

Bolesław KRYSZCOWCZYK  
Zbigniew KRYSZCOWCZYK  
„GEOSERWEX” Bydgoszcz

## MONITOROWANIE DEFORMACJI MASZYN – NIEKTÓRE ASPEKTY GEOMETRYCZNE BEZPIECZEŃSTWA EKSPLOATACJI

**Streszczenie.** Bezpieczeństwo eksploatacji wielkich maszyn obrotowych, np.: pieca lub młyna obrotowego, kalcynatora, turbiny energetycznej, maszyny papierniczej itp., zależy głównie od monitorowania zmian geometrii, zużycia części, zmian nacisków, drgań, temperatur, zmian obciążenia silników itp. Metodami geodezyjnymi zaprezentowanymi w niniejszej publikacji można badać związki przyczynowo-skutkowe powodujące dezorganizację pracy maszyny, jej niższą sprawność lub awaryjność. Dotyczy to głównie osiowości i deformacji powłok i części mechanicznych maszyn. Przedstawiono zasady i sposoby wyznaczania deformacji dynamicznych maszyn obrotowych z zastosowaniem skaningu liniowego, z wykorzystaniem prostych dalmierzy laserowych oraz cyfrowych czujników zegarowych sprzęgniętych z komputerem. Masowe dane uzyskane z tych pomiarów, poddane wektoryzacji i aproksymacji, pozwalają z dużą dokładnością określić proste i dynamiczne deformacje newralgicznych części maszyn, modelować i prognozować niezbędne remonty. Podano przykłady wykorzystania pomiarów deformacji pieca obrotowego do prognozowania jego remontu, obliczania parametrów cięć korekcyjnych i nadzoru prac remontowych. Aktywny udział geodety przy interpretacji wyników pomiarów i podejmowaniu decyzji remontowych jest podstawą sukcesu technicznego i biznesowego.

## DEFORMATION MONITORING OF MACHINES – SOME GEOMETRICAL ASPECTS OF OPERATION SAFETY

**Summary.** The safe operation of big rotary machines, such as rotary kilns or mills, calciners, energy turbines, paper-making machines etc., depends mainly on the monitoring of changes in geometry, parts wearing, stress changes, vibration, changes in temperature, engine load fluctuations etc. The geodesic methods presented in this publication enable the exploration of cause and effect relations disturbing the correct operation of the machine, harnessing its efficiency or increasing the frequency of

failure. This pertains mainly to alignment and deformations of the coats and mechanical elements of the machines. Rules and procedures for describing dynamic deformations of rotary machines are presented. The procedures use linear scanning with straight laser distance measurers and digital clock sensors, interfaced with a computer. Mass data acquired from such measurements, processed in vectoring and approximation, allow to establish, with high accuracy, the simple and dynamic deformations of key machine parts and forecast any necessary repairs. The paper also contains examples of usage of rotary kiln measurements for the purpose of forecasting its overhaul, calculating parameters for correction cutting and for controlling the repair work. Active participation of a geodesist during the interpretation of the measurement results and in repair decision making, is vital for both technical and business success.

## 1. Wstęp

Najczęściej obiekty przemysłowe budowane są po to, aby posadawiać na ich terenie różne użyteczne maszyny. Dla przykładu, w cementowniach będą to piece obrotowe, młyny, kruszarki, łamiarnie itp.; w elektrowniach turbiny, kompresory, wentylatory; a w papierniach maszyny papiernicze itd. Maszyny te są obecnie bardzo skomplikowane, a utrzymanie ich ruchu wymaga monitorowania między innymi geometrii, począwszy od osiadań i przemieszczeń podłoża oraz fundamentów, poprzez monitorowanie zużycia części po monitorowanie zmian obciążeń, temperatur itp. Maszyny są bardzo czułymi i wymagającymi urządzeniami i dzięki temu sygnalizują wcześniej niekorzystne zmiany, takie jak na przykład: spadek mocy, drgania, wzrost temperatur łożysk, wzrost poboru energii itp. Zmiany te mogą być i najczęściej są symptomami późniejszych awarii czy katastrof. Pomiary osiadań reperów na obiektach przemysłowych wykonywane standardowo zawierają zbyt mało informacji geometrycznych przydatnych dla zapobiegania awariom maszyn. Natomiast monitorowanie geometrii maszyn, pomiary osiowości, pomiary deformacji statycznych i dynamicznych (głównych części maszyn) przy zastosowaniu metod geodezyjnych mają nadal podstawowe, często niedoceniane znaczenie dla bezpieczeństwa maszyn, konstrukcji i budowli.

