Journal of Polish CIMEEAC
Faculty of Ocean Engineering & Ship Technology
GDAŃSK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANALIZA I OCENA WADLIWOŚCI ŁOŻYSK W ASPEKCIE II ZASADY TERMODYNAMIKI

Piotr Bzura

Politechnika Gdańska,
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa,
Katedra Siłowni Morskich i Lądowych
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel.: +48 58 3472763
e-mail: pbzura@pg.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono autorską metodę sprawdzania wadliwości łożysk tocznych i ślizgowych podpierających wał napędzany trójfazowym silnikiem elektrycznym. Badania zostały przeprowadzone w aspekcie II zasady termodynamiki na podstawie analizy i oceny wyników badań laboratoryjnych wykonanych na stanowisku badawczym. Badania te wymagały zbudowania stanowiska umożliwiającego porównanie działania łożysk tocznych i ślizgowych przedmiotowego układu napędowego. Został przedstawiony algorytm, według którego wykonano badania empiryczne. Wykazano, że uzyskane wyniki badań potwierdziły przydatność zaproponowanej w tym artykule metody określania wartości wadliwości łożysk.

Sformułowano także, w oparciu o analizę uzyskanych wyników, hipotezę badawczą, z której wynika, że zmiana podparć wału pośredniego, ze względu na rodzaj i liczbę łożysk, wpływa na działania wału. Hipoteza ta została zweryfikowana na podstawie testu Anova z uwzględnieniem statystyki Fishera LSD.

Słowa kluczowe: *działanie wału, współczynnik wadliwości łożysk, hipoteza badawcza.*

1. Wstęp

Do napędu statku morskiego [4,6] potrzebny jest zespół maszyn i urządzeń tworzących układ napędowy. Zasadniczymi elementami każdego układu napędowego są: źródło mocy (np. głównie tłokowe silniki spalinowe, lecz obecnie ze względu na ochronę środowiska coraz częściej stosowane są silniki elektryczne), część pośrednicząca (np. lina wałów składająca się z wału śrubowego, pośredniego i oporowego wraz ze sprzęgłami, łożyskami oraz innymi elementami) oraz pędnik (np. śruba napędowa). Zadaniem linii wałów jest transmisja energii polegająca na przekazywaniu pędnikowi momentu obrotowego od źródła mocy oraz przekazywaniu na kadłub siły naporu wytwarzanej przez pędnik. W celu zapewnienia prawidłowej pracy do utrzymania stałego położenia osi obrotu względem nieruchomej podstawy oraz przenoszenia obciążeń z jednego elementu na drugi wykorzystywane są różne rodzaje łożysk.

Na całej długości linii wałów występują straty mechaniczne (tzw. moc strat tarcia), wskutek czego moc efektywna, jaką źródło mocy generuje jest o około 1÷3% większa od mocy pobieranej przez pędnik. Jednymi z głównych elementów wpływających na wartość tych start są łożyska nośne.

W artykule analizowane było działanie wału napędowego podpartego różnymi łożyskami tocznymi i ślizgowymi na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunkach 1 i 2. Łożyska zostały porównane na podstawie analizy współczynnika wadliwości, czyli przeciwieństwa sprawności, w aspekcie II zasady termodynamiki [1,2].

Kolejne punkty artykułu zawierają: opis łożysk nośnych wału pośredniego, autorską propozycję interpretacji dyssypacji energii, opis stanowiska badawczego wraz z analizą nieodwracalności przemian zachodzących w łożyskach, weryfikację hipotezy badawczej oraz wnioski końcowe.

2. Łożyska toczne i ślizgowe linii wałów

Okrętowa linia wałów składa się z wału śrubowego, wałów pośrednich i wału oporowego. Ponieważ warunki pracy wałów pośrednich są w najmniejszym stopniu narażone na przeciążenia i charakteryzują się łatwością montażu i demontażu, więc traktuje się je jako najsłabsze ogniwa linii wałów, które w wyniku nadmiernego przeciążenia pierwsze ulegną uszkodzeniu. Projektując linię wału zaleca się opracowanie takiej konstrukcji, aby każdy wał pośredni był podpierany tylko jednym łożyskiem, ponieważ uzyskuje się w ten sposób m.in. zmniejszenie strat mechanicznych, masy i kosztów wykonania. Rodzaj łożyska też jest istotny ze względu na funkcjonalność, niezawodność napędu głównego oraz na powstające straty mocy. Zasadnicze rodzaje łożysk to toczne i ślizgowe, których wady i zalety zostały zestawione w tabeli 1 [4,5].

