

# Uniwersalny system do pomiarów odchyłek geometrycznych wielkogabarytowych wałów korbowych

## Universal system for measuring geometrical deviations of large crankshafts

KRZYSZTOF NOZDRZYKOWSKI  
WALDEMAR KOSTRZEWA  
ELWIRA KAŁKOWSKA\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.12.193>

W artykule zaprezentowano oryginalne, nowatorskie rozwiązanie uniwersalnego systemu do pomiarów odchyłek geometrycznych wielkogabarytowych wałów korbowych z tzw. elastycznym podparciem obiektu mierzonego, eliminującym ugięcia i odkształcenia sprężyste wału pod wpływem ciężaru własnego. Przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne najważniejszych elementów systemu, w tym podpór elastycznych i podpór ustalających, których konstrukcja umożliwia – w zależności od potrzeb – ustalenie wału zewnętrznymi czopami w pryzmach albo (po przebrojeniu) ustalenie wału zewnętrznymi powierzchniami czołowymi w kłach. Zaprezentowano również podstawowe kryteria doboru sił reakcji w elastycznych podporach.

**SŁOWA KLUCZOWE:** system pomiarowy, odchyłki geometryczne, elastyczna podpora, wał korbowy, odkształcenia sprężyste

*The article presents an original, innovative solution for a universal system for measurements of geometric deviations of large crankshafts with so-called elastic support of the measured object, eliminating deflections and elastic deformations of the shaft under the influence of its own weight. The structural solutions of the most important elements of the system are presented, including flexible supports and retaining supports, the structure of which allows – depending on the needs – the setting of the shaft with external journals in the piles or (after conversion) setting the shaft with external frontal surfaces in the centers. The basic criteria for selection of reaction forces in flexible supports are also presented.*

**KEYWORDS:** measuring system, geometrical deviations, elastic support, crankshaft, elastic deformation

Nieodłącznym i niezbędnym elementem procesu produkcji czy montażu jest kontrola wymiarowo-kształtowa wytwarzanych części i ich zespołów. Umożliwia ona

\* Dr hab. inż. Krzysztof Nozdrzykowski, prof. nadzw. AM (k.nozdrzykowski@am.szczecin.pl); dr inż. Waldemar Kostrzewa (w.kostrzewa@am.szczecin.pl); mgr inż. Elwira Kałkowska (e.kalkowska@am.szczecin.pl) – Akademia Morska w Szczecinie

ocenę rzeczywistego stanu geometrycznego z narzucenymi przez konstruktora założeniami teoretycznymi, których spełnienie w dużej mierze warunkuje trwałość, niezawodność i żywotność elementów i zespołów, a w rezultacie – całej maszyny roboczej [1, 2].

Realizacja tego etapu produkcyjnego wymaga zapewnienia odpowiednich warunków pomiarów, aby uzyskać poprawne wyniki. Te warunki zależą nie tylko od dokładności wykonania mierzonego obiektu, lecz także od jego właściwości materiałowych i złożoności kształtu oraz wynikających z nich odkształceń [3].

### Wielkogabarytowe wały korbowe

Są to elementy o dużych masach i gabarytach oraz złożonej geometrii, a jednocześnie o małej i zmiennej sztywności, podatne na odkształcenia giętne. Ugięcia pod wpływem ciężaru własnego wałów korbowych, podpartych na czopach głównych, zależą nie tylko od sposobu podparcia, lecz także od kąta obrotu wału na podporach [5–7]. Wyeliminowanie odkształceń sprężystych wału podpartego na kilku stałych, sztywnych podporach pryzmowych jest problematyczne z uwagi na występujące odchyłki geometryczne.

W pomiarach z użyciem takich podpór dopuszcza się występowanie odkształceń wału, czego przykładem są pomiary tzw. sprężynowania, będącego ostatecznie miarą poprawności wykonania wału [9, 10]. To powoduje, że sprężone ze sobą odchyłki geometryczne i odkształcenia sprężyste wzajemnie na siebie oddziałują, a ich wyeliminowanie jest praktycznie niemożliwe.

