

# 1. DRGANIA W INŻYNIERII MECHANICZNEJ

Truizmem jest już stwierdzenie greckiego filozofa - "panta rei" - wszystko płynie, wszystko porusza się wokół nas. Zaś wiele z tych ruchów przyrody ożywionej i nieożywionej ma charakter powtarzający się, prawie okresowy. Znaczący to, że po pewnym ustalonym odcinku czasu - okresie - historia położenia obserwowanego obiektu, a tym samym i zjawisko ruchu powtórzy się. Takie powtarzające się ruchy odniesione do konkretnych obiektów (drzewo, komin, pojazd) nazywamy drganiami. Jeśli zaś zjawisko ruchu nie da się odnieść do konkretnego obiektu, a polega na zmianie pewnej zmiennej uogólnionej (np. ładunek, prąd elektryczny, napięcie, ilość osobników danego gatunku w grupie, ilość bakterii w kolonii, itp.) to ruch powtarzalny nosi nazwę oscylacji. Stąd też mówimy o np. drganiach pojazdu w ruchu po swym torze, o drganiach mostu, drzewa, komina, drganiach strun między innymi głosowych, ale dalej mówimy o oscylacjach napięcia w antenie nadajnika bądź odbiornika radiowego, oscylacjach poziomu wody bądź ciśnienia w instalacji, oscylacją wzrostu liczby takich samych osobników w grupie, itp.

Z powyższego wynika, że zjawiska drganiowe obejmują swym zasięgiem środowisko naturalne jak i techniczne człowieka, a także jego samego (np. oscylacje, pulsacje ciśnienia krwi). Nas jednak będą interesować zjawiska drganiowe obiektów mechanicznych; ściślej: maszyn, urządzeń, pojazdów, będących przedmiotem zainteresowań inżynierii mechanicznej. Generalnie można powiedzieć, że drgania zachodzą w każdym obiekcie mechanicznym, zwłaszcza wypełniającym swą funkcję celu w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu (bądź obciążeniu). Drgania te jednak zaczynają być dopiero istotne po przekroczeniu pewnego progu wyznaczanego przez amplitudę i częstotliwość zjawiska, (amplitudę w najprostszym przypadku mierzy się jako odchylenie od średniego położenia równowagi, zaś częstotliwość to odwrotność wspomnianego już okresu drgań). Po przekroczeniu tego progu drgania mogą być szkodliwe dla obiektu bądź dla jego otoczenia (np. następuje zmniejszenie trwałości materiału). W innych przypadkach mamy celową generację drgań dla wykonania pożytecznej pracy np. zagęszczenia betonu. Wreszcie obserwując charakter drgań maszyn w kategoriach czasu ich życia, możemy wykorzystać informacje o maszynie zawarte w jej procesie drganiowym i dokonać oceny stanu technicznego maszyny (diagnostyka).

Jak z powyższego wynika rola drgań w inżynierii mechanicznej jest istotna i szeroka, a ponieważ stanowi ona motywację studiów i zastosowań przedmiotu należy jej się przyjrzeć z bliska.

## 1.1. DRGANIA SZKODLIWE

Dla przestudiowania tego zagadnienia najlepiej przyjrzeć się czynnikom jakości nowego (wyrobu) wytworu technicznego i ich związkom z drganiami. W odniesieniu do każdej maszyny, urządzenia, itp. jakość określają następujące czynniki: trwałość, niezawodność, dokładność, poziom zakłóceń zewnętrznych. Niżej postaramy się kolejno omówić wpływ drgań na powyższe wskaźniki nowoczesności wyrobów.

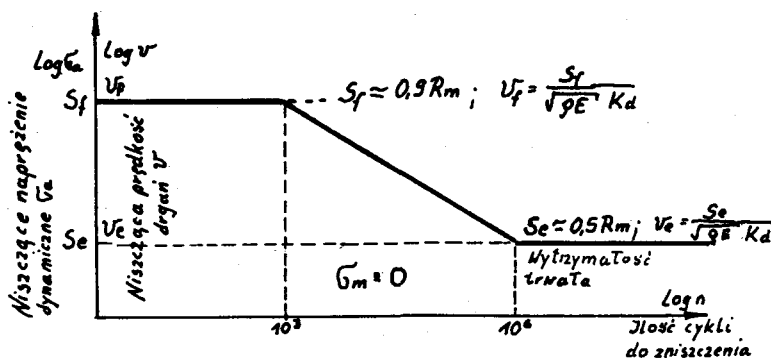
Trwałość elementów mechanicznych. Jest to zdolność elementu do przenoszenia zadanych obciążeń mechanicznych mierzona w jednostkach czasu bądź pochodnych (ilość cykli obciążenia).

