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa, Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: zbiorniki cylindryczne, geomatyka, automatyzacja, sterowanie on-line

STRESZCZENIE: Podczas budowy i eksploatacji rafinerii naftowych występuje problem określania objętości zbiorników służących do magazynowania ropy naftowej oraz jej ciekłych produktów pochodnych. W tym celu Główny Urząd Miar wykorzystuje aktualnie prostą lecz mało wygodną metodę opartą na pomiarze obwodu taśmą mierniczą. Jest to jednak metoda którą można jedynie wykorzystać dla zbiorników o małych zniekształceniach od kształtu cylindrycznego oraz pozwala jedynie określić objętość, nie dając jednak żadnych informacji o jego deformacjach oraz wychyleniach. Jedną z bardziej kompleksowych technologii pomiarowych umożliwiających wyznaczenie objętości i deformacji zbiorników na paliwa płynne oraz mającą oparcie w normie ISO-7507 jest metoda z wykorzystaniem tachimetru bezzwierciadlanego. Jest ona uniwersalna, nowoczesna, precyzyjna a jednocześnie szybka. Wymaga jednak wielkiej staranności podczas pomiaru i w przypadku łatwo odkształcalnych den zbiorników jest trudna do zastosowania w klasycznej postaci. Wszystkie te niedogodności mogą zostać wyeliminowane gdy zostanie wykorzystany zrobotyzowany tachymetr bezzwierciadlany wraz z specjalistycznym oprogramowaniem umożliwiającym pełną automatyzację procesu pomiarowego oraz obliczeniowego.

1. WSTĘP

Powszechnie na całym świecie, do przechowywania ropy naftowej i innych ciekłych produktów ropopochodnych stosuje się duże cylindryczne zbiorniki o pionowej osi obrotu (Rys. 1). Tego typu obiekty mają objętości nawet do 300 000 m³ przy obwodzie dochodzącym do ponad 300 m. Przed właściwym napełnianiem zbiornika musi się odbyć proces jego kalibracji. Jednym z parametrów jakie trzeba określić jest objętość faktyczna zbiornika. Zgodnie z normą ISO-7507 (Międzynarodowa Organizacja Standaryzacji, 2003) kalibrację zbiorników można wykonać następującymi metodami:

- pomiar obwodów taśmą mierniczą
- prostej odniesienia z wykorzystaniem pionownika optycznego
- wcięć przestrzennych

- z wykorzystaniem tachymetru bezzwierciadlanego położonego wewnątrz zbiornika
- z wykorzystaniem tachymetru bezzwierciadlanego położonego na zewnątrz zbiornika



Rys. 1. Zbiornik na biopaliwa w rafinerii Trzebinia

Aktualnie instytucją upoważnioną do kalibracji zbiorników jest Główny Urząd Miar. Wykorzystuje on najprostszą metodę pomiaru opartą na pomiarze obwodów poszczególnych poziomów taśmą mierniczą. Jest to metoda dokładna lecz żmudna, nie możliwa do automatyzacji oraz dostarczająca małą ilość informacji dodatkowych (np. o wychyleniu zbiornika).

Zdaniem autora najwygodniej jest wykonać pomiar z wnętrza zbiornika wykorzystując zrobotyzowany tachimetr bezzwierciadlany. Największymi zaletami tej metody są:

- stosunkowo łatwy pomiar;
- duże możliwości automatyzacji procesu pomiarowego;
- z zebranych danych można wyznaczyć objętość zbiornika, kształt osi głównej zbiornika, deformacje wewnętrznej powłoki zbiornika w przekrojach pomiarowych.

Do wad należy niewątpliwie zaliczyć sam koszt zakupu zmotoryzowanego tachymetru bezzwierciadlanego oraz specjalistycznego oprogramowania sterującego i przetwarzającego.

