

Czesław CEMPEL  
Instytut Mechaniki Technicznej

DRGANIA W INŻYNIERII MECHANICZNEJ

/wprowadzenie do przedmiotu drgania dla  
studiów dziennych i podyplomowych/

Poniższy tekst przedstawia spojrzenie autora na rolę drgań we współczesnej inżynierii mechanicznej. Dając ogólny przegląd możliwości zastosowań wiedzy o drganiach w konstrukcji, technologii i eksploatacji maszyn sformułowano trzy użyteczne cele analizy dynamicznej obiektów mechanicznych. W kolejności są to: minimalizacja drgań szkodliwych w konstrukcjach maszynowych i innych, optymalizacja przetwarzania energii drgań pożytecznych w technologii i optymalizacja odbioru i ekstrakcji informacji użytecznych z drgań w diagnostyce maszyn. Taki szeroki zakres zastosowań wiedzy o drganiach winien znaleźć swe należne odzwierciedlenie w programach kształcenia wydziałów mechanicznych studiów dziennych i podyplomowych.

WPROWADZENIE

Truizmem jest już stwierdzenie greckiego filozofa - „panta rei” • - wszystko płynie, wszystko porusza się wokół nas. Wiele zaś 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 powtarzałby nosi nazwę oscylacji. Stąd też mówiły o np. drganiach pojazdu w ruchu po swym torze, o drganiach mostu, drzewa komina, drganiach strun m. in. głosowych,

ale dalej mówimy o oscylacjach napięcia w antenie nadajnika bądź odbiornika radiowego, oscylacjach poziomu wody bądź ciśnienia w instalacji, oscylacji 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. oscylacja (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 istotne dopiero po przekroczeniu pewnego wyznaczonego 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 jego otoczenia /np. następuje zmniejszenie trwałości materiału/. W /innych przypadkach mamy celową generację drgań dla wykonania pożytecznej pracy np. zagęszczenie 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 w naszym zmieniającym się otoczeniu, należy jej się przyjrzeć z bliska.

## 1. DRGANIA SZKODLIWE

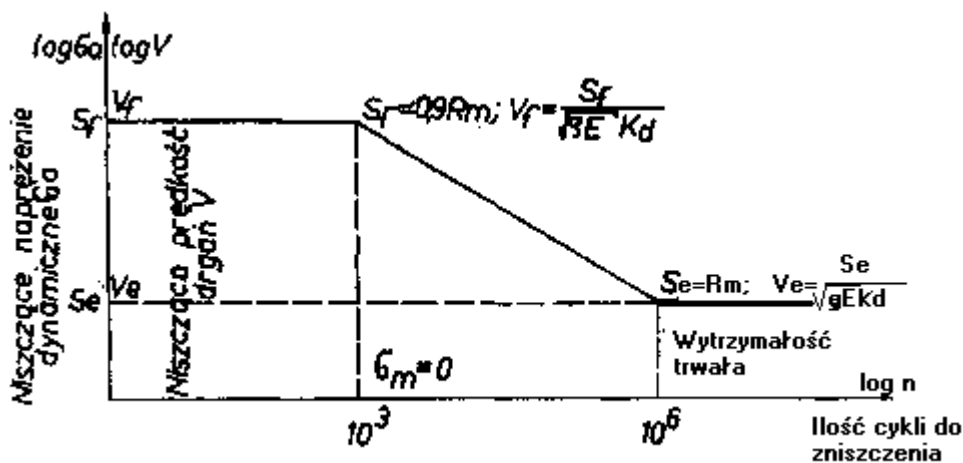
Aby przestudiować to zagadnienie najlepiej przyjrzeć się czynnikom jakości nowego wytworu /wyrobu/ technicznego i ich związkom z drganiami. W odniesieniu do każdej maszyny, urządzenia itp. jakość określają następujące czynniki: trwałość, niezawodność, dokładność, poziom zakłóceń zewnętrznych. Niżej postaramy 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;

$$\tau_c = \tau_m + \tau_a(t)$$

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

Z kursu wytrzymałości materiałów [3] wiadomo, że gdy naprężenie dynamiczne jest zerowe  $\tau_a(t) = 0$ , a naprężenie statyczne nie przekracza wytrzymałości na rozzerwanie, tzn.  $\tau_m < R_m$ , to trwałość próbki jest nieograniczona. Przyczyną ograniczonej trwałości jest występowanie naprężenia dynamicznego o wartości większej od granicy zmęczenia  $S_e$ , ( $\tau_a > S_e$ ) dobrze ilustruje uogólniony wykres Wohlera [2,3], który dla stopów żelaza ma postać jak na rys 1.