Obciążenie elementu, tzn. naprężenia w nim panujące, w ogólności można rozdzielić na dwie składowe:

$$\sigma_c(t) = \sigma_m + \sigma_a(t),$$

gdzie  $\sigma_m$  to naprężenie średnie robocze, zaś  $\sigma_a(t)$  to amplituda zmiennego dynamicznego naprężenia.

Z kursu wytrzymałości materiałów [1] wiadomo, że gdy naprężenie dynamiczne jest zerowe ( $\sigma_a(t) \equiv 0$ ), a naprężenia statyczne nie przekracza wytrzymałości na rozerwanie, tzn.  $\sigma_c < R_m$ , to trwałość próbki jest nieograniczona. Przyczyną ograniczonej trwałości jest występowanie naprężenia dynamicznego o wartości większej od granicy zmęczenia  $S_e$ , ( $\sigma_a > S_e$ ). Sytuację tę dobrze ilustruje uogólniony wykres Wöhlera [2,3], który dla stopów żelaza na postać jak na rysunku 1.1.



Rys.1.1. Uogólniony wykres Wöhlera dla stopów żelaza w kategoriach naprężenia niszczącego oraz odpowiadającej temu niszczącej prędkości drgań ( $G_m = 0$ )

Jak się okazuje, naprężenie dynamiczne w elemencie drgającym dowolnie lecz stacjonarnie można również wyrazić za pomocą maksymalnej amplitudy prędkości drgań elementu [4];

$$\sigma_a = \hat{v} \sqrt{\rho E} K_d = \hat{v} \varphi_c K_d, \quad (G_m = 0),$$

gdzie  $\hat{V}$  jest maksymalną wartością prędkości drgań elementu mierzona w kategoriach amplitud szczytowych,  $\rho$  - gęstość materiału,  $E$  - moduł Younga,  $K_d$  - współczynnik dynamiczny zależny od rozkładu energii ( $K_d = 1+3$ ),  $K_d = 1$  dla elementów małych,  $K_d > 1$  dla elementów o dużej rozpiętości w stosunku do długości fali,  $c = \sqrt{E/\rho}$  - prędkość dźwięku w materiale. Korzystając z tej zależności (1.2) można przeliczyć granice zmęczenia materiałów  $S_e$  na graniczną wartość prędkości drgań  $V_e$ , co uczyniono również na rysunku 1.1. Granica ta wyznaczona jest wzorem:

$$v_e = \frac{S_e}{\sqrt{\rho E K_d}}; \quad \sigma_m = 0,$$

przy czym w tej postaci odnosi się jedynie do próbek. (Dla elementów konstrukcyjnych wartość (1.3) należy podzielić przez współczynnik bezpieczeństwa, czym dalej nie będziemy się zajmować). Na ogół naprężenia robocze są różne od zera  $\sigma_m \neq 0$  stąd też należy jeszcze uwzględnić ten fakt, np. za pomocą prostej hipotezy Goodmana [3], otrzymując:

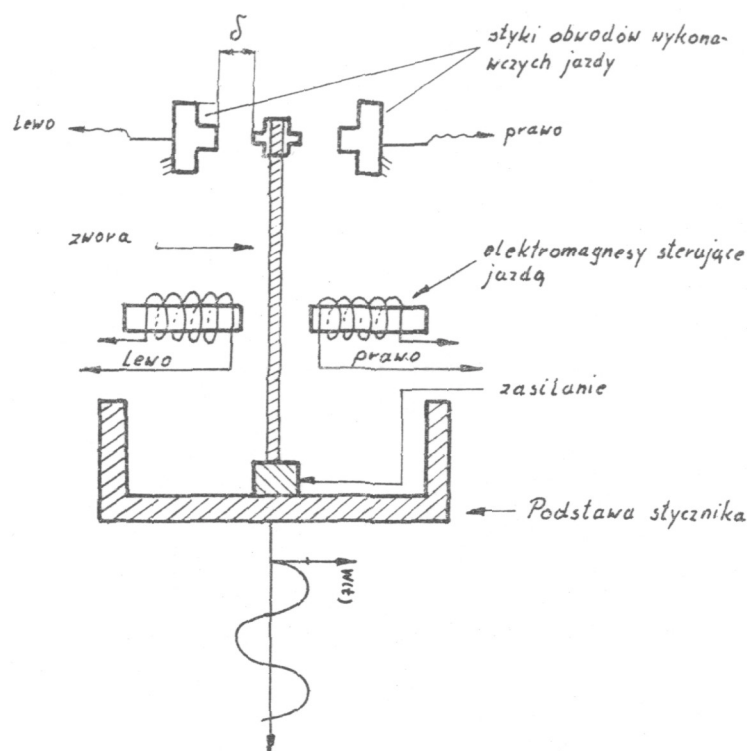
$$v_{em} = \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m}\right) v_e = \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m}\right) \frac{S_e}{\sqrt{\rho E K_d}}$$