2. AUTOMATYZACJA PROCESU POMIAROWEGO

Współczesne instrumenty pomiarowe pozwalają na rozwiązanie różnorodnych problemów pomiarowych. Jedną z przydatniejszych funkcji jest automatyczny skanowanie powierzchni w ustalonych oczkach siatki. Przy pierwszym spojrzeniu może się wydawać, że jest to idealna funkcja dla potrzeb pomiaru zbiorników cylindrycznych. Niestety są one przeznaczone głównie do skanowania powierzchni płaskich i nie pozwalają na rozłożenie równomiernej siatki na obiektach o pewniej krzywiznie. Dodatkowo, przy pomiarach zbiorników, niezbędne jest rozmieszczenie punktów siatki pomiarowej w dość szczególnych miejscach, na co wbudowane oprogramowanie nie pozwala. Zdając sobie sprawę ze wszystkich ograniczeń możliwe jest sterowanie ręczne pomiarem (co z pewnych względów nie zawsze może mieć miejsce oraz jest bardzo czasochłonne) lub można stworzyć własne oprogramowanie sterujące.

Każda firma produkująca instrumenty geodezyjne opracowała własny metody umożliwiające użytkownikowi na jego programowanie. Niektóre instrumenty mają możliwość wgrania programów napisanych dla systemu operacyjnego DOS (np. Topcon GTS-700), inne wymagają pisania programów w konkretnym języku programowania, a najprostsze mają jedynie możliwość sterowania za pośrednictwem zewnętrznych komputerów polowych.

Zgodnie z zaleceniami normy instrument pomiarowy musi spełniać następujące wymogi dokładnościowe:

- rozdzielczość pomiaru kąta równa bądź lepsza od $2''$;
- powtarzalność pomiaru kąta musi być równa lub lepsza od $\pm 5''$;
- niepewność pomiaru kąta równa lub mniejsza od $\pm 10''$;
- dokładność odczytu odległości równa lub większa od 1 mm;
- powtarzalność oraz niepewność pomiaru odległości powinna być równa lub lepsza od ± 2 mm.

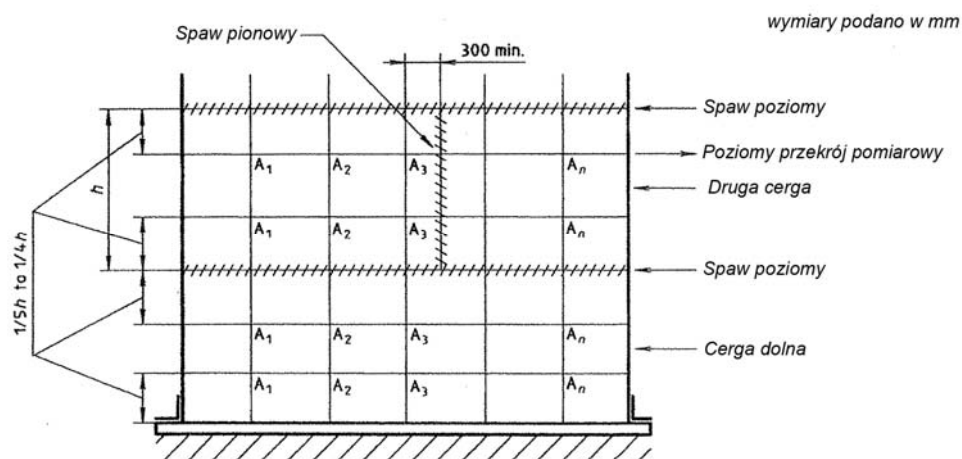
Wszystkie z powyższych wymagań spełnia wybrany instrument Leica TCRA1102 (Rys. 2). Tachymetry tej serii można sterować automatycznie z wykorzystaniem oprogramowania wewnętrznego napisanego samodzielnie w języku GeoBASIC (nowa seria TPS1200 ma możliwość programowania w języku GeoC++) lub za pomocą oprogramowania zewnętrznego (np. zainstalowanego na komputerze przenośnym) łączącego się z instrumentem z wykorzystaniem transmisji szeregowej (przy pomocy odpowiedniego kabla lub transmisji bluetooth).

Wybierając wariant oprogramowania zewnętrznego należy zdecydować o wyborze protokołu. Programista ma do wyboru stary standard o nazwie GSI (*Geo Serial Interface*) lub nowszy GeoCOM, bazującym na protokole RPC (*Remote Procedure Call*) firmy SUN Microsystems (Leica Geosystems, 2004).

