



**TECHNICKÁ
UNIVERZITA
V KOŠICIACH**

František TREBUŇA
Róbert HUŇADY
Martin HAGARA
Miroslav PÁSTOR

**EXPERIMENTÁLNE METÓDY
MECHANIKY – LASEROVÁ
VIBROMETRIA A ESPI**



EDÍCIA VEDECKEJ A ODBORNEJ LITERATÚRY
Košice, 2015



© Dr.h.c. mult. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc.
doc. Ing. Róbert HUŇADY, PhD.
Ing. Martin HAGARA, PhD.
doc. Ing. Miroslav PÁSTOR, PhD.

Experimentálne metódy mechaniky – Laserová vibrometria a ESPI

Lektori:

prof. Ing. Ján Vavro, PhD. – TrU A. Dubčeka
prof. Ing. František Šimčák, CSc. – TU v Košiciach

ISBN: 978-80-553-2347-3
EAN 9788055323473

OBSAH

PREDHOVOR	7
1 TEORETICKÉ ZÁKLADY Z OBLASTI LASEROVEJ VIBROMETRIE	9
1.1 LASER A LASEROVÉ SVETLO	9
1.1.1. Bohrov atóm, fotóny a ich energia	10
1.1.2. Spontánna a stimulovaná emisia	12
1.1.3. Inverzná populácia	14
1.1.4. Optické rezonátory	14
1.1.5. Rezonátory s pozdĺžnymi módmi	15
1.1.6. Rezonátory s priečnymi módmi	19
1.1.7. Hélium-Neónový laser	21
1.2 DOPPLEROV JAV	22
1.2.1. Detektor v pohybe, zdroj v pokoji	23
1.2.2. Zdroj v pohybe, detektor v pokoji	25
1.2.3. Rovnica všeobecného Dopplerovho javu	25
1.2.4. Dopplerov jav pri malých rýchlostiach	26
1.2.5. Nadzvukové rýchlosti, rázové vlny	26
1.3 DOPPLEROV JAV PRI SVETLE	27
1.4 MICHELSONOV INTERFEROMETER	30
1.5 MACH-ZEHNDEROV INTERFEROMETER	33
1.6 URČENIE ORIENTÁCIE VEKTORA RÝCHLOSTI	34
1.7 URČENIE VÝCHYLIEK POVRCHU KMITAJÚCEHO OBJEKTU	38
2 LASER DOPPLEROVE VIBROMETRE	39
2.1 LASEROVÉ VIBROMETRE PRE MERANIE V JEDNOM BODE	39
2.1.1. Princíp činnosti laserového vibrometra značky Polytec	39
2.1.2. Laserový vibrometer Polytec PDV-100	41
2.1.3. Princíp činnosti laserového vibrometra značky Ometron	44
2.1.4. Laserový vibrometer Ometron VH300+	48
2.2 SKENOVACIE LASER DOPPLEROVE VIBROMETRE	51
2.2.1. Skenovací zrkadlový systém	51
2.2.2. Techniky skenovania	53
2.2.3. Skenovací vibrometer Polytec PSV-500	56



2.3 ŠPECIÁLNE TYPY LASEROVÝCH VIBROMETROV	60
2.3.1. Diferenciálny vibrometer	60
2.3.2. In-Plane vibrometer	60
2.3.3. Rotačný vibrometer	61
3 PRÍKLADY VYUŽITIA LASEROVÝCH VIBROMETROV PRI ANALÝZE KMITANIA	63
3.1 EXPERIMENTÁLNA MODÁLNA ANALÝZA ČINELA	63
3.2 POUŽITIE SKENOVACIEHO VIBROMETRA PRI ANALÝZE KMITANIA ROTUJÚCEHO DISKU	66
4 VLNOVÉ VLASTNOSTI SVETLA	69
4.1 INTENZITA SVETLA	73
4.2 INTERFERENCIA SVETLA	75
4.2.1. Interferencia dvoch vln s rovnakou frekvenciou	75
4.2.2. Interferencia dvoch vln s rôznou frekvenciou	76
4.2.3. Interferencia dvoch vln s rôznou amplitúdou	77
4.3 KOHERENCIA	78
4.3.1. Časová koherencia	78
4.3.2. Priestorová koherencia	80
4.4 DIFRAKCIA	82
4.4.1. Fresnel-Kirchhoffov difrakčný integrál	83
4.4.2. Fresnelova difrakcia	85
4.4.3. Fraunhoferova difrakcia	87
4.4.4. Optická difrakcia ako prenos lineárnym systémom	89
4.5 ŠKVRNY A SPECKLE-EFEKT	90
4.5.1. Speckle intenzita a fáza	92
4.5.2. Veľkosť škvŕn	96
5 HOLOGRAFIA A HOLOGRAFICKÁ INTERFEROMETRIA	99
5.1 ZÁKLADY HOLOGRAFIE	100
5.1.1. Základné rovnice holografického procesu	100
5.1.2. Základné typy hologramov	102
5.1.3. Základné vlastnosti hologramov	105
5.1.4. Princípy digitálnej holografie	106
5.2 HOLOGRAFICKÁ INTERFEROMETRIA	108
5.2.1. Tvorba interferenčných pruhov v holografickej interferometrii	109