Rys. 1. Uogólniony wykres Wohlera dla stopów żelaza w kategoriach naprężenia  $\sigma_a$ , oraz niszczącej prędkości drgań  $V_f$ , ( $\sigma_m = 0$ )

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

$$\tau_a = V K_d \sqrt{\rho E} \quad , \quad \tau_m \equiv 0$$

gdzie  $v$  - jest maksymalną wartością prędkości drgań elementu mierzoną w kategoriach amplitud szczytowych,  $\rho$  - gęstość materiału,  $E$  - moduł Younga,  $K_d$  - współczynnik dynamiczny zależny od rozkładu energii  $K_d = 1$  dla elementów małych,  $K_d > 1$  dla elementów o dużej rozpiętości w stosunku do długości fali/. Na ogół naprężenia robocze elementów maszyn są różne od zera  $\tau_m \neq 0$  O, stąd też należy jeszcze uwzględnić ten fakt np. za pomocą prostej hipotezy Goodmana [3] otrzymując:

$$V_{em} = (1 - \frac{\sigma_m}{R_m}); \quad v_e = (1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \frac{S_e}{\sqrt{\rho E} K_d})$$

Z przytoczonych wyżej faktów wynika jasny związek między trwałością materiałów, maszyn a ich amplitudą drgań rys. 1.

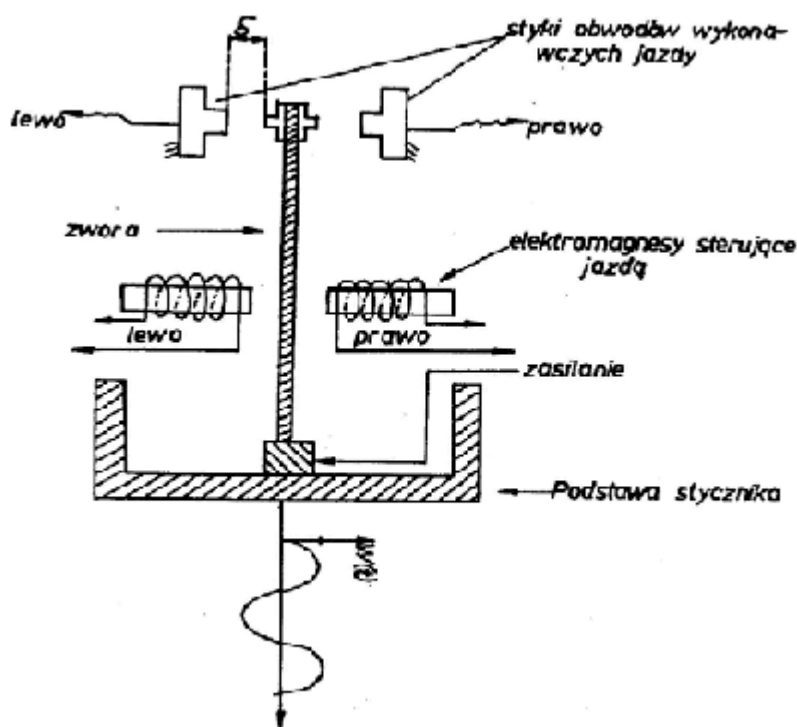
Stąd też w każdym wypadku należy zmniejszać amplitudy drgań, zwłaszcza jeśli zbliżają się do wartości granicznych wyznaczonych powyższymi" wzorami, wziętymi z odpowiednim współczynnikiem bezpieczeństwa. Dla drgań o charakterze złożonym będziemy się posługiwali powyższymi wzorami, natomiast dla drgań 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 spójności elementów jak w poprzednim zagadnieniu, lecz o zagrożenie spełnienia swej funkcji. Prosty przykładem tej różnicy mogą być wszelkiego typu mierniki wskazówkowe pracujące w warunkach drgań. Przy pewnych częstotliwościach tych drgań jest prawie niemożliwe odczytanie wskazań miernika /ciśnienie, temperatury, napięcia/. Mimo, że spójność 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 sterowanego /lub zabawki/ jak na rys. 2.