W przypadku rozpatrywanego zagadnienia zdecydowano się na napisanie zewnętrznego oprogramowania w języku *Object Pascal* (Reisdorph, 2001) ponieważ dzięki niewielkim zmianom będzie można go dostosować do sterowania praktycznie każdym instrumentem zmotoryzowanym (niezależnie od producenta). Program będzie miał za zadanie ustanowić transmisję pomiędzy komputerem a instrumentem oraz przesyłanie poleceń GeoCOM na które instrument będzie odpowiadał przysyłając z powrotem niezbędne dane (Rys. 3).

3. PROJEKTOWANIE SIATKI POMIAROWEJ

Zgodnie z zapisami normy, na każdej cardze należy zaprojektować dwa przekroje poziome odległe od spawów pionowych o $1/5$ (lub $1/4$) jej wysokości. Na przekrojach poziomych należy zaprojektować zbiór punktów z narzuceniem warunku, iż odległość między linią spawu pionowego, a projektowanym punktem nie może być mniejsza od 300 mm (Rys. 4).

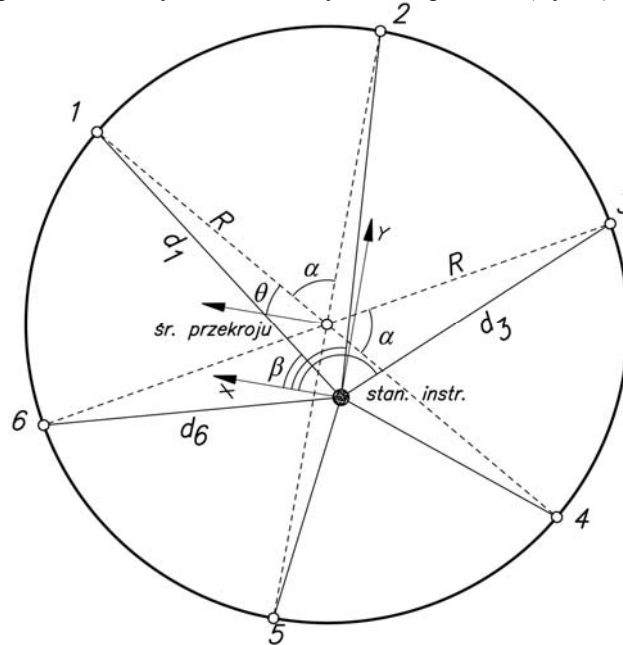


Rys. 4. Rozmieszczenie siatki pomiarowej na tle spawów

Tabela 1. Minimalna liczba punktów na przekroju poziomym

Obwód zbiornika, C [m]	Minimalna liczba punktów pomiarowych
$C \leq 50$	8
$50 < C \leq 100$	12
$100 < C \leq 150$	16
$150 < C \leq 200$	20
$200 < C \leq 250$	24
$250 < C \leq 300$	30
$300 < C$	36

Oprócz warunków przedstawionych powyżej, norma podaje również minimalną liczbę punktów jaka powinna być równomiernie rozmieszczona na każdym przekroju poziomym (Tabela 1). Na podstawie znajomości współrzędnych punktu środka geometrycznego zbiornika oraz promienia można wyznaczyć wartości kątów poziomych i pionowych na które należy naprowadzić tachymetr w celu wykonania pomiaru (Rys. 5).



