

Radosław Rutkowski¹⁾

BAZY POMIAROWE W PROCESIE KONTROLI JAKOŚCI WYMIAROWEJ WIELKOGABARYTOWYCH KONSTRUKCJI STALOWYCH

Streszczenie: Artykuł porusza zagadnienia projektowania systemów kontroli wymiarowej w procesie budowy wielkogabarytowych konstrukcji stalowych. Skupiono się głównie na zagadnieniach osnów oraz baz pomiarowych. W artykule zaprezentowano oryginalne rozwiązanie z zakresu baz pomiarowych w znacznym stopniu usprawniający procesy pomiarowe.

Słowa kluczowe: wielkogabarytowe konstrukcje stalowe, jakość wymiarowa, pomiary, budownictwo okrętowe, technologia, metrologia, osnowy pomiarowe.

WSTĘP

Jak wiadomo podstawowym celem prac kontrolno-pomiarowych prowadzonych w procesie budowy kadłuba jest badanie kształtów i wymiarów elementów konstrukcyjnych oraz wyznaczanie ich położenia w przyjętym układzie współrzędnych. W celu umożliwienia realizacji tych zadań niezbędne jest zakładanie osnów montażowych, definiowanie układów współrzędnych oraz nanoszenie na elementach konstrukcyjnych baz pomiarowych. Są to zagadnienia znane jednak w budowie konstrukcji wielkogabarytowych sprawiają one spore trudności związane głównie z bazami pomiarowymi nanoszonymi na budowanej konstrukcji. Bazom tym poświęcono najwięcej uwagi w niniejszym artykule.

W celu zachowania spójności opracowania w artykule przedstawiono podstawowe wiadomości z zakresu osnów montażowych stosowanych w budownictwie okrętowym. Są one ściśle powiązane z zagadnieniami baz pomiarowych.

Autor opracowania zajmuje się konstrukcjami wielkogabarytowymi w przemyśle okrętowym, w związku z tym opisywane zagadnienia odnoszą się do obiektów okrętowych.

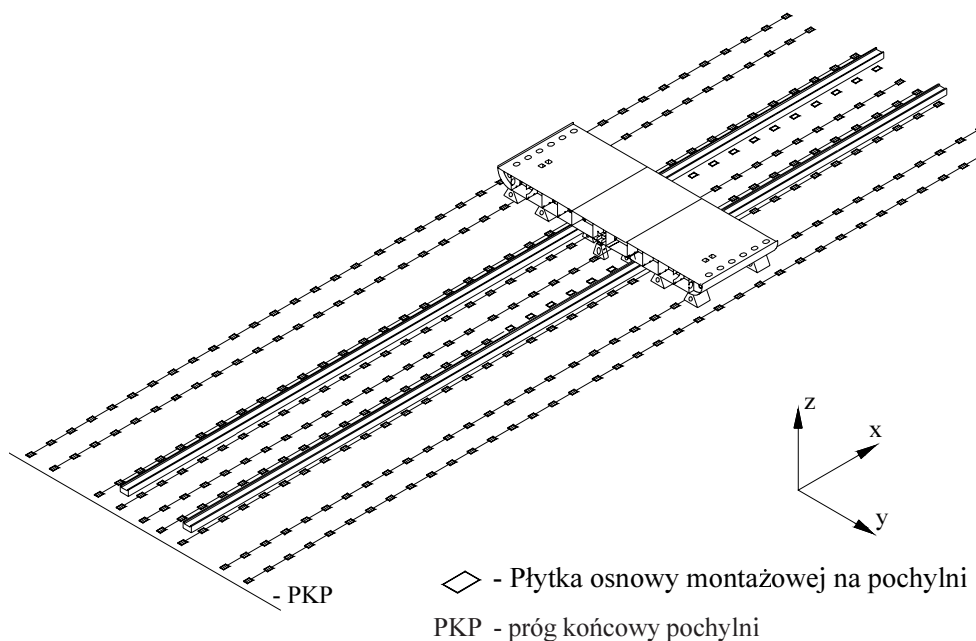
¹⁾ Wydział Techniki Morskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

OSNOWY MONTAŻOWE STOSOWANE W BUDOWNICTWIE OKRĘTOWYM

Ze względu na wielkość obszaru, na którym odbywa się montaż oraz gabarytów samego kadłuba statku, w celu realizacji prac kontrolno-pomiarowych zakładane są osnowy montażowe na placu budowy (pochylni lub doku) oraz na konstrukcji (kadłubie statku).