Jeśli względne przemieszczenie zwory wymuszone ruchem podstawy  $w(t)$  będzie tu większe niż luz  $\delta$ , wtedy bez impulsu sterującego nastąpi przypadkowy skręt wózka w lewo lub w prawo, a niezawodność wózka będzie prawie zerowa. Jak widać wymuszenie 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 ( $v < 0.1$  mm/s) do zupełnie niewrażliwych kruszarek, młynów przesiewaczy, wentylatorów, itp. ( $v < 6$  mm/s). Wiele urządzeń pomiarowo-sterujących pracuje w urządzeniach transportowych, gdzie wymuszenia mają charakter krótkich wstrząsów, uderzeń, nagłych przyspieszeń i opóźnień. Dla ilustracji możliwego zagrożenia /również niezawodności/ przestudujemy niżej podaną tabelę [5].

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 urządzenie transportowe.



Rys. 2. Ideowy szkic przekaźnika sterującego mechanizmem jazdy wózka zdalnie sterowanego poddanego drganiom  $w(t)$ .

Tabela 1. Wielkości i czasy trwania obciążeń dynamicznych spotykanych w transporcie [5].

Środki i rodzaj ruchu	Przyśpieszenie w jednostk.g	Czas trwania w sekundach
1	2	3
Windy:		
- średnio dla wind szybkich	0.1 - 0.2	1-5
- granica komfortu	0.3	1-5
Transport publiczny /metro pociągi/:		
- zwykły start i zatrzymanie	0.1 - 0.2	5
- hamowanie awaryjne $-80 \text{ km h}^{-1}$	0.4	2.5

1	2	3
Samochody:		
- zwykle zatrzymanie	0.25	5-8
- b. nieprzyjemne zatrzymanie	0.45	3-5
- zderzenie /mżliwe do przeżycia	20-100	0.1
Samoloty:		
- zwykły start	0.5	> 10
-start z katapulty	2.5 - 6	1.5
- lądowaaie awaryjne możliwe do		
- wyrzucenie fotela z pilotem	10 - 15	0.25
Człowiek:		
- otwarcie spadochronu z wys. 12 km	33	0.2-05
- otwarcie spadochronu z wys. 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
Głowa:		
- głowa dorosłego spadająca na twardą powierzchnię z wys. 1.8 m	250	0.007
- głowa w hełmie, uderzenie tolerowane	18-23	0.02

Dokładność. Mamy tu na myśli przede wszystkim błędy /odchyłki/ kształtu i położenia. Pierwsze są szczególnie ważne w maszynach obróbczych, zaś drugie w urządzeniach transportowych /dźwigi, suwnice/ i manipulacyjnych /manipulatory, roboty przemysłowe/, a także przy transmisji ruchu i mocy za pomocą różnych przekładał /szczególnie z pasów klinowych/. Błędy kształtu z tytułu drgań przy obróbce toczeniem, szlifowaniem, itp. są wynikiem nadmiernej dynamiczności w całym układzie „obrabiarka-uchwyty-przedmiot-narzędzie" /0-U-P-M/. 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 niezanikające, samowzбудne. Efektem technologicznym drgań w układzie 0-U-P-N są błędy kształtu obrabianego przedmiotu, które niejednokrotnie są prawie periodyczne o długości fali  $\lambda$ , [6].

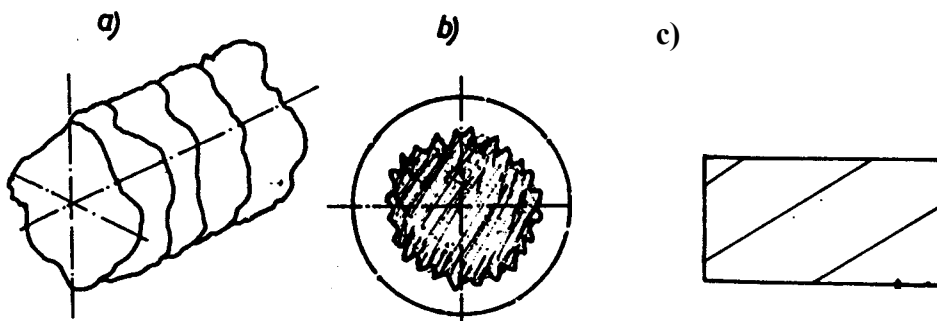
$$\lambda = \frac{v}{f},$$

gdzie  $v$  - prędkość skrawania w mm/s,  $f$  - częstotliwość drgań w Hz.

