

1. ÚVOD

Jedným z najvýznamnejších nepriaznivých faktorov ohrozujúcich zdravie človeka, sú vibrácie a hluk.

Hluk sa prejavuje predovšetkým v oblasti sluchového orgánu trvalými a nevyliciteľnými poruchami. Vibroakustické vlnenie prenášajúce energiu, negatívne pôsobí na jednotlivé segmenty a sústavy ľudského tela. Nadmerné pôsobenie hluku a vibrácií na človeka, znižuje jeho produktivitu a kvalitu práce. Značné je ohrozená bezpečnosť práce, čo sa nepriaznivo prejavuje aj v ekonomickej oblasti. Uvedené skutočnosti by nás mali viesť k tomu, aby sme sa s podstatne väčšou intenzitou venovali otázkam príčin vzniku nadmerného kmitania a hluku strojov, strojových zariadení ako aj všetkým činnostiam spôsobujúcim výrazne nežiadúce kmitanie a hluk.

Znižovanie hluku a vibrácií vo všeobecnosti patrí dnes vo vyspelých štátoch sveta k dôležitým úlohám spoločnosti. Aktivita v tejto oblasti sa sústreďuje predovšetkým na primárne znižovanie hluku a vibrácií, čiže priamo na odstraňovanie príčin vibroakustickej energie technického zariadenia. Sekundárne, resp. následné znižovanie vibroakustickej energie je menej účinné a ekonomicky náročnejšie.

V mojej práci venujem pozornosť hluku a kmitaniu ako nepriaznivému faktoru pôsobiacemu na človeka. Cieľom mojej práce je aj poukázať na sociálne aspekty a ekonomickú efektívnosť ochrany pred nežiadúcimi účinkami hluku a vibrácií.

1.1 VŠEOBECNE O VZNIKU VIBRÁCIÍ A HLUKU

Vibrácie a hluk sú sprievodnými javmi pracovných procesov všetkých strojných zariadení, výrobných strojov dopravných prostriedkov, rôznych domácich elektrospotrebičov a pod. Nemožno preto vibrácie a hluk z pracovného a životného prostredia úplne odstrániť, ale redukovať na prijateľnú hodnotu.

Vibrácie a hluk sú súčasťou životného prostredia nielen ľudí, ale vlastne všetkých živých organizmov na našej Zemi. Vibrácie a hluk pôsobia negatívne na živé organizmy.

Vibrácie pružných médií (pevných látok, tekutín) vznikajú v dôsledku časovo premenných silových účinkov, pôsobiacich v niektorých miestach sledovaného média. Vibrácie sa potom šíria od zdroja do ostatných častí prostredia [1].

Hlukom sa nazýva akýkoľvek nežiadúci obťažujúci a rušivý zvuk. Je ťažké inak definovať hluk, pretože veľmi záleží na vzťahu človeka k danému zvuku. Pre niekoho môže byť daný zvuk neprijateľným hlukom, ale pre iného príjemným a zábavným posluchoch. Zvuk je preto všeobecnejším pojmom ako hluk [1].

Hluk ako nežiadúci zvuk sa šíri do pomerne veľkých vzdialeností. Pritom sa šíri ako plynným tak i kvapalným prostredím. Hluk ako akustické vlnenie a vibrácie ako mechanické kmitanie sa odrážajú, lomí, ohýbajú a tak zasahujú rôzne miesta nášho pracovného a životného prostredia bez toho, aby sme vedeli kde je zdroj umiestnený. Prejavuje sa to najmä v uzavretých a polouzavretých priestoroch. V dôsledku tohto javu pôsobia hluk a vibrácie na každého, kto je v dosahu akustickej a mechanickej energie. Postihujú nielen toho, kto zdroj obsluhuje, ale i ľudí, ktorí so zdrojom nemajú nič spoločné a pre nich sú hluk a vibrácie nežiadúce, obťažujúce a škodlivé.

1.2 ZÁKLADNÉ AKUSTICKÉ POJMY

1.2.1 Akustické pole

Zvuk je pocit vyvolaný v uchu rýchlo sa meniacimi tlakovými zmenami. Oscilácia tlaku v okolitom, prevažne plynnom prostredí vytvára zvukové, alebo akustické pole. Tieto tlakové zmeny sú spravidla spôsobované kmitaním povrchu strojov a ich častí, alebo kmitaním iných zariadení. Môžu však byť vyvolané aj inými spôsobmi, ako napríklad turbulentným miešaním plynným prostredím u výfukov vzducho-technickým zariadení a prúdovým strojov, pohybom zubov pásových a reťazových píl a pod. [2].

Zvukové pole je opísané zmenami ustálených premenných, ktoré popisujú stav prostredia, ktorým sa zvuk šíri. V plynnom a v kvapalnom prostredí vykonávajú časovú a priestorovú závislosť tieto veličiny:

$$\text{tlak} \quad p_{\text{celk}} = \bar{p} + p(\mathbf{r}, t), \quad [\text{Pa}] \quad (1.1)$$

$$\text{rýchlosť} \quad v_{\text{velk}} = \bar{v} + v(\mathbf{r}, t), \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (1.2)$$

$$\text{teplota} \quad T_{\text{celk}} = \bar{T} + T(\mathbf{r}, t), \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.3)$$

$$\text{hustota} \quad \rho_{\text{celk}} = \bar{\rho} + \rho(\mathbf{r}, t). \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (1.4)$$

Pre popis zvukového poľa sa používa najmä tlak a rýchlosť.

