

**Adaptīvo daudzfunkcionālo materiālu un struktūru
dinamikas modelēšana**

Jevgenijs Barkanovs

- **Ievads**
- **Nesagraujošas metodes kompozītmateriāla īpašību noteikšanai**
- **Galīgo elementu modelēšana**
- **Dinamikas analīze**
- **Izstrādāto metožu pielietojums reālu konstrukciju risināšanai**
- **Konferences**
- **Publikācijas**
- **Pateicība**

Projekta īss apraksts

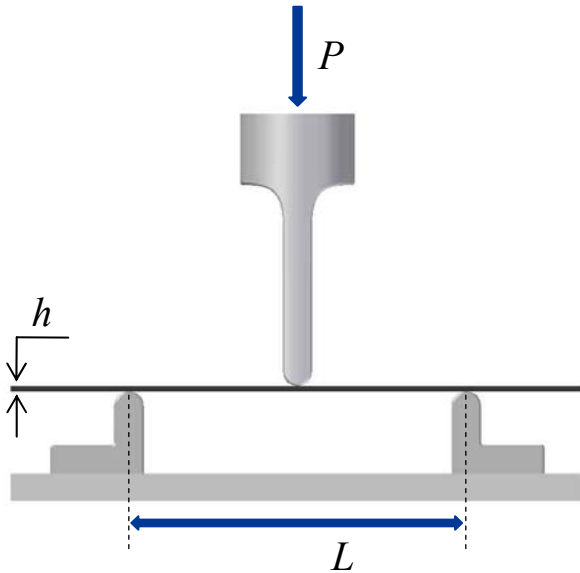


Vispārējs sadarbības projekta **MATERA** mērķis ir vieglo konstrukciju svārstību kontroles tehnoloģiju izstrāde. Piedāvātā tehnoloģija paredz konstrukciju nelabvēlīgo svārstību samazināšanu, izmantojot aktīvos un/vai pasīvos kontroles procesus. Projekta ietvaros pētītie kompozītmateriāli, pēc kuriem pieprasījums, pateicoties to būtiskajām priekšrocībām un nozīmīgajai lomai dažādās rūpniecības sfērās (kosmosa un lidaparātu būve, jūras un sauszemes transporta būve, būvniecība), ir būtiski audzis gan pasaulē, gan Latvijā.

- Programma:** MATERA
Projekta ilgums: 01.01.2009–31.12.2011
Projekta budžets: 942000 EUR
Projekta partneri: Centre de Recherche Public Henri Tudor
Euro-Composites S. A.
Saint-Gobain Abrasives
Projekta etaps: 1. gads

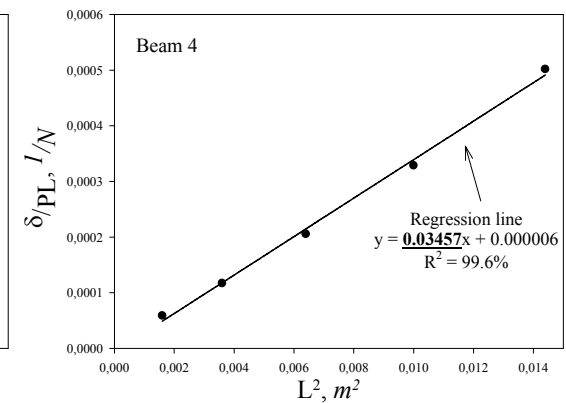
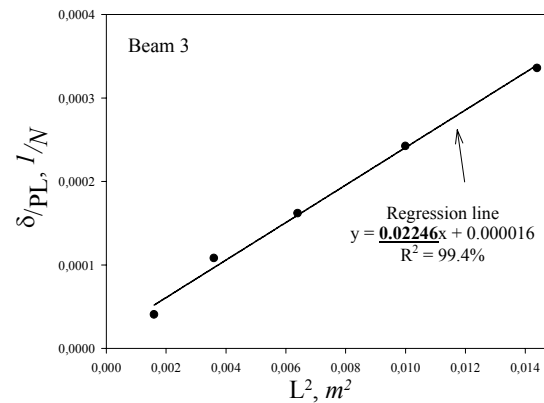
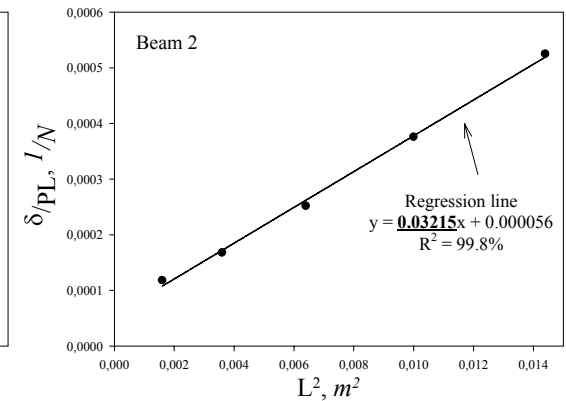
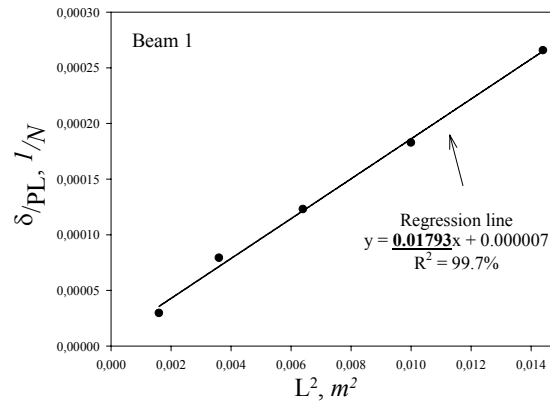
Projekta pirmā gada ietvaros tika pētīta **vēlamā nesagraujošā metode kompozītmateriāla īpašību noteikšanai**. Šim nolūkam, izmantojot esošas laboratorijas iekārtas, tika veikti **statikas eksperimenti** - trīs punktu lieces pārbaudes un arī **dinamikas eksperimenti** - impulsa svārstību pārbaudes. Sekojoši slāņainu kompozītmateriāla plātņu elastīgo īpašību noteikšanai tika izstrādāta **inversa procedūra**, kas balstīta uz eksperimentu plānošanas un atbildes virsmas metodēm. Balstoties uz identifikācijas rezultātiem, ir apskatītas šo **metožu priekšrocības un trūkumi**, kā arī dotas **rekomendācijas inženieriem** saistībā ar apskatīto metožu pielietošanu moderno kompozītmateriālu īpašību noteikšanai.

Statikas eksperimenti: trīs punktu liece



Elastības modulis:

$$E = \frac{1}{4bh^3m}$$



*ASTM Standard D790 – 07e1. Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

Elastības modulis:

$$E = 0.9465 \frac{\rho f_b^2 l^4}{h^2} T_1$$

- ρ - blīvums
 f_b - lieces pašsvārstību frekvence
 l - sijas garums
 h - sijas kopējais augstums
 T_1 - korekcijas koeficients
 $T_1 = [1.0 + 6.585(h/L)^2]$

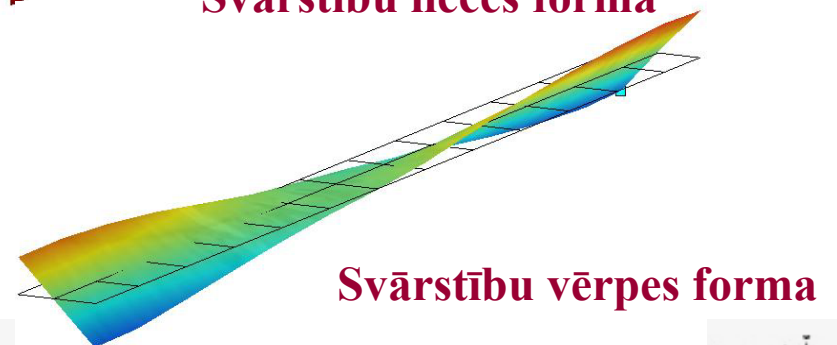
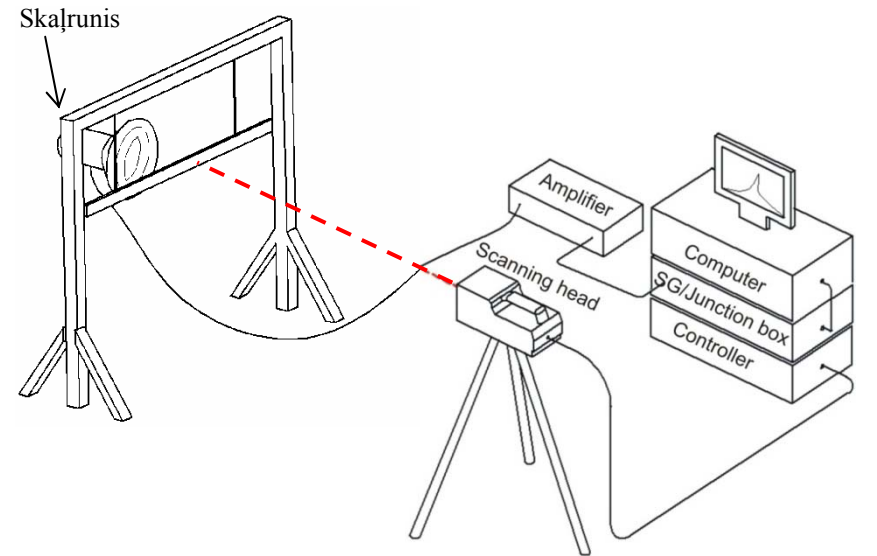
Bīdes modulis plaknē:

$$G = 4\rho f_t^2 l^2 R$$

- R - korekcijas koeficients

$$R = \left[\frac{1 + \left(\frac{b}{h}\right)^2}{4 - 2.521 \frac{h}{b} \left(1 - \frac{1.991}{e^{\frac{\pi b}{h}} + 1}\right)} \right] \left[1 + \frac{0.00851 n^2 b^2}{L^2} \right] - 0.060 \left(\frac{nb}{L}\right)^2 \left(\frac{b}{h} - 1\right)^2$$

*ASTM Standard E 1876 – 07. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration.



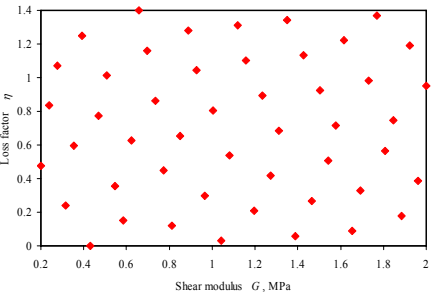
Inversa procedūra



$$\begin{aligned}
 &E_x^*(\omega), E_y^*(\omega) \\
 &G_{xy}^*(\omega), G_{xz}^*(\omega) \\
 &G_{yz}^*(\omega)
 \end{aligned}$$

Eksperimenta dati

$$\begin{aligned}
 &c=93.90\% \\
 &f_1=18.6-1.28*z2+1.13/z1*z2+0.0329/z2^2 \\
 &\quad +0.592*z1*z2+0.000742/z1^3-0.923/z1 \\
 &\text{kur} \quad z1=0.0+0.168*E \\
 &\quad \quad z2=0.5+0.138*E''
 \end{aligned}$$



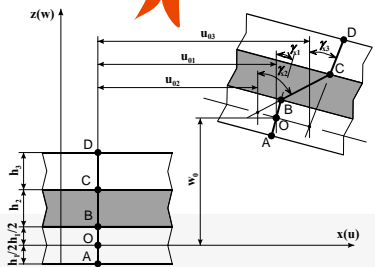
Eksperimenta plāns

GEM aprēķins

**Atbildes virsmas
aprosimācijas**

**Minimizācijas
funkcionālis**

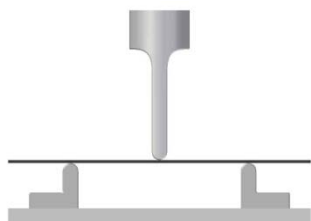
**Identificētās
īpašības**



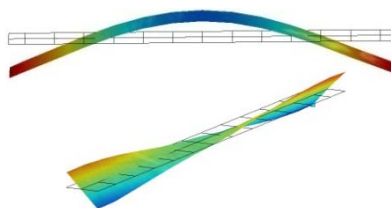
$$\Phi_i(\mathbf{X}) = \frac{(f_i^{\text{exp}} - f_i^{\text{FEM}})^2}{(f_i^{\text{exp}})^2} + \frac{(\eta_i^{\text{exp}} - \eta_i^{\text{FEM}})^2}{(\eta_i^{\text{exp}})^2} \Rightarrow \min$$

Noteiktās kompozītmateriāla īpašības izmantojot dažādas nesagraujošas metodes

Test method



Three-point-bending



Impulse excitation

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^I w_i \frac{(f_i^{EXP} - f_i^{FEM}(x))^2}{(f_i^{EXP})^2} \Rightarrow \min$$

$$\mathbf{x}_1 = [E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}] - \text{Plate 1}$$

$$\mathbf{x}_2 = [E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}] - \text{Plate 2}$$

Inverse technique

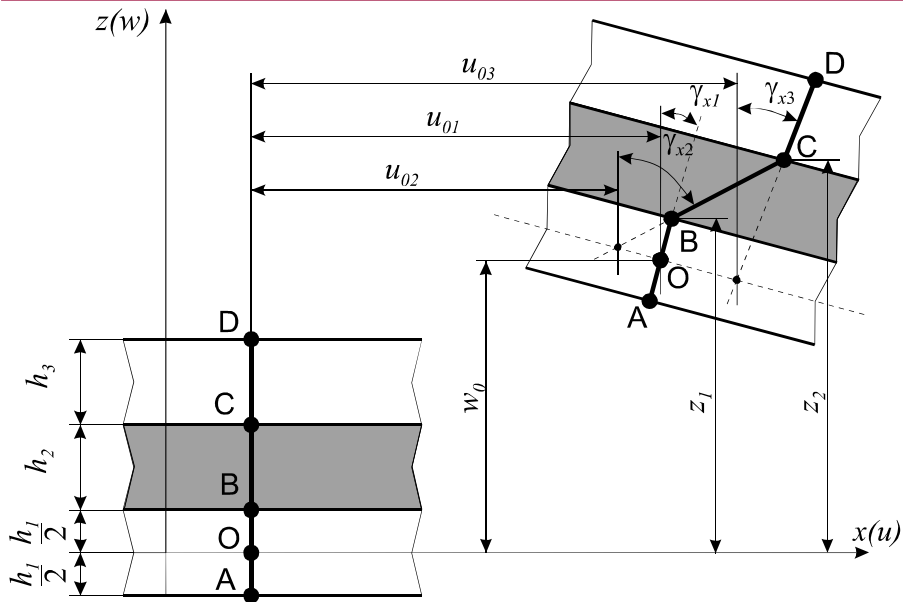
Plate 1

E_1 (GPa)	67.20	66.25	65.97
E_2 (GPa)	37.50	35.90	36.80
G_{12} (GPa)	-	4.79	4.46
ν_{12}	-	-	0.28

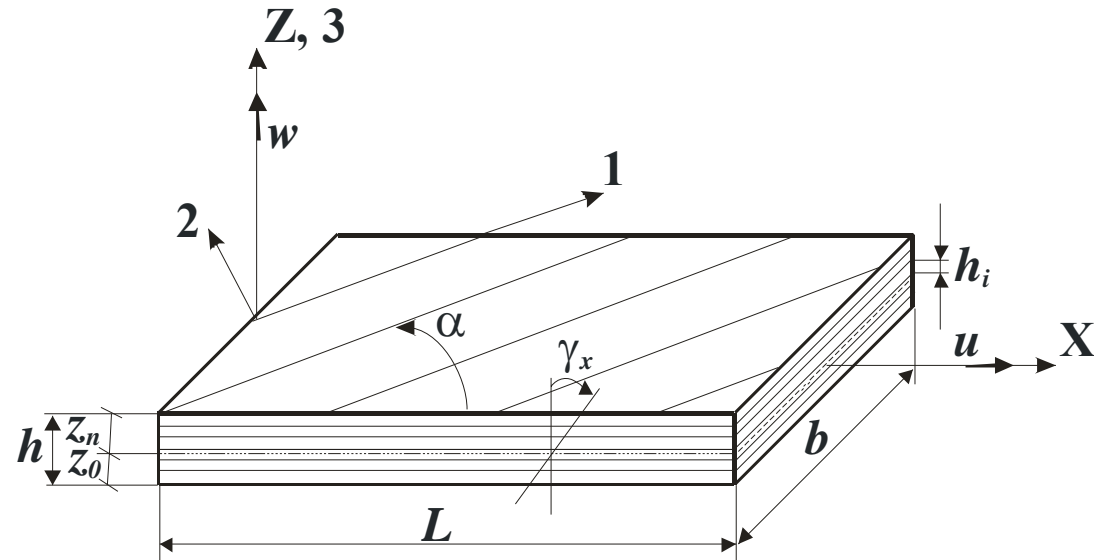
Plate 2

E_1 (GPa)	53.70	52.60	51.70
E_2 (GPa)	34.90	34.10	33.00
G_{12} (GPa)	-	5.77	6.08
ν_{12}	-	-	0.315

Galīgo elementu modeļi



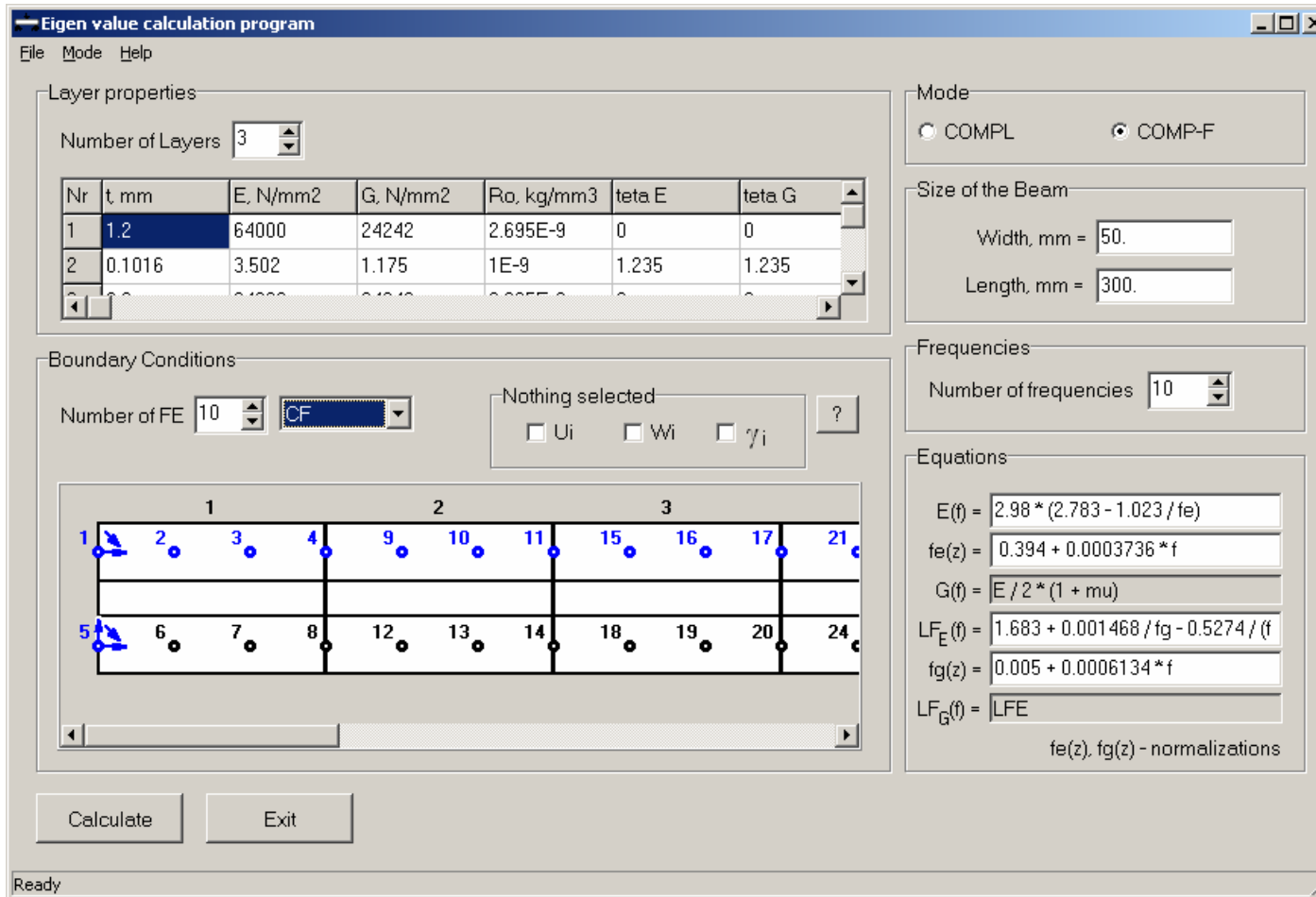
„Sendviča” tipa galīgo elementu modelis



Daudzslāņu galīgo elementu modelis

Viskoelastīgu daudzslāņu un „sendviča” tipa siju, plātņu un čaulu galīgo elementu modeļi tika izstrādāti precīzu dinamisko parametru aprēķiniem. Galīgo elementu modelis ir veidots, balstoties uz pirmās kārtas bīdes deformāciju teoriju, ievērtējot pagriezienu leņķi ap normāli. „Sendviča” tipa kompozītmateriāliem šī hipotēze tiek lietota katram atsevišķam slānim un šis gadījums atbilst lauztās līnijas modelim. Savukārt, slāņainu kompozītmateriālu gadījumā šī hipotēze tiek izmantota visiem slāņiem kopā. Šie galīgie elementi ļauj modelēt konstrukcijas, kurām raksturīga liela elastības moduļa attiecība starp stingriem un mīkstajiem slāņiem, un analizēt konstrukcijas ar svārstību dzēsošu apšuvumu un ar augstām svārstību dzišanas īpašībām.

Grafiskais interfeiss



Eigen value calculation program

File Mode Help

Layer properties

Number of Layers 3

Nr	t, mm	E, N/mm ²	G, N/mm ²	Po, kg/mm ³	teta E	teta G
1	1.2	64000	24242	2.695E-9	0	0
2	0.1016	3.502	1.175	1E-9	1.235	1.235

Boundary Conditions

Number of FE 10 CF

Nothing selected

U_i W_i γ_i ?

1 2 3 4 9 10 11 15 16 17 21

5 6 7 8 12 13 14 18 19 20 24

Calculate Exit

Ready

Mode

COMPL COMP-F

Size of the Beam

Width, mm = 50.

Length, mm = 300.

Frequencies

Number of frequencies 10

Equations

$E(f) = 2.98 * (2.783 - 1.023 / fe)$

$fe(z) = 0.394 + 0.0003736 * f$

$G(f) = E / 2 * (1 + mu)$

$LF_E(f) = 1.683 + 0.001468 / fg - 0.5274 / (f$

$fg(z) = 0.005 + 0.0006134 * f$

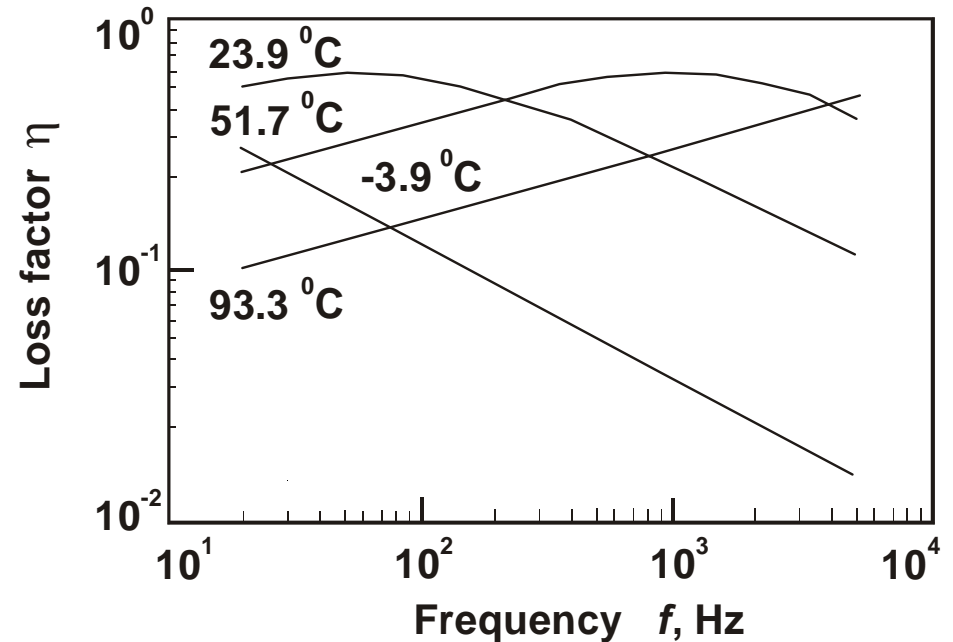
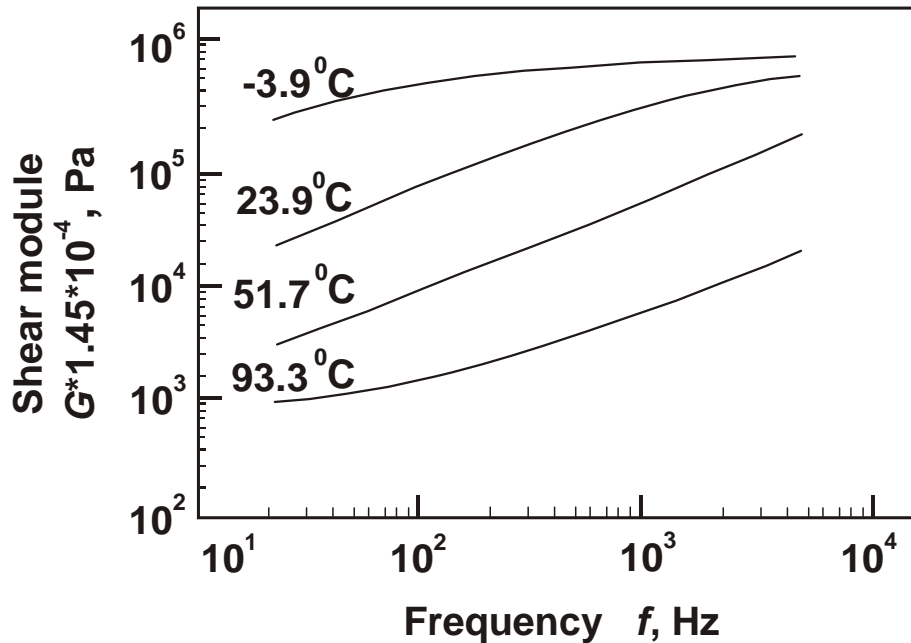
$LF_G(f) = LFE$

fe(z), fg(z) - normalizations

Visas programmas ir rakstītas **GFORTAN** programmēšanas valodā. Nepieredzējušu lietotāju vajadzībām ir izstrādāts lietotājam **draudzīgs grafiskais interfeiss**.

Viskoelastīgas svārstību slāpēšanas modelis

Svārstību slāpējoša materiāla LD-400 pielietošana svārstību slāpējošam apvalkam



Pētāmās konstrukcijas ir izgatavotas no svārstību frekvenču un temperatūras atkarīgiem viskoelastīgiem materiāliem. Kompleksa moduļa koncepcija tiks izmantota, lai iegūtu no frekvences atkarīgu uzkrājuma un zuduma moduļus:

$$\sigma_0 = E^*(\omega)\varepsilon_0 = E(\omega)[1 + i\eta(\omega)]\varepsilon_0 \quad \eta(\omega) = \frac{E''(\omega)}{E(\omega)}$$

Nelineāras svārstību uzvedības aprēķinu metodes (pašsvārstību frekvenču noteikšana, frekvenču iespaids analīze un dinamiskās slodzes iespaids analīze) tika izstrādātas daudzslāņu un „sendviča” tipa konstrukciju dinamiskās analīzei. Konstrukciju dinamiskie raksturlielumi (pašsvārstību frekvences un atbilstošie svārstību dzišanas koeficienti) tika noteikti, izmantojot enerģijas metodi, komplekso īpašvērtību metodi, kā arī frekvenču atbildes funkcijas rezonanses pīķus.

Dinamikas analīze:

- Pašsvārstību analīze
 - Komplekso īpašvērtību metode
 - Enerģijas metode
- Frekvenču iespaids analīze
- Dinamiskās slodzes iespaids analīze

$$[\mathbf{K}^*(\omega) - \omega^{*2}\mathbf{M}]\bar{\mathbf{X}}^* = 0$$

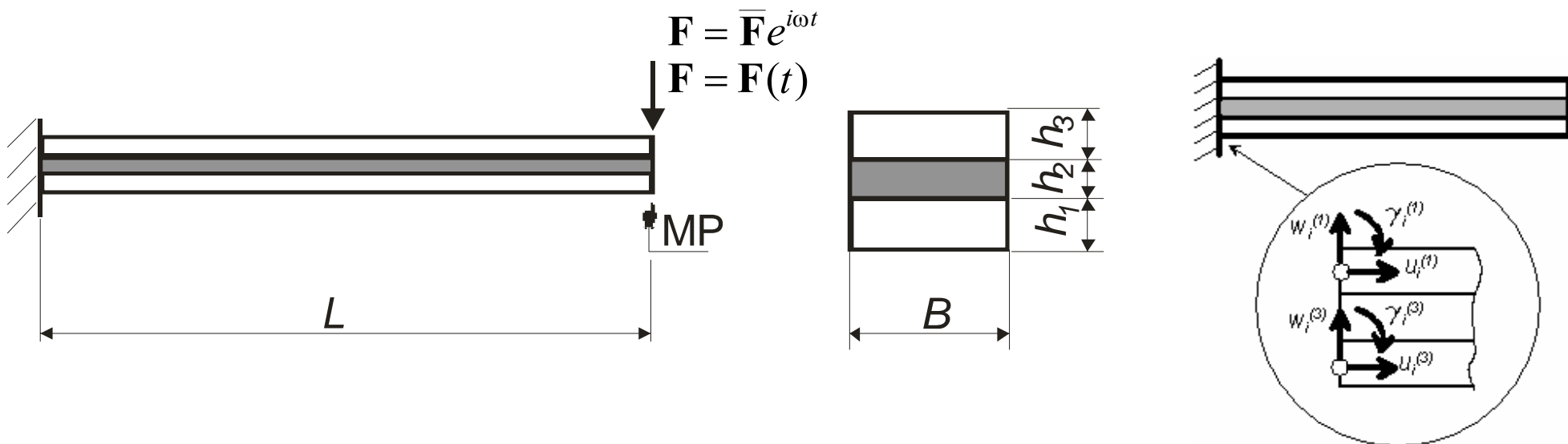
$$[\mathbf{K}(\omega) - \omega^2\mathbf{M}]\bar{\mathbf{X}} = 0$$

$$[\mathbf{K}^*(\omega) - \omega^2\mathbf{M}]\bar{\mathbf{X}}^* = \bar{\mathbf{F}}$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}^* + \mathbf{K}^*(\omega)\mathbf{X}^* = \mathbf{F}(t)$$

kur $\mathbf{K}^*(\omega) = \mathbf{K}(\omega) + i\mathbf{K}''(\omega)$

“Sendviča” tipa panelis



$$u_i^{(1)} = w_i^{(1)} = \gamma_i^{(1)} = 0$$

$$u_i^{(2)} = w_i^{(2)} = \gamma_i^{(2)} = 0$$

Ģeometriskie parametri :

$$h_1 = 0.0012 \text{ m}$$

$$h_2 = 0.0001016 \text{ m}$$

$$h_3 = 0.0008 \text{ m}$$

$$b = 0.05 \text{ m}$$

$$L = 0.3 \text{ m}$$

Materiāli:

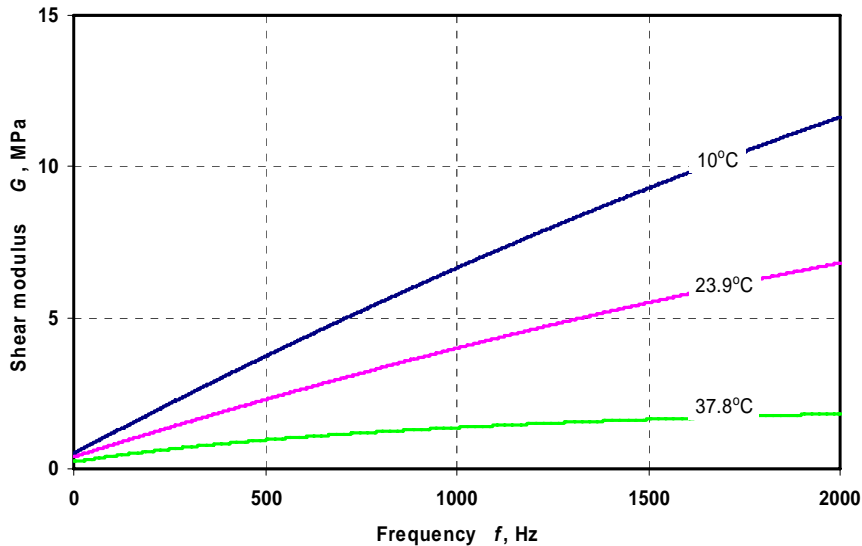
• alumīnijs 2024 T6

$$E = 64 \text{ GPa}, \nu = 0.32, \rho = 2695 \cdot \text{Ns}^2/\text{m}^4$$

• 3M viskoelastīgs svārstību slāpējošs polimērs ISD-112

$$\nu = 0.49, \rho = 1000 \cdot \text{Ns}^2/\text{m}^4$$

Viskoelastīgās materiāla īpašības: 3M ISD-112



Temperatūra=10°C

$$G = 0.4418 + 13.52z - 2.327z^2 \text{ MPa,}$$

where $z = 0.005 + 0.0004975f$;

$$\eta_G = \eta_E = 1.383 - 0.6038z - 0.8022 \cdot 10^{-5} / z^4,$$

where $z = 0.05 + 0.000475f$.

Temperatūra=23.9°C

$$G = 0.3559 + 8.032z - 1.578z^2 \text{ MPa,}$$

where $z = 0.005 + 0.0004975f$;

$$\eta_G = \eta_E = 2.258 - 0.575 / z^{0.25} - 0.6843z^{0.5},$$

where $z = 0.005 + 0.0004975f$.

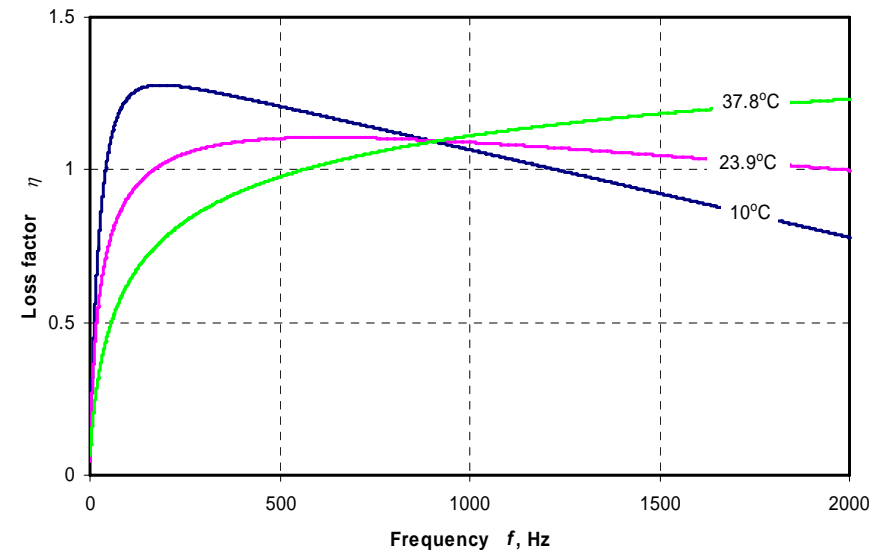
Temperatūra=37.8°C

$$G = 2.884 - 1.06 / z \text{ MPa,}$$

where $z = 0.4 + 0.0003f$;

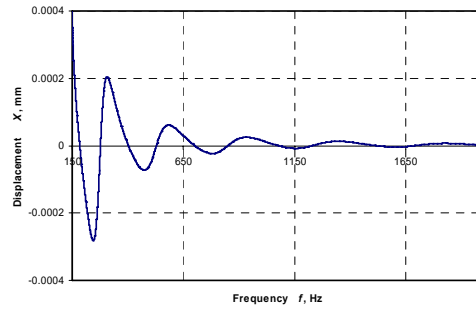
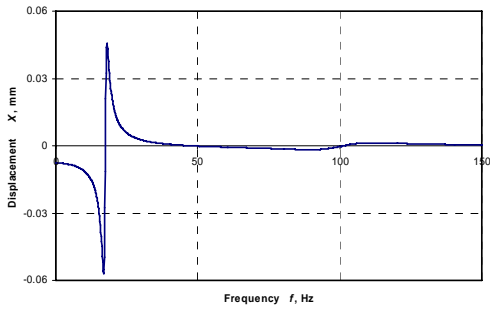
$$\eta_G = \eta_E = 1.977 - 0.8308 / z^{0.25} + 0.08588 / z^{0.5},$$

where $z = 0.005 + 0.0004975f$.

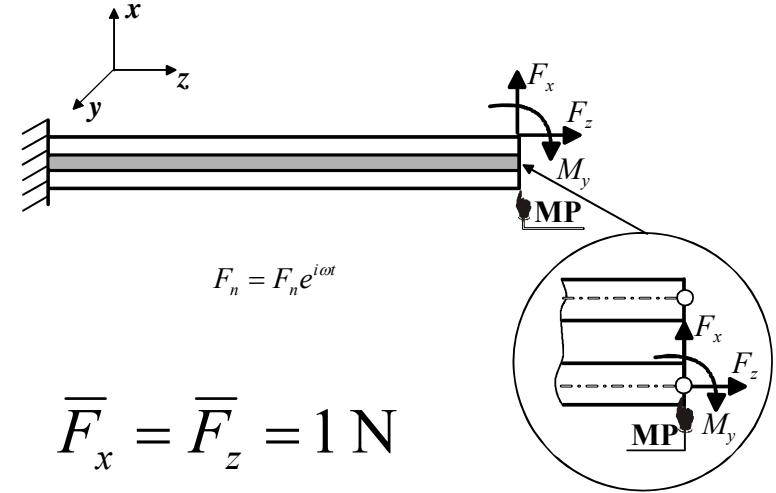


Nashif A. D., Johnes D. I. G. and Henderson J. P. *Vibration Damping*. - John Wiley & Sons: New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1985.

Frekvenču iespaida analīze



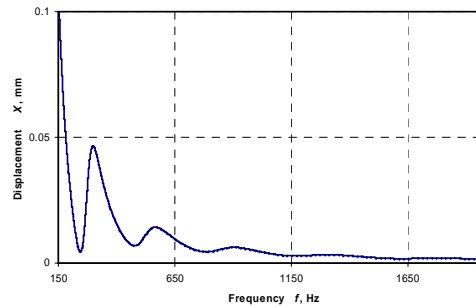
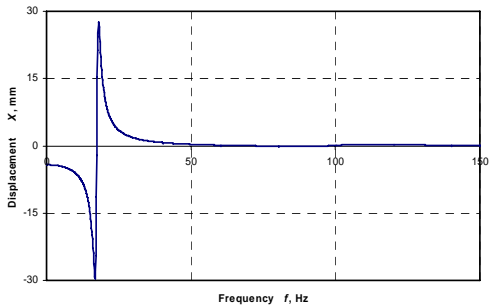
F_z^*



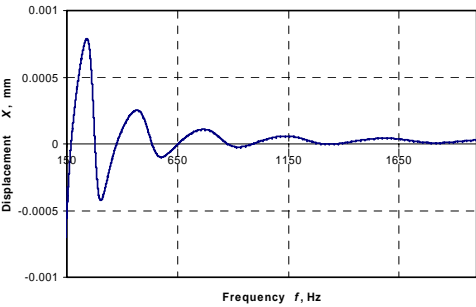
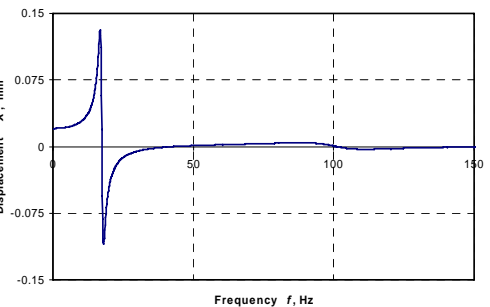
$$\bar{F}_x = \bar{F}_z = 1 \text{ N}$$

$$\bar{M}_y = 1 \text{ Nmm}$$

$$\Delta f = 0.1 \text{ Hz}$$



F_x



M_y^{**}

Transversālie pārvietojumi frekvenču apgabalā pie temperatūras 10°C

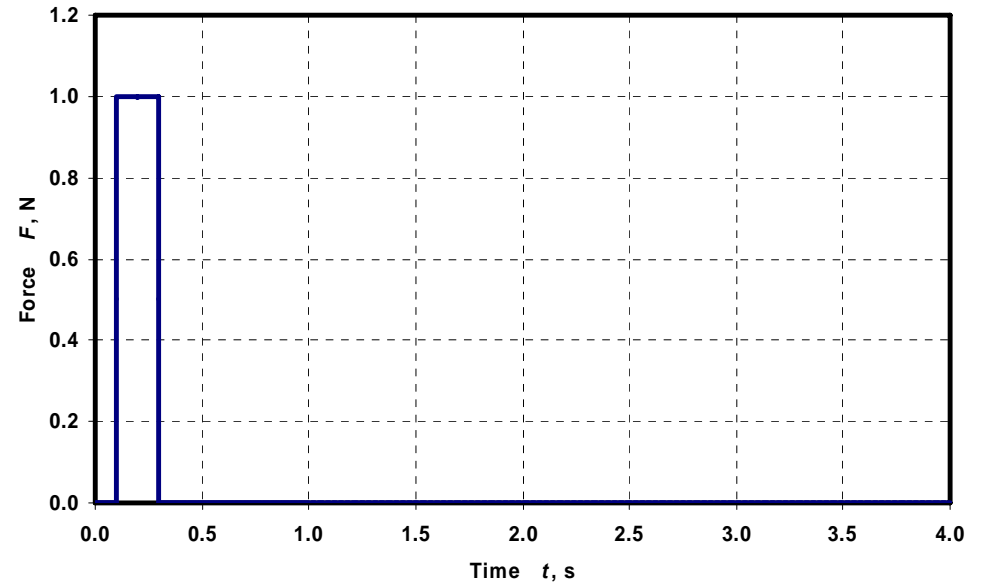
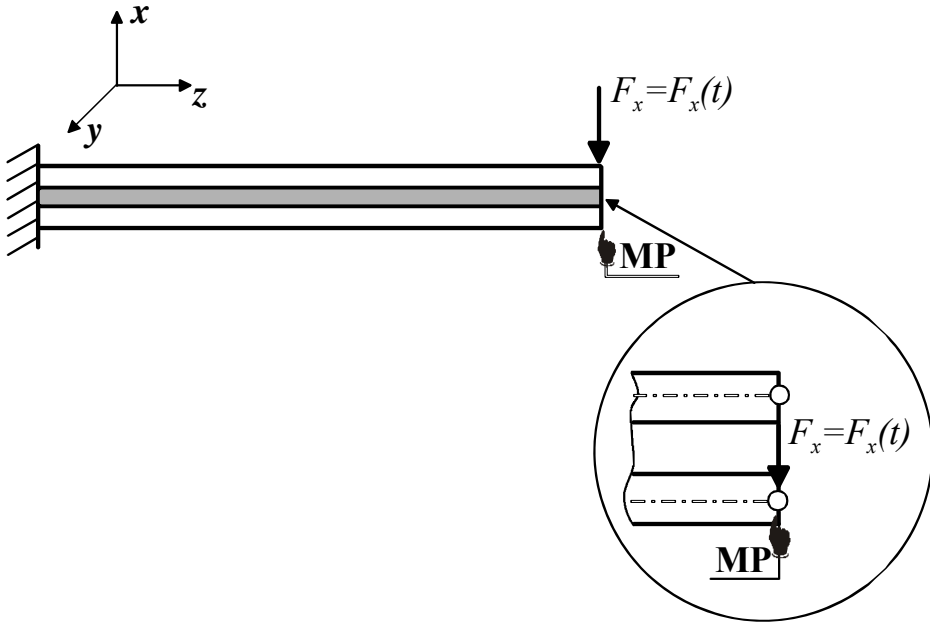
Dinamiskas īpašības

10°C						
Mode n	f_n , Hz			η_n		
	CEM	EM	FRA	CEM	EM	FRA
1	17	17	17	0.07	0.09	0.07
2	100	92	98	0.21	0.33	0.21
3	272	249	277**	0.24	0.38	0.23**
4	519	476	528*	0.26	0.38	0.20*
5	839	775	847*	0.26	0.36	0.18*
6	1223	1143	1229*	0.25	0.33	0.15*
7	1665	1578	1691*	0.24	0.29	0.13*

23.9°C						
Mode n	f_n , Hz			η_n		
	CEM	EM	FRA	CEM	EM	FRA
1	17	17	17	0.07	0.08	0.06
2	91	87	89	0.21	0.26	0.21
3	245	230	249**	0.26	0.32	0.25**
4	466	436	472*	0.28	0.35	0.21*
5	754	706	755*	0.29	0.35	0.18*
6	1105	1039	1081*	0.29	0.34	0.16*
7	1513	1432	-	0.28	0.33	-
8	1975	1882	-	0.27	0.31	-

37.8°C						
Mode n	f_n , Hz			η_n		
	CEM	EM	FRA	CEM	EM	FRA
1	16	16	16	0.05	0.06	0.06
2	80	79	79	0.16	0.17	0.16
3	210	205	210**	0.21	0.22	0.21**
4	391	381	393**	0.22	0.24	0.19**
5	625	610	623*	0.22	0.23	0.16*
6	908	890	899*	0.22	0.23	0.14*
7	1241	1219	1242*	0.21	0.21	0.12*
8	1622	1599	-	0.19	0.20	-

Dinamiskās slodzes iespaids analīze

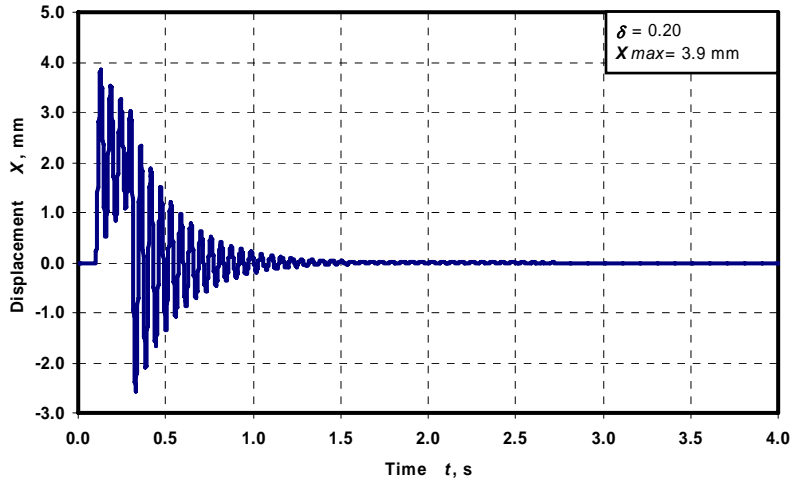


Pieliktais spēks

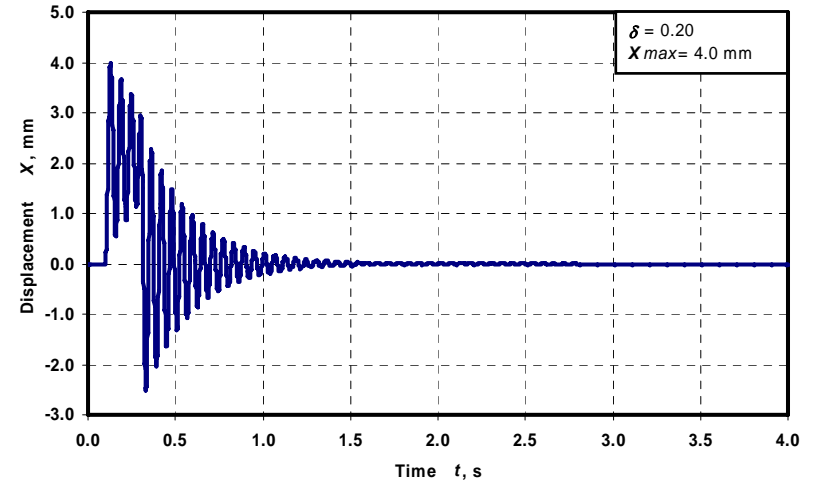
$$N=8000, \Delta t=0.0005 \text{ s}, \Delta\omega = 0.5\pi \text{ rad/s}$$

Dziestošās svārstības

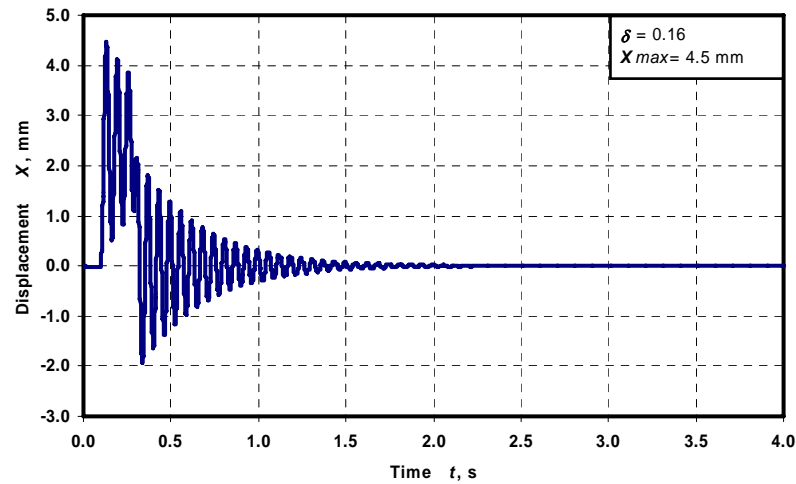
10°C



23.9°C



37.8°C



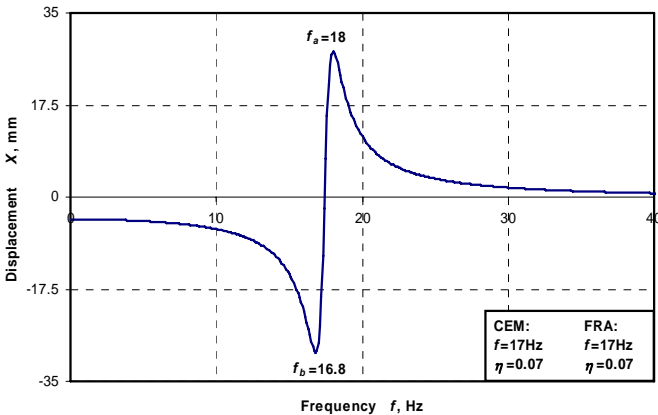
Ar dažādām metodēm iegūto dinamisko īpašību salīdzinājums

Viena un tā paša svārstību dzišanas modeļa izmantošana dažādās metodēs ļauj izvērtēt to efektivitāti stipri svārstību slāpējošu konstrukciju dinamikas aprēķinos:

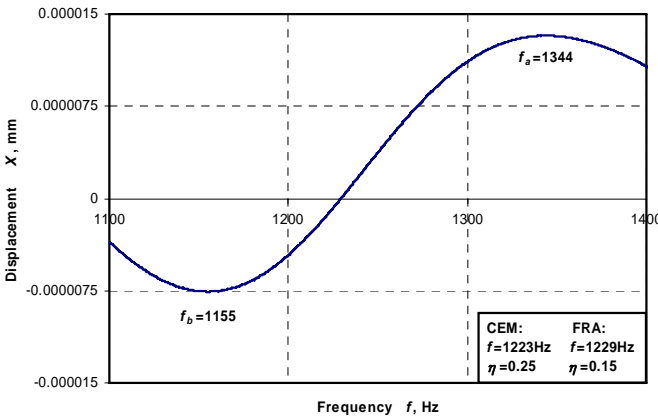
➤ Pašsvārstību frekvences, kas iegūtas ar enerģijas metodi vienmēr ir zemākas kā attiecīgās frekvences, kas iegūtas izmantojot komplekso īpašvērtību metodi, savukārt, svārstību dzišanas koeficienti vienmēr ir augstāki.

➤ Pašsvārstību frekvences, kas iegūtas izmantojot frekvenču iespaida analīzi, lielākoties ir vienādas vai augstākās kā attiecīgās frekvences, kas iegūtas, izmantojot komplekso īpašvērtību metodi, savukārt, svārstību dzišanas koeficienti vienmēr ir vienādi vai zemāki. Jāatzīmē, ka ļoti laba sakritība ir vērojama tikai pašsvārstību frekvenču gadījumā. Konkrētas frekvences svārstību dzišanas koeficients, izskaitļots no frekvenču pīķiem, kas atrodas tālu viens no otra, kā redzams dotajā attēlā, ir ievērojami zemāks kā tas, kas iegūts ar komplekso īpašvērtību metodi.

➤ Dinamisko īpašību vērtības, kas iegūtas ar komplekso īpašvērtību metodi, parasti ir pa vidu starp vērtībām, kas iegūtas izmantojot enerģijas metodi un frekvenču iespaida analīzi.



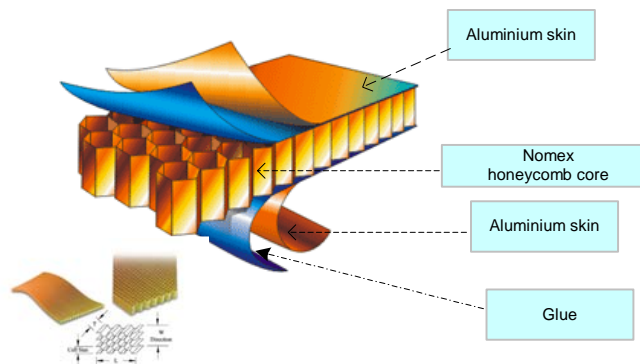
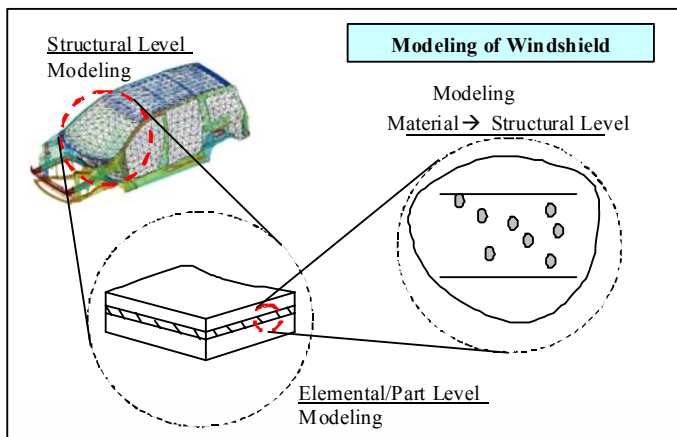
1. frekvence



6. frekvence

Projekta pēdējā gadā izstrādāto metožu pielietojums tiks demonstrēts ar sekojošu liela izmēra konstrukciju aprēķiniem:

- Vējstikla dinamikas analīze
- “Sendviča” tipa kompozītmateriāla ar Nomex šūnu slāni dinamikas analīze
- Mašīnu vibrāciju kontrole
- Griešanas ripu “klusie” tērauda centri
- Zemu svārstību griešanas mašīnas



- 1) 20th Annual International SICOMP Conference,
Pitea, Sweden,
8-9 June 2009.
- 2) 16th International Congress on Sound and Vibration,
Krakow, Poland,
5-9 July 2009.
- 3) 17th International Conference on Composite Materials,
Edinburgh, Scotland,
27-31 July, 2009.
- 4) 12th International Conference on Civil, Structural and Environmental
Engineering Computing,
Funchal, Madeira, Portugal,
1-4 September 2009.

1. Barkanov E. (2009): Dynamic Analysis of Composite Structures Made from Viscoelastic Frequency and Temperature Dependent Materials. In: Proceedings of the 12th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Eds. Topping B. H. V., Costa Neves L. F. and Barros R. C. (Civil-Comp Press: Stirlingshire, Scotland), paper 198, **13 P.**, ISBN 978-1-905088-30-0 Book, ISBN 978-1-905088-31-7 CD-ROM, ISBN 978-1-905088-32-4 Set.
2. Wesolowski M., Barkanov E., Rucevskis S., Chate A. and La Delfa G. (2009): Characterisation of Elastic Properties of Laminated Composites by Non-Destructive Techniques. In: Proceedings of the 17th International Conference on Composite Materials (Edinburgh, United Kingdom), paper F5:12, **10 P.**
3. Wesolowski M. and Barkanov E. (2009): Errors of Experimental and Numerical Models in Vibration Analysis of Structures. In: Proceedings of the 16th International Congress on Sound and Vibration (Krakow, Poland), ISBN 978-83-60716-71-7, paper 165, **8 P.**

Pateicība

Doto darbu atbalsta Latvijas Zinātnes Padome MATERA programmas projekta ADYMA “Adaptīvo daudzfunkcionālo materiālu un struktūru dinamikas modelēšana” ietvaros.