Osnowa realizacyjna zakładana na pochylni związana jest z jej układem współrzędnych $Oxyz$. Jest ona wykorzystywana zarówno przy pomiarach wykonywanych w płaszczyznach $\{xy\}$ jak i w kierunkach osi $\{z\}$ (jest siecią przestrzenną). Punkty osnowy reprezentowane są przeważnie za pomocą płytek ze stali nierdzewnej.

Ogólny schemat osnowy montażowej pochylni zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Osnowa montażowa pochylni

Osnowę na pochylni można zakładać jako sieć:

- jednorodną (jednolity układ obserwacyjny),
- złożoną z sieci głównej i szczegółowej (początkowo zakładana jest sieć w formie dużych prostokątów, a następnie jest ona zagęszczana).

Założenie oraz kontrola sieci jednorodnej możliwa jest tylko na placu budowy „wolnym” od przeszkód. Dla drugiego rodzaju sieci „wolny” obszar budowy niezbędny jest tylko przy zakładaniu sieci głównej, której zagęszczanie realizować można etapami

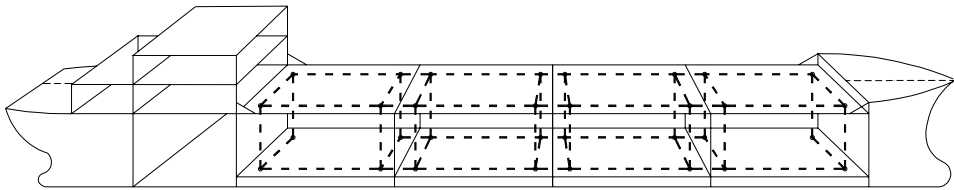
w miarę pojawiania się korzystnych warunków obserwacji. Drugim czynnikiem przemawiającym na korzyść zakładania sieci głównych, a następnie szczegółowych jest stosunkowo duża pracochłonność pomiarów sieci jednorodnych.

W procesie montażu kadłuba współrzędne osnowy montażowej mogą ulegać zmianom. Jest to spowodowane obciążeniami placu budowy zmieniającymi się w miarę postępujących prac montażowych oraz warunkami atmosferycznymi (głównie nasłonecznieniem). Sytuacja ta wymusza kontrolę położenia poszczególnych punktów sieci poprzez pomiary okresowe.

Osnowa wewnętrzna kadłuba statku

W celu powiązania wszystkich pomocniczych układów lokalnych, związanych z poszczególnymi zespołami konstrukcyjnymi, z układem $OXYZ$ jako głównym układem roboczym, zakłada się wewnętrzną osnowę montażową. Spełnia ona rolę bazy budowy i inwentaryzacji kadłuba.

Przedmiotowa osnowa zakładana jest przeważnie w formie prostokątów. Ogólny schemat wewnętrznej osnowy montażowej kadłuba przedstawiono na rysunku 2.