1.2.2 Rýchlosť šírenia zvuku

Rýchlosť šírenia zvuku je rýchlosť šírenia zvukového rozruchu v smere zvukového lúča určeným prostredím. Samozrejme rýchlosť je závislá od prostredia, v ktorom sa zvuková vlna šíri [3]. Rýchlosť šírenia zvuku môžeme všeobecne vyjadriť vzt'ahom

$$c = k \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (1.5)$$

kde k je konštanta,
 E je modul pružnosti média, [Pa]
 ρ je merná hmotnosť média. [kg.m⁻³]

Rýchlosť šírenia zvuku vo vzduchu závisí aj od teploty:

$$c = \sqrt{\kappa \frac{\rho_b}{\rho}} = \sqrt{\kappa r_v T_d} = 20,06 \sqrt{T_d}, \quad (1.6)$$

kde ρ_b je normálny barometrický tlak, [Pa]
 κ je adiabatický exponent: $\kappa = 1,402$,
 r_v je plynová konštanta suchého vzduchu: $r_v = 287,11 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$,
 T_d je termodynamická teplota [K].

pričom

$$\rho = \frac{\rho_b}{r_v T_d}. \quad (1.7)$$

Pri izbovej teplote $20 \text{ }^\circ\text{C}$ je rýchlosť šírenia zvuku $c = 344 \text{ m.s}^{-1}$.

1.2.3 Frekvencia a vlnová dĺžka

Frekvencia určuje počet zmien periodického deja za časovú jednotku. Jej prevrátená hodnota (perióda T) určuje čas trvania kmitu

$$f = \frac{1}{T}. \quad [\text{Hz}] \quad (1.9)$$

V akustike často používame vyjadrenie pomeru dvoch frekvencií oktávou. Fyzikálne vyjadruje frekvenčný interval jednej oktávy pomer frekvencií 1 : 2.

Vlnovú dĺžku šírenia zvuku λ určuje pomer rýchlosti šírenia zvuku a frekvencie sledovaného signálu

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT. \quad [\text{m}] \quad (1.10)$$

Pri zisťovaní šírenia zvuku je vlnová dĺžka dôležitou veličinou a často sa porovnáva s rozmermi priestoru, kde sa zvuk šíri, resp. rozmermi zdroja hluku. Z toho sa následne vyvodzujú závery pre šírenie a vyžarovanie zvuku.

1.2.4 Akustický tlak a rýchlosť

Akustické vlnenie vo vzduchu sa prejavuje najmä akustickým tlakom p .

Akustický tlak je striedavý tlak superponovaný barometrickému tlaku pri šírení zvuku a vyjadruje tak odchýlky od kludovej hodnoty barometrického tlaku. V praxi ho určuje efektívna hodnota akustického tlaku v Pa. Pre akustický tlak v ľubovoľnom bode platí:

$$p = p_i - p_b, \quad (1.11)$$

kde p_i je okamžitý tlak v ľubovoľnom bode prostredia,

p_b je konštantný barometrický tlak.

Najslabšie zvuky, ktoré človek s normálnym zdravým sluchom je schopný postrehnúť, majú akustický tlak blížiaci sa k hodnote $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, ktorá sa považuje ako vzťažná hodnota akustického tlaku.

Akustická rýchlosť je rýchlosť častíc prostredia pohybujúcich sa v rytme akustického tlaku, čiže okolo svojej rovnovážnej polohy. Jej hodnotu vypočítame zo vzťahu:

$$v = v_0 e^{j\omega\left(t \pm \frac{x}{c}\right)}, \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.12)$$

kde \pm je znamienko a platí pre šírenie akustických vln v zápornom smere osi x ,

ω je uhlová frekvencia: $\omega = 2\pi f$,

v_0 je rýchlosť v čase t_0 .

Akustická rýchlosť je rovnocenná akustickému tlaku. Akustický tlak sa však bežne používa na opis vlastností zvukového poľa, pretože meranie tlaku je jednoduchšie ako meranie akustickej rýchlosti.

1.2.5 Akustický výkon a intenzita akustického poľa

Meradlom toku akustickej energie prechádzajúcej určitou plochou sú akustický výkon a akustická intenzita. Vo všeobecnosti pre výkon platí

$$P = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}. \quad (1.13)$$

Ak F vyjadríme ako pôsobenie tlaku p^* na plochu S , potom

$$P = p^* S \vec{v} \cos \alpha, \quad (1.14)$$

kde α je uhol, ktorý zvierá normála k ploche S s vektorom rýchlosti \vec{v} .

Pre akustický tlak platí

$$dP = p v \cos \varphi \cos \alpha dS, \quad (1.15)$$

kde φ je fázový posun medzi akustickým tlakom a akustickou rýchlosťou.

Akustickú intenzitu zvuku možno definovať ako

$$I = \frac{dP}{dS} = p v \cos \varphi \cos \alpha. \quad (1.16)$$

Predpokladáme, že smer normály plochy S je zhodný s vektorom akustickej rýchlosti v (vtedy $\alpha = 0$), potom akustický výkon

$$P = \int_S I dS = \int_S p v \cos \varphi dS = p v \cos \varphi S \quad (1.17)$$

alebo

$$P = I S. \quad (1.18)$$

Ak $\varphi = 0$, potom

$$I = p v = \frac{p^2}{\rho c} = v^2 \rho c \quad [W.m^{-2}] \quad (1.19)$$

a akustický výkon

$$P = \int_S p v dS = \frac{1}{\rho c} \int_S p^2 dS = \frac{p^2}{\rho c} S, [W] \quad (1.20)$$

resp. ak $\varphi = 0$, pre akustickú intenzitu guľovej vlny, kde akustický tlak a akustická rýchlosť nie sú vo fáze, potom platí

$$I = p v \cos \varphi. \quad (1.21)$$

Akustický výkon môžeme definovať ako množstvo akustickej energie prechádzajúcej myslanou plochou S ohraničujúcou akustický zdroj za jednotku času.