5.2.2. Princíp vytvárania interferenčných pruhov pri metóde dvoch expozícií	112
5.2.3. Metóda reálneho času	114
5.2.4. Metóda časového priemeru	115
5.2.5. Metóda posunutia fázy	116
5.2.6. Holografické interferenčné obrazce a ich interpretácia	117
5.2.6.1. Určenie premiestnení na základe využitia parametrov lokalizácie a kontrastu interferenčných pruhov	119
5.2.6.2. Interpretácia interferogramov na základe absolútneho radu pruhov	120
5.2.6.3. Interpretácia interferogramov na základe relatívneho radu pruhov	121
5.3 OBLASTI VYUŽITIA HOLOGRAFICKEJ INTERFEROMETRIE	122
5.3.1. Meranie deformácií na povrchu objektov	123
5.3.2. Nedeštruktívne hodnotenie materiálu	126
5.3.3. Analýza kmitania	127
5.3.3.1. Metóda Powella a Stetsona	128
6 SPECKLE-INTERFEROMETRIA A ELEKTRONICKÁ SPECKLE-INTERFEROMETRIA	131
6.1 ZÁKLADY SPECKLE-INTERFEROMETRIE	131
6.1.1. Korelačná speckle-interferometria	131
6.1.2. Speckle-interferometria s posunutím fázy	134
6.1.3. Aplikácia speckle-fotografie a speckle-interferometrie	136
6.2 ELEKTRONICKÁ SPECKLE-INTERFEROMETRIA (ESPI)	137
6.2.1. Meranie posunutí v smere normály k vyšetrovanej ploche	138
6.2.2. Meranie posunutí v rovine rovnobežnej s obrazovou rovinou	139
6.2.3. Meranie posunutí v priestore	140
6.2.4. Posunutie a rozbalenie fázy	141
6.2.4.1. Technika časového posunutia fázy	141
6.2.4.2. Technika priestorového posunutia fázy	143
6.2.4.3. Rozbalenie fázovej mapy	144
6.2.5. Výpočet posunutí a pomerných deformácií	144
6.3 MERACIE ZARIADENIA PRE ELEKTRONICKÚ SPECKLE-INTERFEROMETRIU	146
6.3.1. Systém Q-100	147
6.3.2. Systém Q-300	150
6.3.3. Systém Q-500 (3D Vibro ESPI)	153
6.3.4. Systém Q-600 (PulsESPI)	156



7 PRÍKLADY VYUŽITIA ELEKTRONICKEJ SPECKLE-INTERFEROMETRIE V NAPĀŤOVO-DEFORMAČNEJ ANALÝZE	159
7.1 APLIKÁCIA METÓDY ESPI PRI ANALÝZE ZVÝŠKOVÝCH NAPĀTÍ	159
7.2 ŠTVORBODOVÝ ROVINNÝ OHYB NOSNÍKA	161
7.3 NAPĀŤOVO-DEFORMAČNÁ ANALÝZA VZORIEK Z KOMPOZITNÉHO MATERIÁLU	163
7.4 POROVNANIE METÓDY ESPI A DIC PRI VYŠETROVANÍ DEFORMÁCIE V OKOLÍ KONCENTRÁTORA NAPĀTOSTI	167
8 DIGITÁLNA SPECKLE-SHEAROGRAFIA	173
8.1 PRINCÍP DIGITÁLNEJ SPECKLE-SHEAROGRAFIE	173
8.2 MERACIE ZARIADENIA PRE DIGITÁLNU SHEAROGRAFIU	176
8.2.1. Systém Q-800	176
8.2.2. Systém Q-810	178
9 LITERATÚRA	179

