

Nowa koncepcja oceny stanu geometrycznego i łożyskowania wielkogabarytowych wałów korbowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono przegląd znanych i stosowanych metod pomiarów w oparciu o które dokonuje się oceny stanu geometrycznego wykonania i łożyskowania wielkogabarytowych wałów korbowych. Dokonana ocena tych metod zarówno pod względem poprawności ich realizacji jak i sposobu interpretacji wyników. Przedstawiono też nową koncepcję przyrządu umożliwiającego ocenę stanu łożyskowania wału na podstawie pomiarów odkształceń ramion wykorbień tzw. metodą symetryczną.

Abstract. The article presents an overview of known and used measurement methods on the basis of which the geometrical state of the design and bearing of extralarge crankshafts is evaluated. These methods were evaluated both in terms of correctness of their implementation as well as interpretation of results. The article also presents a new concept of the device which allows to evaluate the condition of the shaft bearing on the basis of measurements of the deformation of the crank arms using symmetrical method. (**New conception of evaluation the geometrical state and bearing of extralarge crankshafts**).

Słowa kluczowe: wały korbowe, metody oceny, stan geometryczny, łożyskowanie.

Keywords: crankshafts, evaluation methods, geometrical state, bearing.

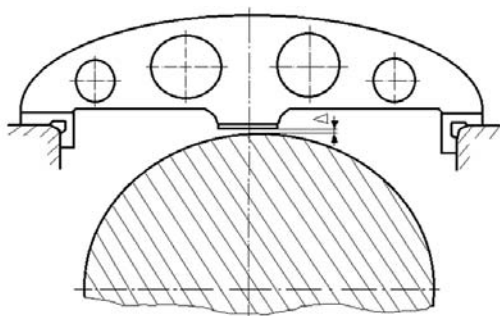
Wstęp

Eliminacja ugięć sprężystych dużych elementów maszyn, zwłaszcza elementów wiotkich o stosunkowo małych proporcjach wymiarów poprzecznych do ich długości, takich jak wały korbowe silników okrętowych, wymaga ich wielomiejscowego podparcia. Utrzymanie w granicach dopuszczalnych odchyłek wzajemnej współosiowości łożysk głównych stanowiących miejsca podparcia wałów warunkuje poprawne funkcjonowanie układu korbowo – tłokowego, a w rezultacie całego silnika okrętowego. Stąd też istotnym elementem weryfikacji stanu technicznego na etapie wykonania jak również weryfikacji okresowej realizowanej w trakcie eksploatacji silnika jest ocena stanu łożyskowania wałów korbowych.

Metody oceny stanu łożyskowania wałów korbowych

Bezpośredni pomiar współosiowości łożysk głównych wałów korbowych jest bardzo kłopotliwy, stąd też w tym celu stosowane są metody pomiarów pośrednich. Wyróżnić tu można takie metody jak: pomiary opadu oraz pomiary odkształceń ramion wykorbień nazywane popularnie pomiarami sprężynowania.

Pomiary opadu wymagają demontażu pokryw łożysk głównych oraz użycia specjalnego szablonu. Miarą opadu jest wielkość szczeliny Δ pomiędzy występnym szablonu a powierzchnią walcową czopów głównych wału korbowego (rys. 1).

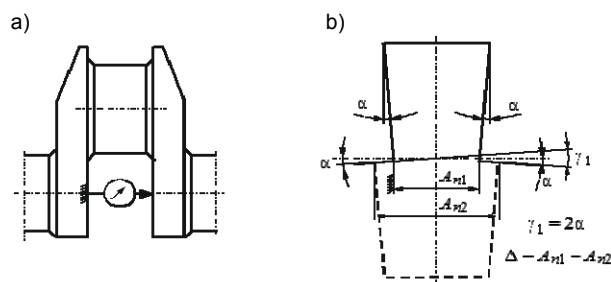


Rys. 1. Zasada pomiaru opadu wału korbowego

Pomiarów dokonuje się szczelinomierzem. Doskonalsze rozwiązania szablonów wyposażone są w śruby mikrometryczne umożliwiające pomiar szczeliny bez użycia szczelinomierza. Bazą do pomiarów w tym