### Uniwersalny system do pomiarów odchyłek geometrycznych wałów korbowych

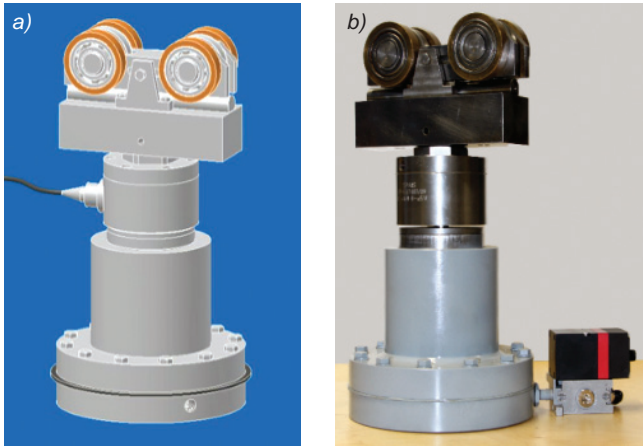
W Zakładzie Podstaw Budowy i Eksploatacji Maszyn Akademii Morskiej w Szczecinie opracowano nowatorski system pomiarowy z układem tzw. elastycznego podparcia mierzonego obiektu (rys. 1) [6].



Rys. 1. Rozwiązanie systemu pomiarowego z elastycznym podparciem – przypadek ustalenia wału korbowego zewnętrznymi powierzchniami czołowymi w kłach

Taki sposób podparcia praktycznie eliminuje sprężyste ugięcia wału pod wpływem ciężaru własnego.

Niezależnie od tego, czy wał jest ustalony w kłach, czy w pryzmach, rolę elementów kompensujących ewentualne ugięcia sprężyste wału pełnią elastyczne podpory, umieszczone w środkowej części wału (rys. 2).



Rys. 2. Podpora elastyczna: a) rysunek bryłowy, b) kompletna podpora z czujnikiem siły i zaworem sterowanym

Układ elastycznego podparcia jest utworzony przez zespół podpór elastycznych, których liczba i rozmieszczenie zależą od liczby i rozmieszczenia głównych czopów wału. Podpory mają właściwości samonastawnych, podatnych, tocznych podpór pryzmowych. Nie ograniczają ewentualnych przemieszczeń czopów głównych, które wynikają z niedokładności wykonania wału. Wartości zmiennych ciśnień i odpowiadających im sił w siłownikach podpór odciążających są nastawiane w sposób ciągły, za pomocą precyzyjnych, proporcjonalnych, sterowanych prądowo

zaworów redukcyjnych. Wartości zmiennych sił, realizowanych przez każdą z elastycznych podpór, są wcześniej wyznaczone w programach do obliczeń wytrzymałościowych części maszyn (metodą elementów skończonych) – przy założeniu, że ugięcia na czopach głównych wału mają być zerowe [4, 8]. W opracowanym systemie dodatkowo zastosowano tensometryczne przetworniki siły, usytuowane pomiędzy głowicami a siłownikami elastycznych podpór (rys. 2). Dzięki temu wymagana siła jest parametrem, który steruje ciśnieniem zaworów redukcyjnych.

Zespół dwóch kłów kulistych, z których jeden jest stały, a drugi – sprężyste osadzony w kierunku poosiowym, zapewnia ustalenie osiowe wału, a tym samym stały kontakt wału i kłów ustalających (niezależnie od jego ewentualnych odkształceń sprężystych) z jednoczesną samoczynną regulacją siły docisku kłów.

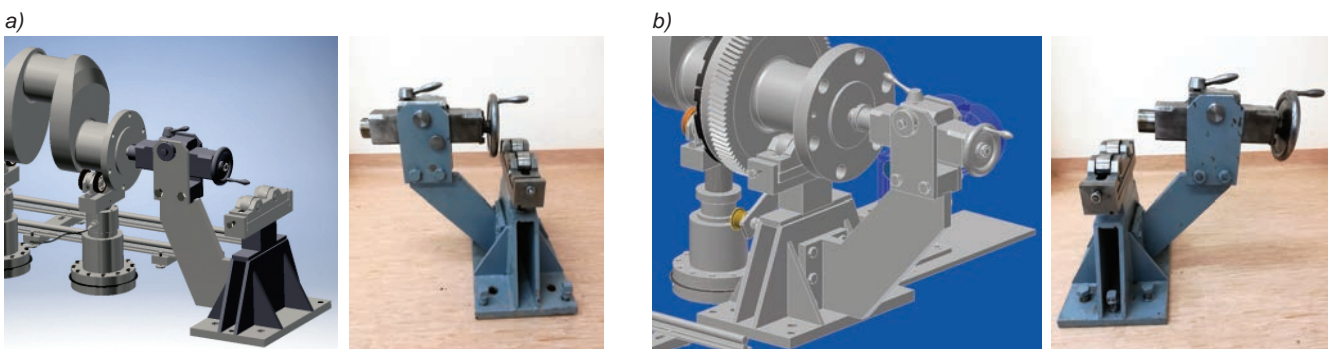
Układ pomiarowy tworzą: wózek jezdny, osadzony na nim statyw i czujnik pomiarowy, przemieszczający się wzdłuż precyzyjnie wykonanych prowadnic. System jest wyposażony w układ sterujący obrotami wału, co umożliwia rejestrowanie danych w sposób ciągły i przekazywanie ich do pamięci komputera.

