

DIAGNOZOWANIE METODAMI DRGANIOWYMI AGREGATÓW MASZYN Z MECHANIZMEM TŁOKOWO-KORBOWYM

Piotr Jan BIELAWSKI

Akademia Morska w Szczecinie, Zakład Diagnostyki i Remontów Maszyn Okrętowych
ul. Podgórna 51/53, 70-205 Szczecin, pbielaws@wsm.szczecin.pl

Streszczenie

Wymieniono istotne cechy agregatów z maszyną z mechanizmem tłokowo-korbowym. Wykazano związki między przebiegiem siły przenoszonej przez węzeł tribologiczny i jego stanem technicznym. Przedstawiono węzły tribologiczne mechanizmu tłokowo-korbowego podatne na diagnozowanie metodami drganiowymi. Wskazano na możliwości diagnozowania agregatów metodami drganiowymi.

Słowa kluczowe: agregat, mechanizm tłokowo-korbowy, łożyska ślizgowe, diagnostyka drganiowa

DIAGNOSIS OF GENERATORS WITH MACHINE EQUIPPED WITH PISTON-CONNECTING ROD MECHANISM BY VIBRATION METHODS

Summary

The important features of generators with machine equipped with piston-connecting rod mechanism have been mentioned. There were indicated relation between course of force carried by tribological pair and it's technical state. There have been presented tribological pairs of piston-connecting rod mechanism suitable for diagnosis by vibration methods. There were indicated the possibilities of generator's diagnosis by vibration methods.

Key words: generator, piston-connecting rod mechanism, slide bearings, vibration diagnosis

WSTĘP

Elementy w maszynach posiadają wiele stopni swobody i z tego względu są zdolne do wykonywania różnego rodzaju drgań. Informacje użyteczne diagnostycznie mogą być zawarte nie tylko w wibracjach elementów, ale również w innych rodzajach drgań w szczególności drganiach poosiowych/wzdłużnych i skrętnych. Wymuszenia generujące drgania jednego elementu mogą pochodzić z różnych źródeł, co musi być uwzględnione podczas wnioskowania diagnostycznego. Obiektem diagnozowania musi być nie pojedyncza maszyna, ale cały agregat.

W agregatach wyróżnia się silnik, odbiornik/maszynę roboczą i fundament. W silnikach i w maszynach roboczych realizowane są procesy robocze oddziałujące na elementy maszyn w formie ciśnień, sił lub momentów sił.

Momenty działające na wał maszyny roboczej są momentem obciążającym silnik. Deformacje fundamentu powodować mogą zmianę reakcji w podporach / łożyskach wałów obydwu maszyn.

W maszynach z mechanizmem tłokowo-korbowym:

– siły i momenty mogą mieć przebieg okresowy (możliwa zmiana znaku siły lub momentu) zależny od kąta obrotu wału korbowego ze zmianą znaku,

– wały są wałami wykorbionymi zdolnymi do zmiany położenia osi czopów głównych.

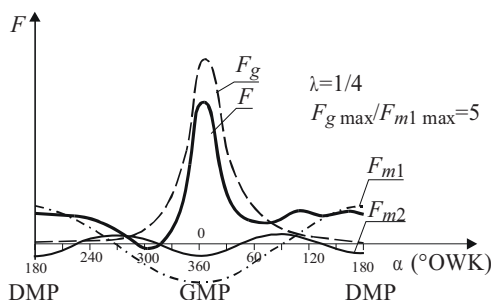
1. PRZEBIEGI SIŁ W MECHANIZMACH TŁOKOWO-KORBOWYCH

Ciśnienia p wytwarzane w komorach roboczych maszyn z mechanizmem tłokowo-korbowym oddziałują na ścianki elementów komory i powodują powstawanie drgań głowicy i tulei oraz sił F_g działających na tłoki.

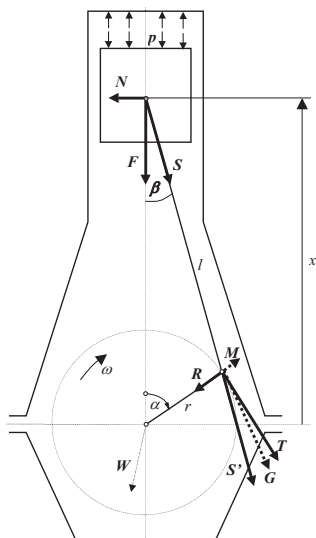
Mając wcześniej wyznaczoną „funkcję przejścia” możliwe jest określenie przebiegu ciśnienia w komorze na podstawie przebiegu drgań głowicy. Bliższe informacje można znaleźć w [1].