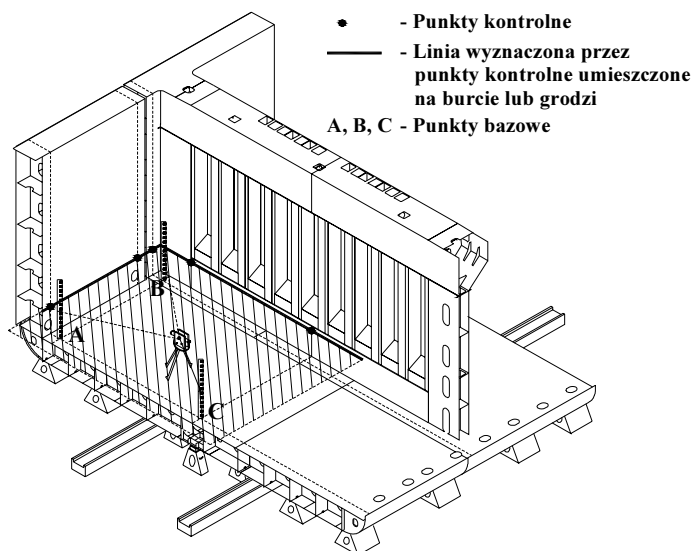
Rys. 2. Osnowa wewnętrzna kadłuba statku

Realizacja wewnętrznej osnowy montażowej jest zadaniem skomplikowanym, gdyż deformacje budowanego kadłuba wynikające z procesu produkcyjnego oraz zmieniających warunków atmosferycznych w znacznym stopniu utrudniają utrzymanie jej parametrów, a przede wszystkim warunków geometrycznych oraz prawidłowego usytuowania w przestrzeni. W związku z powyższym niezbędne jest częste aktualizowanie przedmiotowej osnowy za pomocą pomiarów i odpowiednich obliczeń.

BAZY POMIAROWE

Z teoretycznego punktu widzenia bazą można nazwać idealny element geometryczny (np. płaszczyzna, linia prosta). W praktyce bazy wybiera się na rzeczywistych elementach konstrukcyjnych. Są one realizowane przez tzw. punkty bazowe. Bazy stanowią podstawę do montażu poszczególnych elementów w większe zespoły, a następnie sekcje bloki oraz cały kadłub statku. Wykorzystywane są one również do inwentaryzacji zmontowanych fragmentów konstrukcji.

Przykładową bazę stosowaną w procesie montażu gniazd i przewodnic kontenerów zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. Baza pomiarowa w procesie montażu gniazd i przewodnic kontenerów

W ujęciu ogólnym bazy pomiarowe stanowią „zagęszczenie” wewnętrznej osnowy montażowej.

Różnorodność analizowanych w procesie budowy elementów konstrukcyjnych wymusza każdorazowo konieczność indywidualnego rozpatrywania doboru punktów bazowych. Poniżej przedstawiono ogólne zalecenia jakimi należy się kierować podczas procesu projektowania, nanoszenia oraz kontrolowania punktów bazowych.

- 1) W celu zapewnienia największej stabilności baz montażowych punkty bazowe należy lokalizować:
 - w węzłach konstrukcyjnych, czyli w miejscach o największej sztywności,
 - na maksymalnie odległych od siebie węzłach konstrukcyjnych.
- 2) Bazy montażowe powinny być reprezentowane przez większą liczbę punktów bazowych niż niezbędne minimum. Pozwoli to na kontrolę stabilności baz.

STABILNOŚĆ PUNKTÓW BAZOWYCH

W procesie prefabrykacji stalowych konstrukcji wielkogabarytowych większość prac pomiarowych dotyczy pomiarów względnych wykonywanych specjalnymi metodami pomiarowymi. Omówienie tych metod można znaleźć w literaturze [2, 3, 4]. Pomiary te wykonywane są względem danej płaszczyzny odniesienia P_b .

W projektowaniu prac pomiarowych należy uwzględnić niebezpieczeństwo odkształcenia punktów bazowych wyznaczających płaszczyznę odniesienia mając na względzie, że w procesie budowy zachodzi przeważnie konieczność wykorzystywania danej płaszczyzny P_b w całym procesie montażu kadłuba oraz płaszczyzna odniesienia jest przeważnie wyznaczana przez punkty bazowe leżące na budowanej konstrukcji i przesunięcie jednego nawet z tych punktów powoduje zmianę położenia całej bazy i przemieszczenie związanego z nią układu odniesienia.