przypadku jest bezpośrednio dolna powierzchnia występu a pośrednio powierzchnie podziału gniazd łożysk głównych na których ustawiany jest szablon. Zgodnie z zaleceniami [1] pomiary opadu powinny być realizowane każdorazowo przy określonym ustawieniu wału w celu umożliwienia wzajemnego ich odniesienia i porównania. Potraktowanie wyników pomiarów opadu jako kryterium oceny stanu łożyskowania jest dużym uproszczeniem. Pomiar taki można potraktować jako przybliżony i miejscowy. O poprawności łożyskowania wałów decydują łożyska w stanie zmontowanym. Przy czym jako pojedyncze łożysko należy rozumieć układ takich elementów jak: gniazdo – panewka – czop główny, z których każdy posiada określone wymiary i odchyłki, a w trakcie eksploatacji o łożyskowaniu wałów decyduwać będzie stopień ich indywidualnego zużycia. Z uwagi na swoje właściwości, pomiary opadu realizowane są obecnie rzadko i dotyczą najczęściej starych silników wyposażonych w panewki grubościenne.

Powszechnie natomiast znajdują zastosowanie pomiary odkształceń sprężystych wału. Pomiary sprężynowania realizowane są podczas obrotu wału korbowego przy zmontowanych łożyskach głównych (rys. 2).

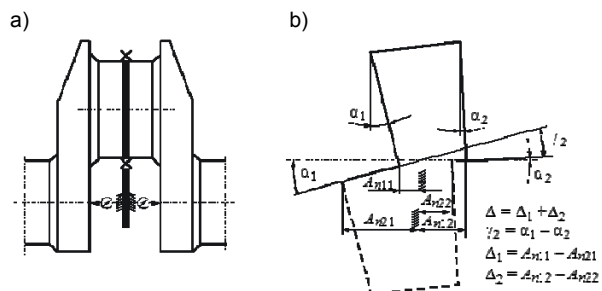


Rys. 2. Pomiar sprężynowania metodą tradycyjną (a), interpretacja wyników pomiaru (b)

Jako miarę sprężynowania określanego najczęściej w płaszczyźnie pionowej i poziomej przyjmuje się różnicę wskazań czujnika przemieszczeń osadzonego w oprawce montowanych pomiędzy poszczególnymi wykorbieniami wału w dwóch wzajemnie skrajnych przeciwległych położeniach wykorbień [1, 2, 3, 4]. Są to położenia dla płaszczyzny pionowej określane jako GMP (górne maksymalne położenie) oraz DMP (dolne minimalne położenie). Dla płaszczyzny poziomej są to odpowiednio położenia określane jako PB (prawa burta) oraz LB (lewa

burta). Założeniem podstawowym przy tego typu pomiarach jest przyjęcie że odkształcenia ramion wykorbień są symetryczne względem osi symetrii wykorbienia. Założenie to wynika z warunków i sposobu realizacji pomiarów. Konsekwencją tego założenia jest interpretacja wyników pomiarów, zalecająca w przypadku przekroczenia dopuszczalnej wartości sprężynowania podniesienie lub obniżenie osi łożysk głównych sąsiadujących z danym wykorbieniem o połowę zmierzonej wartości sprężynowania. Należy również podkreślić że pomiar taki charakteryzuje się brakiem stałości bazy pomiarowej, która przemieszcza się w sposób niekontrolowany podczas ich realizacji. Nie jest brane pod uwagę, że przyczyną odkształceń może być pogarszający się stan tylko jednego łożyska sąsiadującego z danym wykorbieniem. Trudne do zinterpretowania jest też jaki wpływ na mierzoną wartość sprężynowania ma wzajemne oddziaływanie odkształconych w różnym stopniu wykorbień. Potwierdzeniem wymienionych wcześniej spostrzeżeń są wyniki badań symulacyjnych odkształceń wału korbowego otrzymane po wprowadzeniu możliwych do wystąpienia niedokładności w łożyskowaniu jego czopów głównych [5]. Analiza ta wykazała ponadto, że z uwagi na zmienną sztywność i nierównomierne rozmieszczenie środków ciężkości mas w kolejnych przekrojach poprzecznych, występują nie tylko odkształcenia giętne wału ale również skręcanie ramion wykorbień. Wyniki badań wykazały więc że mierzoną w danym położeniu kątowym wielkość rozchylenia ramion wykorbień nie można traktować jako wielkości usytuowanej w płaszczyźnie pionowej lub poziomej, lecz usytuowanej przestrzennie.