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

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

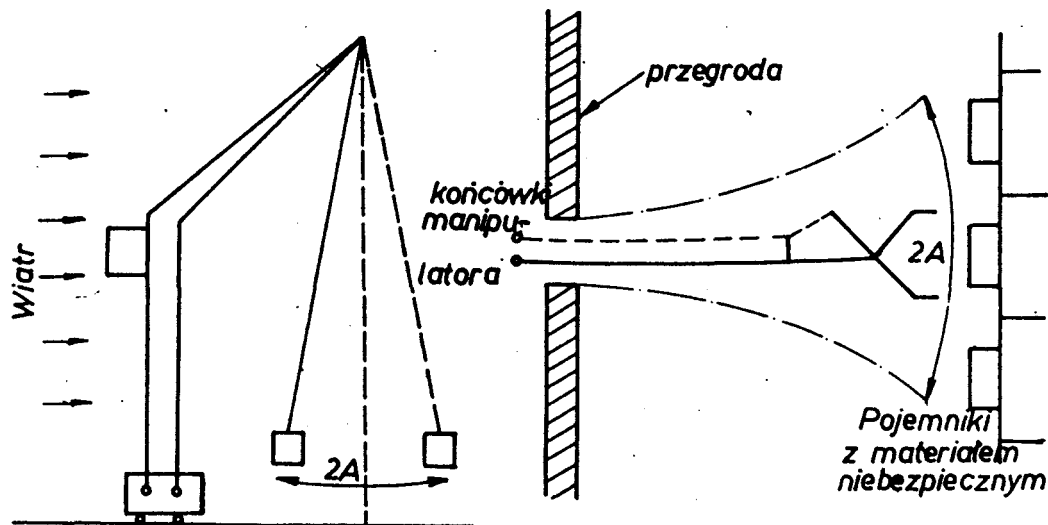
Kończąc dyskusję wpływu drgań na dokładność obróbki, na którą nie ma tu dużo miejsca, warto podać w ślad za [6] ilustrację graficzną zagadnienia jak na rysunku 3.



Rys. 3. Wpływ drgań na falistość i chropowatość powierzchni wałka t a) wałek ze śladami drgań (odchyłki powiększone), b) profilogram wałka w przekroju poprzecznym, c) osiowy profilogram wałka oraz rozwinięcie powierzchni [6].

Błędy położenia na skutek drgań najbardziej dają się we znaki w urządzeniach transportowo-manipulacyjnych. Sytuację ilustruje tu dobitnie praca dźwigu /bądź suwnicy/ przy dużych wahaniach no siwa oraz zdalna operacje manipulatorem o dużym wysięgu tak jak na rysunku 4. Jak widać z rysunku błąd

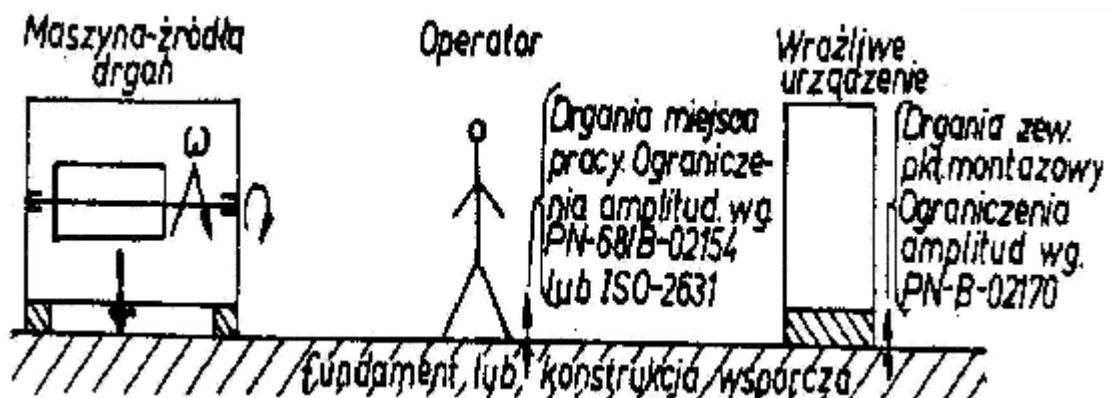
położenia w obu przypadkach może być większy niż podwójna amplituda drgań czyli  $2A$ .



