

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības fakultāte
Būvkonstrukciju katedra

Līga GAILE, Albīns SKUDRA

**AUGSTCELTŅU SVĀRSTĪBU SLĀPĒTĀJSISTĒMAS
UN TO APRĒĶINA PIEMĒRS**

Rīga 2018

UDK 69.032.2+534.83
Ga 165 a

Gaile L., Skudra A. Augstceltņu
svārstību slāpētājsistēmas un to aprēķina
piemērs.

Rīga: RTU, 2018.- 38 lpp.

Recenzents: RTU BF Būvmehānikas
katedras profesors I.Radiņš

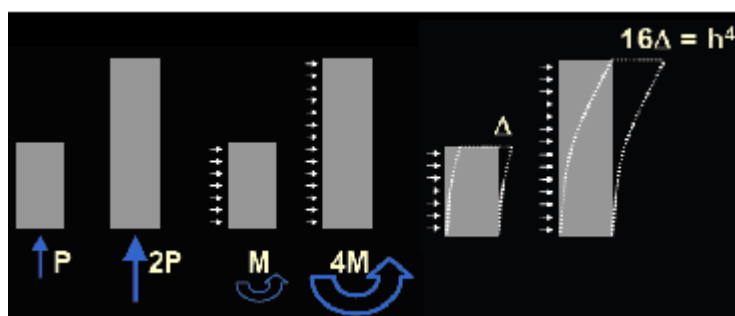
ISBN 978-9934-8151-7-1

SATURS

IEVADS	4
1. SVĀRSTĪBU SLĀPĒTĀJSISTĒMU VEIDI UN TO IEDALĪJUMS	5
1.1 Pasīvās sistēmas.....	6
1.2 Aktīvās sistēmas	8
2. SVĀRSTĪBU PAĀTRINĀJUMU UN HORIZONTĀLO PĀRVIETOJUMU ROBEŽLIELUMI AUGSTCELTNĒM	9
3. NOREGULĒTĀS MASAS SVĀRSTĪBU SLĀPĒTĀJU APRĒĶINS	12
3.1 Ēka ar slāpētspēju un noregulēto masas slāpētāju ar slāpētspēju	12
3.2 Svārsta tipa noregulētais masas slāpētājs	18
4. NOREGULĒTĀS MASAS SVĀRSTĪBU SLĀPĒTĀJA APLĒSES PIEMĒRS 162M AUGSTAI ĒKAI.....	20
5. AUGSTCELTNES VĒJA SLODŽU APRĒĶINA PIEMĒRS.....	24
5.1. Vēja slodžu aprēķins vēja virzienā	24
5.2. Vēja slodžu aprēķins perpendikulāri vēja virzienam.....	33
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	37

IEVADS

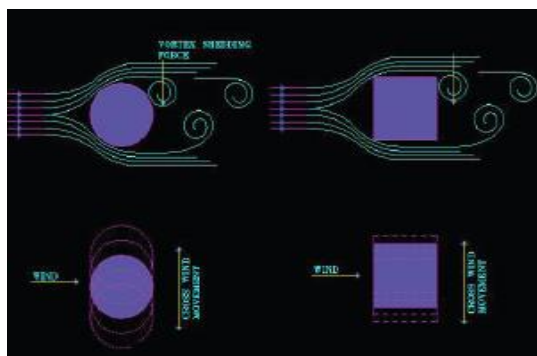
Augstceltnes ir komplicētas būves, kuru projektēšanā jāievēro daudzi papildus aspekti. Tāpat kā uz jebkuru konstrukciju, galvenās iedarbes uz ēku ir gravitācijas, vēja un seismiskās iedarbes. Palielinoties būves augstumam divas reizes, pašsvara slodze palielinās divas reizes. Savukārt, moments pie pamatiem no horizontālām slodzēm palielinās četras reizes, bet izliece palielinās jau 16 reizes kā redzams 1.att. [12]



1. att. Piepūles un deformācijas augstceltnēs

Tāpat augstceltnēm dominējošas kļūst horizontālās iedarbes, kas izraisa ēku horizontālos pārvietojumus un svārstības. Bieži vien pat mērenos vēja klimatiskos apstākļos noteicošais faktors projektēšanā var kļūt ēkas svārstību paātrinājumu ierobežošana, lai neradītu cilvēkiem diskomforta sajūtu ēkas ekspluatācijā.

Ja ēka neatrodas seismiski aktīvā zonā, galvenais ēkas svārstību izraisītājs ir vējš, kas ēkai liek svārstīties perpendikulāri vēja virzienam. (skat. 3. att.) [12]



3. att. Vēja iedarbes un ēku svārstības

Svārstību amplitūda ir atkarīga no daudziem aspektiem. Piemēram, no ēkas perimetra (apaļas ēkas svārstās vairāk nekā taisnstūrveidīgas), ēkas augstuma, un pašas ēkas konstrukcijas.

Viens no veidiem, kā efektīvi samazināt svārstības un paātrinājumus ēkās, ir ierīkot tajās svārstību slāpētājsistēmas. Lai ierīkotu šādas slāpētājsistēmas ir jāreķinās, ka sistēmas

izvietošanai ir nepieciešams ēkas augšējais stāvs, kas parasti augstceltnēm ir visvērtīgākais. Eksploatācijas laikā slāpētājsistēmas, kā jebkurš mehānisms, ir jākopj, lai tās strādātu efektīvi.

1. SVĀRSTĪBU SLĀPĒTĀJSISTĒMU VEIDI UN TO IEDALĪJUMS

Eksistē dažādas svārstību slāpēšanas sistēmas, kas tiek izmantotas augstceltnēs, lai samazinātu vēja slodžu radītos efektus. Šīs sistēmas var iedalīt divās kategorijās – pasīvās sistēmās un aktīvās sistēmās. Pasīvām sistēmām ir fiksētas īpašības. Lai tās strādātu kā paredzēts, tām nav nepieciešams papildus enerģijas avots. Savukārt, aktīvām sistēmām, lai tās funkcionētu, ir nepieciešams papildus enerģijas avots un kontroles sistēma. Tā regulē slāpētājsistēmu atbilstoši ēkas mainīgām slodzēm. Lai arī pārsvarā aktīvās sistēmas ir daudz efektīvākas par pasīvajām sistēmām, tās izmanto salīdzinoši reti ekonomisko apsvērumu dēļ. Svārstību slāpētājsistēmu iedalījums un veidi ir parādīti 1.1. tabulā un 1.2. tabulā. [14]

PASĪVĀS SVĀRSTĪBU SLĀPĒTĀJSISTĒMAS

1.1. tabula

Noregulētās masas svārstību slāpētāji
Noregulētie šķidruma svārstību slāpētāji
Viskozie svārstību slāpētāji
Histerēzes slāpētāji
Berzes svārstību slāpētāji
Elektro magnētiskie svārstību slāpētāji

AKTĪVĀS SVĀRSTĪBU SLĀPĒTĀJSISTĒMAS

1.2. tabula

Aktīvie masas svārstību slāpētāji
Dažāda stinguma aktīvās ierīces

1.1 Pasīvās sistēmas

Pasīvās sistēmas var iedalīt divās apakškategoriņās:

- a) Enerģiju izkliedējošās svārstību slāpētājsistēmās. Piemēram, viskozie svārstību slāpētāji un visko-elastiskie svārstību slāpētāji. [14]
- b) Papildus masas svārstību slāpētājsistēmās. Šāda sistēma ģenerē pretēji vērstus inerces spēkus. Piemēram, noregulētās masas svārstību slāpētāji un noregulētie šķidrums svārstību slāpētāji. [21]

Enerģiju izkliedējošās svārstību slāpētājsistēmas parasti tiek uzstādītas kā neatņemama sastāvdaļa sākotnējai ēkas konstrukcijai, tādējādi samazinot dinamiskās iedarbes augstceltnēs (skat 1.1. tt.). Slāpēšanas spēki viskozos svārstību slāpētājos un visko-elastiskos svārstību slāpētājos ir atkarīgi no deformēšanās ātruma. Slāpēšana tiek izpildīta caur fāzes maiņu starp spēku un pārvietojumu. Kā piemēru viskozo slāpētāju izmantošanā var minēt 55 stāvus augsto ēku Torre Mayor Meksikā (augstākā ēka Latīņamerikā uz doto brīdi), kur viskozie slāpētāji tiek izmantoti kā neatņemama sastāvdaļa stinguma kopnēs (skat 1.2. att.). Visko-elastiskie slāpētāji bija izmantoti 2001. gadā iznīcinātos World Trade Center torņos. Pie citu veidu svārstību slāpētājsistēmām, kur svārstības tiek slāpētas caur enerģijas izklīdināšanu no galvenām konstrukcijām, var minēt histerēzes svārstību slāpētājus un berzes svārstību slāpētājus. [14]



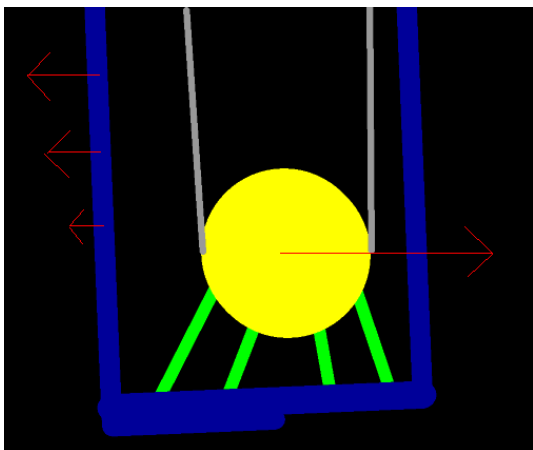
1.1. att.
Enerģiju-izkliedējošas
svārstību slāpētājsistēmas



1.2. att.
Torre Mayor būvniecība Meksikā

Noregulētās masas svārstību slāpētāji sastāv no pretēji vērto inerces spēku ģenerējošas masas, kam papildus nāk relatīvi sarežģītas mehāniskās ierīces. Tās palīdz īstenot pareizu šīs masas uzvedību. Noregulētās masas svārstību slāpētāju kustīgās masas darbības frekvence parasti ir noregulēta, lai sakristu ar ēkas visa konstrukcijas svārstību frekvenci. Kad ēka sāk

svārstīties un noliecas vienā virzienā, noregulēto masas slāpētāju kustīgā masa izkļaujas no sava miera stāvokļa uz pretējo pusi, tādējādi ģenerējot pretēji vērstu inerces spēku (skat. 1.3. att.). Noregulētā masas svārstību slāpētāju sistēmas parasti atrodas speciālās tām paredzētās telpās, kas atrodas ēkas pēdējos stāvos, un ir izolētas no publiskās zonas. Kā piemēru var minēt slīdošo noregulētās masas svārstību slāpētāju veidu, kas ir ierīkots John Hancock Building Bostonā un Citicorp Building Ņujorkā. Tomēr ir arī tādas noregulētās masas svārstību slāpētāju sistēmas, kas kalpo par tūristu apskates objektu. Kā piemēru var minēt svārstīta tipa noregulētā masas svārstību slāpētāju, kas atrodas Taipei 101 tornī Taivānā (skat. 1.3. att. un 1.4. att.). [21]



1.3. att

Noregulētās masas svārstību slāpētājsistēmas darbības princips



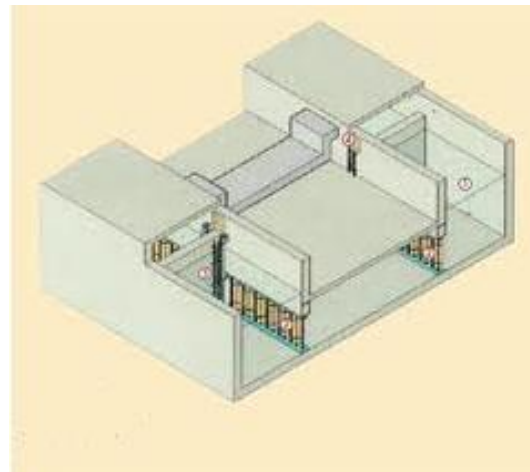
1.4. att.

Taipei 101 tornis Taivānā

Noregulētie šķidruma svārstību slāpētāji darbojas līdzīgi noregulētiem masas svārstību slāpētājiem, tikai lai radītu pretēji vērstu inerces spēku, šajās sistēmās tiek izmantota ūdens viļņošana. Šīs sistēmas radīšanai var izmantot ēkā esošo ūdensapgādes sistēmu, piemēram baseinu vai ūdens tvertni vienā no pēdējiem augstceltnes stāviem (skat. 1.5. att.). Šādās sistēmās nepieciešamās viļņošanās frekvences tiek panāktas ar regulējot ūdens daudzumu tvertnēs. Viens no noregulēto šķidruma svārstību slāpētāju paveidiem ir noregulēto šķidruma kolonnu svārstību slāpētāji. Šajās sistēmās tiek izmantota U-veida ūdenstvertne (skat. 1.6. att.). [21]



1.5. att.
Noregulēta šķidruma svārstību
slāpētājsistēma



1.6. att.
Noregulēta šķidruma kolonnu svārstību
slāpētājsistēma

Noregulēto masas svārstību slāpētāju un noregulēto šķidruma svārstību slāpētāju sistēmu paveidi ir parādīti attiecīgi 1.3. tabulā un 1.4. tabulā. Savukārt svārsta veids iedalās vēl sīkāk, kas ir apkopots 1.5. tabulā. [14]

1.3. tabula Noregulētie masas svārstību slāpētāji	
Svārsta veids	
Slīdošais veids	
Gultņveida	

1.4. tabula Noregulētie šķidruma svārstību slāpētāji	
Noregulētie viļņošanās slāpētāji	
Noregulētie šķidruma kolonnu slāpētāji	

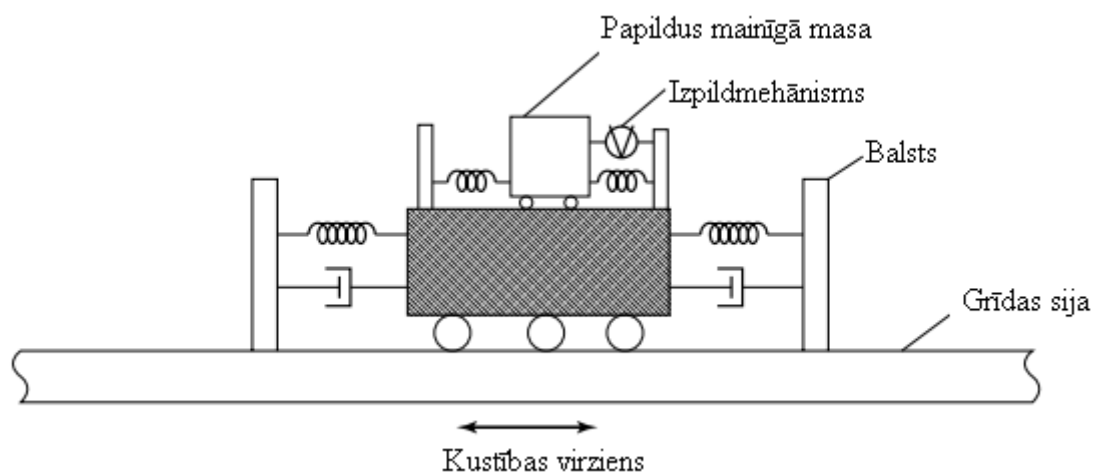
1.5. tabula Svārsta veids	
Vienīgais svārsts.	
Vairākpakāpju svārsts	
Inverss svārsts	

1.2 Aktīvās sistēmas

Aktīvās konstrukciju svārstību kontroles sistēmas ir tādas, kas spēj noteikt konstrukcijas stāvokli laikā, un spēj pielāgot šai situācijai noteiktas darbības, kas mainītu konstrukcijas svārstības pēc vajadzības, veicot visas nepieciešamās darbības kontrolēti un salīdzinoši īsā laika posmā. Pasīvās sistēmas, tādas kā noregulētie masas svārstību slāpētāji un noregulētie šķidruma svārstību slāpētāji, ir efektīvi salīdzinoši šauram slogojumu veidam, bet aktīvās sistēmas var pildīt precīzi savas funkcijas un pielāgoties daudz plašākam slogojumu lokam. Aktīvo sistēmu uzvedība ir sarežģītāka un izmantotās tehnoloģijas ir komplicētas.

Aktīvo sistēmu veidi ir aktīvie masas svārstību slāpētāji un dažāda stinguma aktīvās ierīces. [14]

Aktīvo masas svārstību slāpētāju darbības būtība ir līdzīga noregulēto masas svārstību slāpētāju darbības būtībai, tikai aktīvās sistēmās, ēku vibrācijas tiek uztvertas ar sensoru palīdzību un optimālā vibrāciju kontroles jauda tiek noteikta ar datora palīdzību. Ēku svārstības tiek slāpētas ar mainīgu, kustīgu masu, kurai ir pievienots izpildmehānisms. Aktīvās masas svārstību slāpētāju darbības shēma ir parādīta 1.7. att. [21]



1.7. att. Aktīvā masas slāpētāja darbības shēma

Dažāda stinguma aktīvo ierīču darbības princips ir periodiska un kontrolēta stinguma maiņa visai ēkai, lai ēkas frekvence paliktu nemainīga zemestrīču un vēja iedarbju gadījumā, un ēkas svārstības neieietu rezonansē. Šo sistēmu izmantošana ir ļoti ierobežota to lielo izmaksu un drošuma viedokļa dēļ. Tomēr atzīts, ka šādām sistēmām ir liels potenciāls nākotnes debesskrāpju svārstību slāpēšanā. [14]

2. SVĀRSTĪBU PAĀTRINĀJUMU UN HORIZONTĀLO PĀRVIETOJUMU ROBEŽLIELUMI AUGSTCELTNĒM

Svārstības augstceltnēs, vēja ietekmē, pamazām var novest pie ēkas sabrukšanas, ja svārstību amplitūda pieaug līdz pārmērīgi lielumam. Kā vienu no gadījumiem var minēt, kad svārstības ieiet rezonansē. Ir noteikti svārstību veidi, kuriem nav liela svārstību amplitūda, un kuri neizraisa nekādas problēmas konstrukcijās ēkām, tomēr rada ievērojamas problēmas cilvēku labsajūtai, rada diskomfortu. Bieži augstceltnēm noteicošās prasības ēkas svārstību ierobežošanā ir atkarīgas cilvēku labsajūtas ekspluatācijas laikā, nevis no ēkas elementu stiprības viedokļa. [18]

Ēku kustībai, periodisko vēja iedarbju ietekmē, jābūt cilvēku komforta un labsajūtas robežās. Svārstību paātrinājums ir viens no svarīgākajiem kritērijiem ēku svārstībās. Horizontālais spēks, kas darbojas uz cilvēka ķermeni ēkas svārstību laikā, ir tieši proporcionāls horizontālajam ēkas paātrinājumam. Paātrinājumu ēkām mēra ar mērvienību milli-g, kas ir viena tūkstošā daļa no zemes gravitācijas. [12]

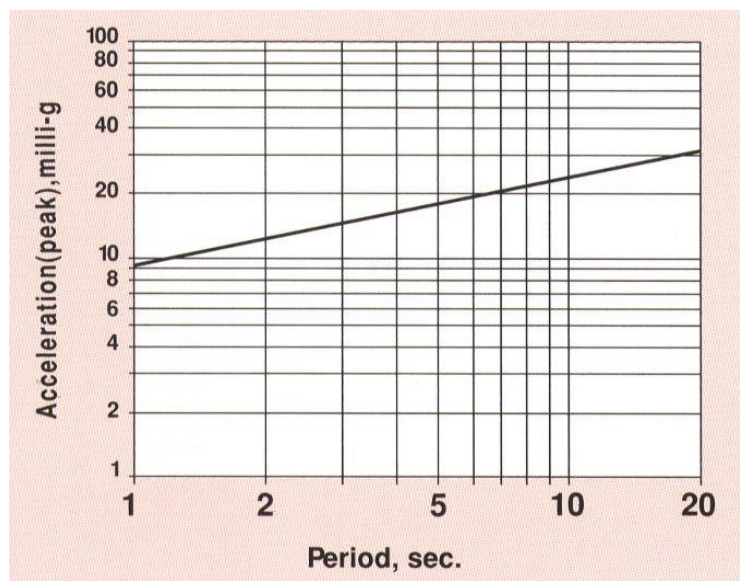
$$\text{milli-g} = 10^{-3} \cdot g \quad (2.1)$$

kur

$$g = 9.807 \frac{m}{s^2} \quad (2.2)$$

Cilvēki izjūt ļoti mazus paātrinājumus – pat pāris milli-g.

Ir neiespējami nodrošināt, lai nekādas uztveramas kustības jebkad nerastos. International Standards Organization (ISO) ir publicējusi pamatnostādnes, kuras nosaka horizontālā paātrinājuma robežvērtības ēkas pēdējā stāvā, kuras nedrīkst būt pārsniegtas vairāk kā vienu reizi piecos gados. 2.1.grafikā tiek parādīta šo pamatnostādņu būtība, kas iegūta no ISO informācijas. [18]



2.1. grafiks. Pamatnostādnes piecu gadu laika posmam paātrinājumam ēkas pēdējos stāvos

Vertikālajā virzienā grafikā ir parādītas paātrinājuma vērtības, bet horizontālajā virzienā - ēku svārstību periods. Piemēram, ēkai ar piecu sekunžu svārstību periodu, piecu gadu laika posmā, paātrinājuma vērtības nedrīkst pārsniegt 18 milli-g. Ēkai ar astoņu sekunžu periodu, piecu gadu laika posmā paātrinājuma vērtības nedrīkst pārsniegt 22 milli-g. Tādi paātrinājumi var tikt uztverti, bet ja tie iestājas ne vairāk kā vienu reizi no pieciem līdz desmit gadiem, tad ēku funkcionalitāte un komerciālā dzīvotspēja netiek negatīvi ietekmēta. [18]

Pēdējo gadu laikā parādījās tendence samazināt laika posmu, kurā paātrinājums nedrīkst pārsniegt robežvērtības, no pieciem līdz vienam gadam, samazinot maksimālās horizontālā paātrinājuma vērtības apmēram par 30%.

Augstāk aprakstītie kritēji ir vairāk attiecināmi uz ofisu ēkām. Pieļaujamie horizontālie paātrinājumi dzīvojamās ēkās ir aptuveni par 20% līdz 30% mazāki.

Kā vēl vienu no ēkām uzstādāmām prasībām, attiecībā uz svārstībām, vajag minēt ēkas jumta sānu novirzi vai horizontālo pārvietojumu no sākuma stāvokļa (skat 2.1. att.). [12]



2.1. att. Jumta sānu novirze vai horizontālais pārvietojums

Dažādās pasaules valstīs pielieto dažādus robežlielumus [12]:

- a) ASV/Dubajā (10-20 gadu vējam) – $H/400$ – $H/500$
- b) Korejā (50-100 gadu vējam) – $H/500$

kur

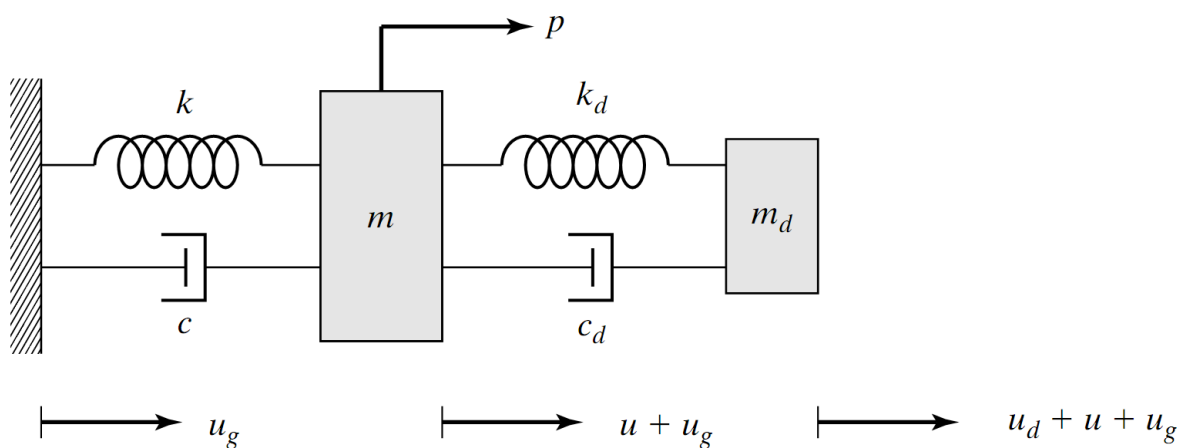
H – ēkas augstums (līdz jumtam)

3. NOREGULĒTĀS MASAS SVĀRSTĪBU SLĀPĒTĀJU APRĒĶINS

3.1 Ēka ar slāpētspēju un noregulēto masas slāpētāju ar slāpētspēju

Katra reāla sistēma iekļauj sevī nelielu slāpētspēju. Ir svarīgi ievērtēt pašas konstrukcijas spēju slāpēt svārstības, optimālai slāpētājsistēmas uzregulēšanai.

3.3.1. att. ir parādīta vienas brīvības pakāpes sistēma, kur ir parādīta primārā masa m (ēkas masa), ar stingumu k (ēkas stingums) un ēkas svārstību slāpētspēja c (proporcionalitātes koeficients), uz kuru darbojās vēja slodze un seismiskā slodze. Ir parādīts noregulētais masas slāpētājs ar masu m_d , stingumu k_d un slāpētspēju (proporcionalitātes koeficientu) c_d , kas ir pievienots primārajai masai. [21]



3.3.1. att. Vienas brīvības pakāpes sistēma ar primāro masu ar slāpētspēju un noregulēto masas svārstību slāpētāju ar slāpētspēju

Katram ķermenim (primārajai masai un slāpētājsistēmas masai) var uzrakstīt kustības vienādojumu:

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d + m_d \ddot{u} = -m_d a_g \quad (3.63)$$

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u - c_d \dot{u}_d - k_d u_d = -m a_g + p \quad (3.64)$$

Primārās masas un slāpētājsistēmas pārvietojumu, vēja un seismiskās slodzes dēļ, izsaka polārajā formā:

$$\bar{u} = \frac{\hat{p}}{k} H_5 e^{i\delta_5} - \frac{\hat{a}_g m}{k} H_6 e^{i\delta_6} \quad (3.65)$$

$$\bar{u}_d = \frac{\hat{p}}{k} H_7 e^{-i\delta_7} - \frac{\hat{a}_g m}{k} H_8 e^{i\delta_8} \quad (3.66)$$

Dažādās H un δ vērtības tiek definētas kā:

$$H_5 = \frac{\sqrt{[f^2 - \rho^2]^2 + [2\xi_d \rho f]^2}}{|D_3|} \quad (3.67)$$

$$H_6 = \frac{\sqrt{[(1 + \bar{m})f^2 - \rho^2]^2 + [2\xi_d \rho f(1 + \bar{m})]^2}}{|D_3|} \quad (3.68)$$

$$H_7 = \frac{\rho^2}{|D_3|} \quad (3.69)$$

$$|D_3| = \frac{\sqrt{1 + [2\xi\rho]^2}}{\{[-f^2\rho^2\bar{m} + (1 - \rho^2)(f^2 - \rho^2) - 4\xi\xi_d f\rho^2]^2} \quad (3.70)$$

$$+ 4[\xi\rho(f^2 - \rho^2) + \xi_d f\rho(1 - \rho^2(1 + \bar{m}))^2] \} \quad (3.71)$$

$$\delta_5 = \alpha_1 - \delta_7 \quad (3.72)$$

$$\delta_6 = \alpha_2 - \delta_7 \quad (3.73)$$

$$\delta_8 = \alpha_3 - \delta_7$$

$$\tan \delta_7 = 2 \frac{\xi\rho(f^2 - \rho^2) + \xi_d f\rho(1 - \rho^2(1 + \bar{m}))}{-f^2\rho^2\bar{m} + (1 - \rho^2)(f^2 - \rho^2) - 4\xi\xi_d f\rho^2} \quad (3.74)$$

$$\tan \alpha_3 = 2\xi\rho \quad (3.75)$$

Vērtības α_1 un α_2 ir definētas formulās 3.46 un 3.47.

Tālāk tiks apskatīti no vēja slodzēm izejoši risinājumi un prasības, pielāgojot tām slāpētājsistēmas optimālos parametrus. Tā kā $|D_3|$ iekļauj sevī primārās masas rimšanas koeficientu ξ , nevar uzrakstīt analītiskās izteiksmes, ar kuru palīdzību varētu atrast nepieciešamos slāpētājsistēmas parametrus. Šajā gadījumā šie parametri ir atkarīgi arī no ξ . Daudzas simulācijas tiek pielietotas, lai aprēķinātu H_5 un H_7 dažādam ρ lokam pie dotajām ξ_d un \bar{m} , ξ , f vērtībām. Sākot ar specifiskām \bar{m} , ξ vērtībām, var zīmēt diagrammu H_5 pret ρ dažādām f un ξ_d lokam. Katrā $H_5 - \rho$ grafikā ir H_5 pīķa vērtība. Īpaša ξ_d un f kombinācija, kas atbilst zemākajai H_5 pīķa vērtībai, tiek pieņemta par optimālo stāvokli. Atkārtojot šo procesu dažādām \bar{m} , ξ vērtībām, dod nepieciešamo informāciju, lai uzprojektētu noregulēto masas slāpētāju.

3.3.1 diagrammā parādītas dažādas maksimālās H_5 vērtības optimālajam stāvoklim. Maksimālās H_7 vērtības optimālajam stāvoklim ir parādītas 3.3.2 diagrammā. Aprēķinos,

ievērojot primārās masas slāpētspēju, tiek panākts ievērojamu efektu pie mazām vērtībām. No vienādojumiem 3.65 un 3.66 var izteikt attiecību starp maksimālo slāpētājsistēmas amplitūdu un maksimālo primārās masas amplitūdu [21]

$$\frac{|\hat{u}_d|}{|\hat{u}|} = \frac{H_7}{H_5} = \frac{\rho^2}{\sqrt{[f^2 - \rho^2]^2 + [2\xi_d \rho f]^2}} \quad (3.76)$$

Tā kā ξ ir mazs, šī attiecība pārsvarā ir neatkarīga no ξ . 3.3.3 diagramma to arī apliecina. Optimālās vērtības uzregulējamai frekvenču attiecībai un slāpētājsistēmas proporcionalitātes koeficientam ir parādītas 3.3.4 diagrammā un 3.3.5 diagrammā attiecīgi. Izmantojot vienādojumu 3.59, var pārveidot $H_5|_{\text{opt}}$ vērtību ekvivalentajā rimšanas koeficientā primārai sistēmai

$$\xi_e = \frac{1}{2H_5|_{\text{opt}}} \quad (3.77)$$

3.3.6 diagramma parāda dažādas ξ_e vērtības pie konkrētiem \bar{m} un ξ .

Tsai and Lin (1993) iesaka sekojošus vienādojumus optimālo parametru f un ξ_d aprēķinam:

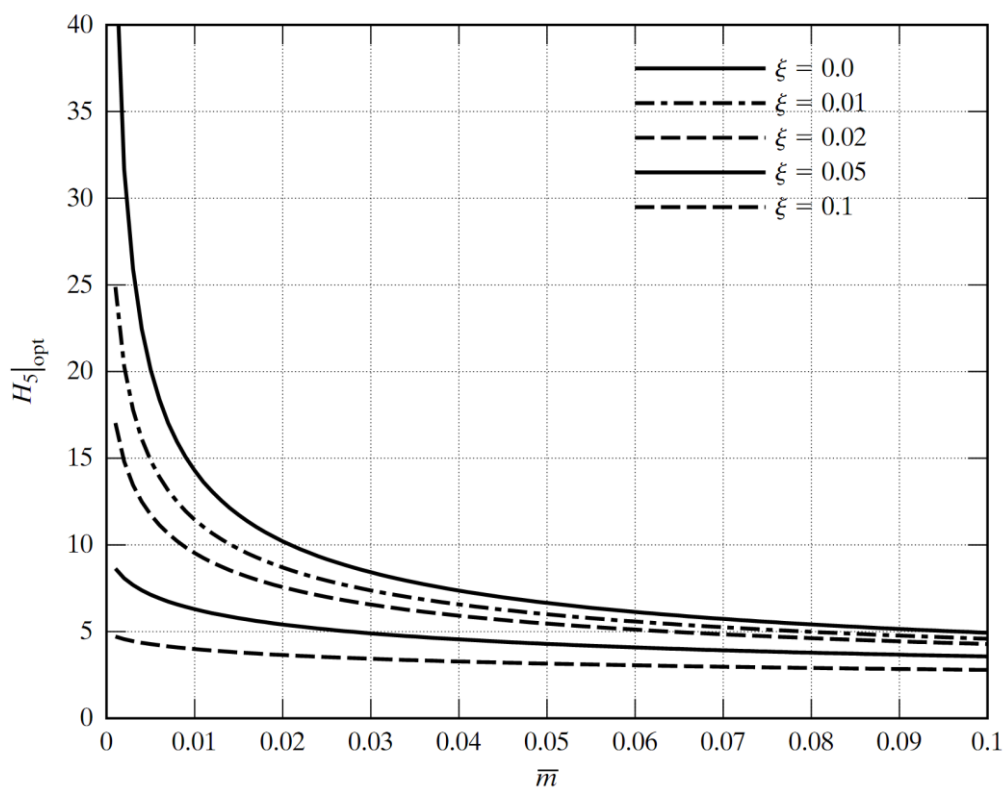
$$f = \left(\frac{\sqrt{1 - 0.5\bar{m}}}{1 + \bar{m}} + \sqrt{1 - 2\xi^2} - 1 \right) \quad (3.78)$$

$$- [2.375 - 1.034\sqrt{\bar{m}} - 0.426\bar{m}] \xi \sqrt{\bar{m}}$$

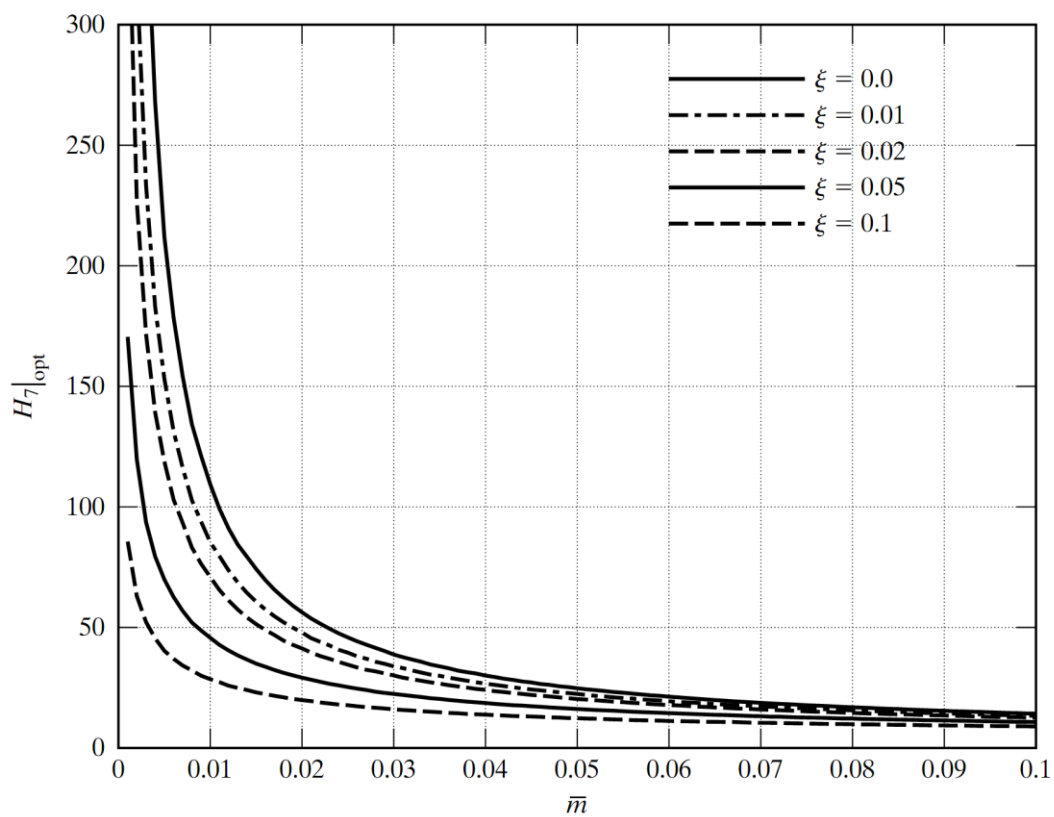
$$- (3.730 - 16.903\sqrt{\bar{m}} + 20.496\bar{m}) \xi^2 \sqrt{\bar{m}}$$

$$\xi_d = \sqrt{\frac{3\bar{m}}{8(1 + \bar{m})(1 - 0.5\bar{m})}} + (0.151\xi - 0.170\xi^2)$$

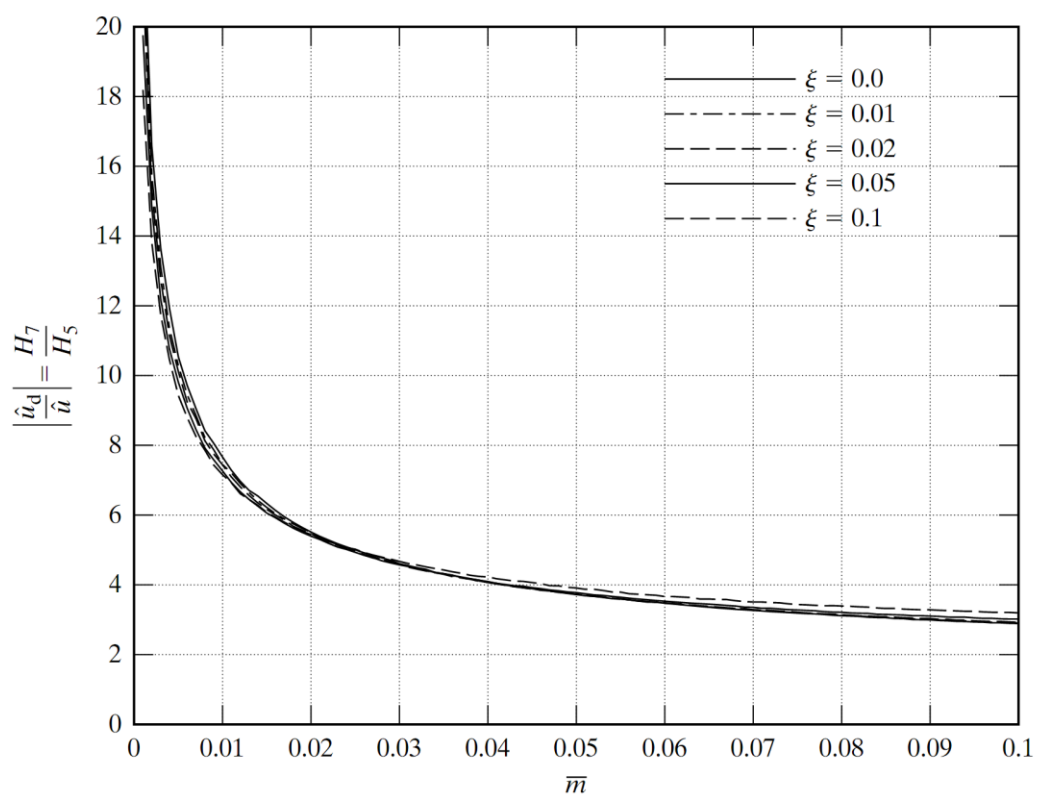
$$+ (0.163\xi + 4.980\xi^2)\bar{m} \quad (3.79)$$



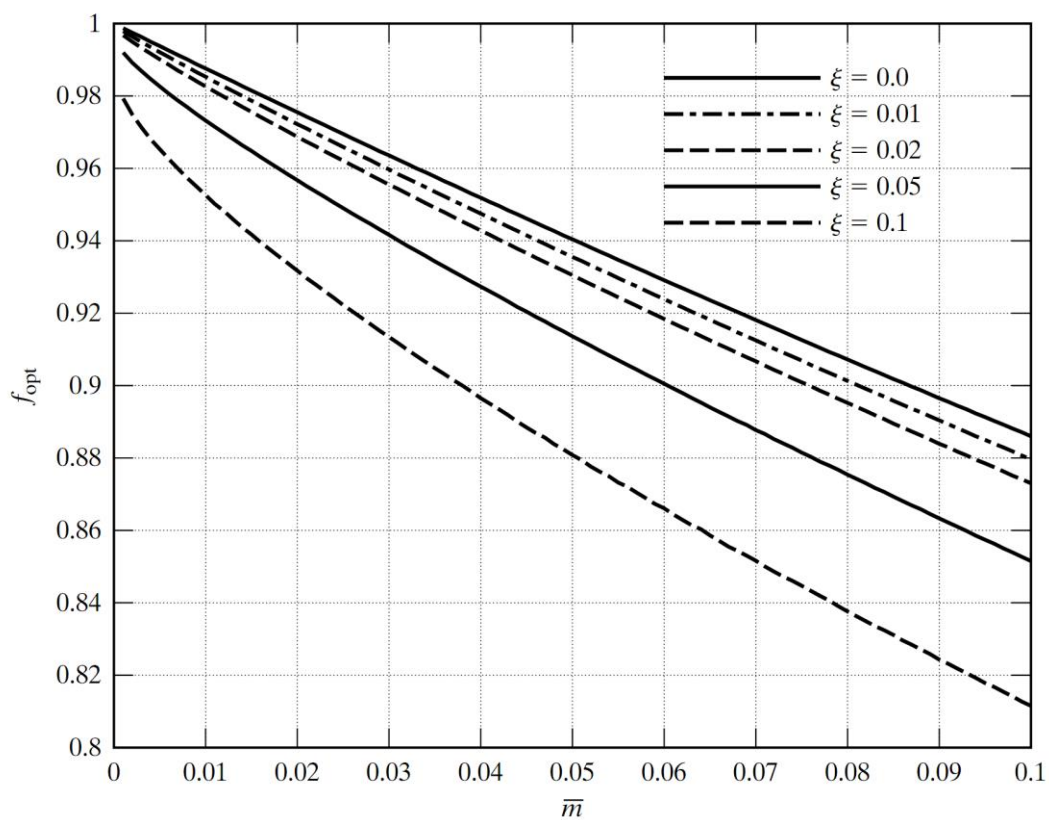
3.3.1 diagramma. Maksimālais pastiprināšanas faktors (primārai masai)



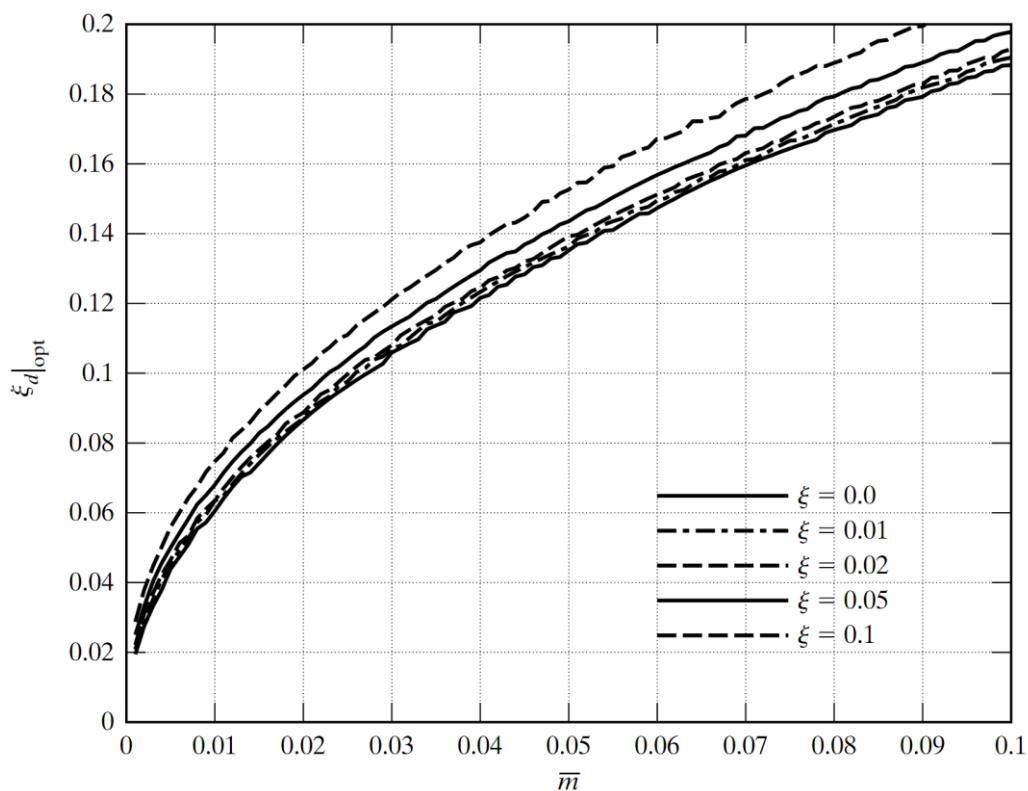
3.3.2 diagramma. Maksimālais pastiprināšanas faktors (slāpētājsistēmai)



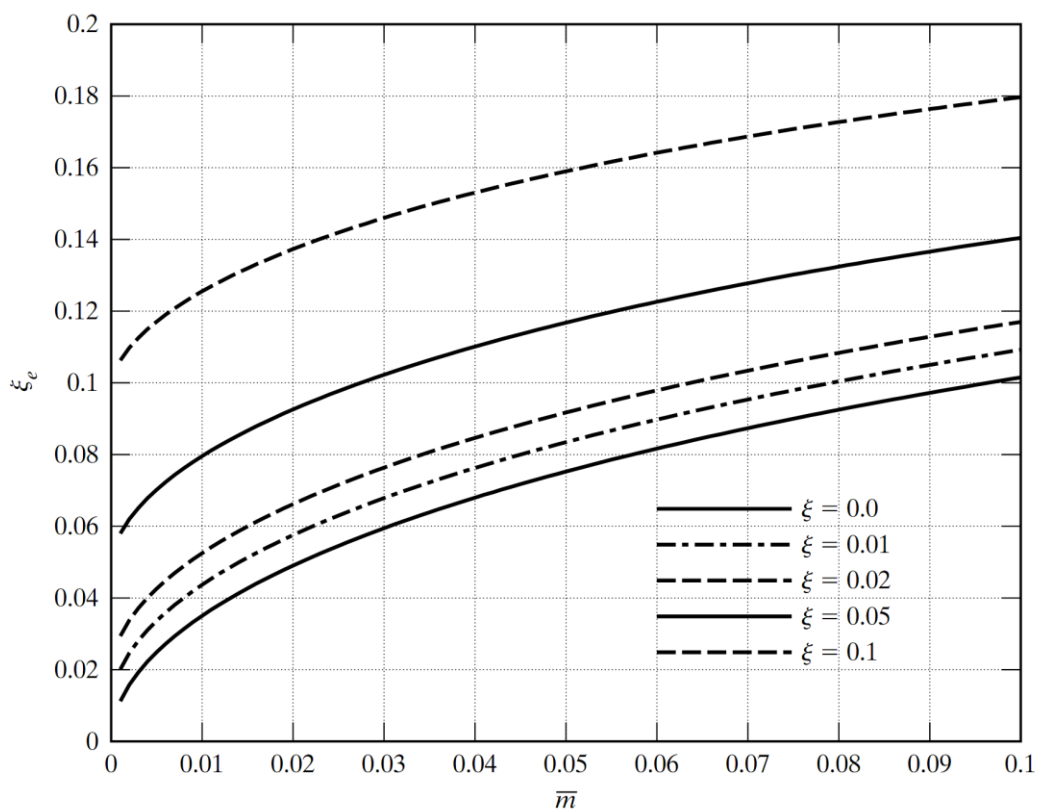
3.3.3 diagramma. Attiecība starp maksimālo slāpētājsistēmas amplitūdu un maksimālo primārās masas amplitūdu



3.3.4 diagramma. Optimālā uzregulējamā frekvenču attiecība



3.3.5 diagramma. Slāpētājsistēmas optimālais rimšanas proporcionalitātes koeficients



3.3.6 diagramma. Ekvivalentais rimšanas koeficients pie optimāli noregulēta masas slāpētāja

Noregulēta masas slāpētāja projektēšana ietver sevī sekojošus soļus:

- 1) Jānedefinē iespējamie pārvietojumi primārai masai un slāpētājsistēmai
- 2) Nodefīnē rimšanas koeficientu ξ ēkai, izmantojot EN 1991-1-4:2005
- 3) No formulām 3.65 un 3.66 nosaka pastiprināšanas faktoros H_{5opt} un H_{7opt}
- 4) Nosaka nepieciešamo masu attiecību, kas apmierinātu šos kustības ierobežojumus, izmantojot diagrammas 3.3.1 un 3.3.2. Izvēlas lielāko \bar{m}
- 5) Nosaka f_{opt} no diagrammas 3.3.4 vai no formulas 3.78
- 6) Izrēķina slāpētājsistēmas ciklisko frekvenci pēc 3.60 formulas

$$\omega_d = f_{opt} \omega$$

- 7) Izrēķina slāpētājsistēmas stingumu pēc 3.61 formulas

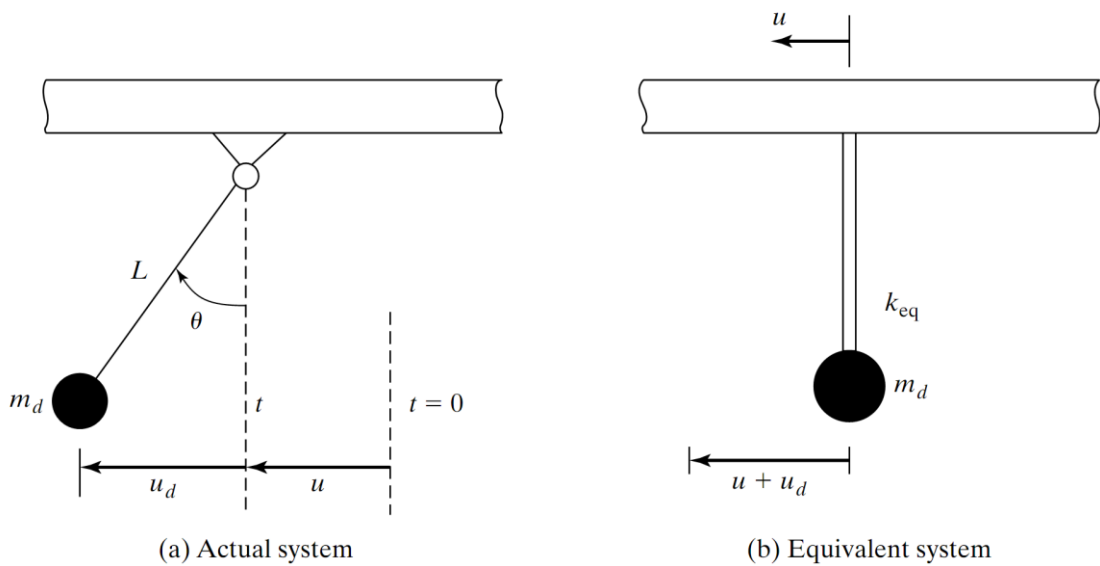
$$k_d = m_d \omega_d^2 = \bar{m} k f_{opt}^2$$

- 7) Nosaka $\xi_d|_{opt}$ no 3.3.5 diagrammas vai no formulas 3.79
- 8) Aprēķina slāpētājsistēmas proporcionalitātes koeficientu pēc 3.62 formulas

$$c_d = 2\xi_d|_{opt} \omega_d m_d = \bar{m} f_{opt} \left[2\xi_d|_{opt} \omega m \right]$$

3.2 Svārsta tipa noregulētais masas slāpētājs

Viens no veidiem kā nostiprināt slāpētājsistēmas masu, ir iekārt to trosēs un no apakšas tam piestiprināt slāpētājus, kā tas tika izdarīts Taipei 101 tornī. Tiks apskatīta parasta sistēma bez slāpētājiem. 3.4.1. (a) att. ir parādīts parasts svārsts, kas ir piestiprināts pie griestiem. Griestu kustība iekustina svārstu. Relatīvā svārsta kustība rada horizontālu slodzi, kas ir pretēja grīdas kustībai. Šī darbība reprezentē tai ekvivalentu vienas brīvības pakāpes sistēmu, kas ir piestiprināta pie griestiem kā parādīts 3.4.1. (b) att. [21]



3.4.1. att. Svārsta tipa noregulētā svārstību masas slāpētāja darbības shēma

Šai sistēmai var rakstīt kustības vienādojumu:

$$T \sin \theta + \frac{W_d}{g}(\ddot{u} + \ddot{u}_d) = 0 \quad (3.80)$$

kur T ir stiepes spēks trosē un W_d ir slāpētājsistēmas pilnā enerģija. Kad θ ir maziņš sekojošas vienādības ir spēkā:

$$u_d = L \sin \theta \approx L \theta \quad (3.81)$$

$$T \approx W_d \quad (3.82)$$

Ņemot vērā šīs sakarības var pārrakstīt formulu 3.80 kā

$$m_d \ddot{u}_d + \frac{W_d}{L} u_d = -m_d \ddot{u} \quad (3.83)$$

Sanāk, ka slāpētājsistēmas izrietošais stingums ir

$$k_{eq} = \frac{W_d}{L} \quad (3.84)$$

Naturālā cikliskā slāpētājsistēmas frekvence ir

$$\omega_d^2 = \frac{k_{eq}}{m_d} = \frac{g}{L} \quad (3.85)$$

Naturālais slāpētājsistēmas periods ir

$$T_d = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (3.86)$$

No šiem vienādojumiem ir redzams, ka ar trosi var aizstāt atsperi pie kura ir piestiprināta masa. Šajā gadījumā troses ekvivalentais stingums ir atkarīgs no troses garuma.

4. NOREGULĒTĀS MASAS SVĀRSTĪBU SLĀPĒTĀJA APLĒSES PIEMĒRS 162M AUGSTAI ĒKAI

Lai varētu noteikt par cik var samazināt svārstību amplitūdas, paātrinājumus un vēja slodzes, ierīkojot ēkā noregulēto masas slāpētāju, sākumā ir jāizrēķina uz ēku darbojošās vēja slodzes. Aprēķina piemērs parādīts 5. nodaļā.

Nedaudz mainot 3. nodaļā izmantotos apzīmējumus ērtības labad, kā arī lai apzīmējumi būtu pēc iespējas tuvāki eirokoda apzīmējumiem tiek iegūts:

$u = y_{F,max}$ – horizontālais pārvietojums (m)

$\hat{p} = p_d$ – dinamiskā vēja slodze (kN)

$\bar{m} = m_a$ – slāpētājsistēmas masas un ēkas masas attiecība

Aprēķinā tiek ņemta vērā tikai vibrējošā daļa no ēkas masas. Vadoties no tā, sākumā tiek aprēķināts ēkas stingums.

$$k = \omega^2 \cdot m \quad (5.1)$$

kur

m - ēkas vibrējošās daļas masa

ω - ēkas cikliskā pašsvārstību frekvence

$$m = m(s) \cdot L_1 \quad (5.2)$$

kur

$m(s) = 188711.85 \text{ kg/m}$ – ēkas masa uz vienu tekošo metru

$L_1 = 120 \text{ m}$ – korelācijas garums

Tad pēc (5.2) formulas tiek aprēķināta ēkas vibrējošās daļas masa

$$m = 188711.85 \cdot 120 = 22645422 \text{ kg}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (5.3)$$

kur

$n = 0.212 \text{ Hz}$ – ēkas pašsvārstību frekvence (skat 4.2.1 tabulu)

Pēc (5.3) formulas tiek aprēķināta ēkas cikliskā pašsvārstību frekvence

$$\omega = 2 \cdot 3.14 \cdot 0.212 = 1.33 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Pēc (5.1) formulas tiek aprēķināts ēkas stingums

$$k = 22645422 \cdot 1.33^2 = 40139450.94 \frac{N}{m}$$

Pieņemot, ka vēja slodze $F = 29840 \text{ kN}$ ir ekvivalentā statistiskā slodze dinamiskai slodzei p_d . Sakarību starp dinamisko un ekvivalento statisko slodzi var uzrakstīt ar izteiksmi:

$$F = p_d \cdot H_5 \quad (5.4)$$

kur

p_d – dinamiskā vēja slodze (kN)

H_5 – pastiprināšanas faktors

Ēkām bez slāpētājsistēmām, pastiprināšanas faktoru nosaka ar sekojošas formulas palīdzību

$$H_5(0) = \frac{1}{2 \cdot \delta_s} \quad (5.5)$$

kur

$\delta_s = 0.1$ – ēkas logaritmiskais rimšanas koeficients. Dzelzsbetona ēkām vienāds ar 0.1.

Pēc EN 1991-1-4:2005 (E), Annex F, F.2 tabulas.

Pēc (5.5) formulas tiek aprēķināts pastiprināšanas faktors dzelzsbetona ēkām bez slāpētājsistēmas

$$H_5(0) = \frac{1}{2 \cdot 0.1} = 5$$

Izmantojot formulu (5.4), tiek aprēķināta dinamiskā vēja slodze

$$p_d = \frac{29840}{5} = 5968 \text{ kN}$$

Tagad, kad ir atrasta dinamiskā vēja slodze, tiek noteikti, kādi būs pārvietojumi, ekvivalentās statistiskās slodzes un paātrinājumi, ierīkojot monolīta dzelzsbetona augstceltnē dažādu masu slāpētājsistēmas. Lai šo aprēķinu varētu veikt, ir jāizmanto tāds raksturlielums kā m_a – slāpētājsistēmas masas un ēkas masas attiecība. Aprēķins veikts dažādām masu attiecībām:

$$m_a(0.01) = 0.01$$

$$m_a(0.04) = 0.04$$

$$m_a(0.07) = 0.07$$

$$m_a(0.1) = 0.1$$

Pēc 3.3.1 grafika tiek noteikti, kādi būs optimālie pastiprināšanas faktori augstāk apskatītām masu attiecībām:

$$H_5(0.01) = 4.02$$

$$H_5(0.04)=3.30$$

$$H_5(0.07)=3.00$$

$$H_5(0.1)=2.80$$

Tagad, ir zināmi visi vajadzīgie lielumi, tiek aprēķināti, horizontālie pārvietojumi pie katras masu attiecības:

$$y_{F,max} = \frac{p d}{k} \cdot H_5 \quad (5.6)$$

$$y_{F,max}(0.01) = \frac{5968000}{40139450.94} \cdot 4.02 = 0.598m$$

$$y_{F,max}(0.04) = \frac{5968000}{40139450.94} \cdot 3.3 = 0.491m$$

$$y_{F,max}(0.07) = \frac{5968000}{40139450.94} \cdot 3 = 0.446m$$

$$y_{F,max}(0.1) = \frac{5968000}{40139450.94} \cdot 2.8 = 0.416m$$

Nosaka maksimālo horizontālais pārvietojumu ēkai bez slāpētājsistēmas: ir $y_{F,max} = 0.743 m$

Aprēķina vēja ekvivalentās statiskās slodzes pie katras masu attiecības. Tas tiek izdarīts, izmantojot (5.4) formulu.

$$F(0.01) = 5968 \cdot 4.02 = 23995kN$$

$$F(0.04) = 5968 \cdot 3.3 = 19690kN$$

$$F(0.07) = 5968 \cdot 3 = 17904kN$$

$$F(0.1) = 5968 \cdot 2.8 = 16710kN$$

Tiek aprēķināts paātrinājums pie katras masu attiecības. Tas tiek izdarīts, atvasinot pēc laika divas reizes pārvietojuma vienādojumu.

$$a = \omega^2 \cdot y_{F,max} \quad (5.7)$$

$$a(0.01) = 1.33^2 \cdot 0.598 = 1.058 \frac{m}{s^2} = 107.94milli - g$$

$$a(0.04) = 1.33^2 \cdot 0.491 = 0.869 \frac{m}{s^2} = 88.63milli - g$$

$$a(0.07) = 1.33^2 \cdot 0.446 = 0.789 \frac{m}{s^2} = 80.50milli - g$$

$$a(0.1) = 1.33^2 \cdot 0.416 = 0.736 \frac{m}{s^2} = 75.09milli - g$$

Maksimālais paātrinājums ēkai bez slāpētājsistēmas ir $a = 134.48 \text{ milli-g}$

Tā kā noregulēts masas svārstību slāpētājs sastāv no kustīgas masas, atsperes un amortizatora, tas nozīmē, ka katrai slāpētājsistēmas masas un ēkas masas attiecībai ir jāpiemēro konkrēts stingums atsperei un proporcionalitātes koeficients amortizatoram. Tālāk šajā nodaļā būs parādīts, kā aprēķināt optimālo atsperes stingumu un optimālo proporcionalitātes koeficientu slāpētājsistēmai ar tās masas un ēkas masas attiecību $m_a=0.01$

Pēc (3.78) formulas tiek aprēķināta optimālā uzregulējamo frekvenču attiecība

$$f = \left(\frac{\sqrt{1 - 0.5 \cdot 0.01}}{1 + 0.01} + \sqrt{1 - 2 \cdot 0.1^2 - 1} \right) - (2.375 - 1.034 \sqrt{0.01} - 0.426 \cdot 0.01) \cdot 0.1 \cdot \sqrt{0.01} - (3.730 - 16.903 \cdot \sqrt{0.01} + 20.496 \cdot 0.01) \cdot 0.1^2 \cdot \sqrt{0.1} = 0.948$$

Pēc (3.79) formulas tiek aprēķināts optimālais rimšanas koeficientu slāpētājsistēmai

$$\xi_d = \sqrt{\frac{3 \cdot 0.01}{8 \cdot (1 + 0.01) \cdot (1 - 0.5 \cdot 0.01)}} + (0.151 \cdot 0.1 - 0.170 \cdot 0.1^2) + (0.163 \cdot 0.1 + 4.980 \cdot 0.1^2) \cdot 0.01 = 0.075$$

Tad pēc (3.61) formulas tiek atrasts slāpētājsistēmas atsperes stingums

$$k_d = 0.01 \cdot 40139450.94 \cdot 0.948^2 = 360734.85 \frac{N}{m}$$

Tiek noteikts slāpētājsistēmas amortizatora proporcionalitātes koeficientu

$$c_d = 0.01 \cdot 0.948 \cdot 2 \cdot 0.075 \cdot 1.33 \cdot 22645422 = 42828.38 \frac{kg}{s}$$

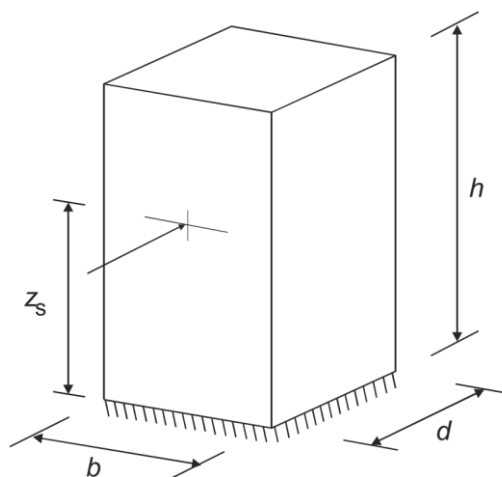
Nosaka noregulētā masas slāpētāja masu. Ņemot vērā, ka dotajā gadījumā slāpētāja masa ir 1% no ēkas vibrējošās daļas masas, tad $m_d=0.01 \cdot m=0.01 \cdot 22645422=226454.22kg$

5. AUGSTCELTNES VĒJA SLODŽU APRĒĶINA PIEMĒRS

Vēja slodzes tiek rēķinātas izmantojot EN 1991-1-4:2005 (E) – turpmāk tekstā [27]. Vēja slodze tiek rēķināta gan vēja virzienā, gan perpendikulāri vēja virzienam, kā arī tiek rēķināti no vēja slodzēm radušies horizontālie pārvietojumi. Fundamentālais vēja ātrums tiek pieņemts 24 m/s. Apvidus kategoriju pieņemu II. Ēkas augstums 144m.

5.1. Vēja slodžu aprēķins vēja virzienā

Jānosaka koncentrēta vēja slodze (9.1.3.1. att), kas ir pielikta ēkai vēja virzienā augstumā z_s , ievērtējot dinamisko faktoru. Sākumā aprēķinam slodzi mazākā ēkas stinguma virzienā (perpendikulāri kodolā esošo durvju plaknei)



9.1.3.1.att. Koncentrētas vēja slodzes pielikšanas shēma

kur $z_s = 0.6 \cdot h = 0.6 \cdot 144 = 86.4m$

$$F_w = c_s \cdot c_d \cdot \left[\sum_{elements} [c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}] \right] \quad (9.1)$$

kur

c_s – izmēra faktors

c_d – dinamiskais faktors

c_f – slodzes koeficients

$q_p(z_e)$ – vēja pīķa ātruma spiediens

A_{ref} – references laukums

z_e – references augstums (mūsu gadījumā no 0 līdz 144m)

$$q_p(z_e) = \left[1 + 7 \cdot I_v(z_e) \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot [v_m(z_e)]^2$$

(9.2)

kur

 $I_v(z_e)$ – turbulences intensitāte augstumā z_e virs zemes $v_m(z_e)$ – vidējais vēja ātrums augstumā z_e virs zemes ρ – vēja blīvums, kas parasti tiek pieņemts kā $1,25 \text{ kg/m}^3$

$$I_v(z_e) = \frac{\sigma_v}{v_m(z_e)} \quad \text{pie } z_{\min} < z_e < z_{\max} \quad (9.3)$$

kur

 σ_v – turbulences standarta novirze $z_{\min} = 2\text{m}$ – pēc 9.1.3.1 tabulas $z_{\max} = 200\text{m}$

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_i \quad (9.4)$$

kur

 k_r – apvidus faktors v_b – vēja pamatātrums 10m augstumā virs zemes un apvidus kategorijas II $k_i = 1$ – turbulences faktors

$$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{z_o}{z_{o,II}} \right)^{0.07} \quad (9.5)$$

kur

 $z_{o,II} = 0.05\text{m}$ (apvidus kategorija II, skat 9.1.3.1 tabulu) $z_o = 0.05\text{m}$ (skat. 9.1.3.1 tabulu)

9.1.3.1 tabula

Apvidus kategorijas un apvidus parametri

Apvidus kategorija		z_o (m)	z_{\min} (m)
0	Jūra vai pret jūru atklāti krasta rajoni	0.003	1
I	Ezeri vai līdzenas horizontālas teritorijas ar nenozīmīgu veģetāciju un bez šķēršļiem	0.01	1
II	Teritorijas ar vāju veģetāciju - piem. ar zāli un atsevišķi stāvošiem šķēršļiem (kokiem, ēkām), kas atrodas viens no otra vismaz 20 šķēršļa augstumu attālumā	0.05	2
III	Teritorijas ar parastu veģetāciju vai būvēm, vai arī ar atsevišķi stāvošiem šķēršļiem, kas atrodas viens no otra maksimāli 20 šķēršļu augstuma attālumā (piem., ciemi, piepilsētu rajoni, nepārtraukts mežs)	0.3	5
IV	Teritorijas, kurām vismaz 15% no to virsmas ir apbūvētas ar būvēm, kuru vidējais augstums pārsniedz 15 m	1.0	10

Pēc (9.5) formulas aprēķina apvidus faktoru:

$$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{0.05}{0.05} \right)^{0.07} = 0.19$$

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,o} \quad (9.6)$$

kur

$c_{dir} = 1$ (ja nav savādāk atrunāts nacionālajā pielikumā)

$c_{season} = 1$ (ja nav savādāk atrunāts nacionālajā pielikumā)

$v_{b,o} = 24\text{m/s}$ - fundamentālais vēja ātrums

Pēc (9.6) formulas aprēķinam vēja pamatātrumu 10m augstumā virs zemes

$$v_b = 1 \cdot 1 \cdot 24 = 24 \cdot \frac{m}{s}$$

Pēc (9.4) formulas aprēķina turbulences standarta novirzi

$$\sigma_v = 0.19 \cdot 24 \cdot 1 = 4.56 \cdot \frac{m}{s}$$

$$v_m(z_e) = c_r(z_e) \cdot c_o(z_e) \cdot v_b \quad (9.7)$$

kur

$c_r(z_e)$ – raupjuma faktors

$c_o(z_e) = 1$ – ortogrāfijas faktors

$$c_r(z_e) = k_r \cdot \ln \left(\frac{z_e}{z_o} \right) \text{ pie } z_{min} < z_e < z_{max} \quad (9.8)$$

$$c_r(z_e) = 0.19 \cdot \ln \left(\frac{144}{0.05} \right) = 1.513$$

Pēc (9.7) formulas aprēķina vidējo vēja ātrumu augstumā (z_e) virs zemes

$$v_m(z_e) = 1.513 \cdot 1 \cdot 24 = 36.31 \cdot \frac{m}{s}$$

Tad pēc (9.3) formulas aprēķina turbulences intensitāti augstumā (z_e) virs zemes

$$I_v(z_e) = \frac{4.56}{36.31} = 0.126$$

Un pēc (9.2) formulas nosaka vēja pīķa spiedienu augstumā (z_e) virs zemes

$$q_p(z_e) = (1 + 7 \cdot 0.126) \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot 36.31^2 = 1.55 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

Tā kā $h > 2b$ kā redzams 9.1.3.2. att. , tad gadījumā $q_p(z_e)$ ir jāaprēķina sešiem dažādiem references augstumiem. Augstāk tika parādīts aprēķins references augstumam 144m. Šis aprēķins vēl ir jāatkārto pie augstumiem 124m, 98m, 72m, 46m, 20m.

Tālāk ir doti vēja pīķa spiedieni augstāk aprakstītajiem references augstumiem:

$$q_p(144) = 1.55 \text{ kN/m}^2$$

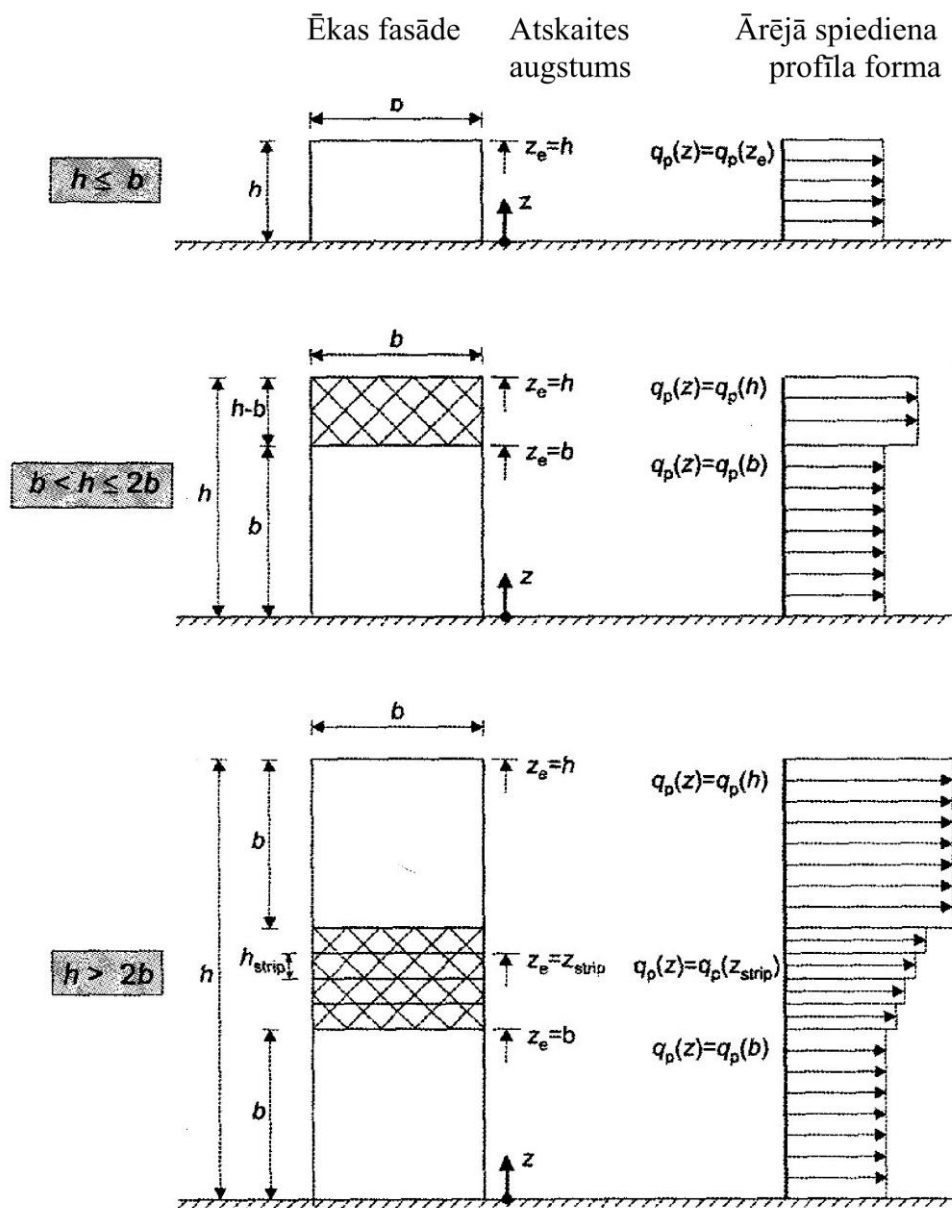
$$q_p(124) = 1.51 \text{ kN/m}^2$$

$$q_p(98) = 1.44 \text{ kN/m}^2$$

$$q_p(72) = 1.35 \text{ kN/m}^2$$

$$q_p(46) = 1.23 \text{ kN/m}^2$$

$$q_p(20) = 1.01 \text{ kN/m}^2$$



9.1.3.2 att. References augstums atkarībā no ēkas izmēriem un attiecīgie vēja spiedieni uz vertikālu virsmu

Nākamais tiek apskatīts c_f – slodzes koeficients

$$c_f = c_{f,o} \cdot \Psi_r \cdot \Psi_\lambda \quad (9.9)$$

$c_{f,o} = 2.1$ pie platuma un garuma attiecības $b/d = 1$. Pēc [1] 7.23 att.

$\Psi_r = 1$, jo ēkai nav noapaļoti stūri. Pēc [1] 7.24 att.

$\Psi_\lambda = 0.92$ Pēc [1] 7.16 tabulas, 7.36 att un 7.37 att.

Tad pēc (9.9) formulas nosaka slodzes koeficientu

$$c_f = 2.1 \cdot 1 \cdot 0.92 = 1.932$$

Nosaka references laukumus katrai daļai uz kuru darbojās vēja pīķa spiediens

$$A_{ref} = b^2 \quad \text{pirmai un pēdējai joslai} \quad (9.10)$$

$$A_{ref} = b \cdot h_{strip} \quad \text{vidējām joslām} \quad (9.11)$$

$$A_{ref}(144) = 400\text{m}^2$$

$$A_{ref}(124) = 520\text{m}^2$$

$$A_{ref}(98) = 520\text{m}^2$$

$$A_{ref}(72) = 520\text{m}^2$$

$$A_{ref}(46) = 520\text{m}^2$$

$$A_{ref}(20) = 400\text{m}^2$$

Aprēķina izmēra faktoru c_s

$$c_s = \frac{\left[1 + 7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2} \right]}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} \quad (9.12)$$

kur

$I_v(z_s) = 0.134$ - turbulences intensitāte augstumā $z_s = 84.6\text{m}$ virs zemes. Aprēķinam, izmantojot (9.3) formulu.

B^2 – fona faktors

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \cdot \left[\frac{(b+h)}{L(z_s)} \right]^{0.63}} \quad (9.13)$$

kur

b un h ir ēkas platums un augstums attiecīgi

$L(z_s)$ – turbulences garuma mērogs references augstumā $z_s = 84.6\text{m}$

$$L(z_s) = L_t \cdot \left(\frac{z_s}{z_t} \right)^\alpha \quad (9.14)$$

kur

$z_t = 200\text{m}$ - Pēc [1] Anex B (B1)

$L_t = 300\text{m}$ - Pēc [1] Anex B (B1)

$$\alpha = 0.67 + 0.05 \cdot \ln(z_o) \quad (9.15)$$

$$\alpha = 0.67 + 0.05 \cdot \ln(0.05) = 0.52$$

Tad pēc (9.14) formulas nosaka turbulences garuma mērogu

$$L(z_s) = 300 \cdot \left(\frac{84.6}{200} \right)^{0.52} = 191.79\text{m}$$

Izsaka B^2 pēc (9.13) formulas

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \cdot \left[\frac{(20 + 144)}{191.79} \right]^{0.63}} = 0.55$$

Aprēķina izmēra faktoru c_s pēc (9.12) formulas

$$c_s = \frac{(1 + 7 \cdot 0.134 \cdot \sqrt{0.553})}{1 + 7 \cdot 0.134} = 0.88$$

Nākamais tiek apskatīts dinamiskais faktors c_d

$$c_d = \frac{\left[1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2} \right]}{1 + 7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2}} \quad (9.16)$$

kur

R^2 – rezonanses faktors

k_p – pīķa faktors

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_1, x) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) \quad (9.17)$$

kur

δ - pilnais logaritmiskais rimšanas koeficients

S_L – bezdimensiju jaudas spektrālā blīvuma funkcija

R_h, R_b – aerodinamiskās pieeju funkcijas

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot (\eta_h)^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) \quad (9.18)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot (\eta_b)^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) \quad (9.19)$$

kur

$$\eta_h = \frac{(4.6 \cdot h)}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (9.20)$$

$$\eta_b = \frac{(4.6 \cdot b)}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (9.21)$$

Aprēķina bezdimensiju frekvenci ēkai

$$f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{n_{1,x} \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} \quad (9.22)$$

kur

$n_{1,x} = 0.25$ Hz – ēkas pašsvārstību frekvence (aprēķins tiek veikts datorprogrammā).

$v_m(z_s) = 33.9$ m/s – vidējais vēja ātrums augstumā $z_s = 84.6$ m virs zemes

Tad bezdimensiju frekvence ēkai pēc (9.22) formulas būs

$$f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{0.25 \cdot 191.79}{33.9} = 1.41$$

Pēc (9.20), (9.21), (9.18), (9.19) formulām attiecīgi aprēķina:

$$\eta_h = \frac{4.6 \cdot 144}{191.79} \cdot 1.41 = 4.87$$

$$\eta_b = \frac{4.6 \cdot 20}{191.79} \cdot 1.41 = 0.68$$

$$R_h = \frac{1}{4.87} - \frac{1}{2 \cdot 4.87^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 4.87}) = 0.184$$

$$R_b = \frac{1}{0.68} - \frac{1}{2 \cdot 0.68^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 0.62}) = 0.702$$

Aprēķina bezdimensiju jaudas spektrālo blīvuma funkciju

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{6.8 \cdot f_L(z_s, n_{1,x})}{\left[1 + 10.2 \cdot f_L(z_s, n_{1,x})\right]^{\frac{5}{3}}} \quad (9.23)$$

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{6.8 \cdot 1.41}{\left(1 + 10.2 \cdot 1.41\right)^{\frac{5}{3}}} = 0.101$$

Aprēķina pilno logaritmisko rimšanas koeficientu

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (9.24)$$

kur

$\delta_s = 0.1$ – ēkas logaritmiskais rimšanas koeficients. Dzelzsbetona ēkām vienāds ar 0.1.

Pēc [1] Anex F F.2 tabulas.

δ_a - fundamentālās modas aerodinamiskās slāpēšanas rimšanas koeficients.

$\delta_d = 0.04$ – papildus rimšanas koeficients no ēkai uzstādītā noregulētā masas slāpētāja pie slāpētājsistēmas masas un ēkas masu attiecības 0.02. Skat 3.3.6 grafiku.

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_{1,x} \cdot m_e} \quad (9.25)$$

kur

c_f – slodzes koeficients apskatīts 1.9 formulā

m_e – ekvivalentā masa uz garuma vienību

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \phi^2(s) ds}{\int_0^l \phi(s)^2 ds} \quad (9.26)$$

kur

$m(s) = 188711.85 \text{ kg/m}$ – ēkas masa uz garuma vienību

$l = 144 \text{ m}$ – ēkas augstums

$\phi(s)$ - fundamentālā moda.

$$\phi(s) = \left(\frac{s}{h}\right)^\zeta \quad (9.27)$$

kur

$\zeta = 1$ - ēkām ar centrālo kodolu un pa perimetru izliktām kolonnām.

Integrējot pēc ēkas augstuma, izmantojot (9.26) formulu, sanāk:

$$m_e = \frac{\int_0^1 m(s) \cdot \left(\frac{s}{h}\right)^2 ds}{\int_0^1 \left(\frac{s}{h}\right)^2 ds} = m(s) = 188711.85 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Tad pēc (9.25) formulas

$$\delta_a = \frac{1.932 \cdot 1.25 \cdot 20 \cdot 33.9}{2 \cdot 0.25 \cdot 188711.85} = 0.017$$

Un pēc (9.24) formulas

$$\delta = 0.1 + 0.017 + 0.04 = 0.157$$

Tagad var aprēķināt rezonanses faktoru R^2 pēc (9.17) formulas

$$R^2 = \frac{3.14^2}{2 \cdot 0.157} \cdot 0.101 \cdot 0.184 \cdot 0.702 = 0.410$$

Tālāk nosaka pīķa faktoru k_p

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \quad (9.28)$$

kur

v - šķērsfrekvence

$T = 600$ sekundes – vidējais darbības laiks vidējam vēja ātrumam

$$v = n_{1,x} \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \quad (9.29)$$

$$v = 0.25 \cdot \sqrt{\frac{0.41}{0.55 + 0.41}} = 0.163 \text{ Hz}$$

Tad pīķa faktors pēc (9.28) formulas būs

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(0.163 \cdot 600)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \cdot \ln(0.163 \cdot 600)}} = 3.226$$

Aprēķina dinamisko faktoru c_d pēc (9.16) formulas

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot 3.226 \cdot 0.134 \cdot \sqrt{0.55 + 0.41}}{1 + 7 \cdot 0.134 \cdot \sqrt{0.55}} = 1.089$$

Tagad, var aprēķināt koncentrēto vēja slodzi (9.1.3.1. att), kas ir pielikta ēkai vēja virzienā augstumā z_s , ievērtējot dinamisko faktoru pēc (9.1) formulas

$$F_w = 0.88 \cdot 1.089 \cdot 1.932 \cdot (1.55 \cdot 400 + 1.51 \cdot 520 + 1.44 \cdot 520 + 1.35 \cdot 520 + 1.23 \cdot 520 + 1.01 \cdot 400) = 7191 \text{ kN}$$

Nākamo aprēķina paātrinājumu vēja virzienā

$$a_x = \sigma_{a,x}(z) \cdot k_p \quad (9.30)$$

kur

$\sigma_{a,x}(z)$ - paātrinājuma standarta novirze

k_p – pīķa faktors, kuram šķērsfrekvences vietā izmanto ēkas pašsvārstību frekvenci pēc (9.28) formulas

$$\sigma_{a,x}(z) = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot I_V(z_s) \cdot [V_m(z_s)]^2}{m_{1,x}} \cdot R \cdot K_x \cdot \Phi_{1,x}(z) \quad (9.31)$$

kur

$m_{1,x} = 188711.85 \text{ kg/m}$ – ēkas ekvivalentā masa uz metru

Tad pēc (9.31) formulas aprēķinam paātrinājuma standarta novirzi

$$\sigma_{a,x}(z) = \frac{1.932 \cdot 1.25 \cdot 20 \cdot 0.134 \cdot 33.9^2 \cdot \sqrt{0.41} \cdot 1.5 \cdot 0.6}{188711.85} = 0.023 \frac{m}{s^2}$$

Un pēc (9.30) formulas aprēķina paātrinājumu vēja virzienā

$$a_x = 0.023 \cdot 3.355 = 0.077 \frac{m}{s^2} = 7.86 \text{ milli-g}$$

5.2. Vēja slodzju aprēķins perpendikulāri vēja virzienam

Šīm slodzēm un īpaši pārvietojumiem ir jāpievērš īpaši liela uzmanība, jo tās parasti ir dominējošās. Šīs slodzes un pārvietojumi rodas no tā sauktā virpuļplūsmas efekta, kura rezultātā ēkai no sāniem sāk cikliski mainīties spiediens un ēka sāk šūpoties. Aprēķins tiks veikts tikai ēkas pirmai modai, jo tā ir dominējošā. Aprēķins veikts 144m augstai ēkai.

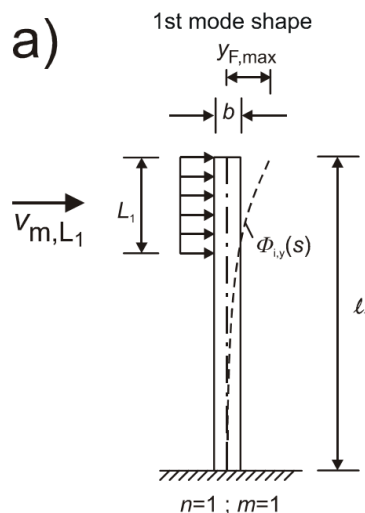
Lai virpuļplūsmas efekts iestātos, ir jāizpildās sekojošiem nosacījumiem:

$$v_{crit,1} < 1.25 \cdot v_{m,L1} \quad (9.32)$$

un $h/b > 6$, $144/20 = 7.2$, kur h un b ir ēkas augstums un platums.

$v_{crit,1}$ – kritiskais vēja ātrums

$v_{m,L1}$ – vidējais vēja ātrums augstumā $l_1 - l_1/2$ kā parādīts 9.1.3.3 att.



9.1.3.3 att. Aprēķina shēma 1. modai

kur

$L_l/b=6$, un $b=20m$, tad $L_j=120m$. Sanāk, ka vēja ātrums jāērķina augstumā

$$l_j-1/2L_l=144-1/2*120=84m$$

$v_m(84)=33.87 m/s$ – skat. (9.7) formulu

$$v_{crit,1} = \frac{b \cdot n_{1,y}}{St} \quad (9.33)$$

kur

$n_{1,y} = 0.25 Hz$ – pašsvārstību frekvence ēkai mazākā stinguma virzienā.

$St = 0.12$ – Strohālais skaitlis. Pēc [1] Annex E, E.1 grafika.

$$v_{crit,1} = \frac{20 \cdot 0.25}{0.12} = 41.67 \frac{m}{s}$$

Tad pārbauda vai var iestāties virpuļplūsmas efekts pēc (9.32) formulas

$$41.67 < 1.25 \cdot 33.87 = 42.34 \left(\frac{m}{s} \right)$$

Tātad virpuļplūsmas efekts ēkai var iestāties un tas ir jāņem vērā. Aprēķina slodzi uz vienu metru, kas darbojās uz ēku un horizontālo pārvietojumu:

$$F_w = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{1,y})^2 \cdot \phi_{1,y}(s) \cdot y_{F,max} \quad (9.34)$$

kur

$m(s) = 188711.85 kg/m$ – ēkas masa uz garuma vienību (aprēķināta ar programmas STRAP palīdzību 3.1 nodaļā)

$\phi_{1,y}(s) = 0 \dots 1$ - modas forma. Skat. (9.27) formulu

$y_{F,max}$ – maksimālais horizontālais pārvietojums pie modas formas vienādas ar 1

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat} \quad (9.35)$$

kur

Sc – skrutona skaitlis

K_w – efektīvā korelācijas garuma faktors

K – modas formas faktors

c_{lat} – sānu slodzes koeficients

$$c_{lat} = \left(3 - 2.4 \cdot \frac{v_{crit,1}}{v_{m,Ll}} \right) \cdot c_{lat,0} \quad (9.36)$$

kur

$c_{lat,0} = 1.1$ – bāzes vērtība skaitlim c_{lat} . Pēc [1] Annex E, E.2 tabulas

$$c_{lat} = \left(3 - 2.4 \cdot \frac{41.67}{33.87} \right) \cdot 1.1 = 0.052$$

Aprēķina efektīvā korelācijas garuma faktoru:

$$K_w = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{L_1}^0 |\phi_{1,y}(s)| ds}{\sum_{j=1}^m \int_{l_1}^0 |\phi_{1,y}(s)| ds} < 0.6 \quad (9.37)$$

kur

$L_1 = 120m$ – korelācijas garums

$l_1 = 144$ – ēkas augstums

$n = 1$ – reģionu skaits kur var iestāties virpuļplūsmas efekts *

$m = 1$ – pretmezglu skaits vibrējošai ēkai *

* Šīs vienības ir vienādas ar 1, jo mēs apskatām tikai 1 un 2 modu.

Nointegrējot pēc ēkas augstuma, no (9.37) formulas, sanāk:

$$K_w = \frac{(L_1)^2 \cdot n}{m \cdot (l_1)^2} = \frac{120^2 \cdot 1}{1 \cdot 144^2} = 0.69 > 0.6 \quad (9.38)$$

Tad $K_w = 0.6$

Aprēķina modas formas faktoru:

$$K = \frac{\sum_{j=1}^m \int_{l_1}^0 |\phi_{1,y}(s)| ds}{4 \cdot \pi \cdot \sum_{j=1}^m \int_{l_1}^0 [\phi_{1,y}(s)]^2 ds} \quad (9.39)$$

Nointegrējot pēc ēkas augstuma, izmantojot (9.39) formulu, sanāk:

$$K = \frac{\sum_{j=1}^1 \int_{144}^0 \left| \frac{s}{144} \right| ds}{4 \cdot \pi \cdot \sum_{j=1}^1 \int_{144}^0 \left(\frac{s}{144} \right)^2 ds} = 0.119$$

Aprēķina skrutona skaitli

$$S_c = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_e}{\rho \cdot b^2} \quad (9.40)$$

$$Sc = \frac{2 \cdot 0.1 \cdot 188711.85}{1.25 \cdot 20^2} = 75.49$$

Aprēķina maksimālo horizontālo pārvietojumu $y_{F,max}$ izmantojot (9.35) formulu

$$y_{F,max} = 20 \cdot \frac{1}{0.12^2} \cdot \frac{1}{75.49} \cdot 0.119 \cdot 0.6 \cdot 0.052 = 0.069m$$

Tagad var noteikt ēkai pielikto slodzi izmantojot (9.34) formulu

$$F_w = \frac{188711.85 \cdot (2 \cdot 3.14 \cdot 0.25)^2 \cdot 1 \cdot 0.069}{1000} = 32.08 \frac{kN}{m}$$

Koncentrētā slodze tad būs $F = F_w \cdot L_1 = 32.08 \cdot 120 = 3849.6kN$

Lai iegūtu paātrinājumus, ir nepieciešams atvasināt divas reizes pārvietojuma vienādojumu

$$a = \left[\frac{d^2}{dt^2} (y_{F,max} \cdot \sin(n_{1,y} \cdot 2 \cdot \pi \cdot t)) \right] \quad (9.41)$$

kur t ir laiks

Atvasinot šo vienādojumu mēs iegūstam

$$a = (n_{1,y} \cdot 2 \cdot \pi)^2 \cdot y_{F,max} \quad (9.42)$$

$$a = (0.25 \cdot 2 \cdot 3.14)^2 \cdot 0.069 = 0.17 \frac{m}{s^2} = 17.35 \text{milli} - g$$

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. J. Brauns. Stiegrota betons konstrukcijas. – Jelgava: LLU, 2007. – 173lpp
2. T. Cajs, A. Mandrikovs. Būvkonstrukcijas 2. sējums. – Rīga: Zvaigzne, 1991. – 464 lpp
3. F. Bulavs, I. Radiņš. Būvmehānikas ievadkurss. – Rīga: RTU, 2006. – 205 lpp
4. F. Bulavs, I. Kiščenko, I. Radiņš. Skaitlisko aprēķinu realizācijas metodes. – Rīga: RTU, 2007. – 117lpp
5. A. Sprince. Metodiskie norādījumi diplomprojekta izstrādāšanai un aizstāvēšanai. – Rīga: RTU, 2010. – 22 lpp
6. H. Guļevskis. Norādījumi studiju noslēguma darbu noformēšanai. – Rīga: RTU, 2001. – 13lpp
7. R. Ozoliņš. Uz ēkām iedarbojošos slodžu aprēķins saskaņā ar EN. – Rīga: RTU, 2009. – 42lpp
8. L. Pakrastiņš, A. Sprince. Stiegrbetona konstrukciju aprēķina piemēri. – Rīga: RTU, 2010. – 32lpp
9. Fizika I lekciju konspekts / I. Klemonoks, M. Jansone, I. Klincāre, J. Blūms, A. Blūma, M. Knite. – Rīga: RTU, 2006. – 200lpp
10. Bill Mosley, John Bungey, Ray Hulse. Reinforced Concrete Design. – London: Palgrave, 2007. – 408lpp
11. Chanakya Arya. Design of structural elements. – London: Spon Press, 2009. – 497lpp
12. Hi Sun Choi. Super Tall Building Design Approach. – New York: Thornton Tomasetti, 2009. – 55lpp
13. Tony Threlfall. Designed and Detailed Eurocode 2 – London: Concrete Society, 2009. – 48lpp
14. Mir M. Ali and Kyoung Sun Monn. Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. – Sydney: University of Sydney, 2007. – 223 lpp
15. S. Narayanan, H. Goodchild. Concise Eurocode 2. – London: The Concrete Centre, 2006. – 108 lpp
16. How to design concrete structures using Eurocode 2 / J. Bond, O. Brooker, J. Harris, T. Harrison, M. Moss. - London: The Concrete Centre, 2006. – 104 lpp
17. Investigations into tuning a vibration absorber for a single degree of freedom system. Paul Horan, Kevin Henry, Jason Kane, Richard Doherty. – Dublin: DIT, 2008. – 28 lpp

18. Wind Loading Code for Building Design in Thailand. Virote Boonyapinyo, Panitan Lukkanaprasit, Pennung Warnitchai, Phoosnak Pheinsusom. – Thailand: Thammasat University, 2008. – 10-18lpp
19. Christian Ucke, Hans-Joackim Schlichting. Oscillating Dolls and Skyscrapers. // Physik. – Nr. 39, 2008. – 139-141lpp
20. Ф. Рафайнер. Высотные здания Объемно-планировочные и конструктивные решения. – Москва: Стройиздатб 1982. – 178 lpp
21. Tuned Mass Damper Systems. - <http://cobweb.ecn.purdue.edu>. – Resurss aprakstīts 2008. gada 4. martā
22. LBN 201-07 - Būvju ugunsdrošība. www.likumi.lv. – Resurss aprakstīts 2007. gada 11. decembrī
23. LBN 003-01 - Būvklimatoloģija. www.likumi.lv. – Resurss aprakstīts 2001. gada 23. augustā
24. LBN 002-01 - Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika. www.likumi.lv. – Resurss aprakstīts 2001. gada 13. novembrī
25. LBN 016-03 - Būvakustika. www.likumi.lv. – Resurss aprakstīts 2004. gada 29 aprīlī.
26. LBN 211-98 - Daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamie nami. www.likumi.lv. – Resurss aprakstīts 1998. gada 20. oktobrī
27. EN 1991-1-4:2005(E) - Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions. <http://www.scribd.com>.
28. EN 1992-1-1:2004(E) - Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. <http://www.scribd.com>
29. EN 1992-1-2:2004 - Design of concrete structures – Part 1-2: General rules. Structural fire design <http://www.scribd.com>.
30. EN 1990:2002(E) - Basis of structural design <http://www.scribd.com>.