Działania mające na celu minimalizację omawianego zagrożenia można podzielić na następujące obszary:

- ograniczenie wpływu zmiennych warunków atmosferycznych (głównie nasłonecznienia),
- analizę doboru lokalizacji punktów bazowych według kryterium ich niezmienności podczas prowadzonych procesów technologicznych,
- kontrolę stałości bazy – zastosowanie punktów kontrolnych.

Obszar pierwszy dotyczy głównie przypadków, gdy stanowisko montażu nie jest odizolowane od wpływu nasłonecznienia. W przypadkach takich prace kontrolno-pomiarowe należy wykonywać we wczesnych godzinach porannych.

Obszar drugi – analiza doboru umiejscowienia punktów bazowych uwzględniająca sztywność technologiczną, jest problemem bardzo skomplikowanym. Badanie tego zagadnienia wymaga przede wszystkim analiz podatności poszczególnych punktów konstrukcji na odkształcenia wynikające z prowadzonych procesów technologicznych (procesy wprowadzające do konstrukcji ciepło, procesy transportowe). Problem ten wymaga indywidualnego podejścia w zależności od danej konstrukcji.

Obszar trzeci dotyczy badania ewentualnych odkształceń punktów bazowych A, B, C , poprzez zastosowanie dodatkowych punktów kontrolnych. W przypadku bazy P_b złożonej z trzech punktów nie ma niezależnej kontroli, czy któryś z nich nie uległ odkształceniu. Możliwość takiej kontroli można osiągnąć poprzez zastabilizowanie w procesie pomiarowym dodatkowych punktów K_i . Zapewni to „utrwalenie” płaszczyzny P_b nie tylko przez punkty bazowe, ale również przez zastosowane dodatkowo punkty kontrolne.

Analizując rezultaty dotychczasowych badań i analiz autora można zauważyć, że największe niebezpieczeństwo przemieszczenia płaszczyzny P_b wiąże się z odkształceniami punktów bazowych wzdłuż osi „z”. W związku z tym w dalszych analizach uwzględniano odkształcenia w kierunku wertykalnym.

ILOŚĆ I UMIEJSCOWIENIE PUNKTÓW BAZOWYCH

Omawiając dobór ilości i umiejscowienia punktów kontrolnych należy dokonać podziału prac pomiarowych na:

- przeprowadzane w fazie prefabrykacji sekcji i bloków,
- prowadzone podczas montażu kadłuba na pochylni.

Podział ten wynika z możliwości usytuowania omawianych punktów.

W pomiarach wykonywanych w procesie prefabrykacji przedmiotowe punkty można umieszczać jedynie na mierzonym obiekcie. W takiej sytuacji identyfikowanie odkształconego punktu bazy polega na wtyczaniu osi celowej instrumentu w płaszczyzny wyznaczone przez poszczególne kombinacje „trójek” utworzonych z punktów bazy A, B, C , oraz punktów kontrolnych K_i . Ma to na celu znalezienie czterech punktów najbardziej zbliżonych do płaszczyzny bazowej. Jest to zadanie czasochłonne. Przykładowo przy zastosowaniu trzech punktów K_i wymaga wykonania kilkunastu opisanych wyżej operacji. Wiąże się to ze znacznym wydłużeniem czasu trwania procedur kontrolnych. Propozycje autora umożliwiające przyspieszenie omawianych procesów zaprezentowano w następnym punkcie artykułu.

W przypadkach, gdy wykonywany jest pomiar elementów konstrukcyjnych będących częściami zmontowanych fragmentów kadłuba statku (np. dno + burta + gródź) istnieje możliwość usytuowania punktów kontrolnych na elementach wertykalnych (patrz rys. 3). Jest to sytuacja znacznie korzystniejsza. Stwierdzenie to wynika z badań odkształceń punktów bazowych przeprowadzonych w ramach opracowania [5].