Akustickú intenzitu definujeme ako priemerné množstvo akustickej energie za časovú jednotku, prechádzajúcu jednotkovou plochou, ktorá je kolmá na smer šírenia vlnenia.

Keďže bežnými prístrojmi nevieme merať fázový uhol, musíme pri výpočte akustickej intenzity a výkonu určiť hranice platnosti predchádzajúcich rovníc.

Prahová vzťahná hodnota akustickej intenzity zvuku sa určila

$$I_0 = 10^{-12} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$$

a prahová hodnota akustického výkonu, ak S definujeme ako jednotkovú plochu, je

$$P_0 = 10^{-12} \quad [\text{W}]$$

V mnohých prípadoch nevyžaruje zdroj hluku do všetkých smerov rovnomerne, a potom uvedené vzťahy pre akustický výkon nemôžeme použiť. Takéto vyžarovanie charakterizuje smerový činiteľ a smerový index.

1.3 MECHANICKÉ KMITANIE

1.3.1 Názvoslovie, základné pojmy, definície

Pojmy, ktoré charakterizujú mechanické kmitanie, sú uvedené v norme STN ISO 2041 [14].

Mechanická sústava - hmotný celok vytvorený určitým definovaným rozložením hmotnosti, tuhosti a tlmenia.

Kmitanie - časová zmena hodnoty určujúcej veličiny kmitania, ktorá popisuje pohyb alebo polohu mechanickej sústavy, kde je určujúca veličina striedavo väčšia alebo menšia než je určitá priemerná alebo referenčná hodnota.

Periodické kmitanie - kmitanie, pri ktorom sa priebeh určujúcich veličín opakuje po určitom rovnakom prírastku nezávisle premennej.

Harmonické kmitanie; sínusové kmitanie - periodické kmitanie, ktoré je sínusovou funkciou nezávisle premennej.

Ustálené kmitanie - súvislé periodické kmitanie.

Vynútené kmitanie - ustálené kmitanie spôsobené ustáleným budením.

Voľné kmitanie; vlastné kmitanie - kmitanie, ktoré sa vyskytuje po odstránení budenia alebo väzby.

Kmit (cyklus) - ucelený súbor stavov alebo hodnôt, ktoré periodický jav alebo funkcia nadobúda pred svojim identickým opakovaním.

Základná perióda; perióda - najmenší interval nezávisle premennej veličiny, po ktorom sa opakuje periodická funkcia.

Frekvencia - prevrátená hodnota periódy.

Uhlová frekvencia; kruhová frekvencia - 2π násobok frekvencie harmonickej veličiny.

Fázový posun - rozdiel medzi fázami dvoch periodických kmitaní tej istej frekvencie; v prípade harmonického kmitania rozdiel medzi ich fázovými uhlami meranými od toho istého začiatku.

Amplitúda - maximálna hodnota harmonického kmitania.

Počuteľná frekvencia - ľubovoľná frekvencia zodpovedajúca normálne počuteľnej zvukovej vlne.

Frekvencia ultrazvuku; ultrazvuk - frekvencia ležiaca nad pásmom počuteľnej frekvencie.

Frekvencia infrazvuku; infrazvuk - frekvencia ležiaca pod pásmom počuteľných frekvencií.

Rezonancia - v sústave pri vynútenom kmitaní vznikne vtedy, keď ľubovoľná malá zmena frekvencie budenia má za následok zmenšenie odozvy sústavy.

Rýchlosť; relatívna rýchlosť - vektorová veličina, ktorá určuje časovú zmenu vektora posunutia.

Zrýchlenie - vektorová veličina, ktorá určuje časovú zmenu vektora rýchlosti.

Oscilácia - zvyčajne časová zmena veľkosti veličiny vzhľadom na určenú hodnotu, ktorá striedavo nadobúda väčšie a menšie hodnoty veličiny, než je určená stredná hodnota tejto veličiny.

Zvuk - (1) sluchový vnem vybudovaný akustickým vlnením

(2) akustické vlnenie schopné vyvolať sluchový vnem

(3) periodická zmena tlaku, mechanického napätia, rýchlosti častíc atď.

v prostredí s vnútornými silami.

Akustika - náuka o zvuku a technike zvuku vrátane jeho vzniku, šírenia a účinkov.

Vonkajšie prostredie - súhrn všetkých vonkajších podmienok a vplyvov, ktorým je sústava vystavená.

Základ - konštrukcia, na ktorej je uložená mechanická sústava; môže byť upevnená vzhľadom na stanovenú vzťažnú sústavu, alebo sa môže pohybovať a tým vyvolať buďenie uloženej mechanickej sústavy.

Stupne voľnosti - počet stupňov voľnosti mechanickej sústavy sa rovná minimálnemu počtu nezávislých zovšeobecnených súradníc potrebných na jednoznačné definovanie polohy sústavy v ktoromkoľvek časovom okamihu.

1.3.2 Fyzikálne veličiny mechanického kmitania

Fyzikálne veličiny mechanického kmitania sú výchylka, rýchlosť a zrýchlenie. Tieto veličiny sú navzájom viazané [4]. Rýchlosť a zrýchlenie sú funkciou výchylky.