W referacie będą przedstawione przykłady związków przyczynowo-skutkowych, od stanów potencjalnego zagrożenia, poprzez monitorowanie po zapobieganie, dla największych maszyn obrotowych, takich jak: piece obrotowe, turbiny energetyczne czy maszyny papiernicze.

## 2. Osiowość głównym problemem eksploatacji maszyn obrotowych

Dla maszyn najważniejszym warunkiem geometrycznym jest osiowość, więc dobrze jest, gdy istnieją metody wykonywania pomiarów podczas ruchu maszyny i maszyna jest przystosowana do takich pomiarów. Maszynami pracującymi w ruchu ciągłym, które można monitorować w dowolnym momencie ich eksploatacji, są maszyny obrotowe typu: piece obrotowe, kalcynatory, młyny, bębny, suszarnie obrotowe itp. Polscy geodeci opracowali pierwsze na świecie metody osiowania pieców obrotowych w warunkach dynamicznych [1], [2] i metody te mają zastosowanie do większości maszyn obrotowych. Metody te są przystosowane do maszyn obrotowych producentów europejskich (FLS, KRUPP-POLYSIUS, KHD) i amerykańskich (FULLER, ALLIS-CHALMERS), a nie są przystosowane do obsługi maszyn producentów japońskich (IHI, UBE). Wynika to z różnic konstrukcyjnych maszyn japońskich (brak dostępu do newralgicznych części maszyny), co czyni te maszyny „mało przyjaznymi” dla obsługi eksploatacji. Nie jest tam możliwa współpraca projektantów, konstruktora, mechanika i geodety, którzy działają bez uwzględniania wzajemnych potrzeb. Geodezyjne pomiary osiowości maszyn typu turbina energetyczna czy maszyna papiernicza wykonywane są obecnie podczas postępu tych maszyn i w czasie ich remontów, a monitorowanie podczas ruchu opiera się głównie na diagnostyce wibroakustycznej. Wydaje się, że wprowadzenie niewielkich zmian konstrukcyjnych, głównie zapewnienie dostępu do punktów osiowych wałów, umożliwiłoby wykonanie pomiarów maszyn papierniczych podczas ich ruchu.

Nieosiowość maszyny może być spowodowana *prostymi przyczynami* typu:

- nierównomierne osiadanie podpór fundamentowych lub podpór łożysk newralgicznych części maszyny,
- zużycie mechaniczne, powodujące zmiany średnic, wymiarów i kształtów,
- zmiany temperatur części maszyny, powodujące zmiany położenia i wymiarów lub *złożonymi przyczynami* typu:
  - wykorbienie osi maszyny lub jej newralgicznych części, pochodzące od trwałych deformacji powłoki (deformacje osiowe i radialne),
  - wykorbienie zmienne dynamiczne osi i powłoki maszyny typu termicznego (temperaturowego),
  - deformacje złożone dynamiczne, związane z ruchem obrotowym typu: wychylenia cykliczne podpór, zmiany nacisków,
  - wyważenie mas wirujących, drgania i efekt rezonansu.