Rys. 4. Ilustracja utraty dokładności dźwigu i manipulatora na skutek drgań (błąd położenia  $>2A$ ).

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

Poziom emitowanych zakłóceń. IV ogólności zakłócenia emitowane w otoczenie przez maszyny, urządzenia i realizowane prze;; 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 5.



### Rys. 5. Ilustracja graficzna generacji i propagacji drgań zakłócających w przemyśle.

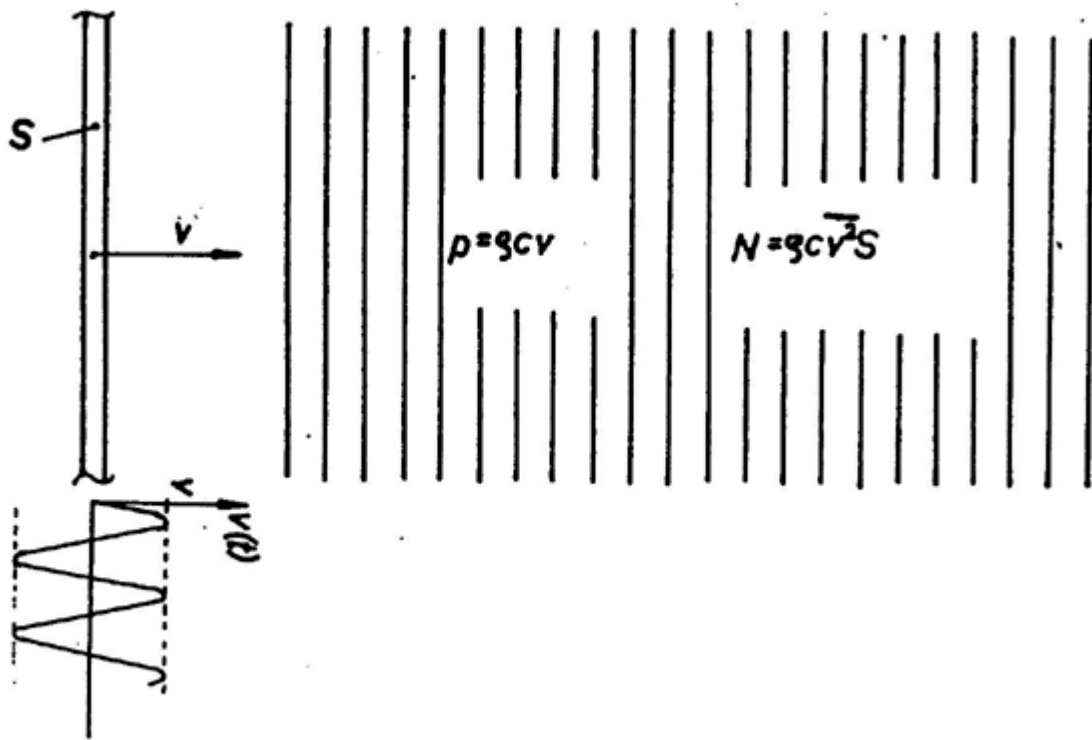
Otóż siły dynamiczne generowane przez maszyny, mimo wibroizolacji, przechodzą dalej na fundament lub konstrukcję wsporczą. Z racji niewielkiego tłumienia w tworzywach konstrukcyjnych mogą się one propagować na dużą odległość doznając nawet lokalnych wzmocnień. Wynikające stąd duże amplitudy drgań w miejscu 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 dźwiękowe jest tutaj ciśnienie akustyczne  $p$ . Amplituda tego ciśnienia jest w prostej relacji do prędkości drgań cząstek ośrodka /np. powietrze, wody itp./:

$$p = \rho c v,$$

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 6, to ciśnienie akustyczne w pobliżu tego modelowego źródła dźwięku będzie,  $p = \rho c v$ .