Zaproponowana metoda symetrycznego pomiaru odkształceń ramion wykorbień (rys. 3) [5, 6], eliminuje szereg wad stosowanej metody tradycyjnej.



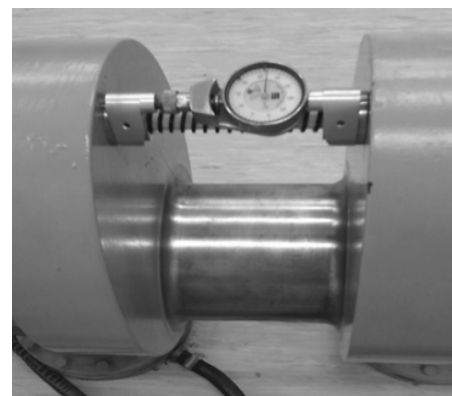
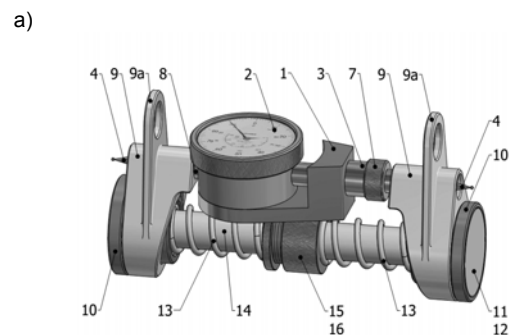
Rys. 3. Pomiar sprężynowania metodą symetryczną z zamocowanym przyrządem do czopa korbowego (a), interpretacja wyników pomiaru (b)

Między innymi eliminuje ona najistotniejszą wadę metody tradycyjnej jaką jest brak stałości bazy pomiarowej. Zastosowanie tej metody w warunkach eksploatacyjnych wymaga jednak demontażu stopy korbowodu i podwieszenie układu korbowo – tłokowego dla umożliwienia osadzenia obejmę przyrządu mocowanego do czopa korbowego, co znacznie wydłuża pomiar.

Nowa koncepcja symetrycznego pomiaru odkształceń ramion wykorbień

Przyjmując, że podstawa oceny wykonania jak i ułożenia wału w łożyskach głównych będą pomiary jego odkształceń, opracowany został i wykonany oraz zastosowany praktycznie układ pomiarowy, który bazując na tradycyjnym sposobie osadzenia przyrządu i pomiaru sprężynowania umożliwia indywidualną ocenę odkształceń ramion wykorbień. Bazę pomiarową realizuje przyrząd osadzony podobnie jak w metodzie tradycyjnej kłami w nawierceniach, wykonanych przez producentów wałów na wewnętrznej stronie ramion wykorbień. Ocena odkształceń

odbywa się jednak w kierunku prostopadłym do tej bazy. Zapewniają to nasadki stanowiące zakończenie trzpieni, w które zaopatrzone jest przyrząd pomiarowy. Nasadki osadzone suwliwie na trzpieniach, dociskane są stałą wartością siły do wewnętrznych powierzchni czołowych ramion wykorbień. Miarą odkształceń, rejestrowanych w sposób ciągły są zmiany obwodowych nacisków występujących na powierzchniach czołowych okładzin nasadek. Pomiar ten odbywa się więc w układzie symetrycznym, w warunkach odpowiadających metodzie tradycyjnej. Okładziny nasadek wykonane z materiału podatnego na odkształcenia sprężyste, zakończone są czułą membraną pomiarów nacisków powierzchniowych. Czujnik przemieszczeń podobnie jak w metodzie tradycyjnej umożliwia sumaryczny pomiar odkształceń ramion wykorbień. Analiza obrazu skanu nacisków powierzchniowych umożliwia z kolei, zgodnie z założeniami opracowanej koncepcji przyrządu pomiarowego (rys. 4), indywidualną ocenę nieprostopadłości wewnętrznych powierzchni czołowych ramion wykorbień względem osi symetrii wykorbienia i odpowiednie rozgraniczenie mierzonej wartości sprężynowania.