W przypadku gdy na zewnętrznych powierzchniach czołowych wału nawiercenia nie występują lub są trudno dostępne, zaleca się ustalenie wału zewnętrznymi, skrajnymi czopami głównymi na podporach z osadzonymi na nich głowicami pryzmowymi oraz podparcie go w części środkowej (podobnie jak w omawianym wcześniej wariancie ustalenia wału w kłach) zespołem elastycznych podpór odciążających (rys. 3).

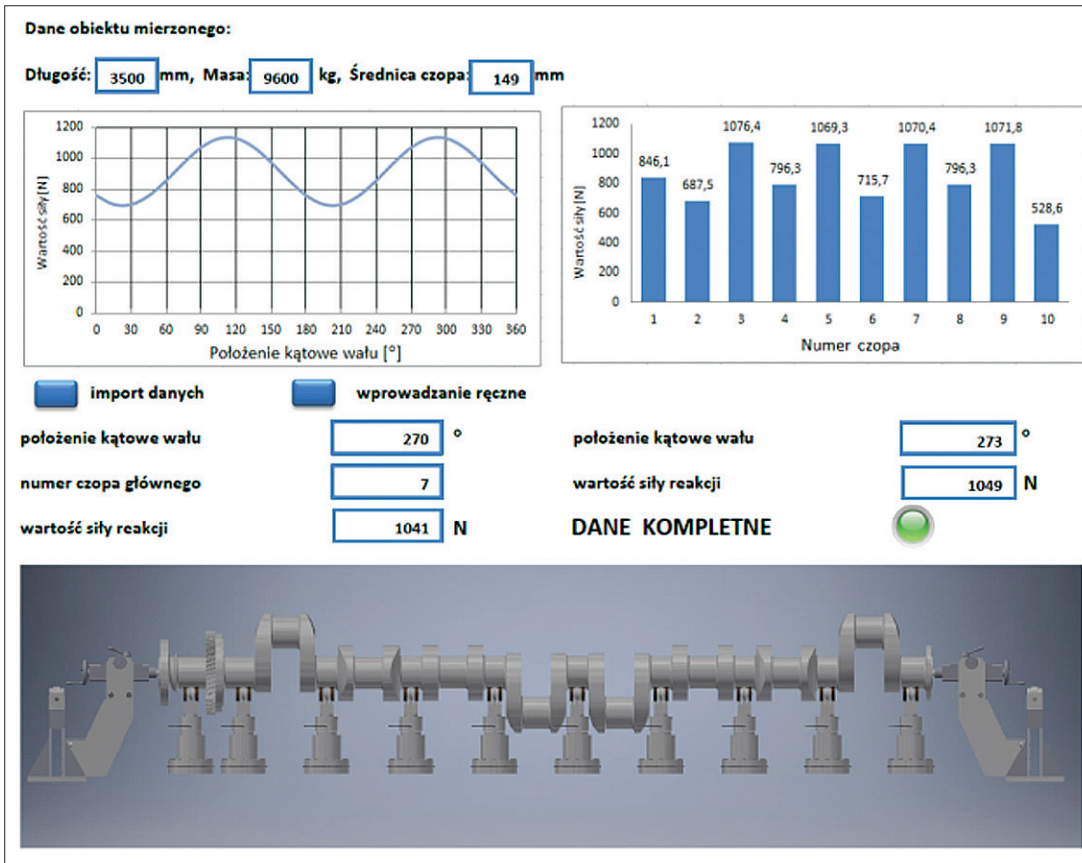
Skrajne podpory są w tym przypadku odpowiedzialne za wyznaczenie wartości odchyłek geometrycznych. Uniwersalna konstrukcja podpór skrajnych umożliwia ustalenie wału w kłach lub zewnętrznymi czopami głównymi w pryzmach (rys. 4).