Z przytoczonych wyżej faktów wynika jasny związek między trwałością materiałów (maszyn) a ich amplitudą drgań (rys. 1.1). Stąd też w każdym wypadku należy zmniejszyć amplitudy drgań, zwłaszcza jeśli zbliżają się do wartości granicznych wyznaczonych wzorami (1.2 - 1.4), wziętymi z odpowiednim współczynnikiem bezpieczeństwa. Dla drgań o charakterze złożonym będziemy się posługiwać powyższymi wzorami, natomiast dla drgań prostych, harmonicznym wystarczy wziąć proporcjonalność naprężeń do amplitudy deformacji.

Niezawodność maszyn i urządzeń. Niezawodność z definicji to prawdopodobieństwo wypełnienia przewidzianej misji w zadanym czasie i warunkach zewnętrznych. Istotnym składnikiem tych warunków jest poziom drgań, na które narażone jest urządzenie.

Nie chodzi tu jednak o utratę spoiwości elementów jak w poprzednim zagadnieniu, lecz o zagrożenie spełnienia swej funkcji. Prosty przykładem tej różnicy mogą być wszelkiego typu mierniki wskaźnikowe pracujące w warunkach drgań. Przy pewnych częstotliwościach tych drgań jest prawie niemożliwe odczytanie wskazań miernika (ciśnienia, temperatury, napięcia). Mimo, że spoiwość fizyczna miernika nie jest zagrożona, to niezawodność (zdolność pomiaru w tym przypadku) urządzenia pomiarowego spada wraz ze wzrostem amplitudy drgań.

Podobny spadek niezawodności w obecności drgań zagraża wszelkim urządzeniom elektromechanicznym, typu styczników, przekaźników, itp. Dla wyjaśnienia łatwości wadliwego zadziałania takich urządzeń weźmy pod uwagę przekaźnik kierunku jazdy wózka zdalnie kierowanego (lub zabawki) tak jak na rysunku 1.2.



Rys.1.2. Ideowy szkic przekaźnika sterującego mechanizmem kierunku jazdy wózka zdalnie sterowanego poddanego drganiom  $w(t)$

Jak widać z rysunku, jeśli względne przemieszczenie zwory wymuszone ruchem podstawy  $w(t)$  będzie większe niż luz  $\sigma$ , wtedy bez impulsu sterującego nastąpi przypadkowy skręt wózka w lewo lub w prawo, a niezawodność wózka będzie prawie zerowa. Jak widać wymuszenia kinematyczne działające na korpus urządzeń kontrolno sterujących należy ograniczać wszelkimi możliwymi środkami, łącznie z tworzeniem aktów prawnych normujących dopuszczalne drgania miejsc przyszłego montażu maszyn. Dobrym przykładem jest tu projekt normy PN-B-02170, który dzieli ogół instalowanych maszyn na 5 klas wrażliwości: od komputerów i precyzyjnych urządzeń pomiarowych ( $v < 0,1 \text{ mm s}^{-1}$ ) do zupełnie niewrażliwych kruszarek, młynów przesiewaczy, wentylatorów, itp., ( $v > 6 \text{ mm s}^{-1}$ ).

Wiele urządzeń pomiarowo sterujących pracuje w urządzeniach transportowych, gdzie wymuszenia mają charakter krótkich wstrząsów, uderów, nagłych przyspieszeń i opóźnień. Dla ilustracji możliwego zagrożenia (również niezawodności) przestudujmy niżej podaną tabelkę [5].