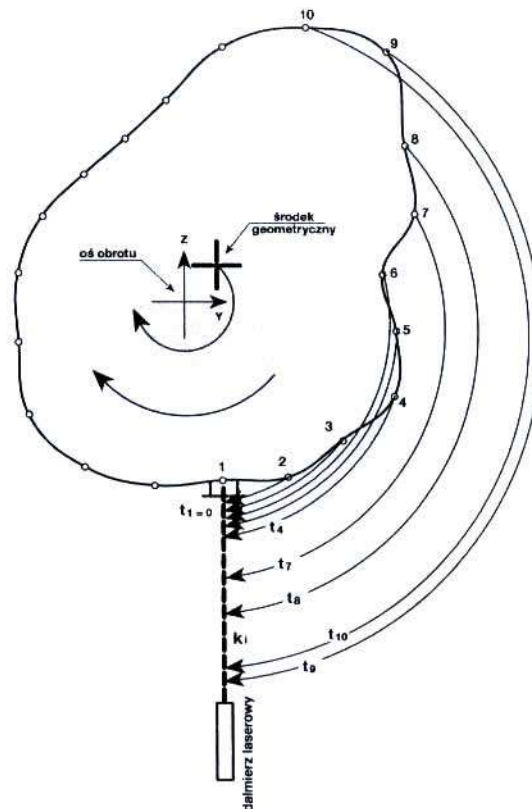
Wyżej wymienione *proste przyczyny nieosiowości* maszyn nie wymagają zasadniczo komentarza (znane są metody pomiarów i ich dokładności), natomiast *złożone dynamiczne czynniki nieosiowości* wyznacza się przy użyciu mniej znanych metod opartych na technikach komputerowych i skaningu liniowym z wykorzystaniem dalmierzy laserowych lub cyfrowych czujników zegarowych.

### 3. Skaniny liniowy, modelowanie geometryczne deformacji

Zasada wyznaczania dynamicznych deformacji maszyn obrotowych jest znana [1], jednakże jej masowe zastosowanie jest związane z upowszechnieniem technik komputerowych, głównie laserowych, metod pomiaru odległości. Metoda ta jest opisana w pozycji [3] i dotyczy wyznaczania deformacji osiowych i radialnych w przekrojach poprzecznych wszelkich maszyn wirujących lub obracających się części innych maszyn, jak np. wał napędu. Deformacje dynamiczne wyznacza się w określonych, najczęściej newralgicznych przekrojach obracającej się powłoki maszyny, przy czym celem pomiaru jest najpierw odróżnienie deformacji osiowych (wykorbienie) od deformacji radialnych (typu wgniecenie powłoki, błąd kształtu przekroju kołowego itp.) od deformacji temperaturowych czy związanych z dynamiką ruchu obrotowego (wychylenia podpór, ugięcia itp.).

