

UDK 534.647:534.1

Ocena jakosti mehanskih nihanj

ANTON KUHELJ (ml.)

V obravnavi so merila za učinek mehanskih nihanj na človeka, stroje in zgradbe. Glede na doslej znana dejstva so številčno v obliki enačb in grafično v obliki diagramov podana za primere, ki so v praksi najpogostnejši — kriteriji za cenitev, ali so nihanja majhna ali velika ozir. dopustna ali nedopustna.

1. UVOD

Sodobni stroji in naprave povzročajo pogostoma mehanska nihanja in tresljaje. Le-ta marsikdaj spremljajo še drugi učinki, predvsem zvočni, vendar se menimo v naslednjem omejiti le na mehanska nihanja strojev in zgradb ter na njihov učinek na človeka. Po doslej znanih preiskavah in predpisih bomo skušali ugotoviti merila za oceno, ali so mehanska nihanja majhna ali velika oziroma dopustna ali nedopustna.

2. UČINEK NA ČLOVEKA

Človeku povzročajo mehanska nihanja raznovrstne občutke in težave. Ker smo v zadnjem času čedalje bolj izpostavljeni nihanjem in tresljajem — naj omenimo za primer le vožnjo s sodobnimi prevoznimi sredstvi — je treba poznati vpliv mehanskih nihanj na človeka in določiti merila za oceno njihovega učinka.

Razlikovati je treba med izmerljivimi veličinami, npr. nihalnimi pomikom, hitrostjo, pospeškom, frekvenco in podobnim ter subjektivno zaznavo človeka. Izkazalo se je, da velikosti človekove zaznave nihanj ni mogoče spraviti v enostavno zvezo z nobeno izmerljivo veličino. Na obremenitev človeka, ki izvira iz velikosti zaznave nihanj, vpliva površ velikosti zaznave še čas delovanja. Za človekovo počutje pa so razen obremenitve pomembne še druge okoliščine, tako na primer, s katerim telesnim delom zaznavamo nihanja, dalje ali so nihanja harmonična ali ne, pomembni so tudi lega telesa in smer delovanja nihanja ter naposled tudi čisto subjektivni dejavniki. Ne samo, da sta občutljivost in zdržljivost ljudi različni, izkazalo se je na primer tudi, da človek lažje prenaša tresenje, če meni, da se mu po želji lahko izogne ali pa je prepričan, da ne bo dolgo trajalo.

O človeških poškodbah zaradi nihanj je še malo znanega. Pri preučevanju reakcije telesa je treba upoštevati tudi lastne frekvence celotnega telesa in posameznih organov. Znano je na primer, da prihaja pri frekvenci nekako 5 Hz do resonančnega odziva stoječega človeka na vertikalna nihanja, kar povečuje zaznavo v tem frekvenčnem območju. Resonančni pojav pri posameznem človeškem organu pa lahko povzroča tudi lokalne premike organov med seboj, kar zelo povečuje učinek nihanj.

Kot merilo za jakost nihanj so razen nihalnega pospeška in hitrosti v rabi še druge veličine. Tako izračunavamo jakost nihanj v *vibracijah* iz enačbe

$$V = 10 \lg \frac{j}{j_0} \text{ [vibrar]} \quad (1)$$

jakost nihanja j v m^2/s^4 pa iz enačbe

$$j = \frac{a_{\text{max}}^2}{f} \text{ [m}^2/\text{s}^4] \quad (2)$$

pri čemer so:

j_0 — primerjalna jakost nihanja ($j_0 = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^4$),
 a_{max} — nihalni pospešek [m/s^2],
 f — nihalna frekvenca [Hz].

Podobno merilo za velikost učinka nihanj na človeka je jakost nihanj izražena v *palih*, ki jo izračunamo iz enačbe

$$P = 10 \lg \left(\frac{v_{\text{ef}}}{v_0} \right)^2 \text{ [pal]} \quad (3)$$

kjer sta:

v_{ef} — efektivna hitrost nihanja [cm/s],
 v_0 — primerjalna hitrost ($v_0 = 3,16 \cdot 10^{-2} \text{ cm}/\text{s}$).