Na tłok maszyny, oprócz wspomnianego ciśnienia, działają siły bezwładności F_m ($F_m = F_{m1} + F_{m2}$). Przykładowy przebieg sił F_g , F_m i ich wypadkowej F przedstawiono na rys. 1.

W mechanizmie tłokowo-korbowym siłę F można rozłożyć tak jak przedstawiono na rys. 2. Z analizy przebiegów sił działających na elementy mechanizmów tłokowo-korbowych dokonanej w [1, 2] wynika, że dla określonego kąta lub kątów obrotu wału korbowego następuje zmiana znaku siły (następuje przejście przez wartość zerową).



Rys. 1. Wykres siły tłokowej F silnika dwusuwowego w zależności od kąta OWK [5]



Rys. 2. Rozkład sił działających na mechanizm tłokowo-korbowy [1]

2. MODULACJA SIŁ W WĘZŁACH TRIBOLOGICZNYCH I DRGANIA NIMI WYWOŁYWANE

W mechanizmie tłokowo-korbowym na skutek zużycia elementów par tribologicznych następuje powiększenie luzów w węzłach tribologicznych.

W przypadku węzła bez cieczy rozdzielającej zmiana znaku siły $F(t)$ działającej np. na czop o masie m powoduje oderwanie się masy od jednej ścianki panwi i przemieszczanie się w ramach luzu s do drugiej ścianki panwi.

Masa zderza się z drugą ścianką z prędkością V_k

$$V_k = \sqrt{\frac{2s \cdot F}{m}} \quad (1)$$

Powstaje siła uderzenia P_d

$$P_d = m \frac{dv}{dt} = m \frac{V_k - V_0}{t_0 - t_k}, \quad V_0 = 0 \quad (2)$$

gdzie: t_0 – czas końca uderzenia,
 t_k – czas początku uderzenia.

Czas trwania uderzenia $t_0 - t_k$ zależy od sztywności ścianki. Obecność filmu olejowego na uderzanej ściance powoduje wydłużenie czasu uderzenia. Efekt ten spowodowany jest tym, że ciecz rozdziela-

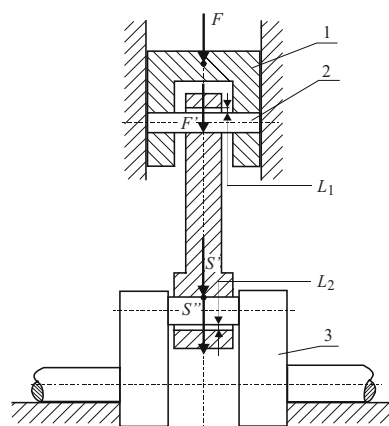
jąca w formie filmu olejowego posiada własności sprężyste i tłumiące. W przypadku łożysk ślizgowych promieniowych współczynniki sprężystości k i tłumienia c opisane są poniższymi wzorami wynikającymi ze wzoru Hollanda [3, 4]

$$k = \frac{\eta \omega B D}{\psi^2} S_0, \quad c = \frac{\eta \dot{x} B D}{\psi^2} S_w \quad (3)$$

gdzie: η – lepkość dynamiczna oleju,
 ω – prędkość kątowa czopa względem panewki,
 $\psi = S/D$
 S – luz w łożysku,
 D – średnica czopa,
 B – szerokość panewki,
 S_0, S_w – liczby Sommerfelda dla efektu związanego z obrotem czopa (S_0) i dla efektu wyciskania oleju (S_w).

Z przebiegu siły wypadkowej F (rys. 1) wynika, że następuje przejście wartości tej siły i jej składowej N (rys. 2) przez wartości zerowe. Jak wykazano, siły o takim przebiegu przenoszone przez węzły tribologiczne ulegają odpowiedniej modyfikacji.