Rys. 4. Konstrukcja nowej koncepcji przyrządu do pomiarów odkształceń ramion wykorbień metodą symetryczną (a), przyrząd pomiarowy osadzony pomiędzy wykorbieniami wału (b)

Przyrząd wg. koncepcji [7] (rys. 4a), posiada korpus 1 do którego zamocowana jest obudowa czujnika przemieszczeń 2. Wstępnie przyjęto, że będzie to zegarowy czujnik przemieszczeń z osiowym przesuwem trzpienia pomiarowego (docelowo przewidywane jest zastosowanie małowagarytowego indukcyjnego czujnika przemieszczeń z osiowym przemieszczeniem trzpienia pomiarowego, współpracującego przewodowo lub bezprzewodowo z wskaźnikiem cyfrowym). Korpus 1 zaopatrzone jest w trzpień stały 3. Trzpień pomiarowy czujnika i trzpień stały 3, usytuowane wzajemnie współosiowo, zaopatrzone są w końcówki 4 z kłami kulistymi. Trzpień stały 3 posiada mechanizm śrubowy 7 regulacji jego długości. Mechanizm ten umożliwia uzyskanie napięcia wstępnego czujnika a

jednocześnie gwarantuje pewne osadzenie i ustalenie przyrządu pomiarowego kłami kulistymi w nawierceniach wykonanych (przez producentów wałów korbowych) na wewnętrznych powierzchniach czołowych ramion wykorbień (rys. 4b). Na zewnętrznej powierzchni walcowej trzpienia stałego 3 i części chwytowej 8 czujnika przemieszczeń 2 osadzone są suwliwie nasadki 9 z wkładkami dociskowymi 10. Uchwyty 9a nasadek dociskowych 9 ułatwiają montaż i pozycjonowanie przyrządu pomiarowego pomiędzy ramionami wykorbień wału. Powierzchnie czołowe wkładek dociskowych 10 wyposażone w okładziny 11, wykonane z materiału podatnego na odkształcenia sprężyste a jednocześnie nie ulegającym odkształceniom trwałym, zakończone są czułą membraną 12 pomiaru nacisków powierzchniowych. Sprężyny 13 osadzone na prowadnicy 14, zapewniają stały docisk powierzchni czołowych okładzin 11 i membran 12 pomiaru nacisków powierzchniowych do wewnętrznych powierzchni czołowych ramion wykorbień. Mechanizm śrubowy 15, 16 umożliwia regulację napięcia wstępnego sprężyn 13 i docisku nasadek 9. Wyniki pomiaru obwodowych nacisków powierzchniowych (zależnych od stanu odkształceń sprężystych okładzin 11) na styku membran 12 z wewnętrznymi powierzchniami czołowymi ramion wykorbień zobrazowane są na ekranie monitora w postaci mapy skanu nacisków powierzchniowych. Wyniki te przesłane do pamięci komputera poddawane są obróbce z zastosowaniem specjalnego algorytmu obliczeniowego. Docisk kulistych kłówek ustalających 4 do nawierceń wykonanych na wewnętrznych powierzchniach czołowych ramion wykorbień i docisk powierzchni czołowych okładzin 11 zakończonych czułą membraną pomiaru nacisków powierzchniowych 12 do wewnętrznych powierzchni czołowych ramion wykorbień realizowany jest niezależnie.