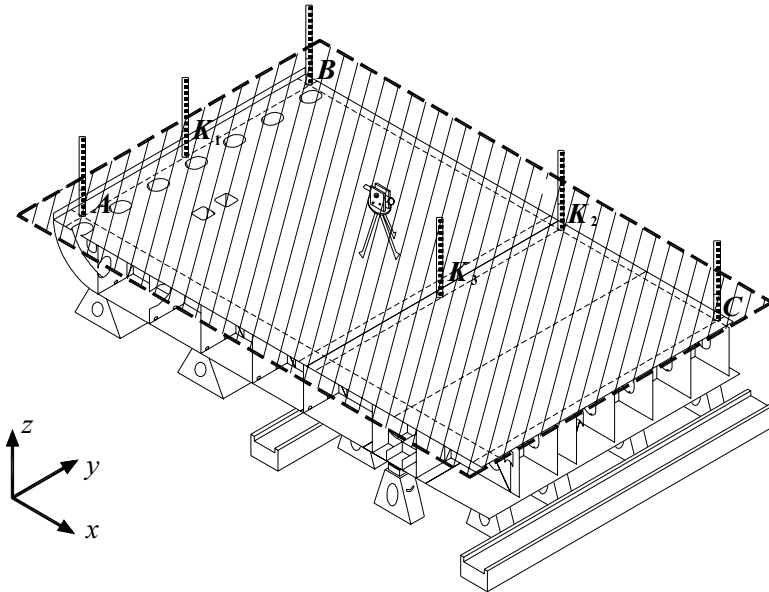
OBLICZENIOWA METODA KONTROLI STAŁOŚCI PUNKTÓW BAZOWYCH

Jak już wspomniano, kontrola stałości punktów bazy w przypadkach, gdy punkty kontrolne leżą na mierzonym obiekcie wymaga szeregu operacji pomiarowych. W celu ich ograniczenia autor proponuje procedurę analityczną, która opiera się na następujących założeniach:

- punkty kontrolne są rozmieszczone w sposób zbliżony do zaprezentowanego na rysunku 4:
 - punkty K_1 oraz K_2 leżą na prostych wyznaczonych przez punkty bazy \overline{AB} i \overline{BC} ,
 - punkt K_3 spełnia warunek: ($x_{K_3} = x_{K_2}$ i $y_{K_3} = y_{K_1}$),
- w pomiarze zerowym⁽¹⁾ punkty A, B, C tworzą płaszczyznę Π_b^O ,
- rzędne punktów kontrolnych K_i wyznaczono w pomiarze zerowym,
- w pomiarze aktualnym⁽²⁾ punkty A, B, C tworzą płaszczyznę Π_b^1 ,
- z płaszczyzną Π_b^1 związany jest układ współrzędnych $Ox^1y^1z^1$,
- współrzędne x i y punktów kontrolnych oraz bazowych w układzie współrzędnych $Ox^0y^0z^0$ oraz $Ox^1y^1z^1$ są sobie równe.

(1) Pomiar wykonywany względem danej płaszczyzny odniesienia Π_b po raz pierwszy.

(2) Pomiar kontrolny sprawdzający stabilność punktów bazy.



Rys. 4. Umiejscowienie punktów bazy oraz punktów kontrolnych

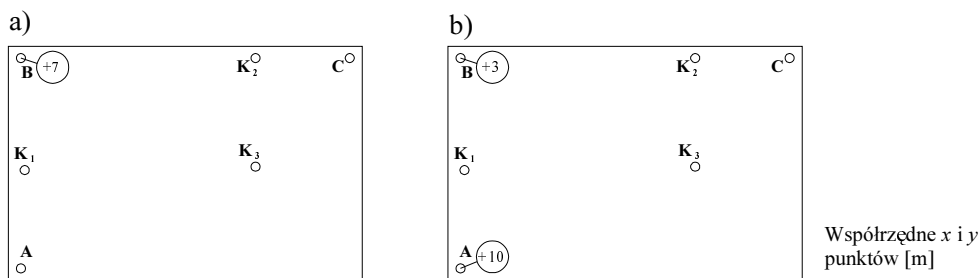
Proponowana procedura kontroli polega na:

- wyznaczeniu współrzędnych „z” punktów kontrolnych w układzie $Ox^1y^1z^1$ oraz analizie otrzymanych wyników,
- ułożeniu równań (w układzie $Ox^1y^1z^1$) płaszczyzn $\Pi_b^{K_j}$ wyznaczonych przez możliwe kombinacje „trójek” utworzonych z punktów A, B, C i punktów kontrolnych K_p ,
- wyznaczeniu odległości normalnych pozostałych punktów kontrolnych od danej płaszczyzny $\Pi_b^{K_j}$,
- wyborze punktów, które nie uległy przemieszczeniu.

W celu sprawdzenia skuteczności proponowanego rozwiązania wykonano szereg symulacyjnych procesów kontroli stałości bazy. Polegały one na symulowaniu odkształceń jednego lub dwóch punktów bazowych i wykonywaniu wyżej opisanych procesów pomiarowych oraz obliczeniowych. Testy dowiodły, że proponowany sposób kontroli stałości bazy spełnia założone zadania.

Na rysunku 5 zaprezentowano dwa wybrane procesy symulacyjne. Pierwszy z nich (rys. 5 a) polegał na symulowaniu odkształcenia jednego punktu natomiast drugi (rys. 5 b) – dwóch punktów wyznaczających płaszczyznę bazową. Otrzymane w pomiarze aktualne wartości rzędnych punktów kontrolnych w układzie $Ox^1y^1z^1$ zaprezentowano na rysunku (5 a') oraz (5 b'). Na ich podstawie ułożono równania płaszczyzn $\Pi_b^{K_j}$ i obliczono od nich odległości normalne poszczególnych punktów. Wybrane wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 1

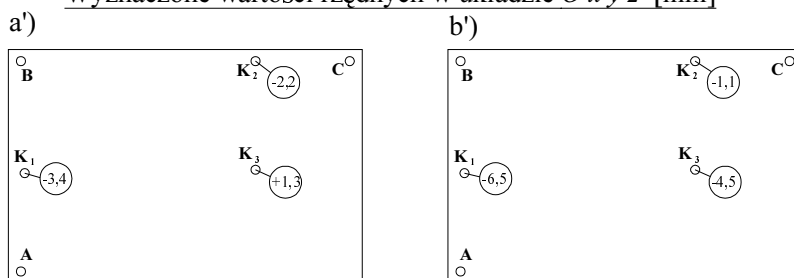
Symulowane odkształcenia punktów bazowych [mm]



Współrzędne x i y punktów [m]

- A (0,0)
- B (0,10)
- C (15,10)
- K_1 (0,5)
- K_2 (10,10)
- K_3 (10,5)

Wyznaczone wartości rzędnych w układzie $Ox'y'z'$ [mm]



Rys. 5. Symulacja odkształceń punktów bazowych oraz kontrolnych

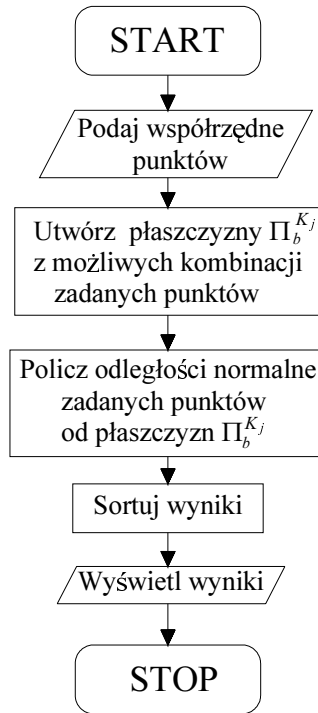
Tabela 1. Wyniki obliczeń symulacji odkształceń punktów bazowych