PREDHovor

Súčasným trendom v oblasti experimentálnej mechaniky sú moderné optické metódy, ktoré majú oproti konvenčným technikám celý rad predností. Aj keď fyzikálny princíp väčšiny týchto metód je známy už celé desaťročia, k ich najvýznamnejšiemu rozšíreniu došlo až v posledných rokoch. Tento rozmach úzko súvisí s pokrokom, ktorý sa dosiahol v oblasti výpočtovej techniky a digitálneho spracovania obrazu a ktorý v konečnom dôsledku viedol k vytvoreniu komerčne využiteľných systémov. Hlavnou prednosťou vyspelých optických metód je možnosť realizovať celoplošné bezkontaktné merania na plochách od jednotiek milimetrov až po metre štvorcové a to na vzdialenosti i niekoľko desiatok metrov. Medzi takéto metódy možno zaradiť najmä tie, ktoré na meranie využívajú laserové svetlo resp. laserový lúč. V oblasti analýzy kmitania, vibrodiagnostiky, akustiky a pod. sú to najmä laser Dopplerove vibrometre; v oblasti testovania materiálov a mechanických skúšok je to napríklad metóda elektronickej speckle-interferometrie alebo speckle-shearografie. Vďaka vysokej presnosti sú tieto prístroje využívané nielen v oblasti výskumu a vývoja, kde nachádzajú široké uplatnenie, ale tiež na verifikáciu a spresňovanie numerických modelov a pre účely kalibrácie konvenčných snímačov. Pritom využitie týchto meracích systémov už dávno nie je doménou len špičkových vedeckých pracovníkov.

Tieto aspekty viedli autorov k napísaniu vysokoškolskej učebnice „Experimentálne metódy mechaniky – Laserová vibrometria a ESPI“, ktorá je prioritne určená ako študijný materiál pre študentov 3. ročníka bakalárskeho štúdia a 1. a 2. ročníka inžinierskeho štúdia strojárskych alebo im príbuzných odborov. Keďže ide o vôbec prvú slovenskú učebnicu týkajúcu sa týchto moderných metód experimentálnej mechaniky, môže slúžiť aj ako vhodný podkladový materiál pri riešení bakalárskych, diplomových, či dizertačných prác. Cieľom predkladanej publikácie je vysvetliť základné princípy laser Dopplerovej vibrometrie (LDV) a elektronickej speckle-interferometrie (ESPI), popísať metodiky meraní a poukázať na praktické využitie meracích systémov spoločností Polytec a Dantec Dynamics v oblasti kmitania a v oblasti napätovo-deformačných analýz.

Autori pri zostavovaní učebnice nadviazali na poznatky uvedené v monografiách „Príručka experimentálnej mechaniky (Trebuňa F., Šimčák, F.)“ a „Využitie optických metód v experimentálnej mechanike I a II (Trebuňa F. et al.)“, pričom informácie čerpali z diel význačných osobností, ako aj z vlastných skúseností a výsledkov výskumnej činnosti nadobudnutých počas dlhoročnej práce s jednotlivými zariadeniami a pri riešení úloh v rámci vedeckých projektov a v spolupráci s praxou.

Naše poďakovanie patrí predovšetkým lektorom učebnice prof. Ing. Jánovi Vavrovi, PhD. z TnU AD v Trenčíne a prof. Ing. Františkovi Šimčákovi, CSc. z TU v Košiciach, za dôsledné preštudovanie rukopisu, cenné rady, podnety i pripomienky, ktorými výrazne prispeli ku skvalitneniu učebnice.

Učebnica bola spracovaná v rámci riešenia projektu KEGA 021 TUKE-4/2013 „Využitie moderných optických metód experimentálnej mechaniky pre rozvoj vedomostnej bázy študentov druhého a tretieho stupňa vysokoškolského štúdia“.

Čitateľom učebnice želáme množstvo inšpirácií smerujúcich k odhaleniu nepoznaného a súčasne sa obraciame s prosbou o námety, postrehy, prípadne pripomienky, ktoré budú viesť k ďalšiemu zdokonaleniu učebnice v oblasti vysvetlenia teoretických princípov, aplikačných postupov, prípadne i ďalšieho využitia experimentálnych metód mechaniky.

Košice, 25.11.2015

Autori