Rys. 3. Rozwiązanie systemu pomiarowego z elastycznym podparciem – przypadek ustalenia wału korbowego zewnętrznymi skrajnymi czopami głównymi w pryzmach



Rys. 4. Sposób ustalenia wału i rozwiązanie konstrukcyjne: a) kłowej podpory ustalającej, b) pryzmowej podpory ustalającej



Rys. 5. Aplikacja wizualizacyjna nadzorowanego systemu sił reakcji, eliminujących ugięcia i odkształcenia sprężyste wałów korbowych

Na rys. 4 przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne podpory skrajnej dla przypadków ustalenia wału w kłach (rys. 4a) oraz zewnętrznymi czopami głównymi w pryzmach (rys. 4b). Zastosowanie podpory dla przyjętego wariantu ustalenia wału wymaga jej przebrojenia. Konstrukcja podpory pozwala na wykonanie tej czynności w prosty sposób oraz niewielkim nakładem pracy i czasu.

Na potrzeby zarządzania systemem, w tym realizacji zmiennych sił reakcji eliminujących ugięcia i odkształcenia sprężyste wału pod wpływem ciężaru własnego, opracowano program nadzorujący oraz aplikację wizualizacyjną (rys. 5).

Wizualizacja umożliwia:

- śledzenie lub wybór obrazu rzeczywistej i zadanej siły na poszczególnych czopach głównych dla kolejnych, wybranych położenia kątowego wału;
- zaprezentowanie w układzie współrzędnych biegunowych lub kartezjańskich obrazu zmian rzeczywistej i zadanej siły na wybranym czopie głównym, w zakresie pełnego kąta obrotu wału  $0^\circ \div 360^\circ$ ;
- śledzenie aktualnego położenia kątowego wału;
- sygnalizację niezgodności siły rzeczywistej z zadaną – po przekroczeniu przyjętej tolerancji różnic pomiędzy porównywanymi wartościami sił.

## Podsumowanie

Zaprezentowany system pomiarowy z elastycznym podparciem mierzonego obiektu znajduje praktyczne zastosowanie w pomiarach wielkogabarytowych wałów korbowych, a opracowany układ pomiarowy wraz z aplikacją nadzorująco-wizualizacyjną zapewnia prawidłową ocenę stanu geometrycznego wału – zarówno w przypadku jego ustalenia w pryzmach, jak i w kłach. Oprócz wyjątkowej uniwersalności systemu jego zaletą jest możliwość interpretacji wyników pomiarów w czasie rzeczywistym.

Zaproponowany sposób podparcia może w praktyce wyeliminować ugięcia sprężyste innych niż wały elementów o dużych gabarytach i podatnych na odkształcenia, np.: korpusów, wałów rozrządu, wałów stopniowych i prostych, płyt.

## LITERATURA

1. Chybowski L., Gawdzińska K. "On the possibilities of applying the AHP method to a multi-criteria component importance analysis of complex technical objects". *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 445 (2016): s. 701–710.
2. Chybowski L., Gawdzińska K. "On the present state-of-the-art of a component importance analysis for complex technical systems". *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 445 (2016): s. 691–700.
3. Jefábek K., Vondráčková T., Voštová V. "Increase of the effective production of crankshafts for ship engines". *Naše More*. 63, 4 (2016): s. 283–288.
4. Król K., Kołodziejczyk K., Olejarczyk K., Wikło M., Siemiątkowski Z. "Odchyłki kształtu wielkogabarytowych wałów korbowych: analiza przyczyn, metoda pomiaru i skutki technologiczne". *Modelowanie Inżynierskie*. 13, 44 (2012): s. 159–169.
5. Nozdrzykowski K. "Prevention of elastic strains in flexible large size machine parts with the use of elastic support". *Machine Dynamics Research*. 39, 2 (2015): s. 111–122.
6. Nozdrzykowski K. "Metodyka pomiarów geometrycznych odchyłek powierzchni walcowych wielkogabarytowych elementów maszyn na przykładzie wałów korbowych silników okrętowych". Szczecin: Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, 2013.
7. Nozdrzykowski K., Grządziel Z. "Simulation test and measurements of crankshaft deformation by the symmetric method". *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*. 42, 114 (2015): s. 33–37.
8. Sun J., Wang J., Gui C. "Whole crankshaft beam-element, finite-element method for calculating crankshaft deformation and bearing load of an engine". *Journal of Engineering Tribology. Part J of the Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 224 (2010): s. 299–303.
9. [www.iims.org.uk/engi\\_necrankshaft-deflection-measurement-news-hound/](http://www.iims.org.uk/engi_necrankshaft-deflection-measurement-news-hound/) (dostęp: 20.06.2018 r.).
10. [www.linkedin.com/diesel-engine-crankshaft-deflection-measurement-mahmoud-moghtaderi/2015-July-7](http://www.linkedin.com/diesel-engine-crankshaft-deflection-measurement-mahmoud-moghtaderi/2015-July-7) (dostęp: 20.06.2018 r.).