Symulacja a)				Symulacja b)			
Punkty tworzące płaszczyznę $\Pi_b^{K_j}$	Odległości normalne punktu od płaszczyzny $\Pi_b^{K_j}$ [mm]			Punkty tworzące płaszczyznę $\Pi_b^{K_j}$	Odległości normalne punktu od płaszczyzny $\Pi_b^{K_j}$ [mm]		
	$K_1K_2K_3$	A → 0,10	B → 6,90		C → 0,15	$K_1K_2K_3$	A → 9,90
AK_1C	K_2 → 0,07	B → 6,80	K_3 → 0,17	K_1CK_3	A → 10,00	B → 3,00	K_2 → 0,10
AK_2K_3	K_1 → 0,10	B → 7,00	C → 0,20	AK_2K_3	K_1 → 9,90	B → 13,00	C → 10,00
BK_2K_3	A → 7,00	K_1 → 6,90	C → 3,30	BK_2K_3	A → 13,00	K_1 → 3,10	C → 3,00

Na szaro zaznaczono punkty bazy, których przemieszczenie symulowano. Jak wiadać w obu prezentowanych przypadkach proponowana procedura pozwala je zidentyfikować.

Omawiane obliczenia powinny być wykonywane praktycznie w czasie rzeczywistym, bezpośrednio na stanowisku pomiarowym. W tym celu autor opracował program komputerowy „Baz_kon” wykonujący omówiony powyżej proces obliczeniowy. Jego opis oraz algorytm zamieszczono poniżej.

Program Baz_kon służy do określania wartości odległości normalnych zadanej grupy punktów od płaszczyzn utworzonych z możliwych kombinacji „trójek” tych punktów. Program został napisany w języku Delphi. Jego algorytm przedstawiono na rysunku 6.



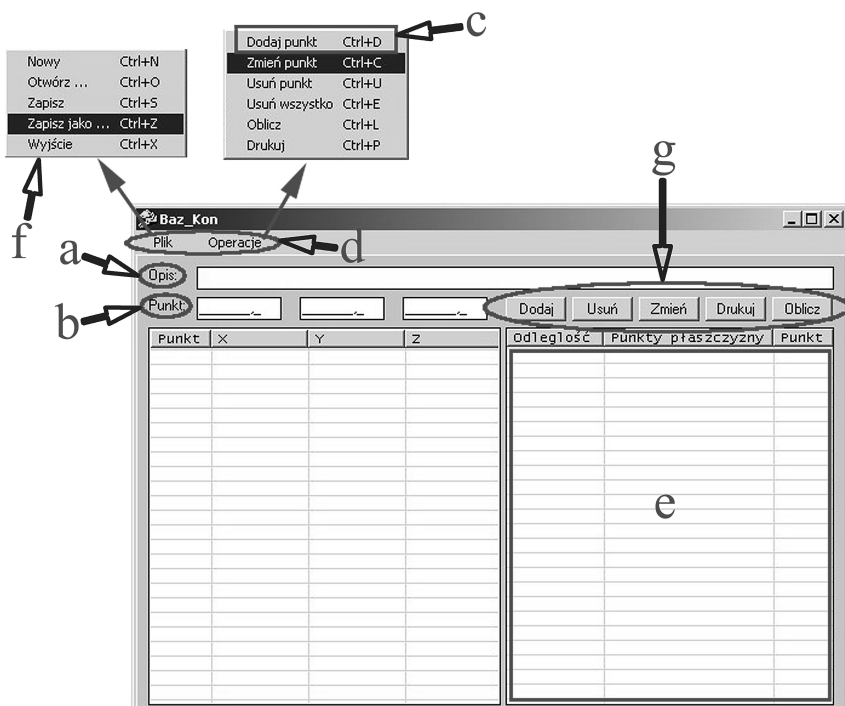
Rys. 6. Algorytm programu BAZ_KON

Rozpoczęcie pracy z programem

Program uruchamia się klikając nazwę (ikonę) **baz_kon** co powoduje otwarcie okna panelu głównego (rys. 7). Pracę z programem należy rozpocząć od opisanie realizowanego zadania (okienko **Opis** rys. 7.a). Pozwala to zidentyfikować plik z danymi przy następnym otwarciu.

Przygotowanie danych do analizy

Współrzędne punktów wprowadza się poprzez wpisanie poszczególnych wartości w okienko **Punkt** (rys. 7.b). Wpisane wartości należy zatwierdzić za pomocą opcji **Dodaj** (rys. 7.c). Program umożliwia wpisanie współrzędnych 26 punktów. Dane, dla których mają być wykonywane obliczenia przechowywane są w plikach z rozszerzeniem *.bsc.



Rys. 7. Interfejs programu BAZ_KON

Funkcje programu

Program posiada menu rozwijane – **Plik** oraz **Operacje** (rys. 7.d). Podstawowe opcje w menu **Operacje** dostępne są również z panelu głównego (rys. 7.g). Operacje na współrzędnych wykonuje się poprzez ich zaznaczenie, a następnie wybranie odpowiedniej funkcji. Po wpisaniu danych należy wybrać opcję **Oblicz**. Wyniki zostają wyświetlone w kolejności: **odległość** – **punkty płaszczyzny** – **punkt**, którego odległość została obliczona (rys. 7.e). Wyniki są automatycznie sortowane wg ich wartości – od odległości najmniejszej do największej. W menu **Plik** dostępne są typowe funkcje (**Zapisz**, **Otwórz itp.**) ((rys. 7.f). Wszystkie funkcje programu dostępne są również poprzez skróty klawiaturowe opisane w menu rozwijalnym (rys. 7.c, 7.f). Program umożliwia wydrukowanie otrzymanych wyników.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszym artykule zagadnienia stałości baz pomiarowych wykorzystywanych w procesie budowy wielkogabarytowych konstrukcji stalowych stanowią bardzo ważny element projektowania technologii, mają duże znaczenie dla

procesu kontroli jakości wymiarowej. Wymagają one ciągłych analiz mających na celu zwiększenie jakości kontroli wymiarowej.

Przedstawiona propozycja analitycznej metody wspomagającej kontrolę stałości baz pomiarowych w znaczącym stopniu usprawnia tę kontrolę. Zaproponowane rozwiązanie zostało testowane w praktyce z dobrym skutkiem.

BIBLIOGRAFIA

1. Niebylski J.: Optymisation of the collection of geometrical data in shipbuilding. International conference on marine technology ODRA 99, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston 2000.
2. Rutkowski R.: Analiza dokładności pomiarów wysokościowych w procesie budowy wielkogabarytowych konstrukcji stalowych. *Postępy Nauki i Techniki*, 5, 2010.
3. Rutkowski R.: Dynamical control of dimensional quality of large steel structures in production enterprises of low – level technological support. *Polish Maritime Research*, vol. 17, 1(63), 2010.
4. Rutkowski R.: Geometrical control systems modelling of three-dimensional steel structures referring to the required accuracy standards. Rozprawa doktorska. Politechnika Szczecińska, Szczecin 2005.
5. Jastrzębski T. (red.): Badanie wpływu wybranych czynników konstrukcyjno technologicznych na sztywność i odkształcenia w budowie kadłuba statku. Politechnika Szczecińska, opracowanie w ramach projektu celowego nr 9 T12C 060 97 c/3480 pn., Szczecin 1998.

MEASURING BASES IN MEASUREMENT QUALITY CONTROL PROCESS OF LARGE-SIZE STEEL STRUCTURES

Abstract

Problems of design of measurement control systems in a building process of large-size steel structures are presented in an article, especially issues of measurement matrixes and bases are stressed. There is presented original solution in measurement bases scope facilitating measurements processes.

Keywords: Large-size steel structures, quality, measurement, shipbuilding, technology, metrology, measuring matrixes.