Rýchlosť kmitania dostaneme prvou deriváciou okamžitej výchylky y podľa času

$$v = \frac{dy}{dt} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.22)$$

Zrýchlenie kmitania možno definovať ako druhú deriváciu výchylky alebo prvú deriváciu rýchlosti podľa času

$$a = \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{dv}{dt} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (1.23)$$

Uvažujeme harmonické kmitanie, ktorého okamžitá výchylka je

$$y(t) = y_0 \sin \omega t, \quad (1.24)$$

kde y_0 je amplitúda výchylky kmitania.

Deriváciou bude

$$v(t) = \omega y_0 \cos \omega t,$$

$$a(t) = -\omega^2 y_0 \sin \omega t = -\omega^2 y.$$

Veličiny mechanického kmitania sa často vyjadrujú v logaritmickej miere so zreteľom na určitú referenčnú hodnotu sledovanej veličiny.

Hladina zrýchlenia kmitania:

$$L_a = 10 \log \frac{a^2}{a_0^2}, \quad [\text{dB}] \quad (1.25)$$

kde $a_0 = 10^{-6} \text{ m.s}^{-2}$ je vzťažná hodnota.

Hladina rýchlosti kmitania:

$$L_v = 10 \log \frac{v^2}{v_0^2}, \quad [\text{dB}] \quad (1.26)$$

kde $v_0 = 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ je vzťažná hodnota.

V technickej praxi sa zvyčajne veličiny uvádzajú v absolútnych hodnotách, iba pri spektrálnej analýze sa vyjadrujú zložky v hladinách. Pri hodnotení škodlivého vplyvu mechanického kmitania na človeka sa používa zväčša vyjadrenie v hladinách zrýchlenia [3].

1.3.3 Charakteristiky kmitania pre sústavu s jedným stupňom voľnosti

Dôležitou charakteristikou voľného kmitania je vlastná kruhová (uhlová) frekvencia

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1.27)$$

kde m je hmotnosť kmitajúceho telesa,

k je tuhosť pružného člena sústavy.

Sústava má toľko vlastných kruhových frekvencií, koľko má stupňov voľnosti. Rast hmotnosti spôsobuje zníženie ω_0 a naopak rast tuhosti znamená jej zvýšenie. Vynútené kmitanie je spôsobené premenlivosťou budiacej sily. Sledovať parametre kmitavých procesov umožňuje teória lineárneho kmitania [6], založená na analýze jednoduchého harmonického procesu. Tento proces pre sústavu s jedným stupňom voľnosti môže byť opísaný jednou skalárnou funkciou $y(t)$ v závislosti od času t odpovedajúcou zmene fyzikálnej veličiny. Ak je premennou výchylka (dráha), potom prvá derivácia a druhá derivácia je rýchlosť a zrýchlenie charakterizujúce zmenu napr. zmenu harmonického pohybu opísaného rovnicou

$$y(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1.28)$$

kde $y(t)$ je okamžitá výchylka,
 A je amplitúda,
 ω je okamžitá alebo uhlová frekvencia,
 $\omega t + \varphi_0$ je okamžitá fáza,
 φ_0 je začiatočná fáza.

Uhlová frekvencia ω závisí od periódy pohybu

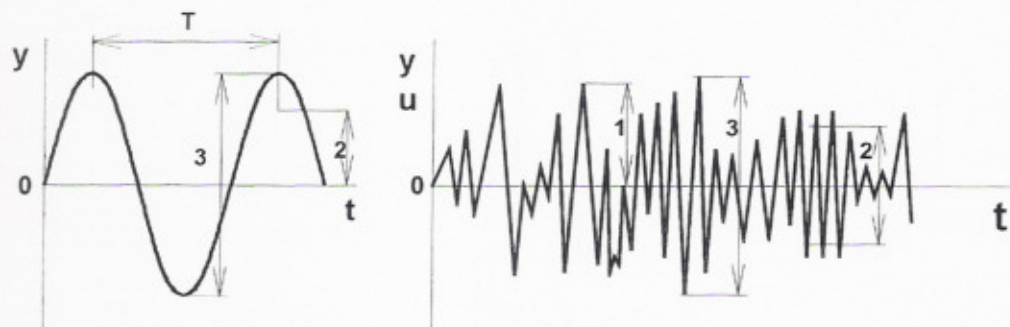
$$\omega = \frac{2\pi}{f} = \frac{2\pi}{T}, \quad (1.29)$$

kde $T = \frac{2\pi}{\omega}$ je perióda pohybu,

$f = \frac{1}{T}$ je frekvencia pohybu v Hz [s^{-1}].

V meracej technike sa perióda kmitania meria priamo v sekundách a frekvencia v Hz; 1Hz je rovný jednému kmitu za sekundu.

Grafické znázornenie harmonického a náhodného kmitania je na obr. 1.



Obr.1 Grafické znázornenie harmonického a náhodného kmitania.

(T - perióda kmitania, 1 - efektívna hodnota, 2 - stredná hodnota,
3 - maximálny rozkmit, y - amplitúda, t - čas)

Ako už bolo povedané, najdôležitejšími charakteristikami harmonického pohybu sú rýchlosť a zrýchlenie

$$v = \frac{dy(t)}{dt} = A\omega \cos \omega t = A\omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (1.30)$$

$$a = \frac{d^2y(t)}{dt^2} = -A\omega^2 \sin \omega t = A\omega^2 \sin(\omega t + \pi). \quad (1.31)$$

Ako vyplýva zo vzťahov (1.29 -1.31) forma a perióda kmitania nezávisia od toho či sledujeme $y(t)$, rýchlosť $v(t)$ alebo zrýchlenie $a(t)$. Treba mať na zreteli fázové posunutia medzi spomínanými veličinami, t.j. rýchlosť predbieha výchylku o $\frac{\pi}{2}$ a zrýchlenie o π . Vzťahy (1.29) a (1.30) možno vyjadriť v amplitúdovom tvare harmonického pohybu

$$A_u = A; \quad A_v = \omega A; \quad A_a = \omega^2 A. \quad (1.32)$$

Pri opise neharmonického pohybu amplitúdová forma nie je efektívna, pretože nedáva predstavu o charakteristikách kmitavého procesu do začiatku jeho registrácie, tzv. predhistórie procesu.