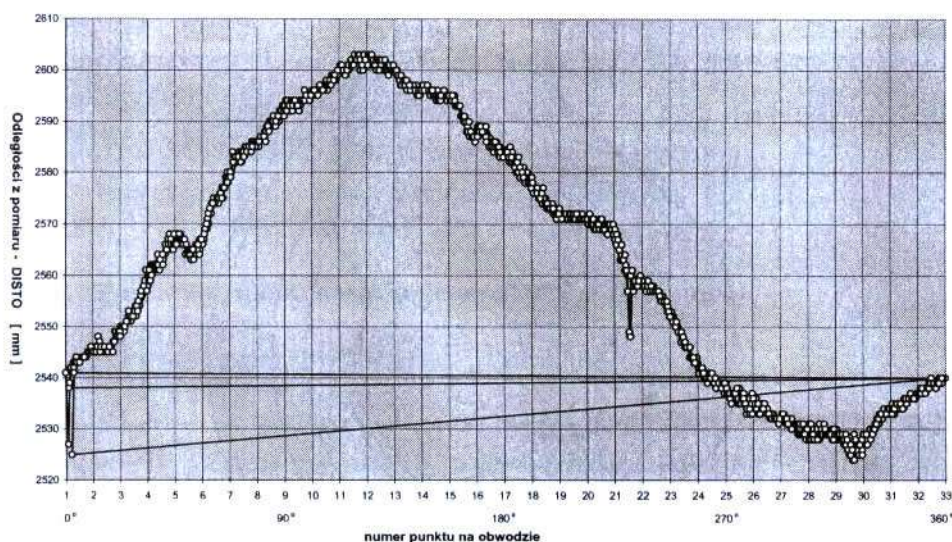
Do pomiaru dynamicznych deformacji powłok maszyn i ich osi można z powodzeniem wykorzystać proste oraz tanie ręczne dalmierze laserowe typu DISTO PRO LEICA, BOSCH i wiele innych, które zapewniają dokładność pojedynczego pomiaru rzędu  $1\div 2$  mm lub cyfrowe czujniki zegarowe, np. SYLVAC, które zapewniają dokładność pomiaru  $\pm 0,01$  mm (istnieje także wiele innych narzędzi pomiarowych, zapewniających dokładności pośrednie). Sprzęt pomiarowy musi mieć funkcję ciągłego pomiaru i możliwość rejestracji wyników na komputerze, np. typu PSION WORKABOUT.

Wybór typu urządzenia pomiarowego zależy od skali spodziewanych deformacji i jako ogólną zasadę przyjmuje się, że dokładność pomiaru powinna być rzędu 10% wartości deformacji. Warunkiem zastosowania tej metody jest dostęp do mierzonej powierzchni, a schemat pomiaru pokazany został na rys. 1.



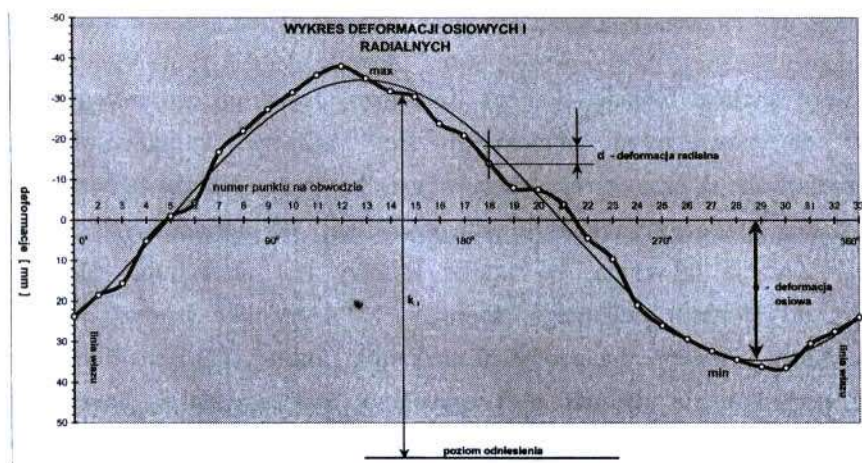
Rys. 1. Schemat pomiaru deformacji  
Fig. 1. Scheme of deformation measurement

Dalmierz spełnia funkcję skanera liniowego, rejestrującego odległości  $k_i$  do punktów na powierzchni obracającej się maszyny, a odległościom tym przyporządkowane są czasy  $t_i$  rejestrowane przez komputer. Należy zauważyć, że o ile typowy skaner geodezyjny rejestruje odległości i kąty do nieruchomych obiektów, to tutaj jest sytuacja odwrotna, bo skaner liniowy jest nieruchomy ale rejestruje odległości do obiektu ruchomego, którego charakterystykę kątową znamy (czas jednego obrotu i teoretyczną geometrię). Skanowanie liniowe [4] umożliwia szybkie i masowe pozyskiwanie danych dotyczących w tym wypadku jednej zmiennej odległości „ $k_i$ ” w funkcji czasu albo kąta obrotu w stosunku do punktu początkowego. Dla danego przekroju otrzymamy ciąg danych  $k_i$ ,  $t_i$  pomierzonych podczas wielu obrotów maszyny (wiele obserwacji nadliczbowych, charakteryzujących dany przekrój). Dane te zostały pokazane na wykresie (rys. 2) i przypominają grafikę rastrową, którą trzeba poddać wektoryzacji za pomocą znanych programów.