Na podstawie dokonanych pomiarów można określić wzajemne usytuowanie osi poszczególnych czopów głównych sąsiadujących z danym wykorbieniem. Sposób pomiarów jest zbliżony do pomiarów tradycyjnych przy czym rejestracja danych odbywa się w sposób ciągły w zakresie kąta obrotu wału przy którym pomiar jest możliwy. W przypadku zdemontowanego układu korbowo – tłokowego, w pełnym zakresie kąta 360° . W przypadku niezdemontowanego układu korbowo – tłokowego, w zakresie kąta odpowiadającego dwóm skrajnym położeniom przyrządu pomiarowego bliskim trzonu korbowodu.

Komputerowe opracowanie wyników pomiarów

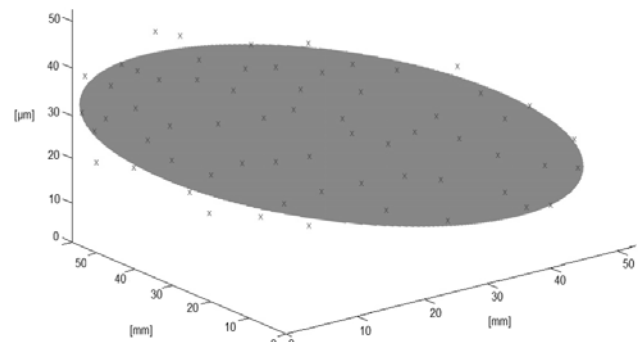
Dla zaproponowanej koncepcji pomiarów opracowana została procedura interpretacji wyników pomiarów. Interpretacji geometrycznej wyników pomiarów odkształceń wykorbień wału dokonuje program komputerowy realizujący następujące kroki algorytmu dla danych będących skanem nacisków powierzchniowych na styku membran z powierzchniami czołowymi ramion poszczególnych wykorbień badanego wału:

- usunięcie wartości odstających,
- aproksymacja do płaszczyzny 3D,
- wyznaczenie wektorów normalnych dla poszczególnych płaszczyzn.

Membrana nacisków powierzchniowych pozwala na akwizycję danych w postaci obrazu z mapą kolorów odnoszącą się do poszczególnych sił nacisku. Mapa taka jest w rzeczywistości dwuwymiarowym obrazem cyfrowym przechowującym trzeci wymiar w postaci wartości odchyłek. Obraz ten przetwarzany jest przy pomocy algorytmów przetwarzania obrazów cyfrowych. Ponieważ dane pozyskane z membrany pomiaru nacisków powierzchniowych mogą posiadać wartości odstające, stąd też w początkowej fazie procedury opracowania wyników pomiarów należy dokonać oczyszczenia danych z wartości

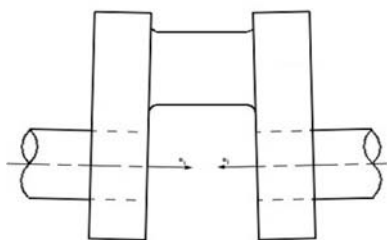
niepożądanych. Za element odstający uważany jest taki element, który nie pasuje do modelu danych reprezentowanych przez resztę elementów [8]. Występowanie obserwacji odstających powodowane jest niedoskonałością przyrządu pomiarowego, nierównościami powierzchni wykorbień stykających się z membranami pomiarowymi, a także innymi anomaliami występującym w trakcie realizacji pomiarów. Obserwacje odstające występują na mapie nacisków w formie nagłych, krótkotrwałych zmian kolorystycznych o charakterze singletonowym. Wartości odstające utrudniają poprawną analizę danych, stąd też konieczne jest ich usunięcie lub zastąpienie wartościami poprawnymi. Zbyt duża liczba pozostawianych wartości odstających może być też powodem błędnej interpretacji geometrycznej wyników pomiarów. Usunięcie wartości odstających w sposób bezpośredni jest niewskazana, stąd też zaproponowano ich zastąpienie medianą (liczoną dla badanego punktu i jego punktów sąsiednich), która w przeciwieństwie do wartości średniej, jest odporniejsza na występowanie wartości odstających. W tym celu obraz mapy nacisków dzielony jest na podobrazy o arbitralnym rozmiarze, na których wykonywana jest filtracja medianowa, będącą rodzajem filtracji nieliniowej obrazów. Rozmiar podobrazu zależy od rozmiarów występujących zniekształceń. Wyznaczenie wielkości podobrazu może zostać zautomatyzowane poprzez metody segmentacji obrazów oparte o progowanie lokalne obrazu lub histogram jego kolorów. W przypadku stwierdzenia asymetrycznego rozkładu zmiennych w miejsce mediany stosowana jest średnia winsorowska, stanowiąca równowagę pomiędzy średnią arytmetyczną i medianą.