Wielkości i czasy trwania obciążeń  
dynamicznych spotykanych w transporcie [5]

Środek i rodzaj ruchu	Przyspieszenie w jednostkach g ( $g=9,81 \text{ ms}^{-2}$ )	Czas trwania w sekundach
<b>Windy:</b>		
- średnio dla wind szybkich	0,1 - 0,2	
- granica komfortu	0,3	1 - 5
- hamowanie awaryjne	2,5	
<b>Transport publiczny (metro, pociąg):</b>		
- zwykły start i zatrzymanie	0,1 - 0,2	5
- hamowanie awaryjne - $80 \text{ km h}^{-1}$	0,4	2,5
<b>Samochody:</b>		
- zwykłe zatrzymanie	0,25	5 - 8
- bardzo nieprzyjemne zatrzymanie	0,45	3 - 5
- zatrzymanie awaryjne	0,7	3
- zderzenie (możliwe do przeżycia)	20 - 100	0,1
<b>Samoloty:</b>		
- zwykły start	0,5	10
- start z katapulty	2,5 - 6	1,5
- lądowanie awaryjne możliwe do przeżycia	20 - 100	-
- wyrzucenie fotela z pilotem	10 - 15	0,25
<b>Człowiek:</b>		
- otwarcie spadochronu z wysokości 12 km	33	0,2 - 0,5
- otwarcie spadochronu z wysokości 1,8 km	8,5	0,5
lądowanie ze spadochronem	3 - 4	0,1 - 0,2
- upadek w gniazdo strażaka	20	0,1
- granica przeżycia przy dobrze rozłożonych siłach - głęboki dół śniegu	200	0,015-0,03
<b>Głowa:</b>		
- głowa dorosłego spadającego na twardą powierzchnię z wysokości 1,8 m	250	0,007
- głowa w hełmie, uderzenie tolerowane	18 - 23	0,02

Jak widać z tabeli normalne operacje transportowe mogą dawać przyspieszenia rzędu 10 g natomiast operacje awaryjne nawet do 200 g. Liczby te warto wziąć pod uwagę; projektując nowy pojazd lub urządzenia transportowe.

Dokładność. Mamy tu na myśli przede wszystkim błędy (odchyłki) kształtu i położenia. Pierwsze są szczególnie ważne w maszynach obróbczych (obrabiarkach), zaś drugie w urządzeniach transportowych (dźwigi, suwnice) i manipulacyjnych (manipulatory, roboty przemysłowe) a także przy transmisji ruchu i mocy za pomocą różnych przekładni (szczególnie pasów klinowych). Błędy kształtu z tytułu drgań przy obróbce toczeniem, szlifowaniem, itp. są wynikiem nadmiernej dynamiczności w całym układzie “obrabiarka - uchwyt - przedmiot - narzędzie\* (0-U-P-N). Oprócz drgań każdego z wymienionych elementów układu dynamicznego 0-U-P-N mamy tu jeszcze oscylacje wartości sił tarcia, sił skrawania, sił które są odpowiedzialne za przeniesienie energii z napędu do układu 0-U-P-N, co daje w efekcie drgania nie zanikające, samowzbudne. Efektem technologicznym drgań w układzie 0-U-P-N są błędy kształtu obrabianego przedmiotu, które niejednokrotnie są prawie periodyczne o długości fali  $\lambda$  [6].

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

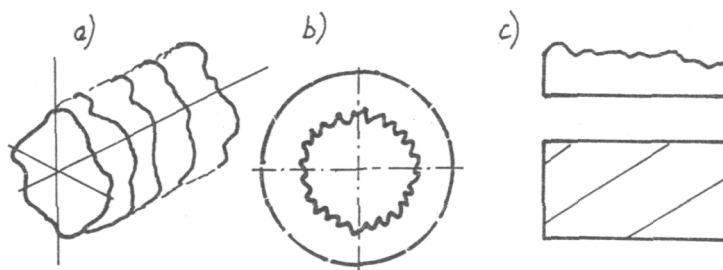
gdzie  $v$  - prędkość skrawania w  $\text{mms}^{-1}$ ,  $f$  - częstotliwość drgań w Hz.