Rys. 5. Wyznaczenie miar do punktów przekroju

$$\alpha = \frac{2\pi}{n} \quad (1)$$

$$X_i = X_0 + R \cdot \cos[\theta + (i-1) \cdot \alpha] \quad (2)$$

$$Y_i = Y_0 + R \cdot \sin[\theta + (i-1) \cdot \alpha] \quad (3)$$

$$\beta_i = \arctan \frac{Y_i - Y_{s \tan}}{X_i - X_{s \tan}} \quad (4)$$

$$d_i = \sqrt{(X_i - X_{s \tan})^2 + (Y_i - Y_{s \tan})^2} \quad (5)$$

$$\varphi_i = \arctan \frac{Z_i - Z_{s \tan}}{d_i} \quad (6)$$

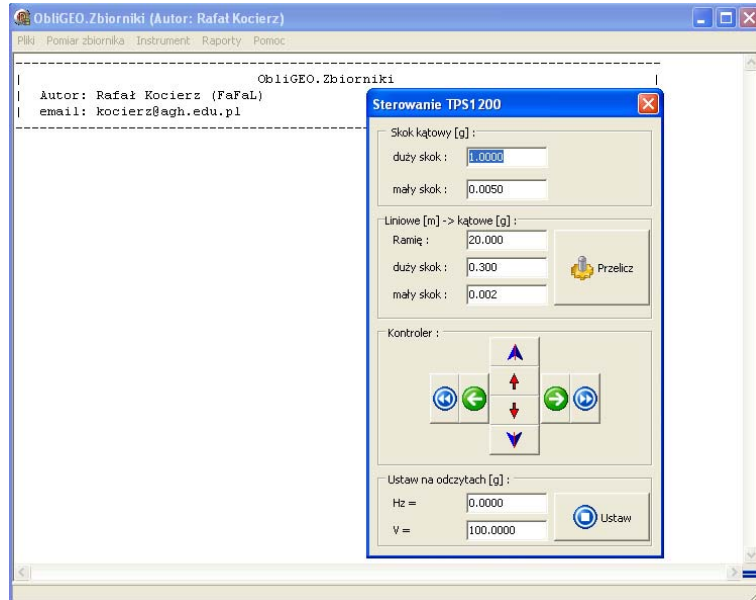
gdzie

Θ	- przesunięcie kątowe punktów na obwodzie, dobrane tak aby zachować minimalną odległość od spawów pionowych
α	- odległość kątowna między punktami pomiarowymi
X_i, Y_i, Z_i	- współrzędne przestrzenne punktów na przekroju
X_0, Y_0	- współrzędne środka geometrycznego zbiornika
$X_{stan}, Y_{stan}, Z_{stan}$	- współrzędne przestrzenne instrumentu
β_i	- azymut celowej do punktu pomiarowego
φ_i	- kąt pionowy do punktu pomiarowego
d_i	- odległość pozioma do punktu na obwodzie zbiornika

W projektowaniu siatki pomiarowej należy z dużą uwagą wyznaczyć wartość kąta Θ . Najbardziej optymalnym wariantem będzie jeśli wartość tego kąta zostanie obliczona przez minimalizację liczby punktów znajdujących się w strefie buforowej spawów pionowych.

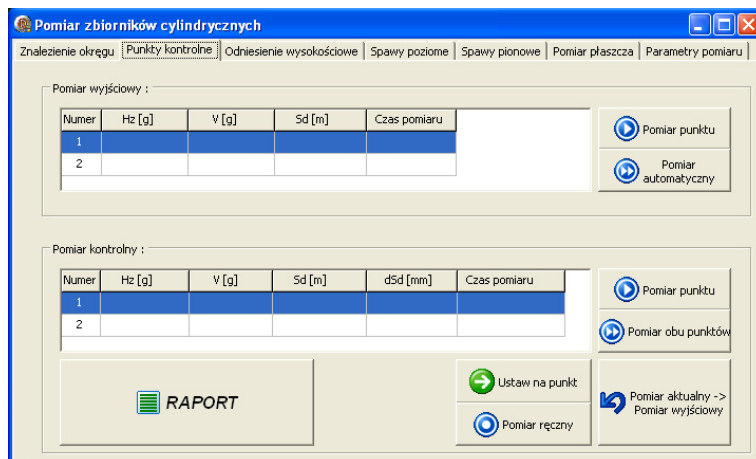
4. PRZEBIEG POMIARU

Wewnątrz zbiornika tachymetr rozstawiamy na specjalnej podstawie dzięki której instrument będzie stał stabilnie. Po wstępnych czynnościach należy ustawić prędkości transmisji danych oraz włączyć tryb pracy GeoCOM. Na wewnętrznej powłoce mierzonego obiektu należy rozmieścić na wysokości osi celowej dwa punkty (tak aby kąt między stanowiskiem a tymi punktami wynosił w przybliżeniu 90°) których celem będzie kontrola stabilności instrumentu (np. naklejane folie dalmierze). Ponieważ podłoga w zbiornikach tego typu łatwo się odkształca, należy odejść z komputerem od instrumentu i usiąść przy krawędzi zbiornika tak aby ruchy ciała nie powodowały zmiany położenia instrumentu. Dzięki temu że instrument jest zmotoryzowany, użytkownik nie musi sterować pracą instrumentu przez bezpośrednie celowanie, ale można włączyć plamkę lasera i naprowadzać ją na kolejne punkty za pomocą zewnętrznego kontrolera lub funkcji jakie zostały wbudowane w oprogramowanie automatyzujące proces pomiaru (Rys. 6).