Efektivno hitrost nihanja izračunamo:

za harmonična nihanja iz enačbe

$$v_{\text{ef}} = 0,707 \cdot v_{\text{max}} \quad (4)$$

kjer je v_{max} — največja nihalna hitrost, za neharmonična nihanja pa iz enačbe

$$v_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt} \quad (5)$$

v kateri označujejo:

T — nihajno dobo [s],

v — hitrost [cm/s],

t — čas [s].

Človek zaznava mehanska nihanja, če imajo vsaj približno jakost 10 palov, nihanja jakosti več kakor 40 palov pa so za človeka trajno že nevzdržna, medtem ko prenašamo za nekaj časa — na primer med vožnjo z vozili — 50 do 60 palov še brez posledic.

Društvo nemških inženirjev je izdalo smernice (VDI-Richtlinien 2057), v katerih je uvedlo kot merilo jakosti zaznave nihanja tako imenovane vrednosti K (brezdimenzijsko število), ki jih izračunavamo iz naslednjih enačb:

— če poznamo efektivno vrednost nihalnega pospeška a_{ef} [m/s^2]:

$$K = a_{\text{ef}} \frac{\alpha}{\sqrt{1 + (f/f_0)^2}} \quad (6)$$

— če poznamo efektivno vrednost nihalne hitrosti v_{ef} [mm/s]:

$$K = v_{\text{ef}} \frac{\beta \cdot f}{\sqrt{1 + (f/f_0)^2}} \quad (7)$$

— če je znana efektivna vrednost nihalnega pomika s_{ef} [mm]:

$$K = s_{\text{ef}} \frac{\gamma \cdot f^2}{\sqrt{1 + (f/f_0)^2}} \quad (8)$$

V teh enačbah pomenijo:

f — nihalno frekvenco [Hz],
 f_0 — primerjalno frekvenco ($f_0 = 10 \text{ Hz}$),
 α, β in γ — konstante z vrednostmi:

$$\alpha = 18,0 \frac{1}{\text{m}/\text{s}^2}, \quad \beta = 0,112 \frac{1}{\text{mm}/\text{s}}, \quad \gamma = 0,71 \frac{1}{\text{mm}/\text{s}^2} \quad (9)$$

Ce poznamo največjo vrednost (amplitudo) pomika, hitrosti ali pospeška, določamo efektivno vrednost analogno enačbi (4) ali pa vstavljamo v enačbe (6), (7) in (8) ustrezno zmanjšane vrednosti za konstante α, β in γ , tj. vrednosti iz enačb (9) množimo z 0,707. Vrednosti K , ki povezujejo izmerljive veličine — pomik, hitrost, pospešek in frekvenco — z jakostjo, s kakršno nihanje zaznava človek, so se dobro obnesle v praksi. Veljajo pa le za vsaj pretežno enakomerna harmonična vertikalna nihanja, ki jih stojč ali sedeč človek zaznava po nogah ali sedalu.

Po priporočilih v dodatku k citiranim smernicam in meritvah ter raziskavah drugih avtorjev je bil izdelan diagram na sliki 1. Na abscisi je v logaritmičnem merilu vrisana nihalna frekvenca [Hz], na ordinati pa prav tako v logaritmičnem merilu amplituda pomika [mm]. Spodnja krivulja a kaže mejo nihanj, kakršna že zaznavamo, zgornje vrisano območje krivulj b in c pa približno mejo nihanj, kakršna prenaša človek pri fizičnem delu še brez škode tudi pri daljšem trajanju brez prenehanja. V območju obeh krivulj b in c so meje še dopustnih nihanj za človeka po raznih predpisih in navodilih. Praviloma pa so te meje veljavne samo za vertikalna, vsaj pretežno harmonična nihanja, kakršna stojč ali sedeč človek sprejema po nogah ali sedalu.