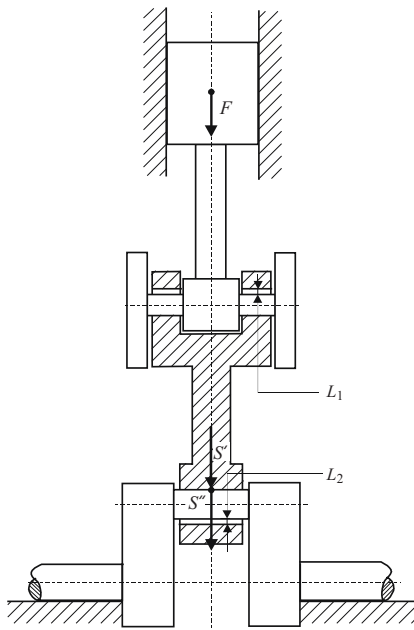
W przypadku mechanizmów bezwodziowych siła F' działająca przez sworzeń na panewkę łożyska korbowodu jest zmodyfikowaną luzem łożyskowym siłą F , rys. 3. Siła F' generuje drgania korbowodu. Po odpowiednim „wybraniu” luzu w łożysku łożyska korbowodu, na stopę korbowodu działa wypadkowa S' sił gazowych, masowych tłoka, sworzni i części korbowodu wykonujących ruch oscylacyjny. Luz w łożysku stopy korbowodu powoduje, że na czop korbowy wykorbienia działa siła S'' . Zmodyfikowana luzem siła S'' generuje drgania m.in. związane z kształtem wału korbowego – drgania wzdłużne (dokładniej drgania wzdłużne wywołuje składowa promieniowa R wymienionej siły, rys. 2). Możliwy jest pomiar takich drgań.



Rys. 3. Siły generujące drgania korbowodu i wykorbienia: 1 – tłok, 2 – sworzeń, 3 – wykorbienie; L_1 – luz łożyska łożyska korbowodu, L_2 – luz łożyska stopy korbowodu (łożyska korbowego) [1]

W przypadku mechanizmów z wodziem wpływ luzów jest podobny, rys. 4. Siłami modyfikowanymi luzem łożyska łożyska korbowodu są siły

gazowe działające na tłok oraz siły bezwładności od mas tłoka, trzona tłokowego i wodzika.



Rys. 4. Siły generujące drgania korbowodu i wykorbienia mechanizmu z wodzikiem: L_1 – luz łożyska łoża korbowodu, L_2 – luz łożyska stopy korbowodu (łożyska korbowego) [1]

W maszynie bezwodzikowej siła N przejmowana jest przez tuleję cylindrową poprzez film olejowy, głównie między częścią prowadzącą tłoka a tuleją. Ponieważ następuje przejście przez wartość zerową siły N , luz między tłokiem i tuleją modyfikuje przebieg siły N . Zmodyfikowana luzem siła N generuje drgania tulei cylindrowej.

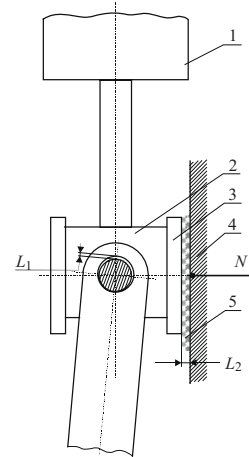
Wykorzystanie tego efektu do celów diagnostycznych jest problematyczne z następujących powodów:

- tuleja cylindrowa jest z reguły chłodzona od strony zewnętrznej cieczą i nie jest bezpośrednio dostępna;

- częściowo siła N przenoszona jest na tuleję poprzez pierścienie cylindrowe. Między tłokiem i pierścieniem znajduje się gaz (sprężony lub gazy spalinowe) o dużym ciśnieniu posiadający określone właściwości sprężyste i tłumiące;

- umieszczenie środka sworznia (punktu, przez który przechodzi siła N) w środku ciężkości tłoka nie gwarantuje równomiernego rozkładu nacisków w części prowadzącej. Umieszczenie osi sworznia w osi symetrii części prowadzącej poniżej środka ciężkości tłoka powoduje uderzenia krawędziami tłoka o tuleję przy zmianie kierunku działania siły N , (patrz np. [5]).

W przypadku mechanizmów wodzikowych siła N działa w osi symetrii wodzika. Siła N' działająca na sanie wodzika jest siłą N modyfikowaną luzem między saniami i prowadnicą wodzika, rys. 5. Składowa dynamiczna siły N' generuje drgania prowadnic. Możliwy jest pomiar takich drgań. Ponieważ siła N jest składową siły F' , przebieg siły N' zależy również od luzu w łożysku łoża korbowodu.



Rys. 5. Siły generujące drgania prowadnicy wodzika: 1 – tłok, 2 – wodzik, 3 – sanie wodzika, 4 – prowadnica wodzika, 5 – ciecz rozdzielająca; L_1 – luz w łożysku łoża korbowodu, L_2 – luz między saniami wodzika i prowadnicą [1]

3. ZALEŻNE OD LUZU ŁOŻYSKOWEGO DEFORMACJE WAŁU KORBOWEGO

Na wał korbowy maszyny agregatu działają:

- moment oporu odbiornika mocy lub moment napędzający od silnika,
- momenty od sił stycznych,
- momenty od drgań skrętnych.

Rozkład sumy momentów od sił stycznych i od drgań skrętnych wzdłuż osi wału nie jest stały: moment skręcający dla pierwszej postaci drgań rośnie w kierunku od wolnego końca wału do koła zamachowego i zależy od prędkości obrotowej.

Sumaryczny moment działający na wał korbowy powoduje nie tylko czyste skręcanie wału (tak jak wału gładkiego), ale wywołuje również deformację wykorbień i deformację całego wału. Deformacje te generalnie zależne są od tłumienia w łożyskach głównych [6]. Zmienny moment skręcający (moment obrotowy + moment wywołany drganiami skrętnymi¹⁾ powoduje zmiany położenia czopów głównych względem panwi łożysk głównych. Wielkie przemieszczenia czopów w kierunku promieniowym powodują powstawanie dodatkowych ciśnień od tzw. efektu wyciskania (wzór Hollanda [3], przyrost ciśnienia proporcjonalny do prędkości przemieszczania). Wypadkowa ciśnienie oddziałuje zarówno na czop, jak i panewkę, co powoduje wzrost siły obciążającej łożysko główne. Efekt wyciskania oleju prowadzi do nieodwracalnej przemiany energii i tym samym do tłumienia drgań skrętnych.

Na wał wykorbiony, przez łożyska podpierające, działają ponadto dodatkowe siły reakcji wywołane deformacją podpór łożyskowych (fundamentu) i oddziaływaniem drugiej maszyny agregatu. Te dodatkowe siły powodują deformację wału korbowego objawiającą się powstawaniem dodatkowych drgań

¹ Moment od drgań skrętnych może być wielokrotnie większy od momentu obrotowego.

poosiowych wolnego końca wału korbowego. Problem ten przedstawiono szerzej w [7].

4. ZALEŻNOŚĆ MIĘDZY SIŁAMI MODYFIKOWANYMI LUZEM W WĘZŁACH A DRGANIAMI ELEMENTÓW MECHANIZMU TŁOKOWO-KORBOWEGO

Badano wpływ luzu w łożyskach korbowych i wpływ sprężynowania wykorbień na drgania wzdłużne wału korbowego oraz wpływ luzu w łożyskach głównych na drgania skrętne wału korbowego i drgania obudowy łożysk [1].

W obu przypadkach drgania wzdłużne mierzone były na wolnym końcu wału korbowego. W obydwu przypadkach otrzymano podobne zależności miary drgań od luzu w łożysku: istnieje pewna wartość „optymalna” luzu, dla której drgania są najmniejsze. Zarówno dla luzu większego, jak i mniejszego następuje wzrost wartości drgań, przy czym wzrost dla luzów mniejszych jest znacznie większy.

W przypadku drgań skrętnych stwierdzono, że dominujący wpływ na omawianą zależność mają luzy łożysk położone w pobliżu węzła drgań mierzonej postaci.

Wzrost miary drgań wzdłużnych i skrętnych można wyjaśnić następująco:

- luz „optymalny” leży w zakresie luzu nominalnego (między minimalnym i maksymalnym);
- poniżej luzu minimalnego ilość oleju smarnego przepływającego przez dane łożysko jest niewystarczająca do zapewnienia „ustalonych warunków termodynamicznych”; natężenie przepływającego oleju jest za małe, ażeby odprowadzić z łożyska całe ciepło tarcia bez wzrostu temperatury oleju;
- wzrost temperatury oleju powoduje znaczący spadek lepkości;
- spadek lepkości oleju powoduje:
 - wzrost (modyfikację) siły przejmowanej przez wykorbiecie (wzrost drgań wzdłużnych),
 - spadek tłumienia w łożyskach głównych (wzrost deformacji wału – amplitudy drgań skrętnych);
- powyżej luzu „optymalnego” następuje znaczący spadek nośności (sprężystości) i tłumienia filmu olejowego.

Potwierdzono eksperymentalnie zależność drgań obudowy łożyska² od drgań skrętnych wału korbowego [1]. Drgania obudowy łożyska (korpusu) są największe dla luzu minimalnego. Zwiększenie luzu do luzu „optymalnego” pociąga za sobą zmniejszenie drgań. Luz większy od optymalnego to zmniejszenie nośności łożyska (spadek tłumienia i wzrost drgań skrętnych), spadek ciśnienia w filmie olejowym, zmniejszenie grubości filmu olejowego i nieznaczny spadek sił generujących drgania obudowy.

W praktyce potwierdzono, że wzrost luzu w łożysku łożyska korbowodu sprężarki dwustronnego działania powoduje znaczący wzrost drgań prowadnicy

wodzika. Kąt obrotu, przy którym na przebiegu czasowym drgań obserwowano wzrost drgań odpowiada kątowi przejścia siły wypadkowej przez wartość zerową [8].

WNIOSKI

1. W przypadku agregatów z maszyną z mechanizmem tłokowo-korbowym konieczne i możliwe jest tworzenie modeli diagnostycznych.

2. Zbudowane modele pozwalają na:

- diagnostowanie stanu łożysk łożyska korbowodu, wodzika, stopy korbowodu i łożysk głównych;
- diagnostowanie ułożenia wałów agregatu;
- wyznaczanie rzeczywistych sił i momentów

działających na określone elementy i prognozowanie uszkodzeń zmęczeniowych tychże elementów [9].

ZAKOŃCZENIE

Równoległe z rozwojem modeli diagnostycznych następuje rozwój sprzętu diagnostycznego – sensorów. Badane są specjalne przetworniki do pomiarów drgań względnych: przyspieszeń drgań skrętnych i prędkości drgań wzdłużnych wolnego końca wału korbowego.

LITERATURA

- [1] Bielawski P., *Elementy diagnostyki drganiowej mechanizmów tłokowo-korbowych maszyn okrętowych*. Szczecin 2002.
- [2] Bielawski P., *Tribological kinematic pairs vibration signals of piston – connecting rod mechanisms*. Kwartalnik Postępy Technologii Maszyn, 2000/1, vol. 24. PAN. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2000, s. 23–40.
- [3] Holland J., *Beitrag zur Erfassung der Schmierverhältnisse in Verbrennungskraftmaschinen*. Technische Universität Hannover, Hannover 1959. Diss.
- [4] Roemer E., Schopf E., *Untersuchungen von Federung und Dämpfung in Gleitlagern*. Antriebstechnik 12(1973)10, s. 282–289.
- [5] Piotrowski I., *Okrętowe silniki spalinowe. Zasady budowy i działania*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1983.
- [6] Federn K., Broede J., *Experimentelle Analyse der Drehschwingungsdämpfung von Kolbenmaschinen*. MTZ 43(1982)11, s. 525–529.
- [7] Bielawski P., *Diagnostowanie ułożenia wału wykorbionego maszyn okrętowych*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Zeszyt 4(132)2002, s. 177–193.
- [8] Lenz J., *Möglichkeiten und Erfahrungen mit der Zustandsüberwachung an oszillierenden Maschinen*. Beiträge des IBZ Hohen Luckow e.V. 7(1999)2, s. 81–96.
- [9] Bielawski P., *Diagnostyka procesów zmęczeniowych łożysk ślizgowych i wałów korbowych tłokowych maszyn okrętowych*. Przegląd Mechaniczny, Nr 4, 2003, s. 32–36.

² Drgania mierzone na górnej pokrywie łożyska głównego w kierunku osi cylindra, (w płaszczyźnie pionowej).