**Rys. 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 kwadratu prędkości drgań  $v^2$  oraz wielkości powierzchni drgającej,  $S$ . Dla źródła jak na rysunku 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 również poziom hałasu tym większy również poziom hałasu docierający do człowieka\* Warto tu dodać, że hałas mierzony za pomocą jednostek względnych tzw. poziomów, jako

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0} \text{ dB}$$

gdzie  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa jest ciśnieniem odniesienia, a jednostka poziomu nosi nazwę „decybel”. Podobnie, jak dla drgań zagrożenia 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 i życia. W Polsce dopuszczalny poziom

hałasu dla różnych stanowisk pracy ujmuje norma PN-84N-01307 z której warto jedynie podać, że maksymalny poziom hałasu w przemyśle przy eksploatacji ciągłej wynosi 85 dB. 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 otoczeniu\*. Dla ludzi nadmierne drgania powodują wprawdzie zmniejszenie komfortu, wydajności pracy a w końcu przy dużych amplitudach zagrożenia zdrowia i życia. Widać więc tu potrzebę minimalizacji drgań docierających z zewnątrz do człowieka bądź maszyny.

## 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 największą 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 [12].

Za pomocą drgań można mieszać różne materiały, a także je rozdrabniać. Wprawiane w ruch drganiowy młyna kulowego daje zmniejszenie średnicy ziarna do 1 mikrona i mniej\*. Powoduje 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 wytwarzane w produkcji automatycznej /np. śruby, kondensatory itp./. Wibracyjnie utwardza się powierzchnie odpowiedzialnych detali maszyn, usuwa naprężenia resztkowe odprężając wibracyjnie duże elementy by nie uległy deformacji. Aplikując drgania wysokoczęstościowe do materiału można

wydatnie obniżyć do celów obróbki jego granicę plastyczności [4] bądź skorzystać ze zjawiska zwanego wibropelżaniem.

W odlewnictwie drgań używa się najpierw przy zagęszczaniu materiału formierskiego, a następnie po wlaniu surówki do 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 wymieniwać. Mają one dwie wspólne cechy : z jednej strony wykonują pożyteczną pracę, zaś z drugiej oddziałują szkodliwie na ręce operatora.

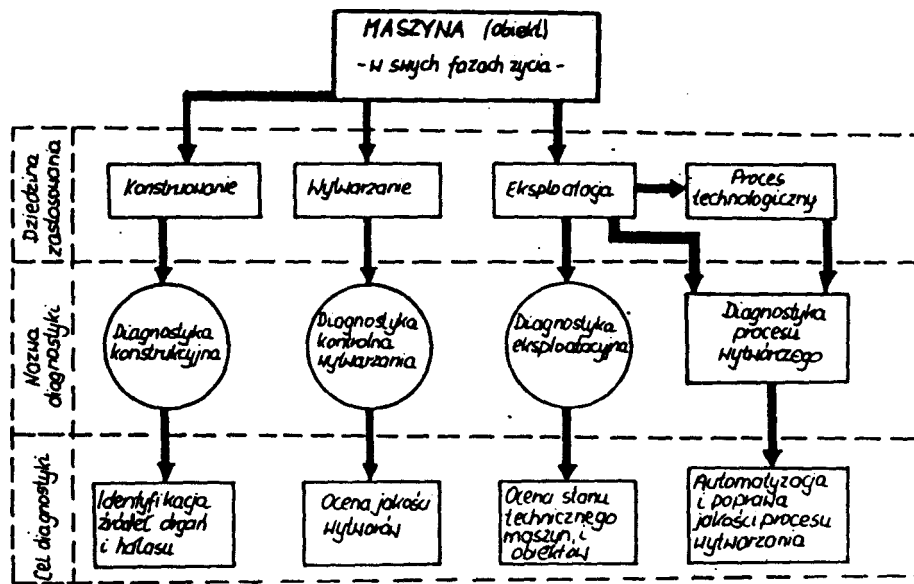
Dotychczas mówiliśmy o drganiach niskoczęstotliwościowych rzędu kilku do kilkuset Hz. Drgania o wyższych częstotliwościach rzędu kilkudziesięciu kiloherców, zwane ultradźwiękami, są równie dobrymi nośnikami energii. Stąd też zastosowania ultradźwięków w łączeniu materiałów, ich obróbce, a nawet w medycynie 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 sprawna zamianę energii drganiowej na prace użyteczna przy minimalnych szkodliwych skutkach ubocznych. Nie jest to więc proste zadanie minimalizacji drgań szkodliwych, jak w p. 1, znacznie większej znajomości zjawisk drganiowych.