1.3.4 Charakteristiky vynúteného kmitavého pohybu

Ak uvažujeme sústavu s jedným stupňom voľnosti s tlmením pri harmonicky sa meniacej budiacej sile

$$F(t) = F_0 \sin \omega t,$$

kde F_0 je amplitúda budiacej sily,

ω je kruhová frekvencia budiacej sily.

Veľkosť amplitúdy s_0 ustáleného vynúteného kmitania určíme nasledovne [7]

$$s_0 = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\delta\omega)^2}}. \quad (1.33)$$

Zavedením bezrozmerných veličín $\delta = \frac{b}{2m}$; $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$; $b_p = \frac{\delta}{\omega_0}$; $\eta = \frac{\omega}{\omega_0}$

a úprave dostaneme pre amplitúdu ustáleného vynúteného kmitania

$$s_0 = \frac{F_0}{k \sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2b_p \eta)^2}}. \quad (1.34)$$

Ak teraz zavedieme pomerom $F_0/k = y_{st}$ statickú výchylku, môžeme výchylku ustáleného vynúteného kmitania zapísať v tvare

$$y(t) = y_{st} \sqrt{\frac{1}{(1 - \eta^2)^2 + (2b_p \eta)^2}} \sin(\omega t + \varphi). \quad (1.35)$$

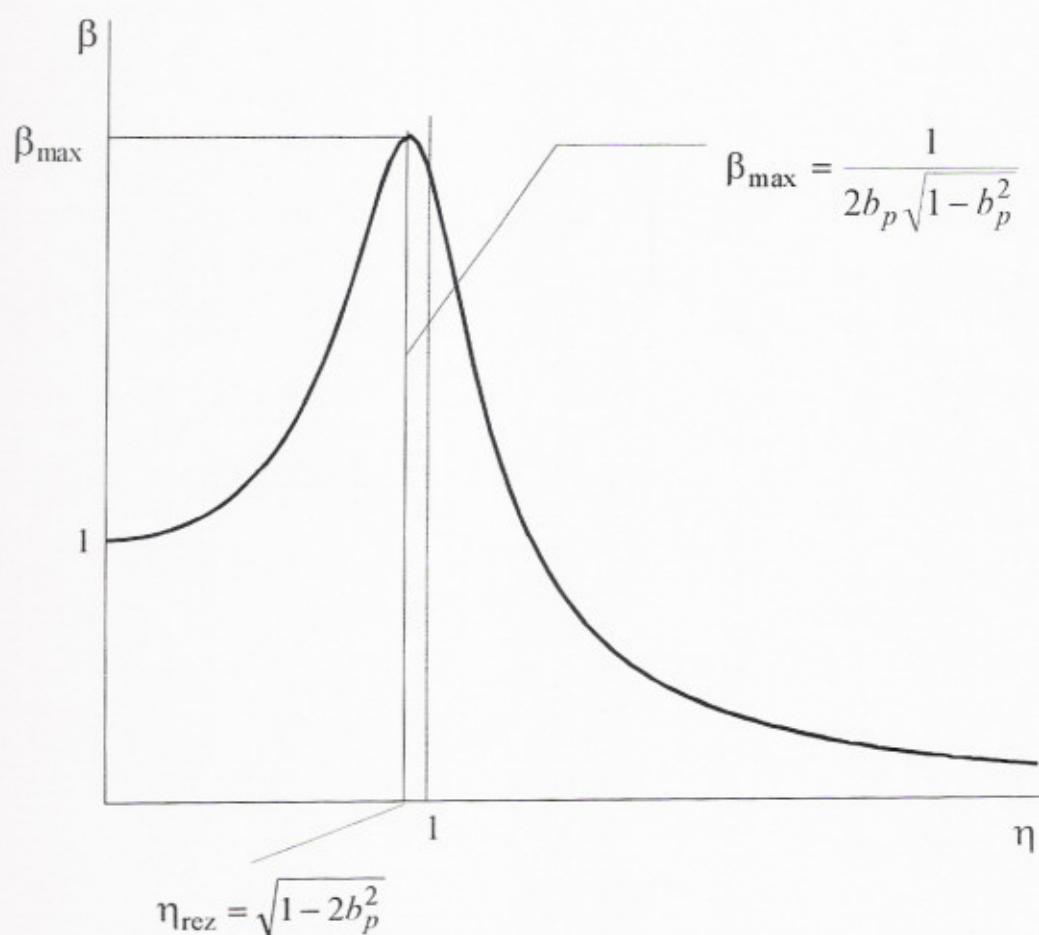
Ďalšie charakteristiky vynúteného kmitavého pohybu, ktoré môžeme odvodiť z (1.34) sú:

a) *Amplitúdová charakteristika*

Pomer absolútnej hodnoty ustáleného vynúteného kmitania a statickej výchylky y_{st} tzv. pomerná výchylka v závislosti na naladení, definuje tzv. amplitúdovú charakteristiku alebo tiež dynamický súčiniteľ β

$$\beta = \frac{|y(t)|}{y_{st}} = \sqrt{\frac{1}{(1-\eta^2)^2 + (2b_p \eta)^2}} \quad (1.36)$$

a možno ju znázorniť na obrázku 2.



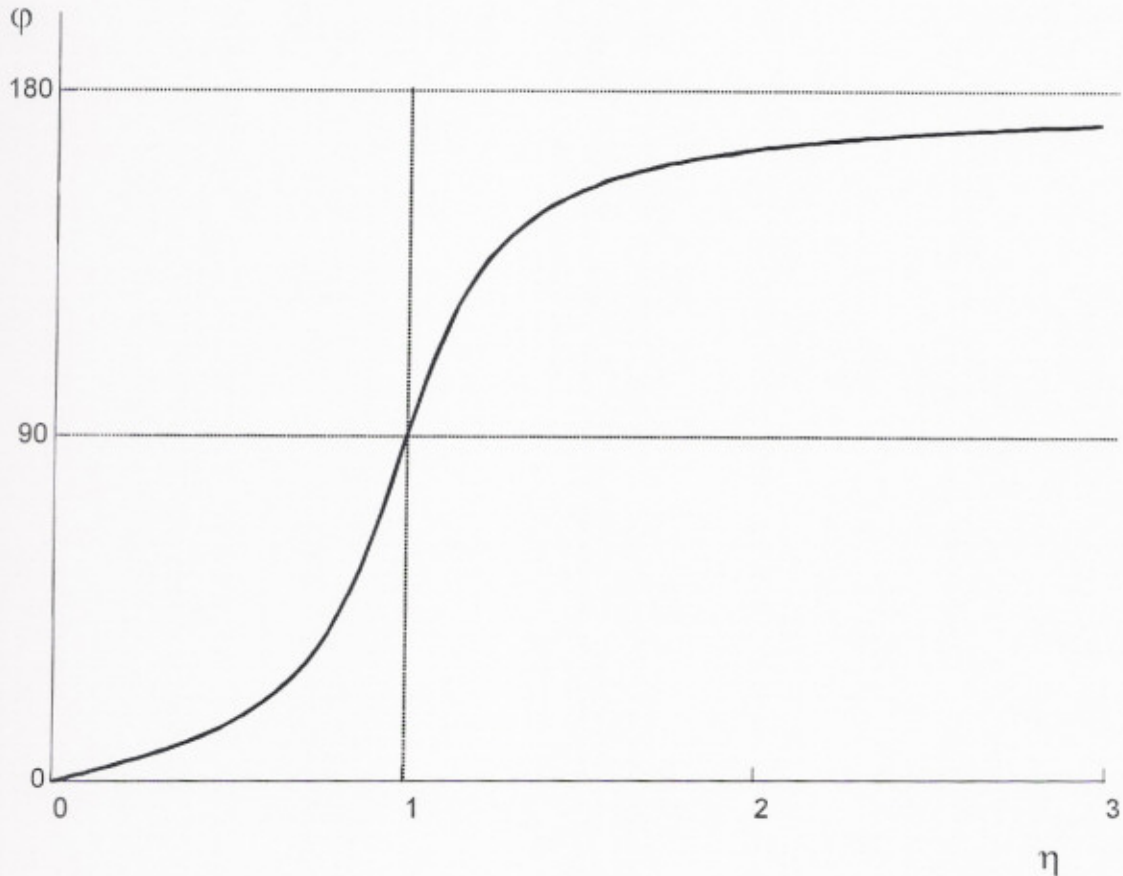
Obr. 2

b) Fázová charakteristika

Fázový uhol medzi výchylkou a budiacou silou v závislosti na naladení - fázová charakteristika sa určí zo vzťahu

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{2b_p \eta}{1 - \eta^2}, \quad \varphi \in \langle 0, \pi \rangle. \quad (1.37)$$

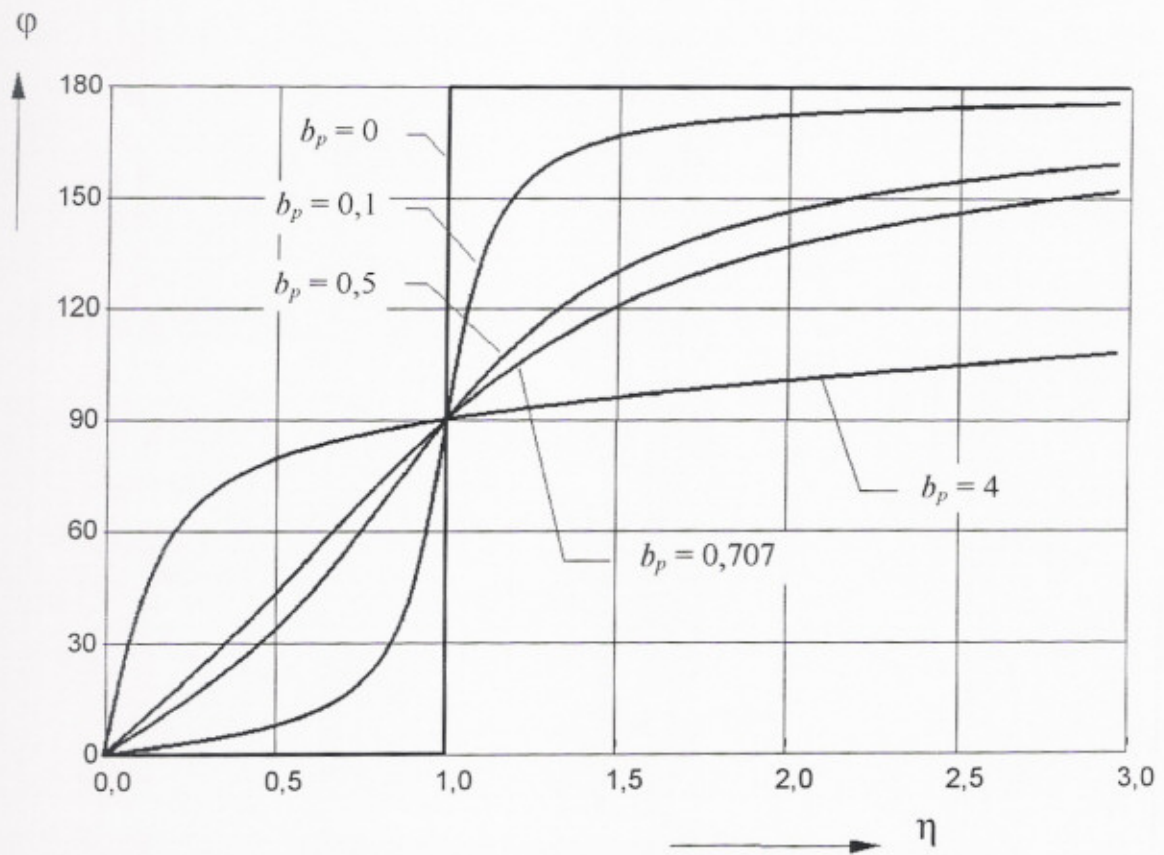
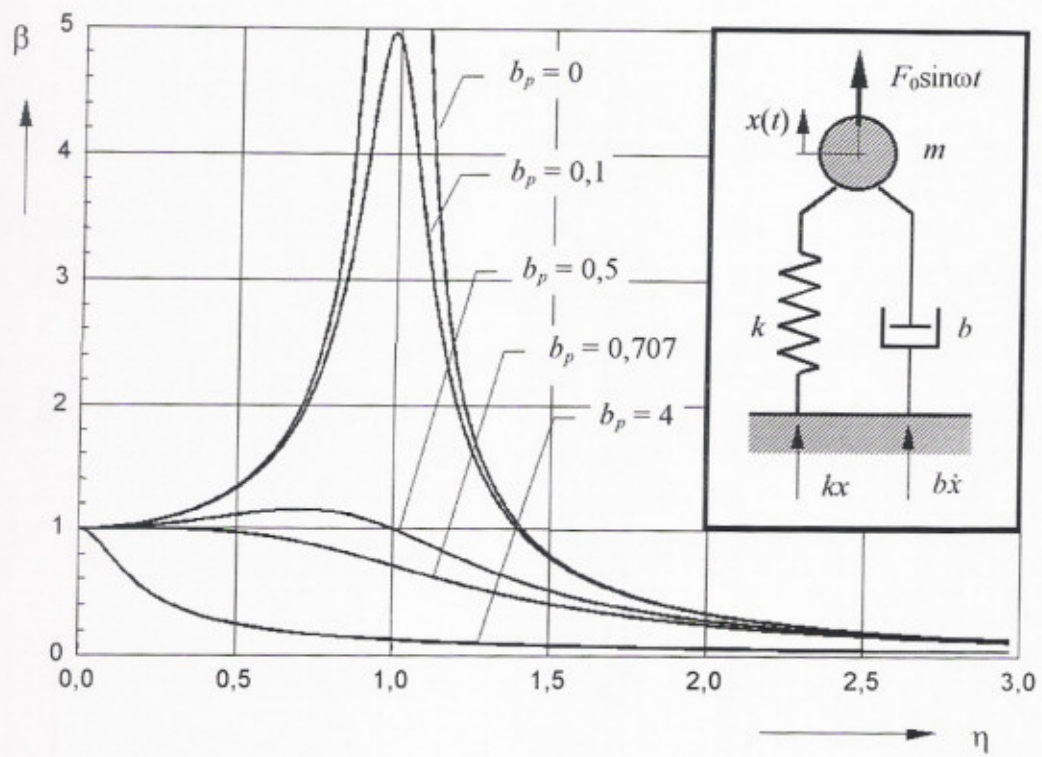
Jej grafické znázornenie je na obr.3.



Obr.3

Amplitúdové a fázové charakteristiky pre niektoré hodnoty pomerného útlmu b_p sú na obr.4.

Na obr.4 vidieť fázový posuv odozvy (výchylky) v závislosti od súčiniteľa naladenia η . Pre všetky hodnoty pomerného útlmu ($b_p < 1$) aj pre prípad netlmeného pohybu ($b_p = 0$) je pri rezonancii hodnota fázového uhla $\varphi = \frac{\pi}{2}$.



Obr. 4

c) Rezonancia

V prípade vynúteného kmitavého pohybu s tlmením nás zaujíma maximálna hodnota amplitúdy kmitavého pohybu alebo dynamického súčiniteľa. Určíme ich z podmienky extrému funkcie definovanej vzťahom (1.36), t.j. z podmienky

$$\frac{d}{d\eta} \left[(1 - \eta^2)^2 + (2b_p \eta^2)^{-\frac{1}{2}} \right] = 0.$$

Tá je splnená pre hodnotu súčiniteľa naladenia

$$\eta_{\text{rez}} = \sqrt{1 - 2b_p^2} \quad (1.38)$$

Potom maximálna hodnota dynamického súčiniteľa (obr. č.2.)

$$\beta_{\text{max}} = \frac{1}{2b_p \sqrt{1 - b_p^2}} \quad (1.39)$$

Súradnice maxima amplitúdovej charakteristiky η_{rez} , β_{max} sú súradnice javu, ktorý nazývame rezonancia, (obr. 2).

Vynútené kmitanie, pri ktorom malé zväčšenie alebo zmenšenie frekvencie budiacej sily (resp. súčiniteľa naladenia) má za následok zmenšenie alebo zväčšenie amplitúdy ustáleného vynúteného kmitania, sa nazýva rezonančné kmitanie.

Pre $0 < b_p < 0,5$ má amplitúdová charakteristika výrazný vrchol s rezonančnou hodnotou danou výrazmi (1.38) a (1.39), obr.3.

Fáza prebieha od 0 do $\frac{\pi}{2}$ s konštantnou rezonančnou hodnotou $\frac{\pi}{2}$ nezávislou od b_p .

Pre veľmi slabé tlmenie $b_p \ll 1$, $\eta_{\text{rez}} = 1 - b_p^2$ sa uvádza praktická rezonancia pre

$$\eta_{\text{rez}} \rightarrow 1, \text{ kedy } \beta_{\text{max}} = \frac{1}{2b_p} \text{ a } \varphi_{\text{rez}} = \frac{\pi}{2}.$$

Z praktického hľadiska má význam nadrezonančné vynútené ustálené kmitanie pre $\eta \gg 1$, resp. $\omega \gg \omega_0$, kedy $\eta \rightarrow 0$ a $\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}$ a sú nezávislé na veľkosti b_p . Vtedy sa sústava samočinne ustáli na relatívne malých amplitúdach kmitania a v protifáze s budiacou silou.

Pre malé b_p súradnica $\eta = \sqrt{2}(1 - b_p^2)$ oddeľuje časť amplitúdovej charakteristiky, kde $\frac{y(t)}{y_{st}} > 1$ od časti, kde $\frac{y(t)}{y_{st}} < 1$.

1.3.5 Charakteristiky periodických veličín

Najčastejšie používanou charakteristikou vibrácií klasifikujúcou nebezpečnosť a škodlivosť vibrácií pre človeka, stroje a pracovné prostredie je stredná kvadratická (efektívna) hodnota:

$$u_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (1.33)$$

Stredná kvadratická hodnota vibračného procesu dáva predstavu o jeho energii.

Intenzita vibrácií sa najčastejšie vyjadruje logaritmickými úrovňami veličín charakterizujúcich kmitavý pohyb v tvare

$$L = 20 \log \frac{u_{ef}}{u_0}, \quad (1.34)$$

kde u_0 je prahová hodnota sledovanej veličiny odpovedajúca nulovej úrovni;

pre rýchlosť vibrácií $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

pre zrýchlenie vibrácií $a_0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,

a udáva sa v dB, pričom rast úrovne o 10 dB znamená zväčšenie príslušného parametra $\sqrt{10} = 3,15$ - krát a rast o 1 dB zväčšenie $10^{0,05} = 1,12$ krát.

Intenzita vibračných procesov a ich pôsobenie na človeka, prístroje a iné objekty závisí od ich frekvencie. Preto celú škálu frekvencií rozdeľujeme na frekvenčné pásma. Pre tvorbu hygienických noriem, a ich hodnotení účinku vibrácií na človeka a jeho pracovného prostredia sa používajú oktávové pásma, pri ktorých pomer horných hraničných frekvencií k dolným je rovný dvom. Každé oktávové pásmo je označované strednou geometrickou hodnotou f_s jeho hraničných frekvencií vypočítaných podľa vzťahu

$$f_s = \sqrt{f_h f_d} = \sqrt{2} f_d = 1,41 f_d \quad (1.35)$$

kde f_d je dolná frekvencia pásma v Hz,

f_h je horná frekvencia pásma v Hz.

Napr. prvé oktávové pásmo má hraničné frekvencie 0,7 a 1,4 Hz potom stredná hodnota je 1Hz; nasledujúce pásmo 1,4 až 2,8 Hz a $f_s = 2$ Hz atď. Oktávové pásma sa môžu ešte deliť na tretinooktávové, pre ktoré $f_h = 1,26 f_d$.

Tu predložené charakteristiky kmitania sústav s jedným stupňom voľnosti platia aj pre každý periodický proces odpovedajúci priemyselným vibráciám, pretože každý periodický proces môžeme rozložiť na konečný počet "čistých" sinusoidálnych procesov a ďalej spracovať Fourierovou metódou.

1.3.6 Zdroje kmitania

Kmitanie v strojových zariadeniach a konštrukciách je spôsobené rušivými dynamickými silami.

Hlavný podiel na hladinu intenzity kmitania, a teda aj hluk, má presnosť a kvalita výroby strojových zariadení, ich údržba a oprava, voľba technologického postupu a návrh konštrukčných prvkov mechanickej sústavy.

Nízkofrekvenčné zdroje vyvolané vratnými hmotami, nevyváženosťou, pôsobením dopravných prostriedkov na komunikácie, sa vyznačujú veľkou amplitúdou kmitania a veľkou energetickou mohutnosťou, pričom ich vlnenie sa šíri do veľkých vzdialeností [4].

Vysokofrekvenčné kmitanie mechanickej sústavy je predovšetkým vyvolané aerodynamickým a hydrodynamickým prúdením média, trením, rázovými silami ale aj technologickým procesom [4].

Je dôležité, aby dizajnéri, konštruktéri, technológovia, manažéri venovali otázkam návrhu, konštrukcii, presnosti, kvalite, údržbe a oprave patričnú pozornosť, ktorá zabezpečí prípustnú a bezpečnú hranicu hladín kmitania.