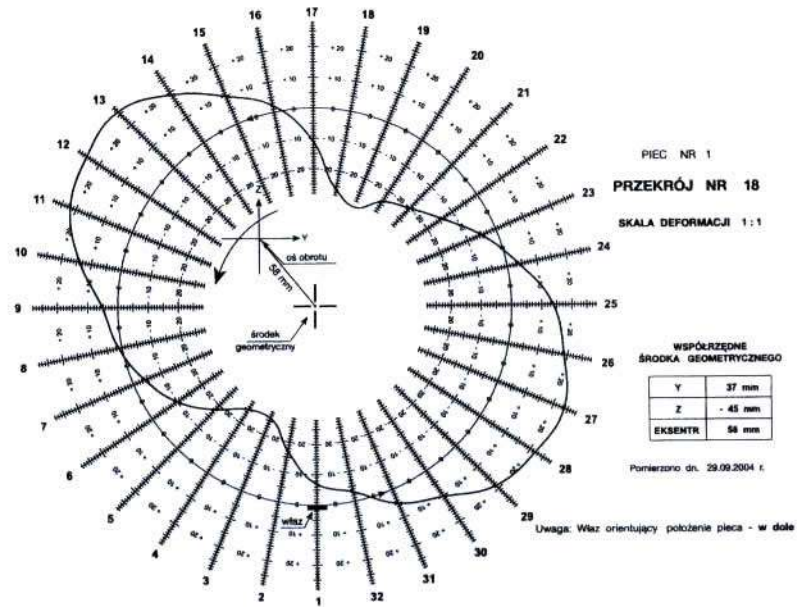
Rys. 2. Ciąg danych  $k_i$ ,  $t_i$  pomierzonych podczas wielu obrotów maszyny  
 Fig. 2. Data series  $k_i$ ,  $t_i$  measured during many machine turns

Kolejny krok to aproksymacja zwektoryzowanych danych, przy czym znany jest teoretyczny kształt przekroju, którym powinien być okrąg, co upraszcza zagadnienie numeryczne. Modelowanie geometryczne umożliwia określenie deformacji osiowych i radialnych przekroju, co zostało pokazane na rysunku (rys. 3).



Rys. 3. Wykres deformacji osiowych i radialnych  
 Fig. 3. Diagram of axial and radial deformations

Dla potrzeb użytkownika (mechanika) sporządza się wykres deformacji radialnych każdego przekroju (rys. 4) oraz zbiorczy wykres deformacji osiowych dla wszystkich przekrojów (rys. 5).

