

### 2.3.6. Model tribo wibroakustyczny maszyny

Jak można się było domyślić z rozdziału pierwszego i powyższych wywodów, u podstaw diagnostyki tkwi współzależność między drganiami i zużyciem wykryta eksperymentalnie prawie pół wieku temu przez Rathbone'a [7]. Mimo tego nie ma jeszcze modelu matematycznego maszyny ujmującego łącznie zjawiska wibroakustyczne i zużyciowe, czyli tribologiczne, jako że całością zjawisk zużyciowych maszyn zajmuje się trybologia [40,28,126]. Pierwsze próby, jak zwykle nie w pełni udane, nakreślenia modelu tribo wibroakustycznego podjął autor w roku 1980 w pracy [45]. Niżej, zaś przedstawiono lepsze, jak się wydaje, wersję tego modelu. U jego podstaw tkwi wspomniane już założenie proporcjonalności drgań  $D$  do zaawansowania procesów zużyciowych. Zaawansowanie to najlepiej mierzyć energią straconą na nieodwracalne procesy zużyciowe - tribologiczne -  $E_z$ . Pamiętając, że maszyna nowa (bez zużycia) cechuje się już pewnym poziomem drgań znamionowych  $D_n$  możemy naszą relację konstytutywną diagnostyki napisać w postaci:

$$D = D_n + \gamma E_z = D_n + \gamma E_z \cdot \theta \quad (2.26)$$

gdzie:  $D$  - miara amplitudowa drgań - np. przyspieszenia, prędkości itp.;  $D_n = D$  ( $\theta = 0$ )- poziom drgań znamionowych maszyny nowej,  $E_z$  - energia stracona na nieodwracalne procesy zużyciowe,  $\gamma$  - współczynnik stratności tribo wibroakustycznej (TWA) obrazujący sprzężenie między procesami trybologicznymi i drganiami,  $N_z$  - średnia moc tracona na procesy TWA.

Energię stracone  $E_z$  bardzo łatwo oszacować znając sprawność mechaniczną maszyny  $\eta$ , gdyż:

$$\eta = \frac{N_{uż}}{N_{zas}} = \frac{N_{zas} - N_z}{N_{zas}} = \frac{E_{zas} - E_z}{E_{zas}} \quad (2.27)$$

gdzie:  $N_{uż}$  - to moc użyteczna,  $N_{zas}$  - moc zasilania,  $E$  - to odpowiednie energie.

Procesy tribologiczne, które najczęściej towarzyszą ruchowi maszyn to zmęczenie i tarcie, a energia w nich wydzielona będzie proporcjonalna do długości szczeliny zmęczeniowej  $l$  oraz objętości wytartego materiału  $U$ . Dalej ograniczymy się do tych dwu zjawisk. Tak więc przyjmiemy

$$E_z = E_{tarcia} + E_{zmęczenie} + \dots \cong al + bU \quad (2.28)$$

przy czym  $a$  i  $b$  pewne współczynniki proporcjonalności,  $l$  - do obliczenia z wzoru Parisa (2.16),  $U$ -z wzoru Archarda (2.20). Obliczając długość szczeliny zmęczeniowej przez całkowanie wzoru (2.16) w wersji Kocańdy [46] znajdziemy

$$l = C_3(\sigma_0 + \sigma_a)^n N = C_3(\sigma_0 + \sigma_a)^n \cdot f \cdot \theta = C_3(\sigma_0 + eD)^n \cdot f \cdot \theta \quad (2.29)$$

gdzie:  $e$  - współczynnik proporcjonalności drgań  $D$  do naprężeń zmiennych  $\sigma_a$ ,  $f$  - częstotliwość drgań,  $\theta$  czas ich działania.