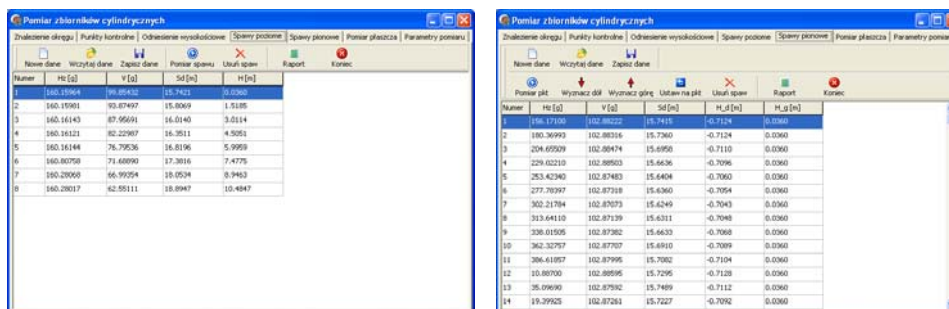
Rys. 6. Ręczne naprowadzanie instrumentu z wykorzystaniem zewnętrznego oprogramowania

Przy pomocy funkcji sterowania serwomotorami instrumentu wykonujemy nacelowania na punkty kontrolne znajdujące się na zbiorniku. Pomiar należy powtórzyć po 15 minutach i skontrolować różnice wartości odległości. Jeśli różnice są większe od dokładności pomiaru należy poprawić stabilność tachymetru. Po nauczeniu programu położenia punktów kontrolnych (np. folii dalmierznych) program może dokonywać automatycznej inspekcji punktów bez ingerencji użytkownika (Rys. 7).



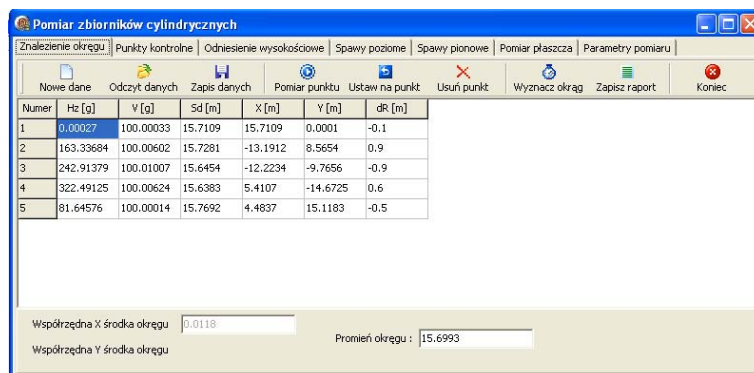
Rys. 7. Pomiar punktów kontrolnych

Po kontroli stabilności należy wskazać programowi punkty znajdujące się na spawach (Rys. 8). Najwygodniej jest zacząć pomiary od punktów znajdujących się na spawach poziomych, a następnie wykonujemy pomiar punktów na spawach pionowych.



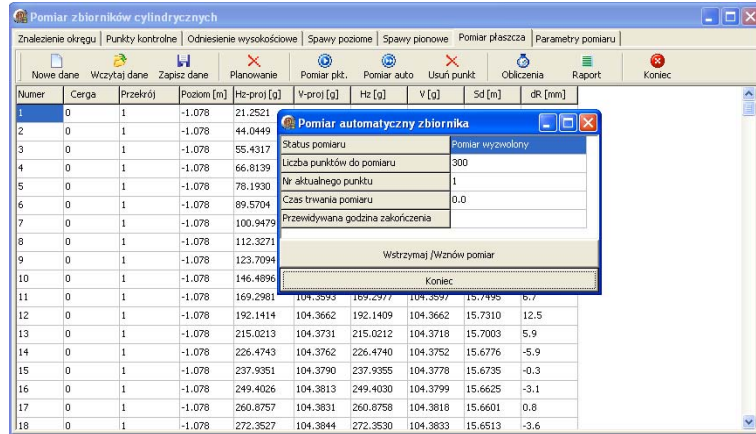
Rys. 8. Definicja spawów w programie

Do zaprojektowania siatki punktów pomiarowych niezbędna jest jeszcze znajomość położenia środka zbiornika względem instrumentu oraz przybliżona wielkość promienia. Parametry te można wprowadzić ręcznie do programu lub wyznaczyć automatycznie na podstawie pomiaru minimum trzech punktów rozmieszczonych w przybliżeniu równomiernie na obwodzie zbiornika (Rys. 9). W przypadku występowania obserwacji nadliczbowych, szukane parametry wyznaczane są według zasady najmniejszych kwadratów z wykorzystaniem procedury zaproponowanej przez Wędzono [Wędzony, 1994].



