

Predmet:

Naziv: Eksperimentalna modalna analiza (EMAM)

Študijsko leto: 2023/2024

---

Izvajalci:

Predavatelj: izr. prof. dr. Gregor Čepon

Termin predavanj: Sreda 12:00 - 14:00

Govorilne ure: Petek 11:00 - 12:00 oz. po dogovoru  
(kabinet DS-P6)

Asistent: asist. dr. Domen Očepek

Termini vaj: Ponedeljek 10:00 - 12:00

Ponedeljek 12:00 - 14:00

Sreda 8:00 - 10:00

Sreda 10:00 - 12:00

Govorilne ure: Ponedeljek 9:00 - 10:00 oz. po dogovoru  
(kabinet DS-P6)

---

## 1 Opravljanje izpita

**Ocena teorije:**

a) Študent oceno pridobi s sprotnim delom. S sprotnim delom lahko študent predmet opravlja le enkrat, pri čemer mora imeti predmet v danem študijskem letu vpisan v sistemu VIS. Oceno predavanj lahko študent pridobi preko dveh kolokvijev, ki bosta izvedena tekom semestra:

Kolokvij	Utež	Min. uspešnost
K1	50%	> 40%
K2	50%	> 40%

b) Študent oceno pridobi na izpitu:

Izpit	Utež	Min. uspešnost
I1	100%	> 50%

**Ocena vaj:**

Za pozitivno ocenjene vaje se zahteva samostojna izdelava dveh seminarjev:

- Seminar 1 (S1): Eksperimentalna modalna analiza; identifikacija modalnih parametrov na akademski in realni strukturi.
- Seminar 2 (S2): Obratovalne deformacijske oblike in analiza prenosnih poti na realni strukturi.

Pogoji za pridobitev ocene so sledeči:

Seminar	Utež	Min. uspešnost
S1	60%	> 50%
S2	40%	> 50%

pri čemer pozitivno opravljeni seminarji predstavljajo pogoj za pristop k izpitu.

## 2 Okvirna lestvica ocen

Ocena	%
neg.	0-49%
6	50-59%
7	60-69%
8	70-79%
9	80-89%
10	90-100%

## 3 Potek predavanj in snov kolokvijev

	<b>Tematika</b>
Teden 1	Uvod v eksperimentalno modalno analizo: <ul style="list-style-type: none"><li>- fizikalna domena za MDoF sistem,</li><li>- analitična izpeljava frekvenčne prenosne funkcije sistema</li><li>- prehod v modalno domeno,</li><li>- modalna superpozicija.</li></ul>
Teden 2	Predstavitev frekvenčne domene za modeliranje dinamskih lastnosti sistemov: <ul style="list-style-type: none"><li>- impedančna in admitančna matrika,</li><li>- oblike frekvenčne prenosne funkcije,</li><li>- predstavitev merilne opreme za modalno testiranje,</li><li>- načini vzbujanja sistemov,</li><li>- načrtovanje preizkusov.</li></ul>
Teden 3	Pregled različnih modelov dušenja: <ul style="list-style-type: none"><li>- proporcionalno dušenje,</li><li>- histerezno dušenje,</li><li>- viskozno dušenje.</li></ul>

Teden 4	<p>Metode modalne identifikacije:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- predstavitev pristopov ter poglobilne razlike med SDoF in MDoF sistemi,</li> <li>- predstavitev in izpeljava metode polovične moči.</li> </ul>
Teden 5	<p>Metoda prilagajanja kroga:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- predstavitev in teoretična izpeljava metode.</li> </ul>
Teden 6	<p>Ewins-Glessonova metoda:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- predstavitev in teoretična izpeljava metode,</li> <li>- kriteriji vrednotenja rezultatov (MAC, coh, LAC, MCF).</li> </ul>
Teden 7	<p>Metoda kompleksnih eksponentov z najmanjšo kvadratično napako:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- predstavitev in teoretična izpeljava metode,</li> <li>- uporaba in razširjenost metode v industriji,</li> <li>- uporaba stabilizacijskega diagrama v kombinaciji z metodo LSCF,</li> <li>- predstavitev odprtokodnih rešitev (pyFBS).</li> </ul>
Teden 8	<p>Merjenje dinamskega modela strukture med obratovanjem:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- obratovalne deformacijske oblike,</li> <li>- obratovalna modalna analiza.</li> </ul>
Teden 9	<p>Obisk strokovnjaka iz industrije:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- predstavitev uporabe eksperimentalne modalne analize v industriji.</li> </ul>
Teden 10	<p>Dinamika podstruktur (1):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- uvod v koncept podstrukturiranja,</li> <li>- predstavitev sklapljanja v frekvenčni domeni,</li> <li>- zapis kompatibilnostnih in ravnotežnih pogojev,</li> <li>- izpeljava sklapljanja na primarni spremenljivki.</li> </ul>
Teden 11	<p>Dinamika podstruktur (2):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- izpeljava sklapljanja na sekundarni spremenljivki (LM-FBS),</li> <li>- problem eksperimentalnega sklapljanja,</li> <li>- uvod v projekcijske in razširitvene metode.</li> </ul>
Teden 12	<p>Analiza prenosnih poti (1):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- problem prenosa vibracij iz aktivnih na pasivne komponente,</li> <li>- metode ekvivalentnih sil.</li> </ul>
Teden 13	<p>Analiza prenosnih poti (2):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- klasične metode,</li> <li>- obratovalna analiza prenosnih poti,</li> <li>- regularizacijske tehnike.</li> </ul>
Teden 14	<p>Uporaba eksperimentalne modalne analize, metod podstrukturiranja in analize prenosnih poti v slovenski industriji</p>

## 4 Literatura

- [1] M. Boltežar, Mehanska nihanja-1. del, 2010.
- [2] M. Häußler, Modular sound & vibration engineering by substructuring, Ph.D. thesis, Technische Universität München (2021).
- [3] N. M. M. Maia, J. M. Montalvão e Silva, Theoretical and experimental modal analysis, 1997.
- [4] D. J. Ewins, Modal testing: theory, practice and application, John Wiley & Sons, 2009.
- [5] P. Avitabile, Modal testing: a practitioner's guide, John Wiley & Sons, 2017.
- [6] P. Verboven, Frequency-domain system identification for modal analysis, Ph.D. thesis (2002).
- [7] Z.-F. Fu, J. He, Modal analysis, Elsevier, 2001.
- [8] M. Van der Seijs, Experimental dynamic substructuring: Analysis and design strategies for vehicle development, Ph.D. thesis, TU Delft (2016).
- [9] C. Rainieri, G. Fabbrocino, Operational modal analysis of civil engineering structures, Springer, 2014.
- [10] C. Devriendt, P. Guillaume, The use of transmissibility measurements in output-only modal analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing* 21 (7) (2007) 2689–2696.
- [11] D. De Klerk, D. J. Rixen, S. Voormeeren, General framework for dynamic substructuring: history, review and classification of techniques, *AIAA journal* 46 (5) (2008) 1169–1181.
- [12] M. S. Allen, D. Rixen, M. Van der Seijs, P. Tiso, T. Abrahamsson, R. L. Mayes, *Substructuring in engineering dynamics*, Springer, 2020.
- [13] M. V. van der Seijs, D. De Klerk, D. J. Rixen, General framework for transfer path analysis: History, theory and classification of techniques, *Mechanical Systems and Signal Processing* 68 (2016) 217–244.
- [14] T. Bregar, A. El Mahmoudi, M. Kodrič, D. Ocepek, F. Trainotti, M. Pogačar, M. Göldeli, G. Čepon, M. Boltežar, D. J. Rixen, pyfbs: A python package for frequency based substructuring, *Journal of Open Source Software* 7 (69) (2022) 3399.
- [15] E. Pasma, M. v. d. Seijs, S. Klaassen, M. v. d. Kooij, Frequency based substructuring with the virtual point transformation, flexible interface modes and a transmission simulator, in: *Dynamics of Coupled Structures, Volume 4: Proceedings of the 36th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics 2018, Springer, 2018*, pp. 205–213.
- [16] S. W. Klaassen, M. V. van der Seijs, D. de Klerk, System equivalent model mixing, *Mechanical Systems and Signal Processing* 105 (2018) 90–112.
- [17] J. C. O'Callahan, System equivalent reduction expansion process, in: *Proc. of the 7th Inter. Modal Analysis Conf., 1989*, 1989.