Istnieje również proste oszacowanie Arnolda dla amplitudy drgań wierzchołka noża  $A$ , w kierunku stycznym do obrabianego przedmiotu [7]:

$$A = \frac{v}{2\pi f}$$

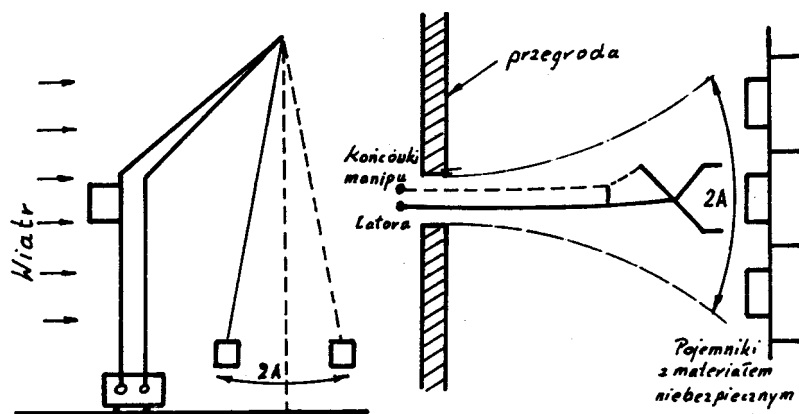
Warto tu dodać, że istnieje relacja odwrotnej proporcjonalności między tak oszacowaną amplitudą, a trwałością narzędzia.

Kończąc dyskusję wpływu drgań na dokładność obróbki, na którą nie ma tu dużo miejsca, warto podać w ślad za [6] ilustrację graficzną zagadnienia, tak jak na rysunku 1.3.



Rys.1.3. Wpływ drgań na falistość i chropowatość powierzchni wałka: a) wałek ze śladami drgań (odchyłki powiększone), b) profilogram wałka w przekroju poprzecznym, c) osiowy profilogram wałka oraz rozwinięcie powierzchni [6 rys.1]

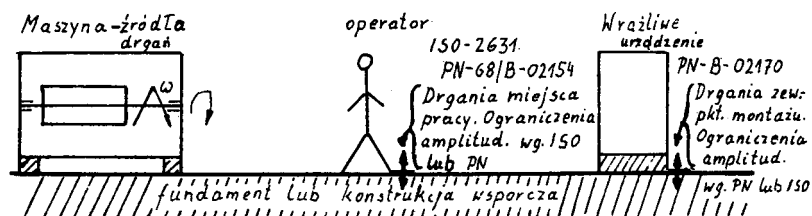
Błędy położenia na skutek drgań najbardziej dają się we znaki w urządzeniach transportowo manipulacyjnych. Sytuację ilustruje tu dobitnie praca dźwigu (bądź suwnicy) przy dużych wahaniami nosiwa oraz zdalne operacje manipulatorem o dużym zasięgu, tak jak na rysunku 1.4, (występuje to również w obrabiarkach sterowanych numerycznie). Jak widać z rysunku błąd położenia w obu przypadkach może być większy niż podwójna amplituda drgań, czyli  $2A$ .



Rys.1.4. Ilustracja utraty dokładności dźwigu i manipulatora na skutek drgań, (błąd położenia  $\geq 2A$ )

Tak więc zarówno w przypadku błędów kształtu jak i błędów położenie oczywiste jest zadanie zmniejszenia amplitudy drgań dla uzyskania lepszej jakości. Jest to więc dalszy asumpt do wniknięcia w istotę drgań mechanicznych.

Poziom emitowanych zakłóceń. W ogólności zakłócenia emitowane w otoczeniu przez maszyny, urządzenia i realizowane przez nie procesy technologiczne mogą mieć różnorodną naturę; elektryczną, chemiczną, mechaniczną, itd. Nas jednak będą interesować zakłócenia natury mechanicznej, czyli drgania i hałas emitowane podczas pracy maszyn i urządzeń. Ilustracja graficzna problemu zakłóceń drganiowych przedstawiona jest na rysunku 1.5.



Rys.1.5. Ilustracja graficzna generacji i propagacji drgań zakłócających w przemyśle

Otóż siły dynamiczne generowane przez maszyny, mimo wibroizolacji, przechodzą dalej na fundament lub konstrukcję wsporcą. Z racji niewielkiego tłumienia w tworzywach konstrukcyjnych mogą się one propagować na dużą odległość doznając nawet lokalnych wzmocnień. Wynikające stąd duże amplitudy drgań w miejscu montażu wrażliwych maszyn lub przebywania ludzi są ograniczone różnymi przepisami normowymi. Przepisy te w odniesieniu do ludzi - operatorów wprowadzają trzy skale zagrożenia drganiowego (np. ISO-2631): zmniejszony komfort, zmniejszona wydajność, zagrożenie zdrowia. Podobnie dla wrażliwych maszyn i urządzeń można wprowadzić trzystopniową skalę zagrożenia; zmniejszenie dokładności, zmniejszenie niezawodności, zmniejszenie trwałości.