### 3. WYKORZYSTANIE DRGAN'W DIAGNOSTYCE

Diagnostyka to umiejętność rozpoznawania stanu na podstawie objawów lub symptomów /diagnostikós po grecku oznacza umiemy rozpoznawać/. Kilkanaście lat temu mówiono jeszcze tylko o diagnostyce medycznej, lecz obecnie wkracza to pojęcie szeroko do techniki, a w szczególności do inżynierii mechanicznej. Jeśli w poprzednia punkcie mówiliśmy o wykorzystaniu energii niesionej przez ruch drganiowy bądź falowy, to obecnie w diagnostyce mówimy o wykorzystaniu informacji zawartych w obrazie drganiowym bądź falowy interesującego nas elementu. Ten krótki przegląd możliwości określania stanu materiału, elementu maszynowego bądź maszyny rozpoczniemy od ultradźwięków. Tutaj elementy płaskie i o małej grubości można wprost prześwietlać, jak w metodzie rentgenowskiej, natomiast dla określenia wad wewnętrznych elementów grubszych stosuje się metody echa /odbicie od wady/ lub cienia akustycznego /osłabienie fali przez wadę/. Technologia nieniszczących badań ultradźwiękowych stosowała jest w wielu dziedzinach inżynierii, od wstępnej kontroli jakości

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 kilkudziesięciu kiloherców. W chwili obecnej powstała już cała dziedzina zwana diagnostyką wibroakustyczną [11]. Badając charakter drgań emitowanych przez maszyny można ocenić ich jakość i stan techniczny na każdym etapie ich życia tak jak na rys. 7.



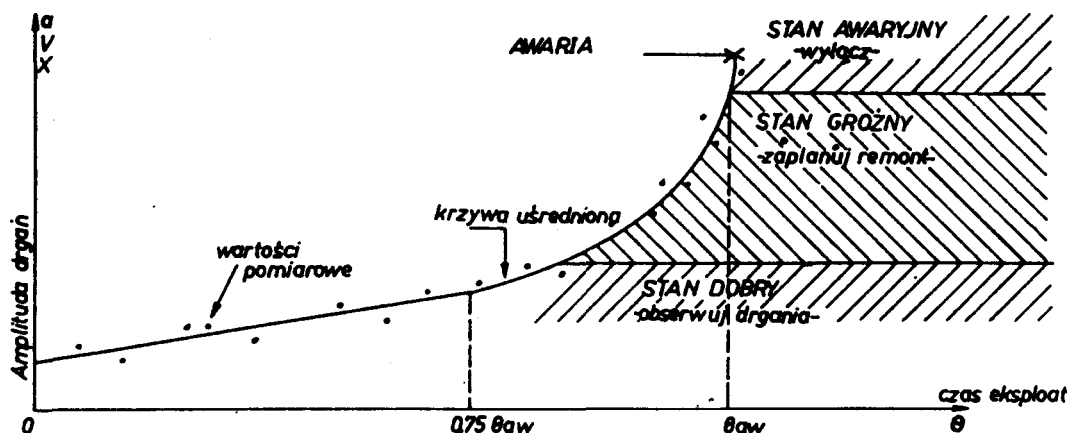
Rys. 7. Syntetyczne ujęcie celów poszczególnych rodzajów diagnostyki WA w przemyśle.

Tak więc za pomocą drgań możemy ocenić jakość projektu maszyny w postaci jej prototypu, jakość wytworzonego seryjnie egzemplarza maszyny a także stan techniczny pracującej już maszyny. Wreszcie te same drgania dostarczają w wielu przypadkach informacji o fazie procesu technologicznego wykonywanego przez maszyny [13].

Obserwacja drgań wielu maszyn w ruchu, szczególnie wirnikowych, doprowadziła do ustaleń, że poziom drgań mierzonych na korpusie, obsadzie łożyska itp., zmienia się w sposób przedstawiony na rysunku 8.

