

Wojciech HOMIK¹

DIAGNOSTYKA WISKOTYCZNYCH TŁUMIKÓW DRGAŃ SKRĘTNYCH

Streszczenie. W artykule omówiono ogólnie zagadnienia związane z drganiami wałów korbowych, zwracając szczególną uwagę na drgania skrętne. Przedstawiono także informacje dotyczące budowy wiskotycznych tłumików drgań skrętnych oraz aktywnych tłumików wiskotycznych. W prezentowanej pracy skoncentrowano się głównie na metodach diagnozowania wiskotycznych tłumików drgań, podkreślając, że ich stan techniczny ma decydujący wpływ na trwałość i niezawodność wielocylindrowych silników spalinowych.

Słowa kluczowe: diagnostyka, drgania, tłumik drgań

THE DIAGNOSTICS OF VISCOTIC DUMPERS OF TORSIONAL VIBRATIONS

Summary. The general problems connected with the vibrations of crankshafts with a particular attention to the torsional vibrations are discussed in the paper. The information concerning the structure of viscotic dumpers of torsional vibrations and operative viscotic dumpers is also described. In the presented paper author concentrated on the main methods for diagnostics of viscotic dumpers of vibrations, and emphasized that their technical state has decisive impact on durability and reliability of multi-cylinder combustion engines.

Keywords: diagnostics, vibrations, dumper of vibrations

1. WSTĘP

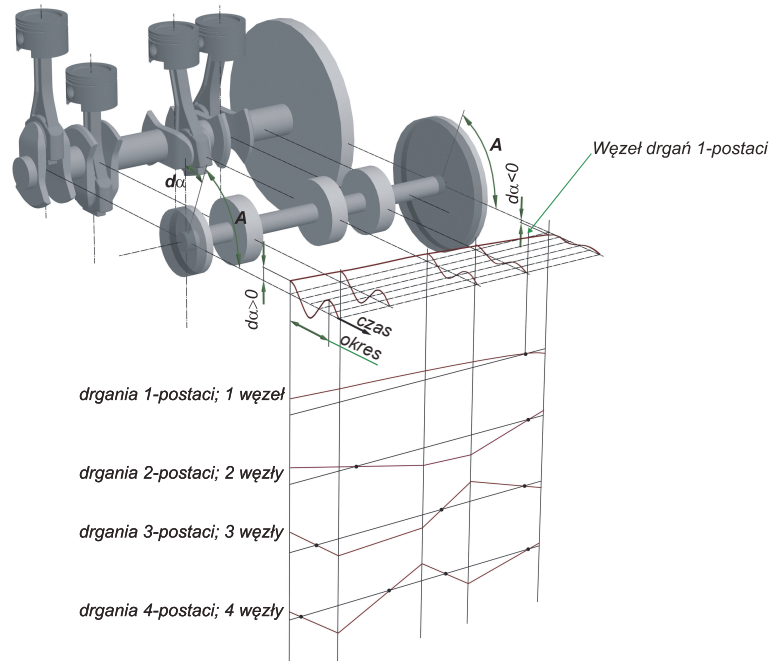
Drgania skrętne wałów korbowych wielocylindrowych silników spalinowych są jednym z czynników wpływających na ich trwałość i niezawodność. Na tle drgań giętych wzdłużnych stanowią one największe zagrożenie dla wału korbowego silnika.

Nałożone na ruch obrotowy wału, zazwyczaj nie powodują większych drgań giętych sąsiednich części, nie są źródłem hałasu i dlatego mogą być niezauważone aż do chwili, w której wystąpi zniszczenie zmęczeniowe wału. O ich istnieniu niejednokrotnie może świadczyć brak równomierności pracy silnika, którego układ rozrządu za pomocą przekładni mechanicznej (pasowej, łańcuchowej, zębatej) jest napędzany drgającym skrętnie wałem korbowym [2, 24, 25].

Model wału korbowego jest układem złożonym z wielu układów zastępczych. Ponieważ ciągły układ wału jest modelowany jako układ dyskretny o liczbie mas skupionych równej na ogół liczbie cylindrów plus jeden, liczba jego postaci drgań skrętnych jest równa liczbie mas

¹ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Konstrukcji Maszyn.

drgających zmniejszonej o jeden. Można zatem powiedzieć, że wał składający się z „n” mas (tarcz) ma „n-1” postaci drgań skrętnych (rys. 1).