Za stanovanja je dopustna jakost seveda nižja in dejansko precej blizu meji zaznave. Vrednost K za trajna nihanja v stanovanjih naj ne presega 0,60. V vozilih, kjer smemo računati z večjimi prekinitvami, pa so dopustne precej večje jakosti; kratkotrajno sme vrednost K dosegati celo 60. Tudi pri fizičnem delu lahko dosegamo vrednosti K do 25, če so vmes daljše ustavitve nihanja. Kot daljšo označujemo tisto prekinitve, ki traja vsaj eno uro, pri tem pa je razmerje časa odmora nasproti celotnemu času večje od 0,1. Pri neenakomernih nihanjih — stresljajih — lahko za ne prevelike spremembe amplitude pomika upoštevamo kar geometrično srednjo vrednost.

Kadarkoli sprejemamo nihanja po drugih telesnih delih, naš diagram na sliki 1 ni uporaben. Take primere je treba posebej preučevati, saj prihajajo tod v poštev razni dejavniki, tako na primer krajevni resonančni pojavi in drugo. Pogosten primer, ko je tresenju izpostavljena roka, je v literaturi deloma že obdelan.

Za nihanja, ki se pojavljajo prečno k telesni osi, dopuščajo prej omenjene smernice enake jakosti kakor

za vertikalna nihanja vzdolž hrbtenice. Novejše raziskave kažejo temu nasproti, da to ni pravilno. Čeprav še ni dokončnih ugotovitev, se zdi primerno, da bi zmanjšali izmerjeno vrednost nihalnega pospeška za nihanja prečno k hrbtenici pri nizkih frekvencah do 30 Hz za približno 30 %, pri višjih frekvencah pa celo za 50 %, če jakost zaznave računamo po enačbi (6).

V zadnjem času narejene raziskave so pokazale, da posebno pri nizkih frekvencah pod 6 Hz človek močnejše zaznava nihanja, kakor kažejo vrednosti K. Razloge smo delno omenili že prej, vendar za sedaj ni bil izdelan še noben zadovoljiv popravek.

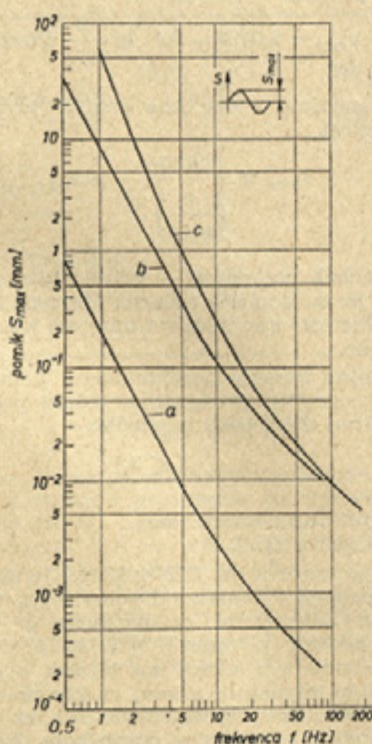
3. STROJNA NIHANJA

Za oceno, kako močna nihanja nekega stroja so še dopustna, so pomembne tri stvari: napetost v materialu, nemoteno delovanje stroja in motnje okolice. Vsi tri kontrole pa je zelo težavno izvajati kvantitativno. Pri izračunu dodatnih dinamičnih obremenitev strojnih delov zadevamo na težave, ker bi morali upoštevati razne krajevne resonance in druge vplive. Tudi račun, ki bi pokazal, pri kako močnem nihanju zahteva po predpisani natančnosti delovanja stroja ni več izpolnjena, bi bil dolgotrajen in nezanesljiv. Računska določitev tiste jakosti nihanj, ki zaradi prevelikih pomikov onemogoča delovanje stroja, je prav tako le redko izvedljiva uspešno. Izkušnje so pokazale, da smemo v večini primerov privzemati kot merilo kar jakost nihanja na nekaterih značilnih mestih stroja.