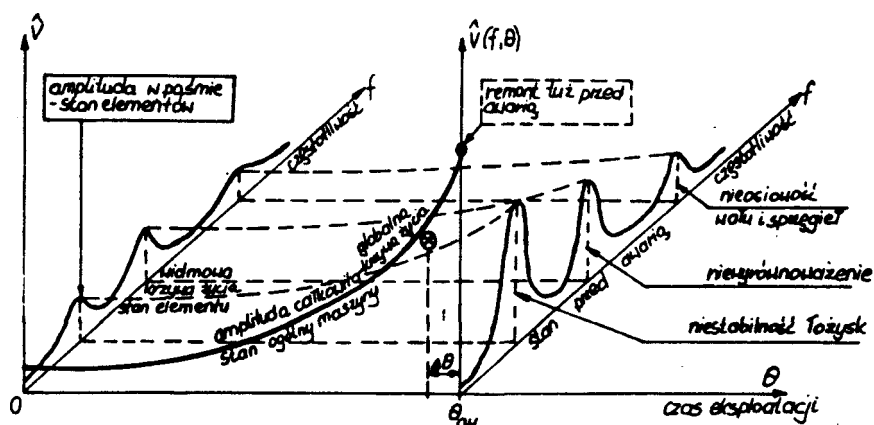
Obserwując więc stan maszyny za pomocą pomiarów drgań /zależnie od typu maszyny i elementu mierzony przyśpieszenie  $a$ , prędkość  $v$ , przemieszczenie  $x$ , / potrafimy przewidzieć czas wystąpienia ewentualnej awarii i zapobiec jej przez wykonanie właściwego remontu. Co więcej, obserwując skład widmowy drgań w porównaniu z częstotliwością obrotową  $f$  i znajomością kinematyki maszyny potrafimy określić element, (zlokalizować) który należy

poddać odnowie. Przykładowo składowe widmowe o częstotliwościach podanych niżej są symptomami:  $f_0$  - niewy-



Rys. 8. Krzywa życia maszyny obserwowana za pomoce pomiarów drganiowych» przyspieszenia, a. prędkości, y, bądź przemieszczenia drgań, x.

równoważenie;  $2 f_0$  - luzy;  $2 f_0, 3 f_0$  - nieosiowość,  $n f_0$  - częstotliwość zębowa koła o liczbie zębów  $n$  i obrotach  $f$ ; itp. tak jak na rysunku 9. Siedząc więc amplitudy poszczególnych składowych widmowych będących symptomami drganiowymi różnych elementów możemy ocenić ich stan eksploatacyjny.



Rys. 9. Ilustracja idei drganiowej diagnostyki maszyn prostych przez pomiar amplitudy całkowitej prędkości drgań - dla oceny stanu ogólnego oraz przez analizę widmowe drgań - dla oceny zaawansowania poszczególnych uszkodzeń (globalna i widmowe krzywe życia).

## 4. WNIOSKI

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 cci 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.

Z tego krótkiego przeglądu oświetlającego istotną rolę drgań w inżynierii mechanicznej wynika konieczność stworzenia takich programów kształcenia na studiach dziennych i podyplomowych, by zawarta w nich elementarna wiedza z dziedziny drgań mechanicznych umożliwiła zrozumienie i rozwiązywanie prostych zagadnień z omawianego wyżej zakresu. Zrozumienie wiedzy oparte na prostych przykładach jest pierwszym krokiem do jej używania w każdym z trzech wskazanych wyżej aspektów.

## LITERATURA

1. Jakubowicz A., Orłowski Z., Wytrzymałość materiałów. PWN, Warszawa 1960.
2. Buch A. Zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej. PWN, Warszawa 1964.
3. Juvinall R., Stress, Strain and Strength. McGraw Hill, New York 1967.
4. Campbell C., Tę fatigue limits for vibration of machine and structural elements. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn. Nr 4, 1953. 51-61
5. Harris C.U., Crede C.U., editors, Shock and Vibration Handbook, ch, 44, sec. edition, McGraw Hill, New York 1976.
6. Marchelek K., Dynamika obrabiarek. WNT, Warszawa 1974.
7. Komosiński J., Analiza drgań noża tokarskiego przy podłużnym toczeniu stali St 45 z uwzględnieniem procesu zużycia, PTPN. Poznań 1971.
8. Campbell C., Wibroakustyka stosowana. PWN, Warszawa-Poznań 1978.
9. Вайабегр Д. В., Писаренко Ф.О., Механические колебания и их в технике. Наука, Москва 1965.
10. Filipożyński L., Pawłowski Z., Wehr J., Ultradźwiękowe metody badania materiałów.

PWNТ, Warszawa 1963.

11..Семпел С., Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn. WNT. Warszawa 1982.

12. Вибрации в втехнике, ТОМ 4, Машиностроение Москва 1981.

13. С е в е l С., Wibroakustyczna diagnostyka maszyn. Wyd. Poi. Poznań 1985.

14. Упътразбук Маленкя знциклордия Сов. Знц. МосКВа 1979 . с. 250.