Rys. 1. Drgania skrętne wału 4-cylindrowego silnika [2, 13]

Fig. 1. The torsional vibrations of the shaft of 4-cylinder engine [2, 13]

2. RODZAJE TŁUMIKÓW

Na przestrzeni lat w celu zminimalizowania zagrożenia pochodzącego od drgań skrętnych stosowane były następujące rodzaje tłumików [3, 12, 23]:

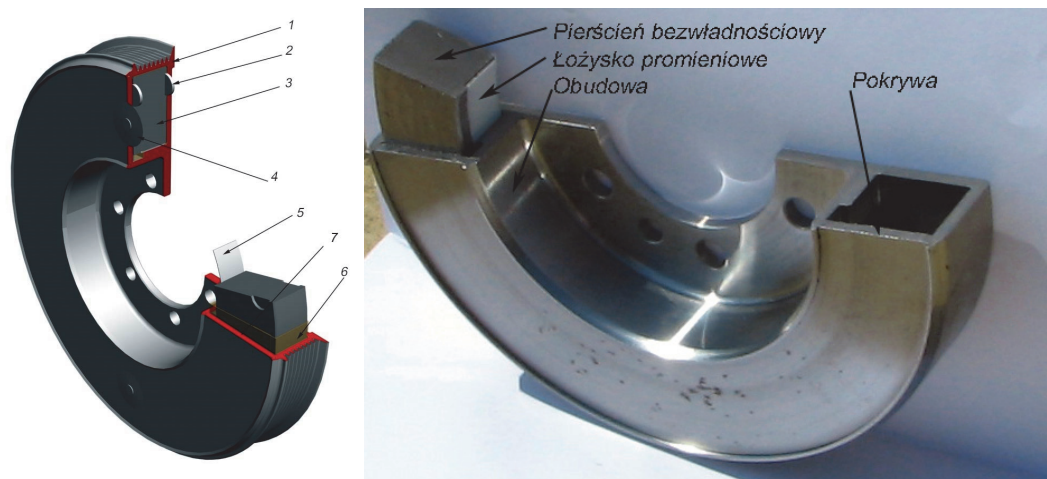
- cierne,
- wiskotyczne,
- gumowe,
- sprężynowe.

Obecnie wykorzystywane są praktycznie trzy rodzaje tłumików:

- wiskotyczne (stosowane w silnikach samochodowych, okrętowych, lokomotyw spalinowych),
- gumowe (stosowane w silnikach samochodowych, okrętowych),
- sprężynowe (stosowane w silnikach okrętowych).

3. TŁUMIK WISKOTYCZNY – BUDOWA

Wiskotyczne tłumiki drgań skrętnych są zbudowane z trzech podstawowych części: obudowy, pokrywy i pierścienia bezwładnościowego, który pływa w cieczy szczelnie wypełniającej obudowę. Pierścień bezwładnościowy jest ponadto pozycjonowany w obudowie łożyskiem promieniowym i niekiedy łożyskami osiowymi (rys. 2) [14, 15, 16, 18, 19].



Rys. 2. Wiskotyczny tłumik drgań skrętnych, 1 – obudowa tłumika, 2 – łożysko wzdłużne, 3 – pierścień bezwładnościowy, 4 – korek, 5 – łożysko promieniowe, 6 – olej silikonowy, 7 – pokrywa

Fig. 2. The viscotic damper of torsional vibrations, 1 – the enclosure of the damper, 2 – the axial bearing, 3 – the inertial ring, 4 – the plug, 5 – the radial bearing, 6 – the silicon oil, 7 – the cover

Kształt obudowy tłumika oraz jej parametry geometryczne, takie jak średnica zewnętrzna, szerokość, grubość ścianek obudowy, zależą przede wszystkim od funkcji, jaką może pełnić obudowa tłumika (np. koło pasowe, koło zamachowe, rys. 3), miejsca mocowania tłumika, a także od wielkości przestrzeni w komorze silnika oraz od wielkości ciśnienia panującego w tłumiku podczas jego pracy.

Należy wyraźnie podkreślić, że rozwiązanie konstrukcyjne obudowy tłumika (rys. 4) oraz metoda jej zamykania (obudowy skręcane, walcowane, spawane) nie mają najmniejszego wpływu na ideę pracy tłumika. Wybór metody zamykania tłumika jest uzależniony przede wszystkim od jego wielkości i przeznaczenia (np. silniki samochodowe czy silniki okrętowe).