Vseprisod pa seveda ta enostavni način ne zadoštuje. Za strojne dele, ki se gibljejo (rotorji ipd.), je potreben natančnejši izračun — ali še bolje — posebna meritev deformacij in napetosti. Tudi pri strojih, ki so zahtevni glede natančnosti, tako na primer pri mnogih obdelovalnih strojih, je potrebna meritev deformacij posameznih strojnih delov. Meritev vibracij na značilnih mestih, na katerih prehaja nihalna energija z enega strojnega dela na drugega (ležaji in pritrđišča strojev), tudi ne pove nič ali le malo o torzijskih nihanjih.

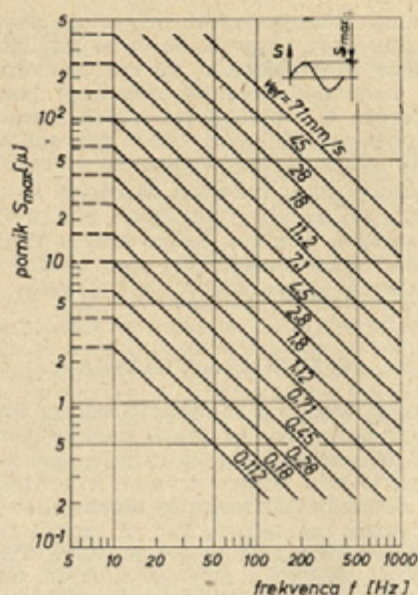
V literaturi je mogoče zaslediti številne izkustvene enačbe in diagrame ali tabele za dopustno jakost nihanj. Njihova uporabnost pa je večinoma omejena na določen tip stroja in njegovega temeljenja, tako da se med seboj precej razlikujejo. Zelo sistematično pa obravnavajo ta vprašanja smernice društva nemških inženirjev (VDI-Richtlinien 2056), v katerih je privzeta kot najprimernejša veličina za merilo jakosti strojnih nihanj pri frekvencah nad 10 Hz efektivna nihalna hitrost v_{eff} [mm/s], kakor je podobno pri človekovi zaznavi nihanj. Pri nizkih frekvencah pod 10 Hz je za človekovo zaznavo predvsem odločilen pospešek, pri strojih pa se izkaže, da je najprimernejše, če ostane pri nižjih frekvencah pomik nespremenjen (glej diagram na sliki 2). Efektivno vrednost nihalne hitrosti izračunavamo za harmonična nihanja spet po enačbi (4), za neharmonična pa po enačbi (5).

Z upoštevanjem poprečne meje, pri kateri človek nihanje zaznava, ki je pri $v_{eff} = 0,11$ mm/s, in ob domnevi, da je napaka pri meritvi manjša od 10 %, so v omenjenih nemških smernicah določene stopnje glede na velikost efektivne nihalne hitrosti. Te stopnje omogočajo naslednjo približno oceno: če je efektivna nihalna hitrost manjša od kritične meje za določen tip stroja za manj kakor dve stopnji, je nihanje »še dopustno«; če je manjša od kritične za dve do štiri stopnje, je treba stroj označiti kot »uporaben«, če pa je manjša za več kakor štiri stopnje, je stanje že »dobro«. V diagramu na sliki 2 so podane meje stopenj v odvisnosti amplitude poti s_{diaz} [mm] od frekvence f [Hz], in sicer sta naneseni obe veličini v logaritmičnem merilu.



Sl. 1. Dopustna vertikalna nihanja za stoječega človeka

- a — meja zaznave (K 0,1 po VDI 2057)
- b — meja zelo močno zaznavnih nihanj (K4 po VDI 2057)
- c — meja neprijetnih (po Meistru) ozir. škodljivih (po Solimanu) nihanj