Drgające powierzchnie elementów maszyn, urządzeń, fundamentów, konstrukcji wsporczych są źródłem poważnego zagrożenia hałasem (hałas to każdy dźwięk przeszkadzający). Wielkością fizyczną odpowiedzialną za wrażenie dźwięku jest ciśnienie akustyczne, p.

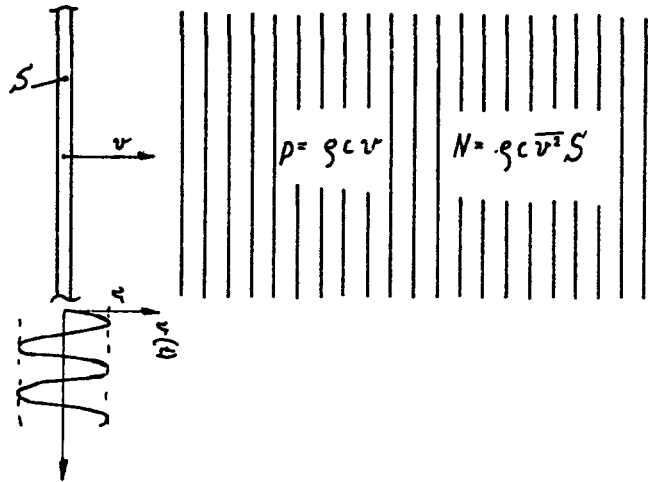
Amplituda tego ciśnienia jest w prostej relacji do prędkości drgań cząstek ośrodka (np. powietrze, woda, itp.)

$$p = \rho c v ,$$

$$(1.7)$$

gdzie  $\rho$  - gęstość ośrodka,  $c$  - prędkość dźwięku w ośrodku,  $v$  - prędkość drgań cząstek ośrodka.

Jeśli wyobrazimy sobie sztywną płytę drgającą np. w powietrzu harmonicznie z prędkością  $v$ , tak jak na rysunku 1.6, to ciśnienie akustyczne w pobliżu tego modelowego źródła dźwięku będzie  $p = \rho c v$



Rys.1.6. Sztywna drgająca płyta jako modelowe źródło dźwięku

Ciśnienie akustyczne w pewnym punkcie pola dźwiękowego nie charakteryzuje "wysiłku" źródła hałasu. Mówi o tym moc źródła  $N$ , która jest proporcjonalna do średniego kwadratu prędkości drgań  $v^2$  oraz wielkości powierzchni drgającej  $S$ . Dla źródła jak na rysunku 1.6 słuszny jest znak równości, natomiast w ogólnym przypadku jest tu jedynie proporcjonalność [8]. Dla nas istotny jest tutaj wniosek, że im większa prędkość drgań powierzchni elementu maszyny, konstrukcji, oraz im większa jego powierzchnia tym większa moc promieniowanego hałasu, tym większy poziom hałasu docierający do człowieka.

Warto tu dodać, że hałas mierzymy za pomocą jednostek względnych, tzw. poziomów,

jako  $L = 20 \lg \frac{P}{P_0}$  [db] gdzie  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} Pa$  jest ciśnieniem odniesienia, a jednostka poziomu nosi nazwę

"decybel". Podobnie jak dla drgań zagrożenie hałasowe przy małych poziomach (40-70 dB) daje

spadek komfortu, przy większych (70-90 dB) powoduje spadek wydajności pracy, natomiast przy poziomach 120 dB i więcej stanowi już poważne zagrożenie zdrowia. W Polsce dopuszczalny poziom hałasu dla różnych stanowisk pracy ujmuje norma PN-70-B-02151, z której warto jedynie podać, że maksymalny poziom hałasu w przemyśle przy ekspozycji ciągłej wynosi 90 dBA. Przekroczenie tego poziomu może powodować już trwałe ubytki słuchu. Wyżej dokonaliśmy krótkiego przeglądu niekorzystnych aspektów oddziaływania drgań na maszyny i ludzi uczestniczących w procesie produkcji. Jak wykazaliśmy dla maszyn i urządzeń nadmierne drgania dają zmniejszenie trwałości niezawodności, dokładności oraz zwiększenie emisji hałasu i drgań w otoczenie. Dla ludzi nadmierne drgania powodują wprawdzie zmniejszenie komfortu, następnie wydajności pracy a w końcu przy dużych amplitudach zagrożenie zdrowia. Widać więc tu potrzebę minimalizacji drgań, zwłaszcza drgań docierających z zewnątrz do człowieka bądź maszyny.