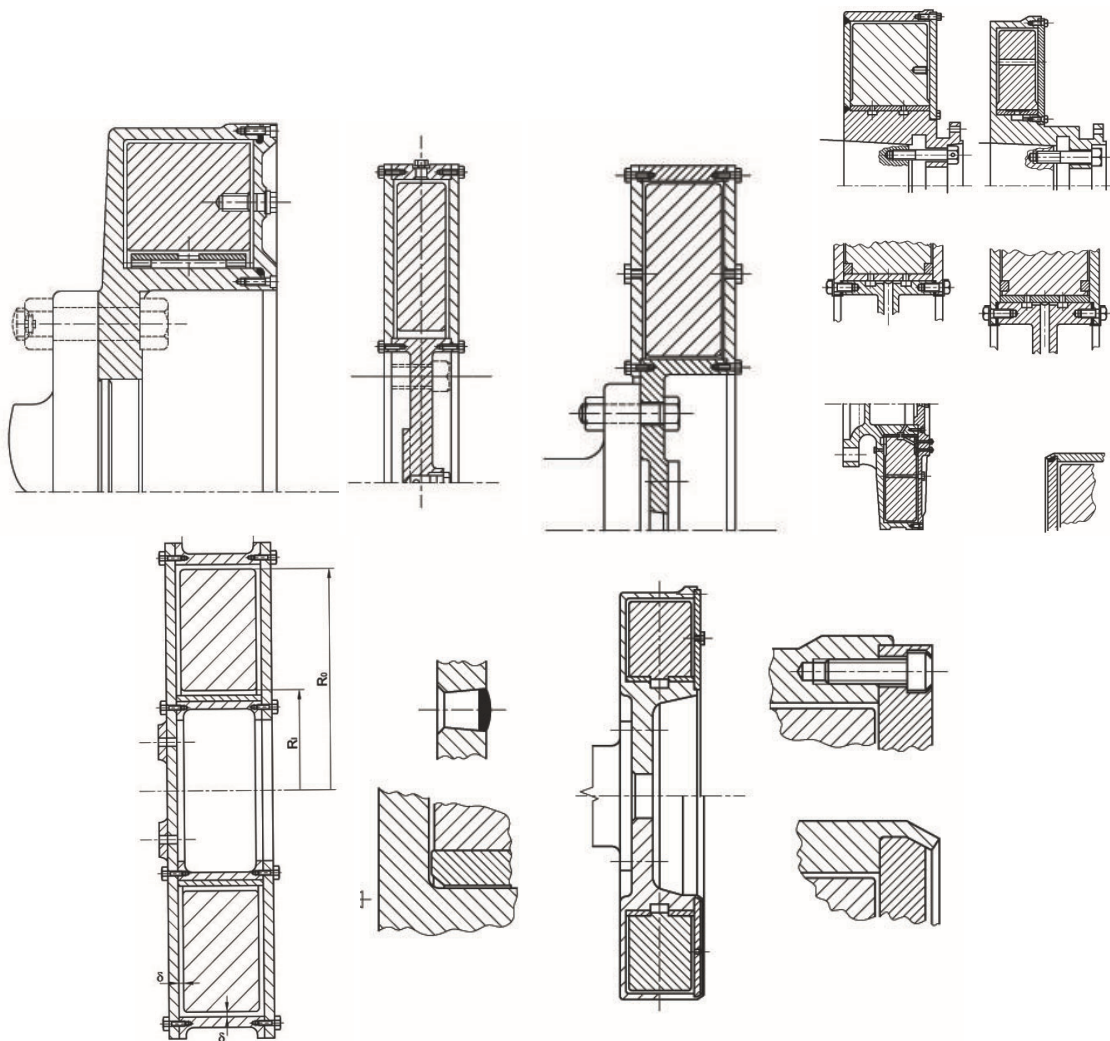
Jedne z pierwszych rozwiązań tego typu tłumików zostały zastosowane w USA w latach dwudziestych minionego wieku w przemyśle okrętowym do tłumienia drgań skrętnych wałów rozrządu w silnikach stosowanych w okrętach podwodnych [12]. Pomimo wykorzystania jak na owe czasy nowatorskiego rozwiązania, polegającego na szeregowym połączeniu dwóch tłumików wypełnionych cieczami o różnych lepkościach, nie osiągnięto zadowalających rezultatów [13].



Rys. 3. Wiskotyczny tłumik drgań skrętnych którego: a) obudowa jest kołem pasowym, b) obudowa pełni funkcję koła zamachowego – silnik lotniczy

Fig. 3. The viscotic damper of torsional vibrations in which: a) the cover is a belt pulley, b) the cover function is a flywheel – in the airplane engine

Było to związane przede wszystkim z tym, że oleje silikonowe były olejami produkowanymi na bazie olejów organicznych i po stosunkowo krótkim użytkowaniu w trudnych warunkach traciły swoje właściwości fizyczne – ze wzrostem temperatury pracy gwałtownie spadała lepkość oleju. Wysoka temperatura pracy miała również decydujący wpływ na szybkość starzenia się oleju, a więc na niezawodność i trwałość tłumika. Ta niewątpliwa niedoskonałość wiskotycznych tłumików drgań skrętnych sprawiła, że przez wiele lat nie były one stosowane. Swoją renesans tłumiki wiskotyczne drgań skrętnych przeżyły w latach 40. minionego stulecia, kiedy to na rynku pojawiły się nieorganiczne oleje silikonowe, które zapewniały odpowiednie parametry fizyczne tłumika, co w 1946 r. wykorzystwała praktycznie firma Houdaille-Horschel. Efektywność nowego tłumika sprawiła, że wyparł on z rynku stosowane tłumiki tarciove i gumowe. Obecnie do napełniania tłumików wiskotycznych wykorzystuje się stabilizowane oleje silikonowe AK produkowane przez firmę Bayer i Wacker. Oleje silikonowe AK są wodnisto czystymi cieczami o lepkościach od 0,65 do 1 000 000 [cSt].



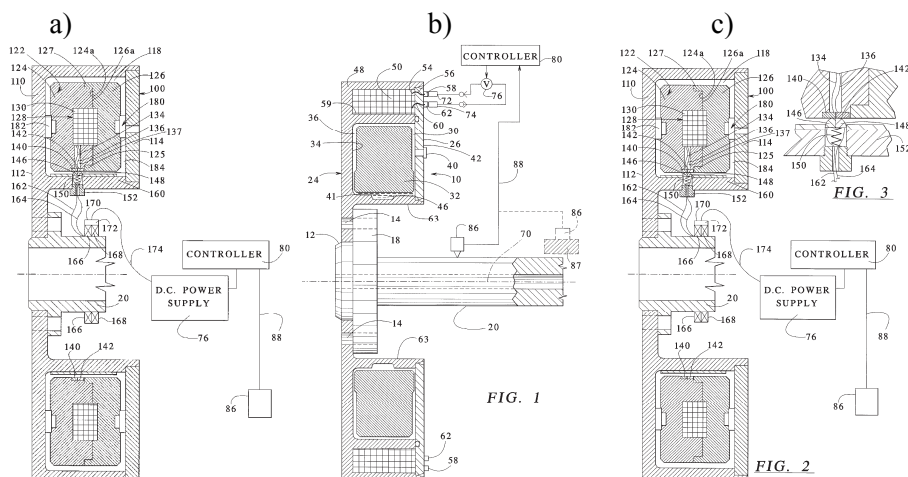
Rys. 4. Rozwiązania konstrukcyjne obudowy wiskotycznych tłumików drgań skrętnych [14] – są to oryginalne rysunki z cytowanej pracy

Fig. 4. The constructional solutions of the cover of the viscotic dampers of torsional vibrations [14] – there are the original figures from quoted paper

4. AKTYWNE WISKOTYCZNE TŁUMIKI DRGAŃ

Na uwagę zasługuje fakt, że prowadzone są również badania nad tłumikami wiskotycznymi nowej generacji, tzw. tłumikami aktywnymi, których właściwości fizyczne zmieniają się wraz ze zmianą wymuszenia.

Zasada działania oraz konstrukcja aktywnych tłumików wiskotycznych nieznacznie różnią się od tłumików klasycznych (rys. 5).



Rys. 5. Konceptyjne rozwiązania aktywnych tłumików drgań skrętnych – a, b, c [26] – są to oryginalne rysunki z cytowanych prac

Fig. 5. The mental solutions of the active dampers of torsional vibrations – a, b, c [26] – there are the original figures from quoted paper

W tego typu tłumikach pierścien bezwładnościowy pływa w cieczy reologicznej wypełniającej obudowę tłumika. Ciecze reologiczne są to substancje, które są zbudowane z nośnika oraz cząstek polaryzowalnych lub cząstek o właściwościach magnetycznych [1, 4, 5, 6, 17, 20, 21, 22].

Są to ciecze typu:

- ER – elektoreologiczne,
- MR – magnetoreologiczne,
- ciecze funkcjonalne mające równocześnie cechy cieczy ER i MR.

Ich specyficzna budowa umożliwia w czasie kilku milisekund kontrolowaną zmianę ich właściwości fizycznych (sprężystości, lepkości i granicy płynięcia), tak że zależność naprężenia stycznego od szybkości ścinania może być zależnością liniową (ciecz newtonowska) lub też nieliniową (ciecz Bingham).

5. DIAGNOSTYKA TŁUMIKÓW

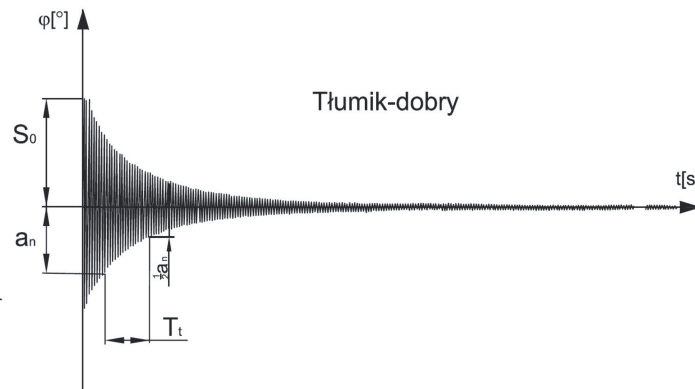
Niezależnie od rozwiązania konstrukcyjnego tłumika o skuteczności działania wiskotycznych tłumików drgań skrętnych decydują nie tylko ich technologia montażu [11], lecz przede wszystkim warunki eksploatacji silnika, na którym zamontowany jest tłumik. Przy uwzględnieniu faktu, że większość tłumików wiskotycznych drgań skrętnych pracuje w stanach okresowo zmiennych (np. zmienne prędkości obrotowe) czy w zmiennych warunkach atmosferycznych, w celu zapewnienia poprawnej pracy silnika tłumiki podobnie jak wszystkie urządzenia powinny być okresowo diagnozowane.

Każdy producent tłumików drgań skrętnych powinien dysponować skutecznymi metodami diagnozowania tłumików drgań, umożliwiającymi stwierdzenie, czy dany eksploatowany tłumik jest jeszcze tłumikiem efektywnym. Producenci tłumików (szczególnie tłumików okrętowych) powinni obligować użytkowników silników, na których montowane są tłumiki drgań skrętnych, do przeprowadzania okresowej diagnostyki i remontów tłumików przez wyspecjalizowany personel firmy (producenta tłumików) lub serwisantów mających stosowne certyfikaty.

Cennym źródłem informacji o tłumiku podczas jego diagnozowania jest jego metryka, którą opracowuje producent.

Metryka tłumika wiskotycznego drgań skrętnych powinna zawierać: dane materiałowe tłumika, parametry geometryczne oraz masowe momenty bezwładności podstawowych części tłumika, informacje dotyczące cieczy tłumiącej, którą tłumik został napełniony, charakterystyki amplitudowe lub charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe tłumika.

Charakterystyki amplitudowe tłumika (rys. 6) sporządza się na specjalnych stanowiskach badawczych.



Rys. 6. Charakterystyka amplitudowa drgań tłumionych stanowiska – tłumik dobry

Fig. 6. The amplitude characteristics of the damped vibrations of the stand – the correct dumper

W przypadku sporządzania metryki tłumików wiskotycznych drgań do badań przygotowuje się z reguły trzy partie tłumików: tłumiki dobre, tłumiki zablokowane (odzworowanie przypadków, w których doszło do znacznego wzrostu lepkości oleju lub też mechanicznego połączenia pierścienia z obudową), tłumiki puste (odzworowanie przypadków, w których np. doszło do wycieku oleju).

Dla wszystkich partii tłumików sporządza się charakterystyki amplitudowe w tych samych warunkach termicznych i przy tym samym wymuszeniu.

Na przykład w firmie DAMPOL (polskim producencie tłumików drgań skrętnych) podczas opracowywania metryki tłumika wiskotycznego układ pomiarowy stanowiska badawczego zlicza liczbę okresów T drgań od czasu t_0 , dla którego amplituda drgań wynosiła A_0 , do czasu t_1 , gdy wartość amplitudy drgań A_1 była równa $0,5 A_0$ (tabl. 1)

Wyznaczone podczas badań średnie wartości liczby okresów $T_{\text{śrs}}$, po których amplituda A_0 drgań wymuszonych osiągnie wartość $A_1=0,5A_0$, są wykorzystywane do diagnozowania tłumików po określonym przez producenta czasie użytkowania.

Tablica 1 [10]

Liczba okresów drgań

Typ tłumika	Nr pomiaru										T _{śr}	T _{śr} s
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Tłumik dobry [liczba okresów T]	23	25	22	23	23	25	23	23	23	23	23.3	22.8
	23	22	23	22	22	23	23	23	22	23	22.6	
	22	22	22	21	22	23	23	23	22	22	22.6	
	22	21	22	21	21	21	23	25	23	23	22.2	
	23	25	22	23	23	25	23	23	23	23	23.3	
Tłumik bez oleju [liczba okresów T]	2	2	3	4	2	2	2	3	4	2	2.6	2.08
	3	2	2	1	3	2	2	2	2	3	2.2	
	2	1	1	2	2	2	2	2	1	3	1.8	
	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	1.7	
	3	2	2	1	2	2	2	3	2	2	2.1	
Tłumik zablokowany [liczba okresów T]	95	98	96	97	95	99	98	97	97	97	96.9	96.42
	97	98	97	96	96	95	96	96	97	96	96.4	
	95	95	97	95	97	97	97	97	97	97	96.4	
	95	96	96	96	96	98	98	99	99	99	97.2	
	95	95	95	95	95	95	95	97	95	95	95.2	

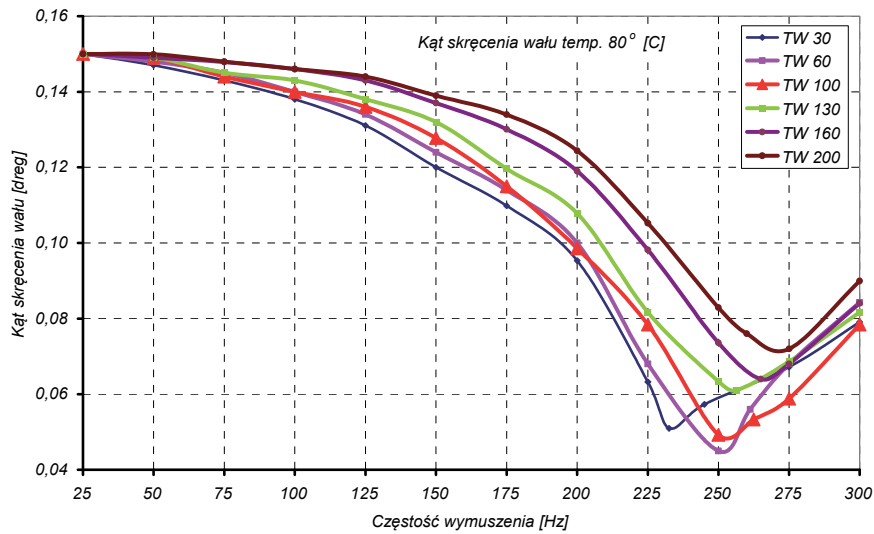
Uznani producenci tłumików wiskotycznych (również firma DAMPOL) w metryce tłumika zamieszczają także stanowiskowe charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe (rys. 7) i rzeczywiste charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe (rys. 7) wału korbowego silnika wraz z tłumikiem, uzyskane podczas pierwszych prób jednostki napędowej.

Diagnostyka tłumików wiskotycznych drgań skrętnych jest uzależniona od ich rozwiązań konstrukcyjnych. Obecnie w przemyśle stosowane są dwa rozwiązania konstrukcyjne: tłumiki nierozbieralne (przemysł motoryzacyjny) i tłumiki rozbieralne (przemysł okrętowy).

Podstawowym kryterium oceny efektywności tłumika wiskotycznego jest wielkość amplitudy drgań skrętnych wału, na którym zamontowany jest tłumik. Tłumik uważa się za efektywny, jeżeli spełniony jest warunek $|\varphi_{\max}| \leq \varphi_{\text{dop}}$. To kryterium w ocenie dobroci tłumika jest jedynym kryterium w przypadku nierozbieralnych tłumików wiskotycznych. Należy jednak pamiętać, że to kryterium może być niewystarczające.

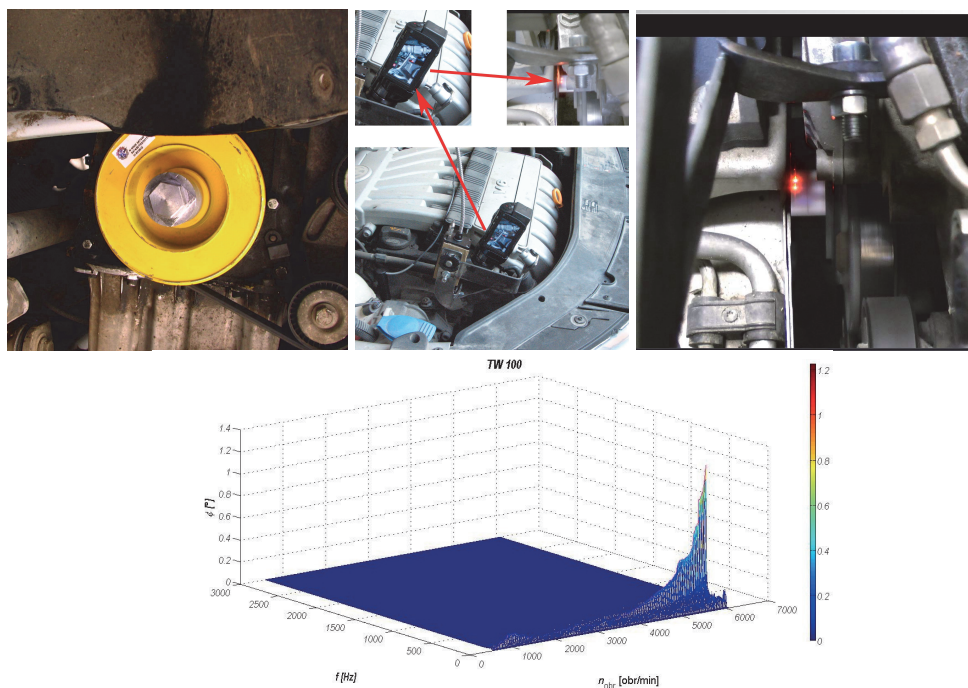
Diagnostyka rozbieralnych wiskotycznych tłumików drgań skrętnych w pierwszej kolejności sprowadza się do sprawdzenia kryterium amplitudowego, a następnie do pomiaru lepkości cieczy tłumiącej [8, 9], na podstawie której można wstępnie określić stan techniczny tłumika.

Próbki cieczy (oleju) do badań powinny być pobierane z tłumika w środowisku obojętnym wg ściśle określonej procedury. Ogólnie procedura pobierania próbki oleju z tłumika polegała na wkręceniu w jeden z otworów znajdujących się na pokrywie tłumika zasobnika na próbkę oleju (rys. 9), a w otwór drugi – króćca doprowadzającego gaz obojętny (argon), który jest wtłaczany do tłumika pod ciśnieniem.



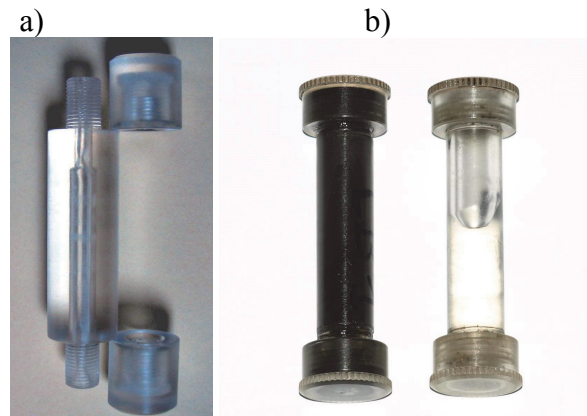
Rys. 7. Przykładowe charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe tłumików wiskotycznych o różnych lepkościach cieczy w temperaturze +80o [C]uzyskane na stanowisku badawczym [13]

Fig. 7. The amplitude-frequency model characteristics of the viscotic dampers with different liquid viscosity in the temp. +80o [C] obtained on the test stand [13]



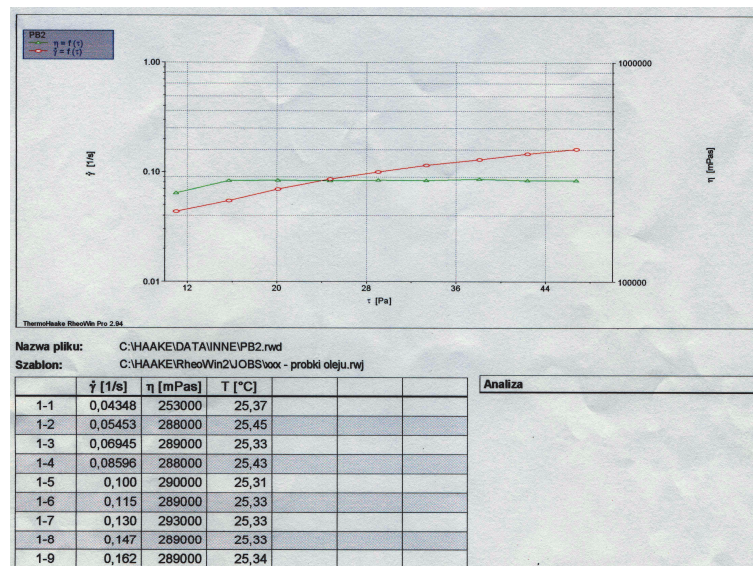
Rys. 8. Przykładowa rzeczywista charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowe tłumika wiskotycznego zarejestrowana na obiekcie rzeczywistym [13]

Fig. 8. The model and actual amplitude-frequency characteristics of the viscotic dumper registered in the real object [13]



Rys. 9. Zasobniki na próbki oleju: a) nowy zasobnik, b) zasobniki wypełnione próbkami oleju [7]
 Fig. 9. The containers in the oil samples: a) a new container, b) the containers filled by the samples

Tak pobrana próbka oleju silikonowego jest poddawana badaniom na wiskozymetrze w celu ustalenia jej rzeczywistej lepkości (rys. 10).



Rys. 10. Przekładowe wyniki pomiarów lepkości cieczy
 Fig. 10. The model results of liquid viscosity measurements

Wieloletnie badania statystyczne wykazały (tabl. 2), że spadek lepkości oleju w czasie eksploatacji tłumików jest czymś naturalnym [7, 9].

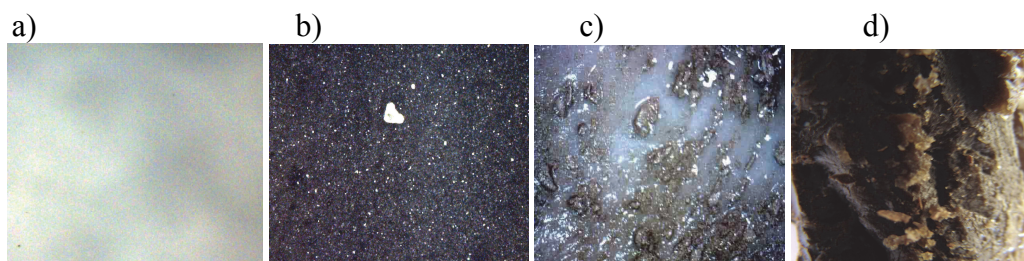
Czasami podczas diagnozowania tłumika z jego wnętrza nie można pobrać próbki oleju, gdyż jego lepkość jest kilka, a nawet kilkadziesiąt razy większa od lepkości początkowej. Tak znaczący wzrost lepkości oleju powoduje unieruchomienie pierścienia bezwładnościowego, doprowadzając do sytuacji, w której tłumik staje się wzbudnikiem drgań.

Niejednokrotnie próbki pobranego oleju poddaje się również badaniom mikroskopowym (rys. 11). Wyniki tych badań pozwalają ocenić wstępnie stopień zużycia powierzchni czynnych tłumika (rys. 12) i łożysk bez konieczności jego otwierania.

Tablica 2 [7]

Lepkość cieczy

Rodzaj tłumika (rodzaj łożysk pierścienia)	(Lepkość cieczy zmierzona/ lepkość nominalna) x100%										
	żel	130	120	110	80	70	60	50	40	30	20
Łożyska z brązu [szt.]	27	13	26	186	48	27	9	13	8	5	2
% z partii przebadanych tłumików	7.4	3.6	7.1	51.1	13.1	7.4	2.5	3.6	2.2	1.4	0.5
Łożyska z teflonu [szt.]	-	1	1	126	148	142	112	77	51	32	19
% z partii przebadanych tłumików	0	0.14	0.14	17.7	20.8	20	15.8	10.8	7.2	4.5	2.6



Rys. 11. Próbkki olejów – powiększenie 200-krotne: a – olej nowy, b – olej zużyty, c – olej z drobinami części tłumika, d – olej o konsystencji ciała stałego [9]

Fig. 11. The oil samples – the 200x enlargement: a – a new oil, b – the used oil, c – the oil with grains of the dumper, d – the oil of the solid body consistence [9]



Rys. 12. Uszkodzenia mechaniczne na czynnych wiskotycznego tłumika [12]

Fig. 12. The mechanical damages on the operatives of viscotic dumper

Istotnym czynnikiem mającym ogromne znaczenie dla poprawnej pracy tłumika jest jego szczelność. Sprawdzenie szczelności tłumika wiskotycznego jest pierwszą czynnością w procesie jego diagnozowania.

Analiza sygnałów chwilowych zmian prędkości drgań kątowych wału korbowego i chwilowych zmian kąta obrotu wału korbowego wydatnie ułatwia proces diagnozowania tłumików drgań skrętnych.

Bibliografia

1. Bossis G., Laci S., Meunier A., Volkova O.: Magnetorheological Fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 252 (2002).
2. Brun R.: Szybkobieżne silniki wysokoprężne, WKiŁ, Warszawa 1973.
3. Homik W.: Rozprawa doktorska: Optymalizacja wiskotycznego tłumika drgań skrętnych, Rzeszów 1997.
4. Homik W.: Analiza drgań skrętnych wału z uwzględnieniem reologicznego tłumika drgań. XXII Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gdynia 2005.
5. Homik W.: Zastosowanie cieczy reologicznych w technice, a w szczególności w tłumieniu drgań mechanicznych. Międzynarodowa konferencja Protechma, Koszyce-Rzeszów 2006.
6. Homik W.: Zastosowanie cieczy reologicznych w technice, a w szczególności w tłumieniu drgań mechanicznych, *Przegląd Mechaniczny*, 10' 06.
7. Homik W.: Brązowe czy teflonowe łożyskowanie pierścienia bezwładnościowego w wiskotycznym tłumiku drgań skrętnych? *Acta Mechanica*, Slovakia 2008.
8. Homik W.: Wpływ zmian lepkości oleju silikonowego w tłumiku drgań skrętnych na wielkość rozpraszanej energii i kąt skręcenia wału korbowego silnika. DYNKON 2008, XIII SYMPOZJUM DYNAMIKI KONSTRUKCJI, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 258, *Mechanika*, z. 74. Rzeszów – Bystre 2008.
9. Homik W.: Zmiany lepkości cieczy w czasie eksploatacji wiskotycznego tłumika drgań, *Przegląd Mechaniczny*, nr 3' 2009.
10. Homik W.: Kryteria oceny właściwości – „dobroci” wiskotycznego tłumika drgań skrętnych wału korbowego silnika spalinowego, Western Scientific Centre of Ukrainian Transport Academy – Transportna Akademia Ukraini. *Praci Zachodnowo Naukowo Centrum*, 2009.
11. Homik W., Szlachta A.: Technologia obróbki i montażu tłumików wiskotycznych, *International Scientific Conference, Pro-Tech-Ma* 2009.
12. Homik W.: Diagnostyka, serwisowanie i regeneracja tłumików drgań skrytych wałów korbowych okrętowych silników spalinowych. *Polish Maritime Reserch*, No. 1/2010.
13. Homik W.: Szerokopasmowe tłumiki drgań skrętnych. *Biblioteka Problemów Eksploatacji*, Wydawnictwa Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2012.
14. Ker Wilson W.: *Practical Solution of Torsional Vibration Problems*, Vol.I-IV, Chapman & Hall, London 1968.
15. Klier H.: Zur Berechnung der Torsionsbeanspruchung der Kurbelwellen von Kolbenmotoren, *Schiff & Hafen*, 5/1977.
16. Kodama T., Wakabayashi K., Honda Y., Iwamoto S.: An Experimental Study of Dynamic Characteristics of Torsional Stiffness and Torsional Damping Coefficient of Viscous – Friction Dampers, *Transactions of the Kokushikan University Department of Engineering*, Vol. 35, No.10/2002.
17. Ławniczak A., Milecki A.: *Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowanie w technice*. Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej, 1999.
18. Naguszewski B., Ciringione J. L.: Development of a Torsional Vibration Damper Testing Machine, *ASME Publ.62-OGP-7*, 1962.
19. Nestorides E.J.: *A Handbook on Torsional Vibration*, Cambridge at the University Press, 1958.

20. Parnoto T., Nagaya K., Ebara Y., Long Q.Q.: Vibration suppression device using permanent-electromagnet and MRF shear damper. *Journal of Materials Processing Technology*, 181, Elsevier, 2007.
21. Parnoto T., Nagaya K., Hosoda A.: Vibration suppression of plate using linear MR fluid passive damper, *Journal of Sound and Vibration*, 276, Elsevier, 2004.
22. Rosensweig R.E.: *Ferrohydrodynamics*, Cambridge University Press, London 1998.
23. Skup Z.: Drgania swobodne tarcowego tłumika drgań skrętnych z uwzględnieniem tarcia konstrukcyjnego. *Prace Instytutu Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej*, nr 3, 1972.
24. Wajand J.A.: *Silniki o zapłonie samoczynnym*. WNT, Warszawa 1988.
25. Wajand J.A, Wajand J.T.: *Tłokowe silniki spalinowe średnio i szybkoobrotowe*. WNT, Warszawa 1993.
26. Patent Number 5.829.319 United States Patent.: Magneto-rheological torsional vibration damper.