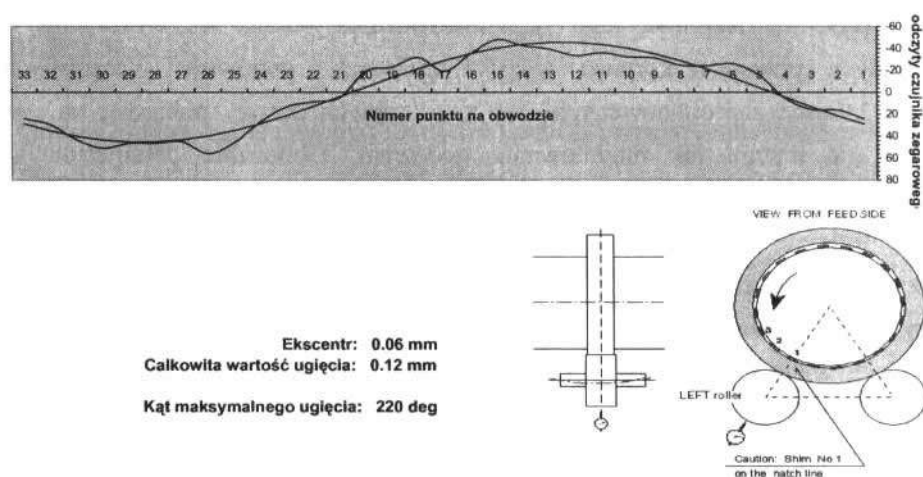


Rys. 4. Radialny wykres deformacji płaszcza (odchyłki kołowości) (widok od strony wlotu)  
Fig. 4. Radial diagram of deformation blanket (circularity deviation) (view from the inlet side)





Przedstawione na rysunku (rys. 5) deformacje osiowe korpusu pieca obrotowego są tłumione (zniekształcone) przez reakcje rolek podporowych. Inaczej mówiąc, gdyby korpus pieca nie był podparty (gdyby był zawieszony w próżni), jego deformacje byłyby dużo większe. Te zniekształcenia dynamiczne muszą być uwzględnione i są wyznaczone dwoma sposobami. Pierwszy sposób to pomiar cyklicznych wychyleń podpór fundamentowych (co nie wymaga komentarza), natomiast drugi dokładniejszy to pomiar zmian ugięć wałów rolek. Schemat pomiaru zmian ugięć pokazany został na rysunku (rys. 6), a sam pomiar wykonywany jest cyfrowym czujnikiem zegarowym sprzężonym z komputerem metodą identyczną z wyżej opisaną. Ugięcia wałów rolek są funkcją uwikłaną ekscentru korpusu pieca i innych wpływów dynamicznych, takich jak na przykład temperatura. Ugięcia te są niewielkie, rzędu setnych milimetra, ale weryfikują w sposób jednoznaczny deformacje. Sposób ten jest szczególnie ceniony i rozumiany dla mechaników, którzy weryfikują te dane dodatkowo przez pomiar obciążenia silników (amperaż zmienny w funkcji kąta obrotu pieca).



Rys. 6. Schemat pomiaru zmian ugięć

Fig. 6. Measurement scheme of deflections changes

Powyższe wywody mogą wydawać się nieco skomplikowane, niemniej jednak meritum zagadnienia to wyłącznie geometria obiektu wirującego i jej zmiany powodowane wpływami dynamicznymi, takimi jak: zużycie, temperatura, ruch obrotowy itp.