Następnym etapem opracowania danych jest aproksymacja mapy pomiarów nacisków powierzchniowych przekształcającej jej obraz do powierzchni płaskiej w przestrzeni 3D. Dla powierzchni tej wyznaczany jest wektor normalny określający kąt nachylenia powierzchni czołowej wykorbienia wału. Aproksymacja mapy nacisków powierzchniowych realizowana jest metodą najmniejszych kwadratów (rys. 5).



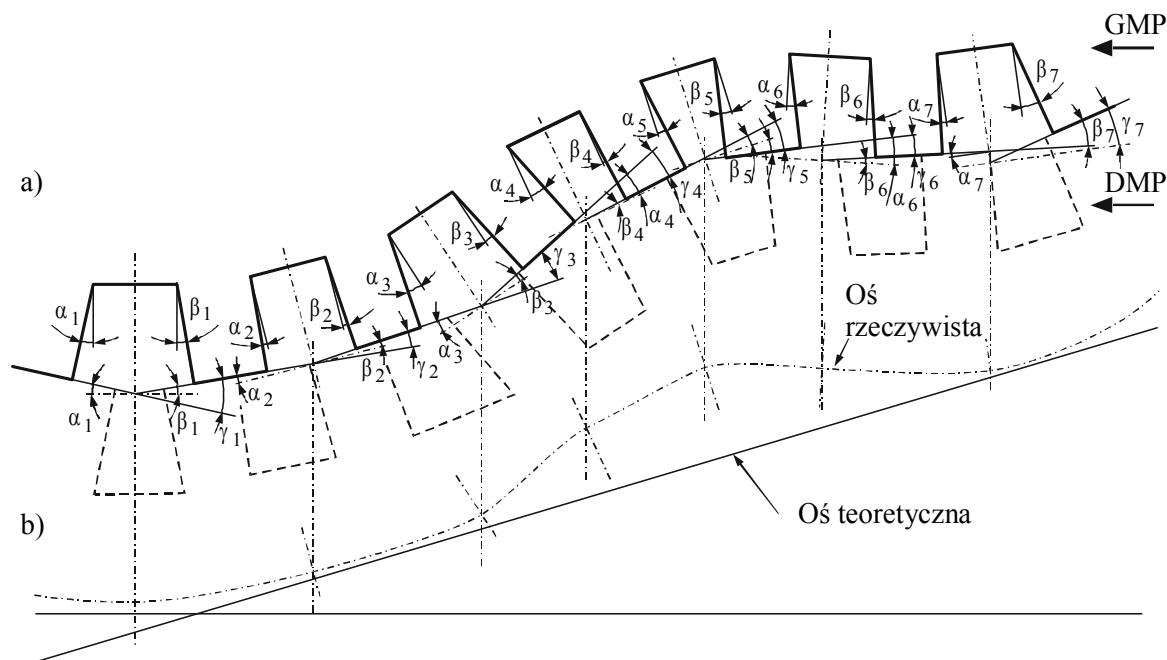
Rys. 5. Aproksymacja metodą najmniejszych kwadratów z uwidocznionymi elementami odstającymi

Kierunek nachylenia powierzchni czołowej wykorbienia określony jest wektorem normalnym n do tej powierzchni. Wektor normalny to wektor prostopadły do niej w punkcie przetrzeźni 3D. Do jego wyznaczenia służy obraz aproksymacji mapy nacisków powierzchniowych. Długość wektora normalnego wynosi jeden z racji jego znormalizowania. Wektor normalny w przestrzeni 3D wyznaczany jest na podstawie iloczynu wektorowego dwóch wektorów stycznych do badanej powierzchni i w efekcie odpowiada on osi powierzchni walcowej czopu wału (rys. 6). Wektory styczne do powierzchni są wyznaczane na podstawie równania tej płaszczyzny powstałego w wyniku wcześniejszej aproksymacji.



Rys. 6. Usytuowanie wektorów normalnych na przykładzie pojedynczego wykorbienia wału

Wektory normalne poszczególnych powierzchni bocznych wykorbień wyznaczają linię ugięcia wału. Tworząc w dalszej kolejności łańcuch powiązanych ze sobą odkształconych wykorbień (rys. 7), wyznaczyć można linię ugięcia wału, a następnie bazując na tych pomiarach dokonać korekty ustawienia łożysk w celu wyeliminowania jego deformacji.



Rys. 7. Interpretacja geometryczna wyników pomiarów odkształceń wykorbień wału metodą symetryczną: a) obraz odkształceń poszczególnych wykorbień wału, b) wyznaczanie rzeczywistej osi wału

Podsumowanie

Przeprowadzone dotychczas badania realizowane na obiekcie rzeczywistym, którym był wał korbowy silnika średnioobrotowego napędu głównego statku, wykazały że połączenie proponowanego układu pomiarowego z pomiarem tradycyjnym umożliwia poprawną ocenę stanu łożyskowania wałów korbowych. Czujnik przemieszczeń mierzy sumaryczną wartość odkształceń ramion wykorbień, natomiast współpracujący z nim układ pomiaru obwodowych nacisków powierzchniowych, umożliwia (zgodnie z zasadą proporcjonalności odkształceń sprężystych do przyłożonego obciążenia) indywidualne, ilościowe rozgraniczenie mierzonej wartości sprężynowania, proporcjonalnie na sąsiadujące ze sobą ramiona wykorbień.

Przedstawiona koncepcja i procedura opracowania wyników pomiarów może być stosowana do oceny stanu geometrycznego wielkogabarytowych wałów korbowych realizowanej na etapie ich wykonania jak również do oceny stanu łożyskowania wałów korbowych dokonywanej okresowo w trakcie eksploatacji silnika.

Autorzy: dr hab. inż. Krzysztof Nozdrzykowski prof. AM w Szczecinie, Akademia Morska w Szczecinie, Instytut Podstawowych Nauk Technicznych, ul. Willowa 2-4, 71-650 Szczecin, E-mail: k.nozdrzykowski@am.szczecin.pl, dr inż. Łukasz Nozdrzykowski, Akademia Morska w Szczecinie, Instytut Technologii Morskich, ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, E-mail: l.nozdrzykowski@am.szczecin.pl

LITERATURA

- [1] Łukomski Z., Technologia spalinowych silników kolejowych i okrętowych, WKiŁ 1972
- [2] Piaseczny L., Technologia naprawy okrętowych silników spalinowych, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1992
- [3] Strona internetowa: www.iims.org.uk/engine-crankshaft-deflection-measurement-news-hound/
- [4] Strona internetowa: www.linkedin.com/diesel-engine-crankshaft-deflection-measurement-mahmoud-moghtaderi/
- [5] Nozdrzykowski K., Metodyka pomiarów geometrycznych odchyłek powierzchni walcowych wielkogabarytowych elementów maszyn na przykładzie wałów korbowych silników okrętowych, Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2013
- [6] Nozdrzykowski K., Grządziel Z., Simulation test and measurements of crankshaft deformation by the symmetric method, Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, No. 42 (114), Szczecin 2015
- [7] Nozdrzykowski K., Przyrząd do pomiarów odkształceń, zwłaszcza wałów korbowych oraz sposób pomiaru odkształceń wałów korbowych, (zgłoszono 12/2016), Zgłoszenie patentowe P.419988
- [8] Osowski S., Metody i narzędzia eksploracji danych, BTC, Legionowo 201