## 1.2. WYKORZYSTANIE DRGAŃ W TECHNOLOGII

Zjawisko drgań mechanicznych w ośrodku jest równoważne stałej transformacji energii kinetycznej na potencjalną ośrodka i odwrotnie. Mamy więc do czynienia nie tylko z oscylacją położenia cząstek, ale także z oscylacją mocy i energii. W wielu przypadkach taka forma energii może być łatwiej wykorzystana do przeprowadzenia różnorodnych procesów technologicznych w różnych dziedzinach przemysłu [9]

Jak się wydaje drgania zrobiły większą karierę w budownictwie. Z racji poważnego wzrostu wytrzymałości drgania używane są tu do zagęszczania betonu zarówno w fabryce domów przy wyrobie płyt, jak i w budownictwie mostów i dróg. Nawet przy kładzeniu dywaników asfaltowych używa się wibracyjnych walców drogowych. Za pomocą wibratorów i młotów wibracyjnych wbija się pale, ścianki, grodzie, a także jeśli trzeba drganiami wyrywa się te same elementy.

Za pomocą drgań można mieszać różne materiały, a także je rozdrabniać. Wprawienie w ruch drganiowy młyna kulowego daje zmniejszenie średnicy ziarna do 1 mikrona i mniej. Daje to istotne podwyższenie własności mechanicznych cementu. Na zasadzie różnorodnego wykorzystania energii drgań działają przesiewacze (np. węgla, żwiru) i transportery wibracyjne. Te ostatnie mogą również transportować w dowolnym kierunku, zależnie od geometrii rynny i kinematyki drgań, nie tylko materiały sypkie, ale także drobne elementy wytworzone w produkcji automatycznej (np. śruby, kondensatory, itp.).

W odlewnictwie drgań używa się najpierw przy zagęszczaniu materiału formierskiego a następnie po wlaniu surówki w celu wytrącenia gazów i szlaki.

Oczyszczanie odlewów to również domena zastosowania drgań. Dla małych elementów odbywa się to w oczyszczarkach bębnowych, zaś elementy duże oczyszczane są ręcznie przy użyciu narzędzi pneumatycznych, zwanych młotkami. Narzędzia o wibracyjnym charakterze pracy takie jak młotki, przecinaki, wiertłomy, nitowniki, wiertarki udarowe, itp. używa się w wielu dziedzinach techniki, które nie sposób wymieni.

Mają one jedną wspólną cechę; z jednej strony wykonują pożyteczną pracę zaś z drugiej oddziałują szkodliwie na ręce operatora lub otoczenie.

Dotychczas mówiliśmy o drganiach niskoczęstotliwościowych rzędu kilku do kilkuset Hz. Drgania o wyższych częstotliwościach rzędu kilkudziesięciu kiloherców zwane ultradźwiękami, są równie dobrymi nośnikami energii. Stąd też zastosowania ultradźwięków w łączeniu materiałów, ich obróbce, a nawet w medycynie przy zdalnym kruszeniu kamieni nerkowych, itp.

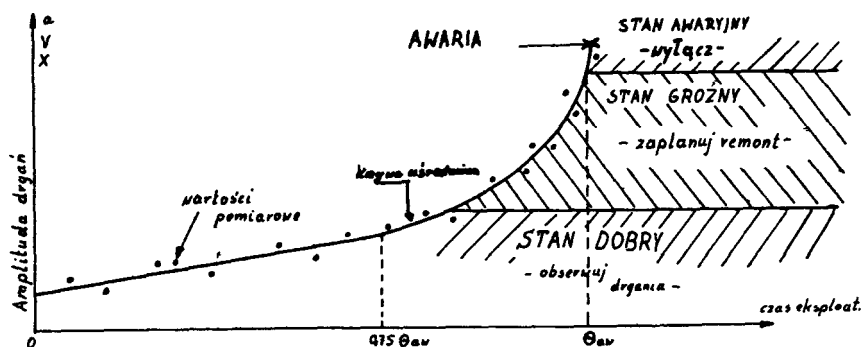
Patrząc ogólnie na całość urządzeń umożliwiających zastosowanie drgań w technologii można powiedzieć, że są one (bądź winny być) podporządkowane następującej funkcji celu: zapewnić maksymalnie sprawną zamianę energii drganiowej na pracę użyteczną przy minimalnych szkodliwych skutkach ubocznych. Nie jest to proste zadanie minimalizacji drgań szkodliwych jak w p. 1.1, wymaga więc znacznie większej znajomości zjawisk drganiowych.