#### **4. Interpretacja wyników pomiarów, prognozowanie i kontrola remontów maszyn obrotowych**

Wyniki pomiarów geometrii korpusu pracującego pieca obrotowego, pokazane na rysunkach (rys. 4, 5 i 6), są podstawą interpretacji technicznej i prognozowania remontów. Jest to monitoring pokazujący rodzaj i skalę potencjalnego zagrożenia (znane tolerancje określone przez producenta maszyny, np.: dopuszczalna odchyłka osiowości, dopuszczalne ugięcie itp.), wykonany bez przerywania produkcji. Wyniki pomiarów są zawsze konfrontowane przez użytkownika z występującymi na piecu zjawiskami, takimi jak: wypadanie cegły ogniotrwałej, uszkodzenia korpusu, zwiększony amperaż silników, drgania itp. Rola geodety może kończyć się na tym etapie, jednak obecnie klient oczekuje wykonania usługi jak najbardziej kompleksowej, w tym interpretacji i zaproponowania działań korygujących. Dla sytuacji pokazanej na rys. 5 widać, że w przekroju 16 znajduje się punkt załamania osi korpusu, a przekrój ten posiada największe dla tego pieca niedopuszczalne deformacje radialne (rys. 4). Naprawa tego typu uszkodzenia polega na wykonaniu cięć korekcyjnych (przecięcia korpusu) w kilku miejscach i ponownym wycentrowaniu korpusu. Miejsca zaproponowanych cięć korekcyjnych zostały pokazane na rys. 5 i jest to nic innego jak modelowanie geometrii. Obliczanie parametrów cięć korekcyjnych jest ściśle powiązane ze sprawowaniem nadzoru nad remontem, kontrolą realizacji remontu oraz wzięciem odpowiedzialności za efekty tego remontu w części dotyczącej geometrii. Taka działalność obarczona jest pewnym ryzykiem, wymaga wiedzy z wielu dziedzin techniki oraz doświadczenia. Aktywny udział geodety przy interpretacji wyników pomiarów oraz przy podejmowaniu decyzji remontowych jest podstawą sukcesu technicznego i biznesowego. Kolejny krok to aproksymacja zwektoryzowanych danych, przy czym znany jest teoretyczny kształt przekroju, którym powinien być okrąg, co upraszcza zagadnienie numeryczne. Modelowanie geometryczne umożliwia określenie deformacji osiowych i radialnych przekroju, zostało pokazane jest na rys. 3. Dla potrzeb użytkownika (mechanika) sporządza się wykres deformacji radialnych każdego przekroju (rys. 4) oraz zbiorczy wykres deformacji osiowych dla wszystkich przekrojów (rys. 5). Przedstawione na rys. 5 deformacje osiowe korpusu pieca obrotowego są tłumione (zniekształcone) przez reakcje rolek podporowych. Inaczej mówiąc, gdyby korpus pieca nie był podparty (gdyby był zawieszony w próżni), jego deformacje byłyby dużo większe. Te zniekształcenia dynamiczne muszą być uwzględnione i są wyznaczone dwoma sposobami. Pierwszy sposób to pomiar cyklicznych wychyleń podpór

fundamentowych (co nie wymaga komentarza), natomiast drugi, dokładniejszy, to pomiar zmian ugięć wałów rolek.

Schemat pomiaru zmian ugięć pokazany został na rys. 6, a sam pomiar wykonywany jest cyfrowym czujnikiem zegarowym sprzężonym z komputerem metodą identyczną z wyżej opisaną. Ugięcia wałów rolek są funkcją uwikłaną ekscentru korpusu pieca i innych wpływów dynamicznych, takich jak na przykład temperatura. Ugięcia te są niewielkie, rzędu setnych milimetra, ale weryfikują w sposób jednoznaczny deformacje. Sposób ten jest szczególnie ceniony i zrozumiały dla mechaników, którzy weryfikują te dane dodatkowo przez pomiar obciążenia silników (amperaż zmienny w funkcji kąta obrotu pieca).

Powyższe wywody mogą wydawać się nieco skomplikowane, niemniej jednak meritum zagadnienia to wyłącznie geometria obiektu wirującego i jej zmiany powodowane wpływami dynamicznymi, takimi jak: zużycie części mechanicznych, temperatura, ruch obrotowy itp.

## BIBLIOGRAFIA

1. Gocał J.: Geodezyjne metody realizacji i kontroli geometrycznych warunków pracy maszyn i urządzeń przemysłowych. Zeszyty Naukowe, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, z. 47, Kraków 1977.
2. Krystowczyk B.: Austrichten von Drehöfen und Korrektur der Tragrollen-Verdrehungen während des Betriebes. ZEMENT-KALK-GIPS INTERNATIONAL, No. 5, 1983.
3. Krystowczyk B.: Dynamiczne monitorowanie i korygowanie deformacji wielkich maszyn obrotowych. VII Konferencja Naukowo-Techniczna PAN. „Aktualne problemy w Geodezji Inżynierskiej”, Warszawa 2005.
4. Nowak E, Nowak J.: Modelowanie semantyki i topologii danych ze skanerów laserowych. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej. „Problemy automatyzacji w geodezji inżynierskiej”, Warszawa 2003.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Witold Prószyński