Wprowadzając do wzoru Archarda (2.20) składową dynamiczną nacisku  $p = p_0 + g D$  ze współczynnikiem proporcjonalności do amplitudy drgań  $g$ , mamy:

$$U = \frac{k_0 \cdot v \cdot \theta}{R_e} (p_0 + gD) \quad (2.30)$$

Podstawiając (2.30) i (2.29) do wyrażenia na energię procesów zużyciowych  $E_z$  (2.28), a to do relacji konstytutywnej (2.26) będziemy mieli:

$$D = D_n + \gamma \left[ aC_3(\sigma_0 + eD)^n \cdot f + \frac{bk_0v}{R_e}(p_0 + gD) \right] \cdot \theta = D_n + \gamma N_z \theta \quad (2.31)$$

$$N_z = aC_3(\sigma_0 + eD)^n \cdot f + \frac{bk_0v}{R_e}(p_0 + gD)$$

gdzie wprowadziliśmy w oczywisty sposób moc procesów zużyciowych  $N_z = E_z/\theta$  która, jak widać, również zależy od amplitudy drgań  $D$ . Wykorzystując tę zależność dla ostatecznego wyznaczenia amplitudy drgań maszyny w funkcji jej czasu eksploatacji można z (2.31) znaleźć

$$D = \frac{\gamma N_z^0 \cdot \theta}{1 - \gamma \theta \left. \frac{dN_z}{dD} \right|_{D=D_n}} + D_n \quad (2.32)$$

gdzie:  $N_z^0 = N_z(D = D_n)$  zgodnie z (2.31) oraz  $\left. \frac{dN_z}{dD} \right|_{D=D_n}$  jest gradientem mocy procesów zużyciowych ze względu na drgania dla maszyny hipotetycznie nowej, tj.  $D = D_n$ , matematycznie zaś jest to współczynnik rozkładu  $N_z$  w szereg Taylora względem drgań  $D$  obrazujący wrażliwość mocy procesów zużyciowych na drgania.

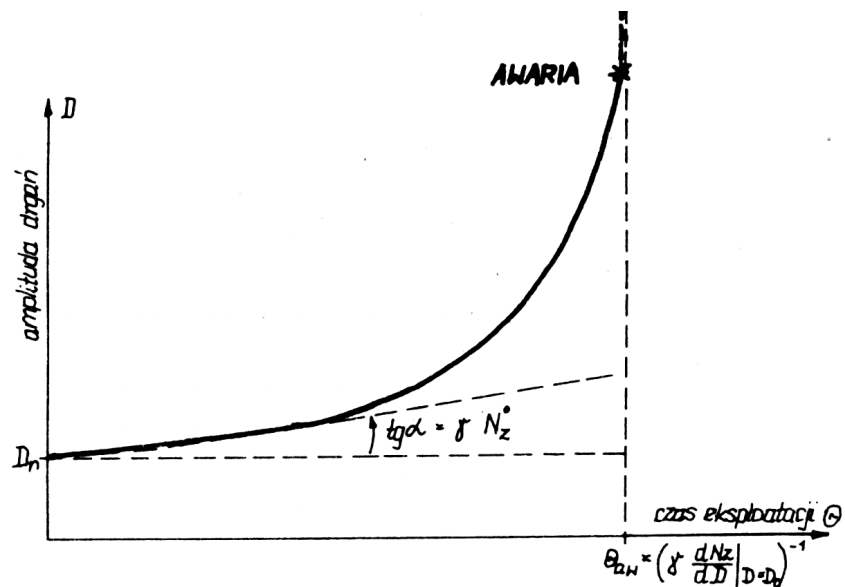
Analizując końcowy wzór naszego modelu tribo wibroakustycznego (2.32) trzeba wyróżnić w nim dwa punkty charakterystyczne. Dla czasu  $\theta = \theta_{aw}$ , z wzoru otrzymujemy  $D = D_n$ , czyli amplitudę drgań znamionowych obiektu nowego.

Natomiast dla  $\theta = \theta_{aw} = \left( \gamma \left. \frac{dN_z}{dD} \right|_{D=D_n} \right)^{-1}$  znajdujemy  $D = \infty$ , można interpretować zgodnie z doświadczeniem jako awarię. Wartość czasu do awarii

$$\theta_{Aw} = \left( \left. \frac{dN_z}{dD} \right|_{D=D_n} \right)^{-1} \quad (2.33)$$