Rys. 9. Wyznaczenie przybliżonych parametrów zbiornika

Mając zebrane wszystkie niezbędne dane, można przystąpić do wygenerowania siatki pomiarowej oraz uruchomienie procedury pomiarowej (Rys. 10). Po pomiarze każdej cergi instrument wstrzymuje pomiar i czeka na pomiar kontrolny stabilności stanowiska oraz wznowienie procedury pomiarowej dla następnej cergi. Na zakończenie przeprowadzić należy pomiar punktów kontrolnych.



Rys. 10. Automacyjny pomiar wygenerowanej siatki punktów

5. OPRACOWANIE WYNIKÓW

Na podstawie zebranych obserwacji kątowych i liniowych możliwe jest obliczenie współrzędnych przestrzennych każdego punktu pomiarowego. Dzięki znajomości współrzędnych, każdy przekrój aproksymuje się równaniem okręgu w postaci 0:

$$\sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2} = R + v_i \quad (7)$$

Metodą najmniejszych kwadratów zostają wyznaczone współrzędne X_0 , Y_0 środka przekroju oraz promień zbiornika R . Błąd aproksymacji σ_0 0 jest wskaźnikiem deformacji zbiornika na analizowanym przekroju pomiarowym.

$$\sigma_0 = \pm \sqrt{\frac{\sum vv}{n-3}} \quad (8)$$

Do obliczenia objętości zbiornika niezbędna jest znajomość powierzchni na każdym z przekrojów pomiarowych. Jednym z sposobów na jej wyznaczenie jest wykorzystanie wartości estymowanej wartości promienia zgodnie z wzorem 0:

$$P_i = \pi \cdot R^2 \quad (9)$$

Dodatkowo, dzięki wyznaczonym współrzędnym środków przekrojów, możliwe jest również wyznaczenie wychylenia osi zbiornika na każdym z pomierzonych przekrojów, co może być istotne przy pomiarach odbiorczych oraz dla potrzeb jego remontów. Cenną informacją może być również wykres wychyleń każdego przekroju pionowego, jaki można wygenerować na podstawie współrzędnych punktów, które go tworzą.

Wynikiem końcowym pracy programu jest raport zawierający wyznaczone parametry. Jego postać przedstawia poniższy listing fragment raportu z pomiaru testowego zbiornika Z104.

```

-----
                                ObligeO.Zbiorniki
Autor: Rafał Kocierz (FaFaL)                                ver.1.0
email: kocierz@agh.edu.pl                                  tel.kom. +48 697 467920
-----

CERGA : 7          PRZEKRÓJ : 14          POZIOM [m] : 10.185
-----
Numer | X [m] | Y [m] | H [m] | R [m] | dr [mm] | Uwagi
-----
261 | 14.844 | 5.148 | 10.171 | 15.665 | 4.5 |
262 | 12.113 | 10.036 | 10.169 | 15.673 | 13.1 |
263 | 10.099 | 11.988 | 10.129 | 15.615 | -44.8 |
264 | 7.835 | 13.643 | 10.162 | 15.672 | 11.8 |
265 | 5.299 | 14.860 | 10.189 | 15.717 | 56.8 |
266 | 2.564 | 15.509 | 10.151 | 15.664 | 3.4 |
267 | -0.234 | 15.700 | 10.141 | 15.651 | -9.8 |
268 | -3.019 | 15.396 | 10.135 | 15.645 | -15.5 |
269 | -5.697 | 14.585 | 10.118 | 15.622 | -38.7 |
270 | -10.454 | 11.676 | 10.138 | 15.655 | -5.8 |
271 | -13.882 | 7.267 | 10.151 | 15.673 | 12.5 |
272 | -15.531 | 1.928 | 10.155 | 15.675 | 14.5 |
273 | -15.187 | -3.651 | 10.152 | 15.662 | 1.4 |
274 | -14.293 | -6.312 | 10.162 | 15.674 | 13.9 |
275 | -12.927 | -8.766 | 10.165 | 15.674 | 13.4 |
276 | -11.152 | -10.945 | 10.174 | 15.684 | 23.4 |
277 | -8.979 | -12.722 | 10.144 | 15.632 | -28.6 |
278 | -6.546 | -14.113 | 10.137 | 15.617 | -43.1 |
279 | -3.917 | -15.092 | 10.162 | 15.650 | -10.2 |
280 | -1.150 | -15.592 | 10.189 | 15.688 | 27.6 |
-----
Współrzędne środka przekroju oraz promień średni
-----
X0 [m] | Y0 [m] | H0 [m] | R [m] |
-----
0.031 | 0.051 | 10.155 | 15.660 |
-----
Powierzchnia przekroju poziomego (średni promień) [m2] : 770.464
Powierzchnia przekroju poziomego (met. interwalowa) [m2] : 770.947
Obwód przekroju poziomego (met. interwalowa) [m] : 98.428
-----

```

Dodatkowo, wszystkie informacje są prezentowane w postaci rysunku przestrzennego zapisywanego przez program w formacie DXF. Dzięki temu użytkownik ma możliwość wygenerowania dowolnego raportu graficznego na podstawie zebranych informacji co do kształtu i wymiarów obserwowanego zbiornika.

6. WNIOSKI

Za popularnością metody opasania taśmą przemawia jej prostota w pomiarze oraz opracowaniu wyników. Powyższe cechy przestają mieć tak duże znaczenie, ponieważ dzięki opracowanemu oprogramowaniu metoda z wykorzystaniem tachymetru elektronicznego sprowadza się do ustawienia tachymetru i nauczenia program gdzie znajdują się spawy pionowe i poziome. Cała siatka pomiarowa zostanie wygenerowana automatycznie, a pomiar wraz z opracowaniem wyników będzie wykonany praktycznie bez udziału człowieka. Dodatkowymi zaletami prezentowanej metody jest dostarczenie znacznie szerszej informacji, a nie tylko danych umożliwiających wyznaczenie objętości analizowanego zbiornika. Stają się zbyteczne dodatkowe pomiary wyznaczające

wychylenie zbiornika wykonywane przeważnie z zewnątrz, a wymagające znacznie większych nakładów pracy.

7. LITERATURA

Leica Geosystems. *GeoCOM Reference Manual*. Heerbrugg, 2004.

Międzynarodowa Organizacja Standaryzacji. *ISO 7507 Petroleum and liquid petroleum products - Calibration of vertical cylindrical tanks*. Genewa, 2003.

Reisdorph, Kent. *Delphi 6 dla każdego*. Gliwice: Helion, 2001.

Wędzony, Józef. *Przykłady uzupełniające nauczanie rachunku wyrównawczego*. Kraków: AGH, 1994.

Praca została wykonana w ramach zadania badawczego AGH o nr 11.11.150.005

THE AUTOMATION OF CYLINDRICAL TANK VOLUME MEASUREMENT PROCESS BASED ON ISO -7507 STANDARD

KEY WORDS: cylindrical reservoirs, geomatics, automation, on-line controlling

SUMMARY: The problem of volume determination of cylindrical tanks occurs during their construction phase, as well as in the course of operating them. Currently, the Central Office of Measures uses a simple but little convenient strapping method to solve this problem. This method can be used just for tanks with small shape distortions and enables to determine only the volume of the tank itself without giving any information about the tank deformations or deflections. One of more complex measuring technologies, having support in ISO 7507 standard and enabling the determination of volume and deformation of cylindrical tanks is the internal electro-optical distance ranging method. This method is universal, modern, precise and fast. It requires, however, a great care during measurement and, in the case of tanks with easily deformable bottoms, it is hard to use in a classic way. All of those inconveniences can be eliminated when a robotic reflectorless total station will be used along with the specialised software enabling the automation of measuring as well as computational process

Mgr inż. Rafał Kocierz
e-mail: kocierz@agh.edu.pl
tel. +12 6172299