### 1.3. WYKORZYSTANIE DRGAŃ W DIAGNOSTYCE

Diagnostyka to umiejętność rozpoznawania stanu na podstawie objawów lub symptomów (diagnostikus po grecku oznacza umiejący rozpoznawać).

Kilkanaście lat temu mówiono jeszcze tylko o diagnostyce medycznej, lecz obecnie wkracza ono szeroko do techniki, a w szczególności do inżynierii mechanicznej. Jeśli w poprzednim punkcie mówiliśmy o wykorzystaniu energii niesionej przez ruch drganiowy bądź falowy, to obecnie w diagnostyce mówimy o wykorzystaniu informacji zawartych w obrazie drganiowym bądź falowym interesującego nas elementu. Ten krótki przegląd możliwości określenia stanu materiału, elementu maszynowego bądź maszyny w ruchu (bez jej wyłączenia) rozpoczniemy od ultradźwięków. Tutaj elementy płaskie i o małej grubości można wprost prześwietlać jak w metodzie rentgenowskiej, natomiast dla określenia wewnętrznych wad elementów grubszych stosuje się metody echa (odbicie od wady) lub cienia akustycznego (osłabienie fali przez wadę). Technologia nieniszczących badań ultradźwiękowych stosowana jest w wielu dziedzinach inżynierii, od wstępnej kontroli jakości materiału, po kontrolę eksploatacyjną elementów maszyn i urządzeń [10], np. kontrolę spoistości zbiorników ciśnieniowych. Nie wdając się bliżej w te techniki badawcze przejdźmy do diagnostyki drganiowej, gdzie źródłem informacji są drgania o częstotliwości kilku herców do kilku kiloherców. W chwili obecnej powstała już cała dziedzina zwana diagnostyką wibroakustyczną [11], my jednak tutaj zajmiemy się najbardziej oczywistymi zastosowaniami w diagnostyce eksploatacyjnej maszyn.

Obserwacja drgań eksploatacyjnych wielu maszyn, szczególnie wirnikowych, doprowadziła do ustaleń, że poziom drgań mierzonych na korpusie, obsadzie łożyska, itp. zmienia się w sposób przedstawiony na rysunku 1.7.



Rys.1.7. Krzywa życia maszyny obserwowana za pomocą pomiarów drganiowych przyspieszenia  $a$ , prędkości  $v$ , bądź przemieszczenia drgań  $x$

Obserwując więc stan maszyny za pomocą pomiarów drgań (zależnie od typu maszyny i elementu mierzymy przyspieszenie  $a$ , prędkość  $v$ , przemieszczenie  $x$ ), potrafimy przewidzieć czas wystąpienia ewentualnej awarii i zapobiec jej przez wykonanie właściwego remontu. Co więcej, obserwując skład widmowy drgań w porównaniu z częstotliwością obrotową  $f_0$  i znajomością kinematyki maszyny potrafimy określić element, który należy poddać odnowie. Przykładowo składowe widmowe o częstotliwościach podanych niżej są symptomami:  $f_0$  - niewyrównoważenia,  $2f_0$  - luzy,  $2f_0 - 3f_0$  - nieosiowość,

$nf_0$  - częstotliwość zębowa koła o liczbie zębów  $n$  i obrotach  $f_0$ , itp. Śledząc więc amplitudy poszczególnych składowych widmowych będących symptomami drganiowymi elementów możemy oceniać ich stan eksploatacyjny.

Podsumowując to co powiedziano wyżej o roli drgań w inżynierii mechanicznej trzeba wyróżnić ich trzy aspekty i wynikające stąd cele analizy dynamicznej obiektów mechanicznych. Pierwszy aspekt szkodliwego działania drgań na obiekty mechaniczne i ludzi narzuca konieczność redukcji amplitud drgań szkodliwych. Drugi aspekt drgań użytecznych w technologii określa cel analizy dynamicznej jako optymalizację efektywności przetwarzania energii drganiowej w pracę użyteczną. Trzeci aspekt wykorzystania informacji zawartych w drganiach stwarza konieczność optymalizacji zagadnień odbioru drgań maszyn i ekstrakcji informacji użytecznych w nich zawartych. Przekazana dalej w skrypcie elementarna wiedza z drgań mechanicznych winna umożliwić rozwiązywanie prostych zagadnień z omawianego wyżej zakresu.