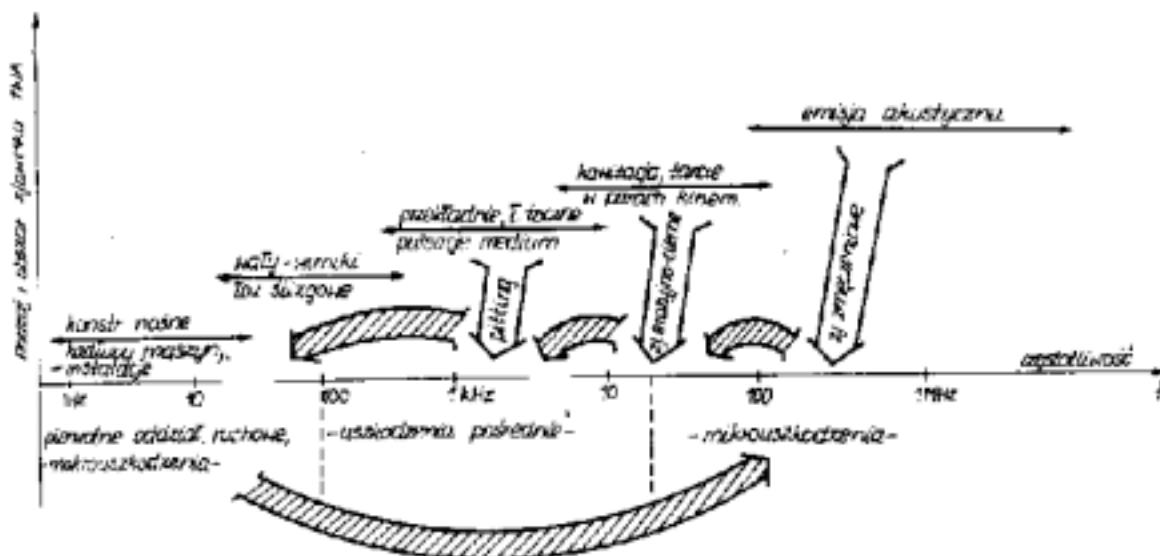
jest odwrotnie proporcjonalna do stratności tribo wibroakustycznej  $\gamma$  oraz wrażliwości zużycia na drgania  $\left. \frac{dN_z}{dD} \right|_{D=D_n}$ . Od tych też charakterystyk oraz od łącznej mocy procesów tribologicznych  $N_z^0$  maszyny nowej zależy wartość amplitudy drgań  $D$  jak i szybkość jej

zmian w czasie eksploatacji  $\theta$ . Jakościowy obraz tych zmian przedstawia rysunek 2.23, skąd widać, że zarówno czas awarii  $\theta_{aw}$  jak i szybkość wzrostu symptomu drganiowego



Rys.2.23. Graficzny obraz amplitudy drgań w modelu tribo wibroakustycznym maszyny

$(\text{tg} \alpha)$  są funkcjami stratności tribo wibroakustycznej  $\gamma$ , wrażliwości tribo wibroakustycznej  $\frac{dN_z}{dD}$  oraz łącznej mocy procesów zużyciowych  $N_z$ . Nie są to wnioski trywialne, stąd wydaje się, że sam model jak i uzyskany za jego pomoce wgląd w drganiowe sprzężenie zwrotne procesów zużyciowych są bardzo wartościowe. Z modelu tego wynika np. że czas awarii  $\theta_{aw}$  da się przewidzieć dla nowej maszyny znając jedynie drganiowy gradient mocy traconej  $\frac{dN_z}{dD} |_{D=D_n}$  i jej stratność TWA  $\gamma$ . Możliwe jest również sekwencyjne wykorzystanie modelu i wzoru (2.32) do celów predykcji drgań i stanu maszyn, co aktualnie jest przedmiotem badań autora [131,132]



Rys. 2.24. Zjawiska wibroakustyczne i tribologiczne w maszynach we wzajemnym sprzężeniu zwrotnym

Na zakończenie naszych rozważań o sprzężeniu tribo wibroakustycznym spójrzmy jeszcze raz na rysunek 2.14 pod kątem widzenia przyczyn i symptomów zużycia we wzajemnym sprzężeniu zwrotnym, tak jak na rysunku 2.24. Z rysunku widać, że pierwotne oddziaływania ruchowe są przyczyną drgań i nisko częstotliwościowych, które powodują mikro uszkodzenia zmęczeniowe itp. Uszkodzenia kumulują się w procesie eksploatacji dając uszkodzenia pośrednie i makro uszkodzenia, które powiększają dalej poziom pierwotnych oddziaływań dynamicznych. To z kolei we wzajemnym sprzężeniu zwrotnym zwiększa poziom mikro uszkodzeń itd., co prowadzi w efekcie do przyspieszenia, zużycia i awarii.