Sl. 2. Jakostne stopnje po VDI 2056

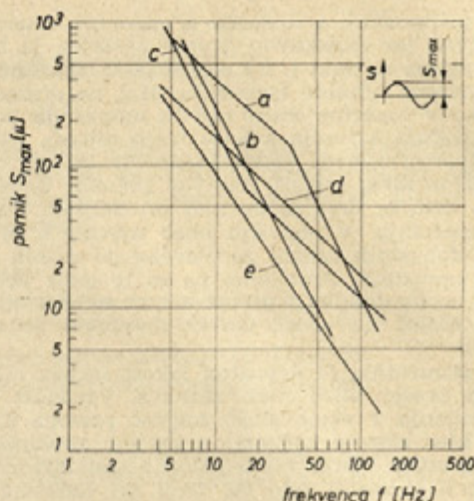
Pri ocenjevanju o dopustnosti nihanj je treba razlikovati med posameznimi vrstami strojev glede na način delovanja in velikost stroja ter njegov tip temeljenja. Po nemških smernicah so najpogostnejši tipi strojev razdeljeni na šest skupin, ki so označene s črkami K, M, G, T, D in S. V skupino K spadajo predvsem mali elektromotorji do moči 15 kW, ki so trdno povezani s podlago. V drugi skupini M so srednje veliki elektromotorji z močjo od 15 do 75 kW brez kakega posebnega podstavka, pa tudi drugi rotacijski stroji z močjo do 300 kW. V skupini G so večji rotacijski stroji s togim ali težkim temeljem, ki je visoko ugašen (visoko ugašen temelj ima tako visoke lastne frekvence, da dela stroj v podresonančnem območju temelja). V skupino T pa so uvrščeni večji rotacijski stroji, ki imajo nizko ugašen temelj, tako na primer večina turbin (nizko ugašen temelj ima vse lastne frekvence nižje od motilnih frekvenc stroja). Za te štiri skupine je na izbiri dovolj izkušenj pri določitvi meje še dopustnih nihanj, tako da so vrednosti, ki so zbrane v tabeli 1, predvsem po meritvah Rathbonea, v praksi že toliko preskušene, da so zanesljive.

Tabela 1

Skupina	K	M	G	T
največja, še dopustna efektivna hitrost v_{ef} [mm/s]	4,5	7,1	11,2	18

Nihanja z efektivnimi hitrostmi, ki so večje od vrednosti, navedenih v tabeli 1, so nedopustna. Tek stroja ocenjujemo kot dober, kakor smo omenili že poprej, če je nihalna hitrost v_{ef} vsaj za štiri stopnje po diagramu na sliki 2 manjša od kritične. Tako je na primer delovanje strojev skupine G, kar zadeva nihanja, dobro, če je efektivna hitrost manjša od 1,8 mm/s.

V skupino D prištevamo vse stroje z neizravnanimi masami, katerih temelji so visoko ugašeni. Poglavitni zastopniki te skupine so togo temeljeni batni stroji. V skupino S pa sodijo stroji z neizravnanimi masami, katerih temelji so nizko ugašeni. Za ti dve skupini pa je težko podajati neko mejo dopustnih nihanj. Pri strojih skupine D so nihanja z efektivno hitrostjo do



Sl. 3. Meje dopustnih nihanj pri stavbah

a — po DIN 4150 za temelje, b — priporočilo v ZDA (0,1 g), c — predlog po Sollmanu, d — predlog VDI ($v_{max} = 10$ mm/s), e — 30 vibrarov

30 mm/s večidel še dopustna, pri strojih skupine S pa lahko prihaja celo do efektivnih hitrosti 500 mm/s pri prehodu čez resonančno območje, ne da bi se stroj pokvaril, če to upoštevamo pri konstrukciji stroja (elastični priključki ipd.).

Kot primer, koliko se razlikujejo razne eksperimentalne enačbe, si pogledjmo obrazec, po katerem računajo v težki industriji Sovjetske zveze dopustne amplitude pomika

$$s_{max} = 0,0785 - 0,1 \cdot \lg \frac{n}{1000} \text{ [mm]} \quad (10)$$

in ga primerjajmo z ustrezno enačbo tovarne Metropolitan Vickers

$$s_{max} = \frac{0,185}{\left(\frac{n}{1000}\right)^{1,75}} \text{ [mm]} \quad (11)$$

V obeh enačbah pomeni n — vrtilno hitrost [vrt/min].

Vidno je, da dopušča tovarna Metropolitan Vickers pri vrtilni hitrosti npr. 1000 vrt/min več kakor za 100 % večje pomike.