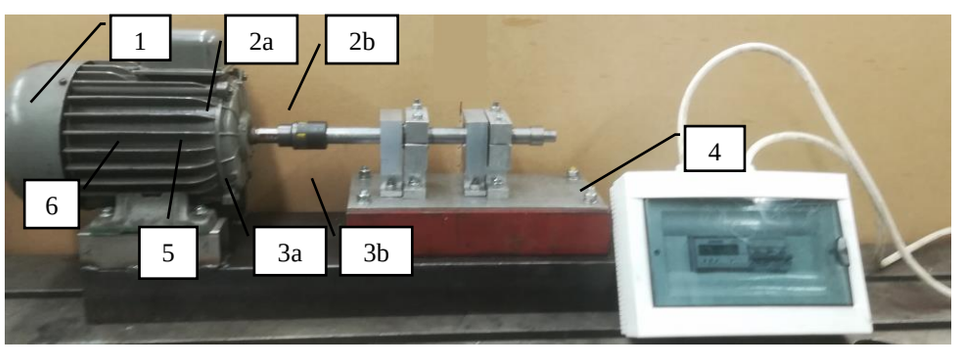
Tab. 1. Wady i zalety łożysk

L.p	Cechy łożyska	Łożyska toczne	Łożyska ślizgowe
1	Współczynnik tarcie w chwili rozruchu	Mały(zaleta)	Większy (wada)
2	Współczynnik tarcie podczas eksploatacji	Mały, ale zależy od prędkości obrotowej wału	Większy, ale niezależny od prędkości obrotowej wału
3	Smarowanie	Proste (zaleta)	Skomplikowane (wada)
4	Nośność w odniesieniu do jednostki szerokości łożyska	Większa (zaleta)	Mała (wada)
5	Docieranie	Zbędne (zaleta)	Konieczne (wada)
6	Wrażliwość na uderzenia	Większa (wada)	Mała (zaleta)
7	Wrażliwość na zanieczyszczenia	Większa (wada)	Mała (zaleta)
8	Wykonanie dzielone	Niekorzystne (wada)	Powszechnie stosowane (zaleta, łatwy demontaż)
9	Wymiary łożyska: średnica/długość	Duża/mała	Mała/duża
10	Podatność naprawcza	Duża (zaleta)	Mała (wada)

3. Stanowisko badawcze do badania wadliwości

Stanowisko laboratoryjne, na którym przeprowadzone zostały badania eksperymentalne służące do analizy działań wału pośredniego zostało przedstawione na rysunku 1.

Pomiar polega na uruchomieniu trójfazowego silnika elektrycznego firmy ATB Tamel S.A., przy zadanej prędkości obrotowej 700 obr/min napędowego wału pośredniego podpartego różnymi typami łożysk i w różnych konfiguracjach. Są to dwa smarowane jednorzędowe zwykłe łożyska kulkowe firmy SKF i dwa niesmarowane łożyska ślizgowe wykonane z panwi dzielonej ze stali St4S. Wał pośredni, również wykonany ze stali St4S, jest wałem pełnym, z końcówkami stożkowymi i z czterema czopami, na których osadzone są łożyska. Ostatnim elementem zespołu napędowego jest sprzęgło rozłączne łączące silnik z wałem i umożliwiające prostą zmianę konfiguracji ustawień łożysk podpierających wał. Zapotrzebowanie na energię elektryczną jest mierzone trójfazowym licznikiem energii OR-WE-505 firmy ORNO.



Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego łożysk wału pośredniego: 1- trójfazowy silnik elektryczny, 2a, 2b – łożyska toczne,3a,3b – łożyska ślizgowe, 4 – trójfazowy licznik energii elektrycznej, 5 – wał pośredni, 6 – sprzęgło elastyczne

Podczas badań mierzone były wartości następujących wielkości:

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

– działanie silnika elektrycznego - energia dostarczona z sieci do silnika elektrycznego odłączonego od wału E_{DS} [N·m],
– działanie układu - energia dostarczona z sieci do silnika elektrycznego napędzającego wał pośredni, z założoną konfiguracją łożysk (podparć) E_D [N·m],
– czas trwania jednego impulsu elektrycznego τ[s].

Działanie wału pośredniego było analizowane na podstawie współczynnika wadliwości łożyska [3,4,6] bądź łożysk, podczas jednego obrotu. Jego wartość wyznacza się z następującej zależności:

$$\xi_S = \frac{L_S}{E_D} = \frac{2 \cdot \pi \cdot P \cdot \mu \cdot r}{E_D} = \frac{2 \cdot \pi \cdot M_t}{E_D} \tag{1}$$

gdzie:

L_S – praca szkodliwa[N·m],
P – równoważne obciążenie dynamiczne łożyska [N],
μ - współczynnik tarcia [-],
r – promień czopa [m],
M_t - moment tarcia w łożysku [N·m].

Moment tarcia w łożyskach pochodzi od czterech, następujących źródeł [7]:

$$M_t = M_{t1} + M_{t2} + M_{t3} + M_{t4} \tag{2}$$

gdzie:

M_{t1} - moment tarcia tocznego, uwzględniający zmniejszenie grubości filmu smarnego i nagrzewanie się środka smarnego wskutek ścinania w strefie wlotowej [N·m],

M_{t2} - moment tarcia ślizgowego, uwzględniający wpływ warunków smarowania [N·m],

M_{t3} - moment tarcia uszczelnień zintegrowanych [N·m],

M_{t4} - moment tarcia związany z oporami ruchu, ugniataniem, rozbryzgiwaniem itp. w kąpieli olejowej [N·m].

Obliczenia wartości dla tych czterech źródeł powstających start mechanicznych jest skomplikowane, więc posługując się metodą próbną, zakładając tę samą zależność dla łożysk tocznych i ślizgowych, moment tarcia wynosi:

$$M_t = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot P \cdot d \tag{3}$$

gdzie:

d – średnica czopa łożyska [m].

4. Określenie współczynnika wadliwości działania wału podpartego łożyskami

Zbadano sześć modeli fizycznych układu mechanicznego z różnymi sposobami podparć wału pośredniego:

1. Układ składający się z silnika elektrycznego, napędzającego wał pośredni z łożyskami tocznymi 2a i 2b - symbol A;
2. Układ składający się z silnika elektrycznego, napędzającego wał pośredni z łożyskiem tocznym 2a - symbol B;
3. Układ składający się z silnika elektrycznego, napędzającego wał pośredni z łożyskiem tocznym 2b - symbol C;
4. Układ składający się z silnika elektrycznego, napędzającego wał pośredni z łożyskami ślizgowymi 3a i 3b - symbol D;
5. Układ składający się z silnika elektrycznego, napędzającego wał pośredni z łożyskiem ślizgowym 3a - symbol E;
6. Układ składający się z silnika elektrycznego, napędzającego wał pośredni z łożyskiem ślizgowym 3b - symbol F;

Badania zostały wykonane wg procedury zgodnie, z którą należało:

1. Odłączyć wał pośredni od silnika elektrycznego;

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

2. Uruchomić silnik elektryczny i zmierzyć czas trwania jednego impulsu elektrycznego (1 imp = 0,001 kW·h);
3. Odłączyć od zasilania silnik elektryczny i podłączyć wał pośredni z łożyskami według jednej z rozpatrywanych konfiguracji A÷F;
4. Uruchomić badany układ mechaniczny i zmierzyć czas trwania jednego impulsu elektrycznego;
5. Po zakończeniu wszystkich testów spisać wyniki pomiarowe.

Wszystkie pomiary wraz z obliczeniami były czterokrotnie powtarzane, uzyskane wyniki zapisano w tabelach 2 i 3.

Tabela 2. Wyniki pomiarów z wartością średnią i odchyleniem standardowym

Model układu badawczego	τ_1[s]	τ_2[s]	τ_3[s]	τ_4[s]	$\tau_{śr}$[s]	S_z[s]
Silnik bez wału	18,64	18,94	18,74	18,82	18,79	0,64
A	18,08	18,05	17,92	17,83	17,97	0,64
B	18,25	18,24	18,20	18,11	18,20	0,44
C	18,62	18,52	18,37	18,31	18,46	0,70
D	16,91	17,14	16,94	16,91	16,98	0,60
E	17,61	17,71	17,65	17,53	17,63	0,49
F	17,81	17,82	17,86	17,74	17,81	0,38

gdzie: $\tau_{śr}$[s] - wartość średnia impulsu elektrycznego, S_z - potrojona wartość odchylenia standardowego na podstawie rozkładu Studenta dla poziomu ufności 99,7%

Tabela 3. Wyniki prób pomiarowych węzłów tarcia

Model fizyczny układu mechanicznego	E_{DS} [N·m]	E_D [N·m]	P·μ[N]	L_s[J]	ξ_s [-]
A	16,46	17,12	53,17	4,17	0,24
	16,46	17,15	55,44	4,35	0,25
	16,46	17,28	65,40	5,13	0,30
	16,46	17,36	72,37	5,68	0,33
B	16,46	16,96	40,40	3,17	0,19
	16,46	16,97	41,15	3,23	0,19
	16,46	17,01	44,13	3,46	0,20
	16,46	17,10	50,90	4,00	0,23
C	16,46	16,63	13,44	1,05	0,06
	16,46	16,72	20,62	1,62	0,10
	16,46	16,85	31,54	2,48	0,15
	16,46	16,91	35,96	2,82	0,17
D	16,46	18,31	154,11	12,10	0,66
	16,46	18,06	133,64	10,49	0,58
	16,46	18,28	151,41	11,89	0,65
	16,46	18,31	154,11	12,10	0,66
E	16,46	17,58	93,47	7,34	0,42
	16,46	17,48	85,19	6,69	0,38
	16,46	17,54	90,15	7,08	0,40
	16,46	17,66	100,15	7,86	0,45
F	16,46	17,38	77,01	6,05	0,35
	16,46	17,37	76,20	5,98	0,34
	16,46	17,33	72,96	5,73	0,33
	16,46	17,45	82,73	6,49	0,37

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że działanie układu (wartość energii E_D) wyraźnie zmienia swoje wartości przy różnych rodzajach i konfiguracjach łożysk.

5. Weryfikacja hipotezy badawczej

Hipoteza badawcza o treści: „Nastąpiła zmiana działania wału pośredniego, dlatego ponieważ nastąpiła zmiana współczynnika wadliwości ξ_s łożyska bądź łożysk podtrzymujących" została zweryfikowana na podstawie analizy wariancji ANOVA (tabela 4):

- Działanie wału pośredniego jest wyrażane zmienną losową. Jako hipotezę zerową (H_0) przyjęto, że wszystkie analizowane sposoby podparć (łożysk tocznych lub ślizgowych) umożliwiające działanie wału pośredniego mają taką samą wartość współczynnika wadliwości ξ_s. Jako hipotezę alternatywną (H_A) przyjęto, że wszystkie podparcia wału mają różną wartość współczynnika wadliwość ξ_s.
- Z testu zgodności Kołmagorowo-Smirnova dla prób o liczebności $n < 100$ dla przedziału ufności $\beta = 95\%$ wynika, że funkcją, która opisuje sposób

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

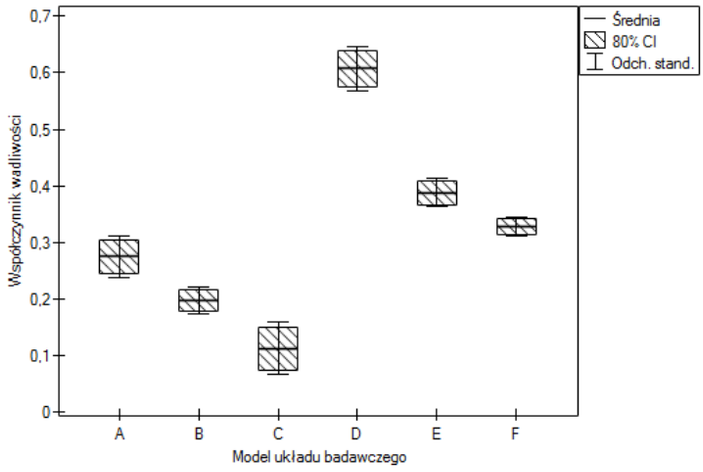
przyporządkowania prawdopodobieństw poszczególnym wartościom zmiennej losowej, jest rozkład normalny.

- Na podstawie testu Levene'a potwierdzona została jednorodność wariancji pomiędzy porównywanymi grupami.
- Po wykonaniu testu po fakcie (ang. POST-HOC, dotyczącego porównywania różnych par pomiarów) za pomocą statystyki Fishera LSD dla poziomu istotności $\alpha = 0{,}05$ wykazano, że wartość średnia współczynnika wadliwości jest wyraźnie różna dla wszystkich populacji, więc hipotezę zerową H_0 odrzucono i przyjęto hipotezę alternatywną H_A.

Tabela 4. Analiza wariancji ANOVA

ξ_s [-]	Model układu badawczego	Analiza rozkładu			Analiza wariancji wg Levene		Analiza różnic - POST-HOC (Test Fischer LSD)							
		Poziom istotności α	Wartość prawdopodobieństwa testowego p	p>α	p_L	$p_L>\alpha$		A1	B1	C1	D1	E1	F1	$p_F<\alpha$
0,24	A	0,05	0,905	RN	0,2967	WP	A1		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	H_A
0,25														
0,30														
0,33														
0,19	B	0,05	0,856	RN			B1	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
0,19														
0,20														
0,23														
0,06	C	0,05	0,96	RN			C1	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	<0,05	
0,10														
0,15														
0,17														
0,66	D	0,05	0,513	RN			D1	<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05	
0,58														
0,65														
0,66														
0,42	E	0,05	0,98	RN			E1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	
0,38														
0,40														
0,45														
0,35	F	0,05	0,992	RN			F1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05		
0,34														
0,33														
0,37														

gdzie: p_α - wartość prawdopodobieństwa testu Kołmagorowa-Smirnova, RN - rozkład normalny, p_L-wartość prawdopodobieństwa testu Levene'a, WP - wariancje w populacjach są zbliżone, p_F –wartość prawdopodobieństwa testu Fishera, H_A - przyjęta hipoteza alternatywna (są podstawy do odrzucenia hipotezy zerowej)



Rys. 4. Porównanie wartości średniego współczynnika wadliwości na podstawie analizy wariancji ANOVA [8]

Z wykresu dotyczącego testu po fakcie (*POST HOC*) wynika, że wszystkie populacje (*A, B, C, D, E, F*) mają względem siebie różne wartości współczynnika wadliwości ξ_s. Największa wartość współczynnika wadliwości występuje, gdy wał pośredni jest podparty dwoma łożyskami ślizgowymi, a najmniejsza - gdy wał pośredni jest podparty jednym łożyskiem tocznym umieszczonym bliżej silnika.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

6. Uwagi końcowe i wnioski

Przedstawione stanowisko badawcze zbudowane zostało celem analizy pod względem poprawności działania różnych rodzajów i konfiguracji łożysk podpierających wał pośredni. Wyznaczenie współczynników wadliwości ξ_S, umożliwiło porównanie sześciu sposobów podparcia wału napędowego. Najmniejszą wartość pracy szkodliwej L_S podczas działania osiąga wał pośredni podparty smarowanym łożyskiem tocznym wg modelu C.

Można więc uznać, że ostatecznie została potwierdzona prawdziwość hipotezy badawczej, że rodzaj i konfiguracja podparć wału wpływa na poprawność jego działania, co można uzasadnić stwierdzoną podczas badań zmianą wartości współczynnika wadliwości.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań można wnioskować(podobnie jak to wykazano w pracy [3,4]), że zaproponowany przez autora model fizyczny do określenia poprawności działania wału może być przydatny przy analizie ułożenia okrętowej linii wałów na podstawie współczynników wadliwości łożysk.

Literatura

[1] Bzura, P, *Analiza i ocena poprawności działania węzła tarcia w aspekcie II zasady termodynamiki*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Kwartalnik grudzień 2018.

[2] Bzura, P, *Analiza i ocena wadliwości działania węzła tarcia w aspekcie II zasady termodynamiki*, Journal of Polish CIMEEAC, Vol. 13, No 1, Gdańsk 2018.

[3] Bzura, P., *Influence of lubricating oil improvers on performance of crankshaft seals*, Polish Maritime Research. Special Issue S1 (97) 2018 Vol.25,s.172-177.

[4] Cudny, K., *Linie wałów okrętowych. Konstrukcje i obliczenia WM*, Gdańsk 1990.

[5] Kozłowiecki, H., *Łożyska tłokowych silników spalinowych*, WKŁ, Warszawa 1982.

[6] Wojnowski, W., *Okrętowe siłownie spalinowe,* W.O.iO, Gdańsk 1991.

[7] *General Catalogue SKF, https://www.boie.de/ ftp/pub/skf/6000_I_EN.pdf.*

[8] PQSTAT *Statystyczna Oprogramowanie Obliczeniowa*: *https://pqstat.pl/.*

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl