

EKSPERIMENTALNA MODALNA ANALIZA

UČNI NAČRT PREDMETA/COURSE SYLLABUS

Predmet:

Eksperimentalna modalna analiza

Course title:

Experimental Modal Analysis

Članica nosilka/UL

UL FS

Member:

Študijski programi in stopnja	Študijska smer	Letnik	Semestri	Izbirnost
Strojništvo - Razvojno raziskovalni program, druga stopnja, magistrski	Mehanika (smer)	2. letnik	1. semester	obvezni

Univerzitetna koda predmeta/University course code:

0566905

Koda učne enote na članici/UL Member course code:

6041-M

Predavanja /Lectures	Seminar /Seminar	Vaje /Tutorials	Klinične vaje /Clinical tutorials	Druge oblike študija /Other forms of study	Samostojno delo /Individual student work	ECTS
30		30			65	5

Nosilec predmeta/Lecturer:

prof. dr. Gregor Čepon, doc. dr. Domen Ocepek, prof. dr. Janko Slavič

Izvajalci predavanj:

Izvajalci seminarjev:

Izvajalci vaj:

Izvajalci kliničnih vaj:

Izvajalci drugih oblik:

**Izvajalci praktičnega
usposabljanja:**

Vrsta predmeta/Course type:

Obvezni strokovni predmet na smeri Mehanika, ki je izbirni strokovni predmet na ostalih smereh./Compulsory specialised course in the study of Mechanics, which is an elective specialised course in other fields of study.

Jeziki/Languages:

Predavanja/Lectures:

Slovenščina

Vaje/Tutorial:

Slovenščina

Pogoji za vključitev v delo oz. za opravljanje študijskih obveznosti:

Izpolnjevanje pogojev za vpis v Magistrski študijski program II. stopnje Strojništvo - Razvojno raziskovalni program.

Prerequisites:

Meeting the enrollment conditions for the Master's study programme of Mechanical Engineering - Research and Development program.

Vsebina:

1. Uvod v eksperimentalno modalno analizo
- Analitična izpeljava frekvenčno prenosne funkcije

Content (Syllabus outline):

1. Introduction to experimental modal analysis
- Analytical derivation of Frequency Response Function for SDOF system

sistema z eno prostostno stopnjo - Analitična določitev modalnih parametrov (SISO) 2. Analitična določitev frekvenčno prenosne funkcije za sistem z več prostostnimi stopnjami (SIMO, MIMO) - Izpeljava modalnih konstant ter modalnih oblik 3. Modalno testiranje na realni strukturi - Predstavitev merilne opreme za merjenje vibracij (laserski vibrometer, pospeškometer, ...) - Predstavitev mehanizmov vzbujanja sistemov (stresalnik, udarno kladivo, ...) 4. Metode modalne identifikacije - Predstavitev pristopov ter poglobitve razlike med SDOF in MDOF sistemi - Predstavitev in izpeljava metode prilagajanja kroga 5. Ewins-Gleesonova metoda - Predstavitev ter teoretična izpeljava metode - Aplikacija metode na lahko dušene strukture 6. Metoda kompleksnih eksponentov v frekvenčni domeni (LSCF) - Predstavitev ter teoretična izpeljava metode 7. Stabilizacijski diagram - Uporaba stabilizacijskega diagrama v kombinaciji z metodo LSCF - Predstavitev odprtokodnih rešitev (pyEMA) 8. Določitev lastnih oblik z metodo najmanjših kvadratov v frekvenčni domeni (LSFD) - Določitev modalnih konstant - Določitev lastnih oblik 9. Obratovalna modalna analiza - Predstavitev obratovalnih deformacijskih oblik 10. Obisk strokovnjaka iz industrije - Predstavitev uporabe eksperimentalne modalne analize v industriji 11. Dinamika podstruktur - Uvod v koncept podstrukturiranja - Predstavitev sklapljanja v frekvenčni domeni 12. Eksperimentalno sklapljanje podstruktur - Izpeljava primarnega sklapljanja v frekvenčni domeni - Izpeljava sekundarnega sklapljanja v frekvenčni domeni 13. Metoda iskanja izvora vibracij na strukturi - Definicija izvora, spoja med podstrukturami ter sprejemnika pri metodi izvora vibracij 14. Predstavitev uporabe metode izvora vibracij za vibroakustično analizo realnih izdelkov - Karakterizacija spojev - Določitev prenosa poti vibracij do sprejemnika 15. Uporaba eksperimentalne modalne analize in metod podstrukturiranja v slovenski industriji	- Analytical determination of modal parameters (SISO) 2. Analytical derivation of the Frequency Response Function for MDOF system (SIMO, MIMO) - Derivation of modal constants and modal shapes 3. Modal testing of a real-case structures - Presentation of measuring equipment (laser vibrometer, accelerometer, ...) - Excitation mechanisms (electrodynamic shaker, impact hammer, ...) 4. Modal identification methods - Differences between SDOF and MDOF systems - Presentation of circle-fitting method 5. Ewins-Gleeson method - Theoretical background of the method - Application of the method to lightly damped structures 6. Least Squares Complex Frequency method (LSCF) - Presentation and theoretical derivation of the method 7. Stabilization diagram - Stabilization diagram in combination with the LSCF method - Presentation of open source solutions (pyEMA) 8. Least Squares Frequency Domain identification method (LSFD) - Determination of modal constants - Determination of modal shapes 9. Operational modal analysis - Presentation of operational deflection shapes 10. Visit by an industry expert - Use of experimental modal analysis in industry 11. Dynamics substructuring - Introduction to the concept of dynamics substructuring - Coupling in frequency domain 12. Experimental dynamic substructuring - Primary coupling in frequency domain - Secondary coupling in frequency domain 13. Transfer path analysis (TPA) - Definition of source, joints and receiver 14. Application of TPA for vibration source characterization on real-case structures - Characterization of joints - Vibration path to the receiver 15. Use of experimental modal analysis and dynamic substructuring in Slovenian industry
---	--

Temeljna literatura in viri/Readings:

1. Boltežar, M.: *Mehanska nihanja - 1.del (2. popravljena izdaja)*, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2010, [COBISS.SI-ID [226716160](#)]
2. Rao, S. S.: *Mechanical vibrations.- 5th ed Reading etc. : Addison-Wesley Publishing Company, cop. 2011,* [COBISS.SI-ID [138737667](#)]

3. Rao, J. S.: Dynamics of plates.- New York; Basel; Hong Kong; M. Dekker; New Delhi etc. : Narosa, cop. 1999, [COBISS.SI-ID [3548443](#)]
4. N. M. M. Maia, J. M. M. Silva: Theoretical and Experimental Modal Analysis, Research Studies Press, 1997, [COBISS.SI-ID [11736603](#)]

Cilji in kompetence:

Cilji: 1. Spoznati metode za eksperimentalno določitev modalnih parametrov sistemov. 2. Spoznati merilne tehnike ter vzbujevalne mehanizme. 3. Osvojiti metodologijo eksperimentalnega dinamskega podstrukturiranja. Kompetence: 1. Sposobnost karakterizacije dinamskih lastnosti realnih izdelkov. (S7-MAG, P3-MAG) 2. Sposobnost samostojne izvedbe eksperimentalne in obratovalne modalne analize. (S9-MAG, P6-MAG) 3. Sposobnost uporabe sodobnih raziskovalnih metod dinamskega podstrukturiranja za analizo kompleksnih sistemov. (S10-MAG)
--

Objectives and competences:

Objectives: 1. Understanding the methods for experimental determination of system modal parameters. 2. To get acquainted with measuring techniques and structure excitation mechanisms. 3. Understanding the methodology of experimental dynamics substructuring. Competencies: 1. Ability to characterize dynamics properties of real products. (S7-MAG, P3-MAG) 2. Ability to independently perform experimental and operational modal analysis. (S9-MAG, P6-MAG) 3. Ability to perform state-of-the-art dynamics substructuring analysis on a complex system. (S9-MAG, P6-MAG)

Predvideni študijski rezultati:

Znanja: Z2: Poglobljeno teoretično in praktično poznavanje metode eksperimentalne modalne analize, ki je ključna za identifikacijo dinamskih lastnosti realnih sistemov. Spretnosti: 1. S2.1 Obvladovanje napredne metode eksperimentalne modalne analize za karakterizacijo dinamskih lastnosti sistemov. 2. S2.2 Načrtovanje eksperimentov in sposobnost ustvarjalnega prenosa teoretičnih znanj za dinamsko analizo realnih sistemov.
--

Intended learning outcomes:

Knowledge: Z2: In-depth theoretical and practical knowledge of the experimental modal analysis, which is of great importance to identify system dynamics properties. Skills: 1. S2.1 Use of advanced experimental modal analysis method for characterization of system dynamics properties. 2. S2.2 Design of experiments and creative transfer of theoretical knowledge to analyze the dynamics response of the system.
--

Metode poučevanja in učenja:

1. P1 Avditorna predavanja s teoretičnimi izhodišči skupaj z reševanjem praktično uporabnih primerov. 2. P3 Avditorne vaje v računalniški učilnici, kjer se teoretično znanje s predavanj podkrepi z računskimi primeri. 3. P4 Laboratorijske vaje, kjer se predavanja in vaje podkrepi s prikazom delovanja algoritmov na realnih primerih. 4. P6 Interaktivna predavanja. 5. P10 Izvedba interaktivnega poučevanja preko uvajanja anket v realnem času pri osvajanju novih znanj
--

Learning and teaching methods:

1. P1 Lectures with solving of selected theoretical and practical examples. 2. P3 Practical classes in computer room where theoretical knowledge of the lessons is supported by computational examples. 3. P4 Laboratory exercises where lectures and practical classes knowledge is demonstrated on real-case systems. 4. P6 Interactive lectures. 5. P10 Use of instant real-time surveys.
--

Načini ocenjevanja:

Delež/Weight

Assessment:

sodelovanje pri laboratorijskih vajah (vsaj 80%)	5,00 %	laboratory work (at least 80%)
--	--------	--------------------------------

preizkus iz vaj / seminarsko delo (vsaj 50%)	45,00 %	exam / seminar work (at least 50%) theory
preizkus iz teorije (vsaj 50%)		exam (at least 50%)
Ustni zagovor predloga ocene.	50,00 %	Oral defense of the proposed grade.

Ocenjevalna lestvica:

5 - 10, pri čemer velja, da je pozitivna ocena od 6 - 10

Grading system:

5 - 10, a student passes the exam if he is graded from 6 to 10

Reference nosilca/Lecturer's references:

Janko Slavič:

- JAVH, Jaka, **SLAVIČ, Janko**, BOLTEŽAR, Miha. Experimental modal analysis on full-field DSLR camera footage using spectral optical flow imaging. Journal of sound and vibration. [Print ed.]. Nov. 2018, vol. 434, str. 213-220, ilustr. ISSN 0022-460X.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X18304905>, DOI: 10.1016/j.jsv.2018.07.046. [COBISS.SI-ID [16182299](#)], [JCR, SNIP, WoS do 28. 6. 2023: št. citatov (TC): 21, čistih citatov (CI): 18, čistih citatov na avtorja (CIAu): 6.00, Scopus do 20. 10. 2023: št. citatov (TC): 28, čistih citatov (CI): 25, čistih citatov na avtorja (CIAu): 8.33] kategorija: 1A1 (Z, A', A1/2); uvrstitev: SCIE, Scopus, MBP (ASFA, COMPENDEX, INSPEC, PUBMED); tip dela je verificiral OSICN točke: 36.37, št. avtorjev: 3
- JAVH, Jaka, **SLAVIČ, Janko**, BOLTEŽAR, Miha. High frequency modal identification on noisy high-speed camera data. Mechanical systems and signal processing. Jan. 2018, vol. 98, str. 344-351, ilustr. ISSN 0888-3270. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327017302637>, DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.05.008. [COBISS.SI-ID [15504923](#)], [JCR, SNIP, WoS do 1 10. 2023: št. citatov (TC): 69, čistih citatov (CI): 54, čistih citatov na avtorja (CIAu): 18.00, Scopus do 10. 10. 2023: št. citatov (TC): 75, čistih citatov (CI): 59, čistih citatov na avtorja (CIAu): 19.67] kategorija: 1A1 (Z, A', A1/2); uvrstitev: SCIE, Scopus, MBP (COMPENDEX, INSPEC, PUBMED); tip dela je verificiral OSICT točke: 48.37, št. avtorjev: 3
- MRŠNIK, Matjaž, **SLAVIČ, Janko**, BOLTEŽAR, Miha. Vibration fatigue using modal decomposition. Mechanical systems and signal processing. Jan. 2018, vol. 98, str. 548-556, ilustr. ISSN 0888-3270. http://ac.els-cdn.com/S0888327017302728/1-s2.0-S0888327017302728-main.pdf?_tid=05277f10-46ab-11e7-8377-00000aabb0f26&acdnat=1496308779_741233a7c58e44148923265c09da0eaa, DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.0052. [COBISS.SI-ID [15513115](#)], [JCR, SNIP, WoS do 10. 2023: št. citatov (TC): 52, čistih citatov (CI): 43, čistih citatov na avtorja (CIAu): 14.33, Scopus do 20. 8. 2023: št. citatov (TC): 62, čistih citatov (CI): 53, čistih citatov na avtorja (CIAu): 17.67] kategorija: 1A1 (Z, A', A1/2); uvrstitev: SCIE, Scopus, MBP (COMPENDEX, INSPEC, PUBMED); tip dela je verificiral OSICN točke: 48.37, št. avtorjev: 3
- KOŠIR, Tilen, **SLAVIČ, Janko**. Manufacturing of single-process 3D-printed piezoelectric sensors with electromagnetic protection using thermoplastic material extrusion. Additive manufacturing. [Print ed.]. Jul. 2023, vol. 73, str. 1-12, ilustr. ISSN 2214-860
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860423003123>, <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=148359>, DOI: 10.1016/j.addma.2023.103699. [COBISS.SI-ID [161592067](#)], [JCR, SNIP, WoS, Scopus] kategorija: 1A1 (Z, A", A', A1/2); uvrstitev: SCIE, Scopus, MBP (COMPENDEX, INSPEC, PUBMED); tip dela je verificiral OSICT točke: 71.66, št. avtorjev: 2
- BARŠI PALMIČ, Tibor, **SLAVIČ, Janko**. Design principles for a single-process 3D-printed stacked dielectric actuators : theory and experiment. International journal of mechanical sciences. May 2023, vol. 246, str. 1-16, ilustr. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740323000309>, <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=144023>, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108128. [COBISS.SI-ID [139541763](#)], [JCR, SNIP, WoS do 25. 8. 2023: št. citatov (TC): 2, čistih citatov (CI): 1, čistih citatov na avtorja (CIAu): 0.50, Scopus do 11. 10. 2023: št. citatov (TC): 3, čistih citatov (CI): 2, čistih citatov na avtorja (CIAu): 1.00] kategorija: 1A1 (Z, A', A1/2); uvrstitev: SCIE, Scopus, MBP (COMPENDEX, INSPEC, PUBMED); tip dela je verificiral OSICT točke: 75.08, št. avtorjev: 2

Gregor Čepon:

- KODRIČ, Miha, BREGAR, Tomaž, **ČEPON, Gregor**, BOLTEŽAR, Miha. An expansion based on system equivalent model mixing : from a limited number of points to a full-field dynamic response. *Measurement : journal of the International Measurement Confederation*, ISSN 0263-224 [Print ed.], Feb. 2022, vol. 190, str. 1-13. [COBISS.SI-ID [93039619](#)]

2. POGAČAR, Miha, **ČEPON, Gregor**, BOLTEŽAR, Miha. Weakening of the multi-point constraints in modal substructuring using singular value decomposition. *Mechanical systems and signal processing*, ISSN 0888-3270, 15. jan. 2022, ol. 163, str. 1-17. [COBISS.SI-ID [66995203](#)]
3. **ČEPON, Gregor**, OCEPEK, Domen, KORBAR, Jure, BREGAR, Tomaž, BOLTEŽAR, Miha. Sensitivity-based characterization of the bias errors in frequency based substructuring. *Mechanical systems and signal processing*, ISSN 0888-3270, May 2022, vol. 170, str. 1-18. [COBISS.SI-ID [97635843](#)]
4. OCEPEK, Domen, KODRIČ, Miha, **ČEPON, Gregor**, BOLTEŽAR, Miha. On the estimation of structural admittances from acoustic measurement using a dynamic substructuring approach. *Applied acoustics*, ISSN 0003-682X. [Print ed.], Sep. 2021, vol. 180, str. 1-10. [COBISS.SI-ID [62006531](#)]
5. BREGAR, Tomaž, EL MAHMOUDI, Ahmed, **ČEPON, Gregor**, RIXEN, Daniel J., BOLTEŽAR, Miha. Performance of the expanded virtual point transformation on a complex test structure. *Experimental techniques*, ISSN 0732-8818. [Print ed.], Feb. 2021, vol. 45, iss. 1, str. 83-93. [COBISS.SI-ID [28063747](#)]

Domen Ocepek:

1. **OCEPEK, Domen**, TRAINOTTI, Francesco, ČEPON, Gregor, RIXEN, Daniel J., BOLTEŽAR, Miha. On the experimental coupling with continuous interfaces using frequency based substructuring. *Mechanical systems and signal processing*. Aug. 2024, vol. 217, [article no.] 111517, str. 1-15, ilustr. ISSN 0888-3270. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327024004151>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.1016/j.ymssp.2024.111517. [COBISS.SI-ID [196039939](#)], [Odprti dostop, JCR, SNIP, WoS do 22. 1. 2025: št. citatov (TC): 1, čistih citatov (CI): 1, čistih citatov na avtorja (CIAu): 0.20, Scopus do 6. 3. 2025: št. citatov (TC): 3, čistih citatov (CI): 3, čistih citatov na avtorja (CIAu): 0.60]
2. **OCEPEK, Domen**, VRTAČ, Tim, ČEPON, Gregor, BOLTEŽAR, Miha. Estimation of the frequency response functions for operational assemblies using independent source characterization. *Mechanical systems and signal processing*. Jan. 2023, vol. 182, str. 1-14, ilustr. ISSN 0888-3270. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327022006410>, Repozitorij Univerze v Ljubljani – RUL, DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.109542. [COBISS.SI-ID [118438147](#)], [Odprti dostop, JCR, SNIP, WoS do 11. 9. 2024: št. citatov (TC): 3, čistih citatov (CI): 3, čistih citatov na avtorja (CIAu): 0.75, Scopus do 17. 9. 2024: št. citatov (TC): 3, čistih citatov (CI): 3, čistih citatov na avtorja (CIAu): 0.75] projekt: N2-0144-2020 Optična metoda za obratovalno identifikacijo reduciranega nelinearnega modela; financer: Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije
3. POGAČAR, Miha, **OCEPEK, Domen**, TRAINOTTI, Francesco, ČEPON, Gregor, BOLTEŽAR, Miha. System equivalent model mixing : a modal domain formulation. *Mechanical systems and signal processing*. Sept. 2022, vol. 177, str. 1-18, ilustr. ISSN 0888-3270. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327022003879>, DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.109239. [COBISS.SI-ID [108159235](#)], [JCR, SNIP, WoS do 27. 1. 2025: št. citatov (TC): 4, čistih citatov (CI): 4, čistih citatov na avtorja (CIAu): 0.80, Scopus do 23. 1. 2025: št. citatov (TC): 9, čistih citatov (CI): 9, čistih citatov na avtorja (CIAu): 1.80]
4. **OCEPEK, Domen**, ČEPON, Gregor, BOLTEŽAR, Miha. Karakterizacija aktivnega vzbujanja podstruktur in prenosnost obratovalnih sil = Source characterization and transferability of the operational forces. V: SLAVIČ, Janko (ur.), ČESNIK, Martin (ur.). Kuhljevi dnevi 2021 : zbornik del : Bohinjska Bistrica, 23.-24. september 2021. Ljubljana: Slovensko društvo za mehaniko, 2021. Str. 161-168, ilustr. ISBN 978-961-93859-6-8. <http://www.drustvozamehaniko.si/zbornik/ZbornikKD2021.pdf>. [COBISS.SI-ID [78492419](#)]
5. **OCEPEK, Domen**, HRAŠAR, Janko, KVAS, Amadej, LUPŠE, Janez, STARC, Blaž, BOLTEŽAR, Miha, ČEPON, Gregor. Virtual prototyping to reduce vibration transfer of ASKO tumble dryer compressor. V: GOLOBIČ, Iztok (ur.). Akademija strojništva 2023 : inženirstvo - povezovanje za trajnostni preboj : [zbornik prispevkov 12. Mednarodne konference Zveze strojnih inženirjev Slovenije], Ljubljana, 22. november 2023. Ljubljana; online: Zveza strojnih inženirjev Slovenije - ZSIS, 2023. Letn. 12, št. 3/6, str. 112-113, ilustr. Svet strojništva, letn. 12, št. 3/6. ISSN 1855-6493. <https://www.zveza-zsis.si/2023/11/22/akademija-strojnistva-2023-november-2023/>, DOI: 10.62020/svet.str.as20230112. [COBISS.SI-ID [182085635](#)]