Za strojne temelje izračunavamo dopustno jakost nihanja po nemških predpisih o zaščiti pred streslaji v gradbeništvu (DIN 4150) iz enačbe

$$s_{max} \cdot f \leq 0,4 \quad (12)$$

v kateri sta:

s_{max} — amplituda pomika [cm],

f — frekvenca [Hz].

Dodatna zahteva po DIN 4150 pa je, da mora biti amplituda pospeška manjša od polovičnega zemeljskega pospeška g . Zato velja za harmonična nihanja do $f = 31$ Hz omejitev po enačbi (12), ki je enakovredna zahtevi, da sme biti efektivna hitrost $v_{ef} \leq 18$ mm/s, kar kaže mejo dopustnih nihanj za skupino T po nemških smernicah. Pri višjih frekvencah od 31 Hz pa je nihanje temelja omejeno s pospeškom, ki mora biti manjši od 5 m/s^2 . Zato prične pri višjih frekvencah pomik bolj strmo padati z naraščanjem frekvence (glej krivuljo a v diagramu na sliki 3).

Na koncu navedimo še nekaj izkustvenih podatkov za posamezne vrste strojev. Sovjetski predpisi navajajo tele največje dopustne amplitude pomika:

za hidravlične turbogeneratorje (GOST 5616-50):

vrtilna hitrost n [vrt/min]	pomik s_{max} [mm]
60 do 187	0,18
214 do 375	0,12
nad 375	0,10

za parne turbogeneratorje (GOST 5908-51):

vrtilna hitrost n [vrt/min]	pomik s_{max} [mm]
1500	0,06
3000	0,04
5000	0,03

Tabela 2 pa navaja poprečne amplitude pomikov, ki ne motijo obratovanja pri običajnih vrtilnih hitrostih v posameznih industrijskih vejah (po Korčinovskem).

Pri strojnih kladivih je treba paziti predvsem, da na dopustno mero omejujemo motnjo okolice. Pomiki nakovala samega [mm] naj ne bi bili večji od teže padajočega ovna [Mp], pomik temelja pod nakovalom pa ne večji od 1 do 5 mm.

Tabela 2

Dopustne amplitude nihálnih pomikov v nekaterih industrijah

	s_{max} [mm]	srednje vrtilne hitrosti n [vrt/min]
tkalnice	0,3	140
predilnice	0,10 ... 0,12	200 ... 550
stiskalnice za čokolado	0,25	200
stiskalnice za pecivo	0,15	350 ... 450
ventilatorji	0,10	1000
skobeljni stroji	0,35	
stružnice, frezalni in vrtni stroji	0,03	
brusilni stroji	0,03	
stiskalnice za kroglične ležaje	0,09	
prostorji z merilnimi instrumenti	0,005	

4. NIHANJA ZGRADB

Za oceno dopustne jakosti pri nihanjih zgradb in posameznih gradbenih elementov sta odločujoči predvsem dve okoliščini: napetost v materialu in motnja okolice. Upoštevat pa je treba tudi možnost, da se zaradi tresenja lahko pojavijo posedanje temeljev stavbe in s tem velike dodatne napetosti. V naslednjem se bomo omejili predvsem na nihanja stavb, saj so potrebni za druge gradbene objekte na primer za dimnike, stolpe ali mostove posebni izračuni in tudi njim prilagojene meritve.

Čeprav pri posameznih gradbenih elementih, kakor na primer pri stropu, ni težavno po meritvah izračunati dejanske dodatne dinamične napetosti, v praksi tega računa po navadi ne izvajamo. Podobno kakor pri strojih skušamo tudi tukaj kar po skušnjah oceniti, ali je izmerjena jakost nihanj za stavbo še dopustna. Dodatne dinamične napetosti so, kakor kaže izračun, običajno le majhne v primerjavi s statičnimi (približno

3 %); ker pa navadno ne poznamo dejanskih statičnih napetosti v materialu, ne vemo, kolikšne dinamične obremenitve bi material še prenesel. Dejanska napetost v materialu je namreč v veliki meri odvisna tudi od možnega posedanja temelja stavbe in še drugih okoliščin, ki jih je računsko težavno zajeti.

Kot merilo za jakost nihanj v gradbeništvu se je v zadnjem času pokazala kot najprimernejša nihalna hitrost, ki je v precejšnji meri kar sorazmerna s povzročeno dinamično napetostjo. Za natančnejše meritve je treba povrh vertikalnih hkrati meriti še horizontalna nihanja v dveh med seboj pravokotnih smereh. Rezultirajoča hitrost je tedaj

$$v_R = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (13)$$

Po predlogu društva nemških inženirjev naj bi amplituda (ne efektivna vrednost) nihalne hitrosti ne presegala 10 mm/s.

Starejši nemški predpisi DIN 4150 so, kakor je bilo rečeno pri strojnih temeljih, pri nizkih frekvencah do $f = 31$ Hz omejevali hitrost, pri višjih frekvencah pa pospešek (krivulja a v diagramu na sliki 3). Predpisi ZDA omejujejo nihanja stavb enako kakor večinoma vsa nihanja z dopustno vrednostjo nihalnega pospeška (v odstotkih zemeljskega pospeška g). Soliman predlaga za nihanja stavb podobne omejitve, kakršne so uveljavljene za vpliv nihanj na človeka, starejši nemški predlog pa je dopuščal največ 30 vibrarov (po enačbi (1)). Vse našete omejitve so prikazane v diagramu na sliki 3.

Za občasne streslaje (zaradi eksplozij ipd.) je dopustna meja v istem območju. Poškodbe na stavbah je sicer mogoče opaziti večinoma šele, če so amplitude nihalne hitrosti večje od 50 mm/s, vendar so tako močna nihanja tudi občasno dopustna samo za industrijske stavbe iz železobetona. Za zelo stare stavbe, ki so slabo ohranjene, so že amplitude hitrosti nad 2 mm/s prevelike, medtem ko je za navadne stavbe meja nekje pri 10 mm/s. Ta hitrost približno ustreza vrednosti K 4 po nemških smernicah (VDI-2057) in s tem meji še dopustnih nihanj za človeka.

Omeniti velja še, da izbiramo, če merimo nihanja stavb, po možnosti kot merilno mesto zunanji temelj stavb. Nikakor pa ne smemo meriti na delih stavbe, pri katerih je možnost za krajevne resonančne pojave.

LITERATURA

- [1] Baule H.: Sprengerschütterungen. Messung und Beurteilung der Schadenwirkung auf Gebäude, VDI Bericht Nr. 113, 1967.
- [2] Bobbert G.: Schwingungseinwirkung auf den Menschen, VDI Bericht Nr. 113, 1967.
- [3] Buzdugan, G.: La mesure des vibrations mécaniques, Editions Eyrolles, Paris-Editions Meridiane, Bucarest, 1964.
- [4] Dupuis H., Christ W.: Über das Verhalten einiger Körper teile bei Schwingungseinwirkung, VDI Bericht Nr. 113, 1967.
- [5] Gasch R.: Beurteilung der dynamischen Beanspruchung von Bauwerksteilen, VDI Bericht Nr. 113, 1967.
- [6] Harris C. M., Crede C. E.: Shock and Vibration Handbook, 3. del, McGraw-Hill 1961.
- [7] Ker Wilson W.: Vibraciona tehnika, Mašgiz, Moskva 1963.
- [8] Kuhelj A.: Dinamični problemi pri temeljenju strojev, magistrsko delo. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 1968.
- [9] Major A.: Berechnung und Planung von Maschinen- und Turbinenfundamenten, Verlag für Bauwesen, Berlin-Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest, 1961.
- [10] VDI-Richtlinien 2056: Beurteilungsmaßstäbe für mechanische Schwingungen von Maschinen, 1964.
- [11] VDI-Richtlinie 2057: Beurteilung der Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, 1963.

Avtorjev naslov:

mag. dipl. ing. Anton Kuhelj,
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani