

OBSAH

PREDHOVOR	27
1 ÚVOD.....	31
1.1 CIELE A METÓDY OVERENIA PODMIENOK SPOLĀHLIVOSTI MECHANICKÝCH PRVKOV A UZLOV PEVNOSTNÝMI VÝPOČTAMI.....	38
1.2 METÓDY EXPERIMENTÁLNEJ ANALÝZY A ICH UPLATNENIE PRI OVEROVANÍ KONŠTRUKČNÝCH PRVKOV A UZLOV	45
1.3 LITERATÚRA.....	46
2 TEÓRIA INŽINIERSKEHO EXPERIMENTU	49
2.1 ÚLOHA A POSTAVENIE EXPERIMENTU V PROCESE RIEŠENIA TECHNICKÝCH PROBLÉMOV	49
2.2 CHARAKTERISTIKA SÚČASNÉHO EXPERIMENTU.....	51
2.3 TYPY EXPERIMENTOV	56
2.3.1. Typy experimentov podľa hierarchicko-cieľových hľadísk.....	57
2.3.2. Typy experimentov podľa tímovosti.....	58
2.3.3. Typy experimentov podľa miesta realizácie experimentu.....	59
2.3.4. Typy experimentov podľa ľudských činností v experimente.....	59
2.3.5. Typy experimentov podľa ich riadenia.....	59
2.3.6. Typy experimentov podľa ich úlohy v modelovaní.....	60
2.3.6.1 Typy experimentov vo výpočtovom modelovaní.....	60
2.3.6.2 Typy experimentov v experimentálnom modelovaní	61
2.4 ETAPY EXPERIMENTU	62
2.4.1. Návrh experimentu.....	62
2.4.2. Realizácia merania	67
2.4.3. Spracovanie výsledkov merania	69
2.4.4. Vyhodnotenie a posúdenie experimentu	69
2.5 ÚLOHA EXPERIMENTU V TECHNICKEJ PRAXI	69
2.5.1. Tvorba technických objektov	70
2.5.2. Experiment ako prostriedok riadenia	70
2.5.3. Experiment ako zdroj údajov pre databázy.....	70
2.6 EXPERIMENT V EXPERIMENTÁLNEJ MECHANIKE	71
2.7 TEÓRIA EXPERIMENTU.....	72
2.7.1. Teória problému.....	73
2.7.2. Teória plánovania merania	74
2.7.3. Teória meracích metód.....	74
2.7.4. Teória merania.....	76
2.7.5. Teória spracovania výsledkov merania	77
2.8 ZÁKLADNÉ POJMY V EXPERIMENTÁLNEJ OBLASTI	78
2.9 LITERATÚRA.....	80



3	TEÓRIA MERANIA	83
3.1	TEÓRIA MERANIA Z HĽADISKA TEÓRIE INFORMÁCIÍ	83
3.2	ŠTRUKTÚRA EXPERIMENTÁLNEHO REŤAZCA	86
3.2.1.	Štruktúra meracieho reťazca	86
3.2.2.	Štruktúra zaťažovacieho a budiaceho reťazca	87
3.2.3.	Štruktúra vyhodnocovacieho reťazca	88
3.3	VLASTNOSTI PRÍSTROJOV A REŤAZCOV	89
3.3.1.	Dynamické vlastnosti prístrojov	92
3.3.1.1	Všeobecne o dynamických vlastnostiach prístrojov	92
3.3.1.2	Prechodová charakteristika.....	95
3.3.1.3	Impulzná (váhová) charakteristika	98
3.3.1.4	Rýchlostná charakteristika	99
3.3.1.5	Frekvenčný prenos a frekvenčná charakteristika	100
3.3.1.6	Úplná a čiastkové dynamické charakteristiky	103
3.3.1.7	Určovanie výstupného signálu z prístroja pre známy všeobecný vstupný signál	107
3.3.1.8	Výber meracích prístrojov	109
3.3.1.9	Problematika optimalizácie meracích sústav zavedením frekvenčných korekcií	110
3.3.2.	Statické vlastnosti prístrojov a reťazcov	112
3.3.3.	Informačné vlastnosti prístrojov	115
3.3.4.	Spôľahlivosť prístrojov a reťazcov	117
3.3.4.1	Charakteristiky spoľahlivosti	118
3.3.4.2	Rozdelenie spojených náhodných veličín používaných v teórii spoľahlivosti.....	123
3.3.4.3	Experimentálne určovanie charakteristík spoľahlivosti.....	124
3.3.5.	Spôľahlivosť reťazcov	126
3.3.5.1	Sériové zapojenie –náhle poruchy.....	127
3.3.5.2	Sériové zapojenie – postupné poruchy.....	127
3.3.5.3	Paralelné zapojenie – náhle poruchy.....	128
3.3.6.	Životnosť prístrojov a reťazcov	129
3.3.7.	Súčasný aspekt spoľahlivosti prístrojovej techniky.....	132
3.4	LITERATÚRA.....	133
4	SPRACOVANIE VÝSLEDKOV MERANIA A PLÁNOVANIE EXPERIMENTU.....	135
4.1	VÄZBY MEDZI ETAPAMI ANALYZOVANÉHO PROCESU	135
4.2	CHYBY V PROCESSE MERANIA A SPRACOVANIA VÝSLEDKOV	139
4.2.1.	Odlíšnosť chýb výpočtu a experimentu.....	139
4.2.1.1	Rozdielnosť v chybách z hľadiska rozdielnosti modelového hardvéru.....	140
4.2.1.2	Rozdielnosť v chybách z hľadiska rozdielnosti modelového softvéru.....	141
4.2.1.3	Rozdielnosť v chybách v dôsledku rôznej funkcie riešiteľa.....	142
4.2.2.	Vymedzenie a členenie chýb merania	143
4.2.2.1	Členenie chýb podľa spôsobu výskytu	145

4.2.2.1.1 Náhodné chyby merania.....	145
4.2.2.1.2 Systematické chyby merania	145
4.2.2.1.3 Testovanie výskytu systematických chýb a možnosti znižovania ich výskytu.....	147
4.2.2.1.4 Hrubé chyby merania.....	147
4.2.2.2 Členenie chýb podľa príčin vzniku.....	148
4.2.2.2.1 Chyby metódy.....	148
4.2.2.2.2 Chyby meracích prístrojov	148
4.2.2.2.3 Chyby meracích reťazcov spôsobené skutočným zaťažením prístroja, kolísaním napájacieho napätia a rušivými napätiami v elektrických meracích prístrojoch.....	151
4.2.2.2.4 Chyby použitých etalónov.....	151
4.2.2.2.5 Osobné chyby.....	152
4.2.2.2.6 Chyby pri spracovaní výsledkov merania	152
4.2.2.3 Členenie chýb podľa časovej závislosti meraných veličín.....	153
4.2.2.3.1 Statické chyby prístrojov.....	153
4.2.2.3.2 Dynamické chyby prístrojov.....	154
4.2.2.4 Členenie chýb podľa možnosti ich vylúčenia.....	158
4.3 ZÁKLADNÉ POJMY Z TEÓRIE PRAVDEPODOBNOTI.....	159
4.3.1. Skalárna náhodná veličina.....	159
4.3.2. Vektorová náhodná veličina.....	163
4.4 SPRACOVANIE VÝSLEDKOV MERANIA NEZÁVISLEJ VELIČINY	167
4.4.1. Východiskové úvahy a základné pojmy.....	167
4.4.2. Určenie výberových charakteristík.....	168
4.4.3. Základné výberové rozdelenia.....	168
4.4.4. Odhady parametrov základného súboru.....	169
4.4.5. Bodové odhady parametrov.....	171
4.4.6. Intervalové odhady parametrov	172
4.4.7. Plánovanie merania pre určenie nezávislej deterministickej veličiny	174
4.4.8. Testovanie štatistických hypotéz	176
4.4.8.1 Základné pojmy a postup pri testovaní hypotéz	177
4.4.8.2 Parametrické testy.....	178
4.4.8.3 Postup pri realizácii parametrických testov	179
4.4.8.4 Testy významnosti strednej hodnoty a rozptylu.....	179
4.4.8.5 Chyby pri testovaní štatistických hypotéz.....	181
4.4.8.6 Plánovanie merania v podmienkach štatistických parametrických hypotéz	182
4.4.8.7 Neparametrické testy.....	183
4.4.9. Postup pri spracovaní výsledkov merania	184
4.4.9.1 Priame určovanie deterministickej veličiny meraním.....	185
4.4.9.2 Nepriame určovanie deterministickej veličiny (meraním a výpočtom). 185	
4.5 REGRESNÁ ANALÝZA.....	189
4.5.1. Úvod do regresnej analýzy	190
4.5.2. Všeobecná regresia lineárna medzi parametrami	194
4.5.2.1 Problematika rozptylu	196



4.5.2.2 Štatistická analýza výsledkov regresnej analýzy	199
4.5.3. Plánovanie regresných experimentov	200
4.5.3.1 Kritériá optimálnosti regresných plánov merania	203
4.5.3.2 Plánovanie regresných experimentov I. rádu	205
4.5.3.2.1 Jednofaktoriálny experiment	206
4.5.3.2.2 Úplný faktoriálny experiment 2^n	207
4.5.3.2.3 Skrátенý faktoriálny experiment	210
4.5.3.2.4 Simplexové experimenty	210
4.5.3.3 Realizácia faktoriálnych plánov merania I. rádu	210
4.5.3.4 Štatistická analýza výsledkov plánovania regresnej analýzy	211
4.5.4. Nelineárna regresná analýza	213
4.5.5. Vplyvy narušujúce predpoklady regresnej analýzy	214
4.6 ANALÝZA ROZPTYLU	216
4.6.1. Základné pojmy analýzy rozptylu	216
4.6.2. Všeobecný vzťah medzi výstupnými a vstupnými veličinami v analýze rozptylu	217
4.6.3. Jednofaktorové experimenty	219
4.6.3.1 Úplne znáhodnená štruktúra – jednofaktorová analýza rozptylu	220
4.6.3.1.1 Odhad parametrov μ, α_i	222
4.6.3.1.2 Štatistické posúdenie výsledkov jednofaktorovej analýzy rozptylu s pevnými efektmi	222
4.6.3.1.3 Štatistické posúdenie jednofaktorovej analýzy rozptylu s náhodnými efektmi	226
4.6.3.2 Znáhodnené bloky – dvojfaktorová analýza rozptylu	226
4.6.3.3 Latinské štvorce – trojfaktorová analýza rozptylu	228
4.6.3.4 Gréckolatinské štvorce – štvorfaktorová analýza rozptylu	229
4.6.3.5 Neúplné bloky – Youdenove štvorce	231
4.6.3.6 Plánovanie merania pri jednofaktorovej analýze rozptylu	231
4.6.3.7 Určenie priebehu funkcie odozvy pomocou analýzy rozptylu	233
4.6.4. Viacfaktorové experimenty	234
4.6.4.1 Základné členenie viacfaktorových experimentov	234
4.6.4.2 Všeobecné faktoriálne experimenty	235
4.6.4.2.1 Dvojfaktorová analýza rozptylu	235
4.6.4.2.2 Viacfaktorová analýza rozptylu	238
4.6.4.3 Faktoriálne experimenty typu p^f	239
4.6.4.3.1 Analýza faktoriálnych plánov typu 2^f	239
4.6.4.3.2 Analýza faktoriálnych plánov typu 3^f	241
4.6.4.3.3 Zlučovanie vo faktoriálnych experimentoch	243
4.6.4.3.4 Skrátенé faktoriálne experimenty	244
4.6.4.4 Hierarchické experimenty	247
4.7 KOVARIANČNÁ ANALÝZA	248
4.7.1. Základné pojmy v kovariančnej analýze	248
4.7.2. Predpoklady realizácie kovariančnej analýzy	250



4.7.3. Jednorozmerná kovariančná analýza	250
4.7.3.1 Metóda rozkladu na čiastkové súčty odchýlok	251
4.7.3.2 Metóda odhadu parametrov.....	252
4.7.3.3 Posúdenie výsledkov získaných kovariančnou analýzou.....	252
4.8 DISKRIMINAČNÁ ANALÝZA	256
4.9 ANALÝZA HLAVNÝCH KOMPONENTOV	257
4.10 PROBLEMATIKA CHÝB PRI SPRACOVANÍ VÝSLEDKOV MERANIA	258
4.10.1. Chyby vo vytvorení systému $\sum (EO)$ experimentálneho objektu	259
4.10.2. Chyby v nesprávnej alebo nevhodnej interpretácii a aplikácii štatistiky v spracovaní výsledkov merania	259
4.10.3. Chyby prameniace z nespĺnenia predpokladov	260
4.11 VYJADROVANIE NEISTÔT MERANIA PRI KALIBRÁCII	260
4.11.1. Vyhodnotenie neistôt meraní vstupných veličín.....	262
4.11.1.1 Vyhodnotenie typu A štandardnej neistoty	262
4.11.1.2 Vyhodnotenie typu B štandardnej neistoty	263
4.11.2. Výpočet štandardnej neistoty výstupného odhadu	264
4.11.3. Rozšírená neistota merania	267
4.11.4. Uvádzanie neistôt merania v kalibračných certifikátoch	267
4.11.5. Jednotlivé kroky pri výpočte neistôt merania	268
4.12 LITERATÚRA	269
5 ZÁKLADY TEÓRIE VLNENIA A INTERFERENCIE.....	271
5.1 VLNY A ČASTICE	271
5.1.1. Vlnová dĺžka a uhlový vlnočet.....	273
5.1.2. Perióda, uhlová frekvencia a frekvencia	274
5.2 RÝCHLOSŤ POSTUPNEJ VLNY	275
5.3 RÝCHLOSŤ VLNY NA STRUNE.....	276
5.4 ENERGIA A VÝKON VLNY.....	278
5.4.1. Kinetická energia	278
5.4.2. Potenciálna energia napätosti	278
5.4.3. Prenášaný výkon	279
5.5 PRINCÍP SUPERPOZÍCIE.....	279
5.6 INTERFERENCIA VLŇ.....	281
5.7 FÁZORY	283
5.8 STOJATÉ VLNY	284
5.9 VLASTNÉ KMITY	286
5.10 ZVUKOVÉ VLNENIE	288
5.10.1. Rýchlosť zvuku	289
5.10.2. Šírenie zvukových vln	291
5.10.3. Interferencia	293
5.10.4. Intenzita zvuku a jej hladina.....	294
5.10.5. Zdroje zvuku	296
5.10.6. Záchvevy.....	299
5.10.7. Dopplerov jav	300



5.10.7.1 Detektor v pohybe, zdroj v pokoji	300
5.10.7.2 Zdroj v pohybe, detektor v pokoji.....	302
5.10.7.3 Rovnica všeobecného Dopplerovho javu	303
5.10.7.4 Dopplerov jav pri malých rýchlostiach	303
5.10.7.5 Nadzvukové rýchlosti, rázové vlny	303
5.11 DOPPLEROV JAV PRI SVETLE	304
5.12 SVETLO AKO ELEKTROMAGNETICKÉ VLNENIE	305
5.13 POLARIZÁCIA.....	312
5.13.1. Polarizované svetlo.....	312
5.13.2. Anizotropia	315
5.14 ODRAZ A LOM.....	316
5.15 ÚPLNÝ ODRAZ	319
5.16 POLARIZÁCIA ODRAZOM A BREWSTEROV ZÁKON	320
5.17 INTERFERENCIA	322
5.17.1. Svetlo ako vlnenie.....	322
5.17.2. Difrakcia	325
5.17.3. Youngov interferenčný pokus	326
5.17.4. Koherencia.....	329
5.17.5. Intenzita pri interferencii svetla z dvoch štrbín.....	330
5.17.6. Interferencia na tenkej vrstve.....	333
5.17.7. Michelsonov interferometer.....	337
5.18 LITERATÚRA	339
6 TECHNIKY MERANIA VEĽMI MALÝCH DEFORMÁCIÍ A POSUVOV	341
6.1 MECHANICKÉ A OPTICKO MECHANICKÉ TENZOMETRE	343
6.2 STRUNOVÉ TENZOMETRE	344
6.3 PNEUMATICKÉ TENZOMETRE.....	345
6.4 KOVOVÉ TENZOMETRE.....	347
6.5 POLOVODIČOVÉ TENZOMETRE.....	348
6.6 NAPAROVANÉ TENZOMETRE.....	349
6.7 KAPACITNÉ TENZOMETRE	349
6.8 PIEZOELEKTRICKÉ TENZOMETRE	350
6.9 INÉ SYSTÉMY	350
6.10 FYZIKÁLNE PRINCÍPY TENZOMETROV	350
6.10.1. Princíp činnosti kovových tenzometrov.....	351
6.10.2. Princíp činnosti polovodičových tenzometrov	352
6.11 MERACÍ REŤAZEC	353
6.12 KONŠTRUKCIA A TECHNICKÉ ÚDAJE O TENZOMETROCH.....	354
6.12.1. Elektrický odpor tenzometrov	360
6.12.2. Použiteľná teplotná oblasť	361
6.12.3. Deformačná citlivosť kovových tenzometrov	362
6.12.4. Deformačná citlivosť polovodičového tenzometra	363
6.12.5. Priečna citlivosť.....	364
6.12.6. Teplotná zmena v mieste tenzometra.....	366

6.12.6.1 Uplatnenie samokompenzačných tenzometrov na odstránenie zdanlivej deformácie	367
6.12.6.2 Teplotný drift	371
6.12.6.3 Závislosť citlivosti od teploty	372
6.12.7. Statická rozťažnosť	372
6.12.8. Dynamická rozťažnosť	374
6.12.8.1 Únavová charakteristika	374
6.12.8.2 Medzná frekvencia	375
6.12.9. Elektrická zaťažiteľnosť	378
6.12.10. Creep – tečenie tenzometra	379
6.12.11. Mechanická hysterézia	382
6.13 VPLYVY OKOLIA	384
6.13.1. Teplota	384
6.13.2. Vlhkosť	384
6.13.3. Hydrostatický tlak	385
6.13.4. Energetické (ionizačné) žiarenie	388
6.13.5. Magnetické pole	392
6.13.6. Uskladnenie	393
6.14 APLIKAČNÉ PROSTRIEDKY	394
6.14.1. Upevňovacie prostriedky pre tenzometre	394
6.14.2. Čistiace prostriedky	397
6.14.3. Prostriedky pre spájkovanie	398
6.14.4. Prostriedky na pripájanie	399
6.14.5. Prostriedky na preskúšanie	401
6.14.6. Prostriedky na ochranu meracieho miesta	402
6.15 KRITÉRIÁ PRE VOĽBU TENZOMETROV	406
6.16 WHEATSTONOVO MOSTÍKOVE ZAPOJENIE	409
6.16.1. Schéma zapojenia Wheatstonovho mostíka	409
6.16.2. Princíp Wheatstonovho mostíkového zapojenia	410
6.16.3. Napájanie mostíka a zosilnenie výstupného napätia mostíka	413
6.17 KALIBROVANIE MERACIEHO ZARIADENIA	414
6.17.1. Činnosť vyrovnávacích a kalibrovacích zariadení meracích zosilňovačov	415
6.17.2. Kalibrovanie kalibračným signálom vytvoreným v meracom zosilňovači ..	417
6.17.3. Bočníková (shuntová) kalibrácia	418
6.17.4. Kalibrovanie kalibrovacím prístrojom	420
6.17.5. Zohľadnenie rozdielnosti k -faktora od približnej hodnoty 2	421
6.18 OPATRENIA PRE POTLAČENIE, RESP. ZMENŠENIE CHÝB MERANIA	422
6.18.1. Teplotná kompenzácia	423
6.18.1.1 Teplotná kompenzácia pri jednoduchom štvrtmostíkovom zapojení ..	424
6.18.1.2 Teplotná kompenzácia štvrtmostíka v trojvodičovom zapojení	424
6.18.1.3 Teplotná kompenzácia štvrtmostíka s kompenzačným tenzometrom	425
6.18.1.4 Teplotná kompenzácia pri dvojštvrtinovom, resp. diagonálnom mostíku	426



6.18.1.5 Teplotná kompenzácia pri polmostíkovom zapojení	427
6.18.1.6 Teplotná kompenzácia pri úplnom mostíku	428
6.18.2. Vplyv odporov vodičov	428
6.18.2.1 Jednoduché štvrtmostíkové zapojenie	429
6.18.2.2 Štvrtmostík v trojvodičovom zapojení	431
6.18.2.3 Štvrtmostíky s kompenzačnými tenzometrami	431
6.18.2.4 Dvojštvrtinový alebo diagonálny mostík	431
6.18.2.5 Polmostíkové zapojenie	432
6.18.2.6 Zapojenie s plným mostíkom	433
6.18.2.7 Korektúra chýb pomocou voliča k – faktora	433
6.19 ELIMINÁCIA VPLYVOV KÁBLA ŠPECIÁLNYMI OBVODMI MERACIEHO PRÍSTROJA	434
6.20 VPLYV KAPACITY KÁBLA	435
6.21 KOREKČIE PRIEČNEJ CITLIVOSTI TENZOMETRA	439
6.21.1. Korekcie pre samostatné meracie mriežky	440
6.21.2. Korekcie pre tenzometrické ružice	442
6.21.2.1 Kríže $0^\circ/90^\circ$	442
6.21.2.2 Ružice	443
6.22 UPLATNENIE KONŠTITUČNÝCH ROVNÍC PRE VÝPOČET NAPÄTÍ Z NAMERANÝCH DEFORMÁCIÍ	445
6.22.1. Jednoosová napätosť	445
6.22.2. Dvojosová napätosť so známymi hlavnými smermi	446
6.22.2.1 Meranie na hriadeli namáhanom krútením	448
6.22.3. Meranie a analýza napätí pri rôznych kombináciách zaťaženií	452
6.22.4. Merania na nosníku namáhanom na ohyb (vplyv ohybového momentu a posúvajúcej sily)	453
6.22.5. Meranie teplotných napätí	455
6.22.5.1 Porovnanie meraní na voľnom a z oboch strán upevnenom objekte	455
6.22.5.2 Meranie s kompenzačným tenzometrom na nezaťaženom materiáli	456
6.22.5.3 Oddelené alebo dodatočné zistenie vplyvu teploty	456
6.22.6. Dvojosová napätosť s neznámymi hlavnými smermi	456
6.22.6.1 Určenie veľkosti hlavných normálových napätí s ružicou $0^\circ/45^\circ/90^\circ$	457
6.22.6.2 Určenie veľkosti hlavných normálových napätí s ružicou $0^\circ/60^\circ/120^\circ$	457
6.22.6.3 Určenie hlavných smerov	457
6.22.6.4 Ďalšie možnosti určenia hlavných normálových napätí a ich smerov	459
6.22.6.5 Mohrova kružnica napätosti	459
6.23 POSUDZOVANIE PRESNOSTI MERANIA	461
6.23.1. Príčiny odchýlok meraní v tenzometrii	461
6.23.2. Výpočet náhodných rozptylov nameraných hodnôt	462
6.24 LITERATÚRA	466

7	TENZOMETRE, APLIKAČNÉ A OCHRANNÉ PROSTRIEDKY	483
7.1	TENZOMETRICKÉ SNÍMAČE	483
7.1.1.	Technické údaje o konštrukcii a vlastnostiach tenzometrov HMB.....	487
7.1.1.1.	Štandardné tenzometre	488
7.1.1.2.	Špeciálne tenzometre HBM.....	494
7.1.1.2.1.	Tenzometre na určovanie zvyškových napätí	494
7.1.1.2.2.	Tenzometre pre veľké pomerné predĺženia.....	495
7.1.1.2.3.	Zapuzdrené tenzometre.....	495
7.1.1.2.4.	Tenzometre s voľnou mriežkou určené na meranie pri vysokých teplotách.....	496
7.1.1.2.5.	Privariteľné tenzometre typu LS 31 a LS 61.....	496
7.1.2.	Technické údaje a vlastnosti tenzometrov Vishay Micro-Measurements ...	496
7.1.2.1.	Štandardné snímače.....	496
7.1.2.1.1.	Snímače s jednou mriežkou	498
7.1.2.1.2.	Tenzometrické kríže	501
7.1.2.1.3.	Tenzometrické ružice.....	502
7.1.2.1.4.	Tenzometre na meranie šmyku	503
7.1.2.2.	Špeciálne snímače výrobcu Vishay Micro-Measurements.....	504
7.1.2.2.1.	Snímače na určenie zvyškových napätí	504
7.1.2.2.2.	Snímače na meranie v magnetickom poli.....	504
7.1.2.2.3.	Privariteľné snímače	505
7.1.2.2.4.	Snímače na meranie pri vysokých teplotách	509
7.1.2.2.5.	Snímače na určenie modulu pružnosti v šmyku	509
7.1.2.2.6.	Snímače porušenia.....	510
7.1.2.2.7.	Snímače na sledovanie šírenia trhliny.....	511
7.2	TENZOMETRICKÉ LEPIDLÁ – TMELY	512
7.2.1.	Tenzometrické lepidlá HBM	513
7.2.2.	Tenzometrické lepidlá M-M.....	514
7.3	OCHRANNÉ PROSTRIEDKY	519
7.3.1.	Ochranné prostriedky HBM.....	519
7.3.2.	Ochranné prostriedky M-M	520
7.4	SPÁJKOVACIE BODKY A ĎALŠÍ APLIKAČNÝ MATERIÁL	523
7.5	LITERATÚRA	525
8	TENZOMETRICKÉ APARATÚRY, ICH PRÍSLUŠENSTVO, KONTROLA A PRIPOJENIA	527
8.1	TENZOMETRICKÉ APARATÚRY NA SKÚMANIE STATICKÝCH (KVÁZISTATICKÝCH) JAVOV	527
8.1.1.	Digitálny indikátor deformácií P-3500 s prepínacou jednotkou SB 10 a meračom špičkových hodnôt P 3650.....	527
8.1.1.1.	Vstupné obvody tenzometrov pripojených k jednotke SB-10	532
8.1.1.2.	Odčítanie deformácií pri použití reťazca prístrojov P-3500 a SB-10 ...	533
8.1.1.3.	Model P-3560 čítač píkov	534
8.1.2.	Indikátor deformácií a nahrávacie zariadenie - model P3	536
8.1.2.1.	Vstupné obvody tenzometrov	537



8.1.2.2 Ovládanie softvérom.....	540
8.1.3. Tenzometrická aparátúra Centipede 100	542
8.1.3.1 Prepojenie a komunikácia s prístrojom.....	546
8.2 TENZOMETRICKÁ APARATÚRA SPIDER 8 NA SKÚMANIE DYNAMICKÝCH JAVOV	547
8.2.1. Pripojenie na počítač	551
8.3 SHUNTOVÁ KALIBRÁCIA TENZOMETRICKÝCH APARATÚR.....	552
8.3.1. Základná shuntová kalibrácia	554
8.3.2. Škálovanie aparatúry pre malé pomerné deformácie.....	557
8.3.3. Nelinearity Wheatstonovho mostíka	562
8.3.4. Škálovanie aparatúry pre veľké pomerné deformácie	564
8.3.5. Verifikácia aparatúry	570
8.3.6. Hľadiská presnosti	573
8.4 KALIBRAČNÉ ZARIADENIE INDIKÁTOROV DEFORMÁCIÍ-MODEL 1550 A. 576	
8.5 CHYBY VYVOLANÉ SPOLOČNÝMI NAPÁJACÍMI KÁBLAMI V PARALELNÝCH OBVODOCH.....	580
8.5.1. Signál z paralelných obvodov	581
8.5.2. Počiatočná nevyváženosť.....	581
8.5.3. Kalibračné chyby.....	582
8.5.4. Meranie chýb prenikania.....	582
8.5.5. Chyby od zmeny teploty napájacieho kábla	583
8.5.6. Opravné merania	584
8.6 INŠTALAČNÝ TESTER TENZOMETROV - MODEL 1300.....	585
8.7 PROGRAM CATMAN PROFESIONAL A CATMAN EXPRESS	587
8.8 LITERATÚRA	594
9 POSTUPY PRI PRÍPRAVE A REALIZÁCIÍ TENZOMETRICKÝCH MERANÍ	595
9.1 TECHNIKY LEPENIA PRIPÁJACICH KÁBLOV NA POVRCHY PODLIEHAJÚCE VEĽKÝM ODSREDIVÝM SILÁM	595
9.2 SPÁJKOVANIE SPOJOV TENZOMETER – PRÍVODNÉ VODIČE STRIEBROM	597
9.3 VOĽBA SPRÁVNÝCH TVAROV A MIEST APLIKÁCIE SVORKOVNÍC.....	600
9.4 PRIPOJENIE PRÍVODNÝCH KÁBLOV ZABEZPEČUJÚCE MAXIMÁLNU ÚNAVOVÚ ŽIVOTNOSŤ TENZOMETROV	602
9.5 MERANIE VEĽKÝCH POMERNÝCH DEFORMÁCIÍ	603
9.6 SPÁJKOVANIE TENZOMETROV SO SPÁJKOVACÍMI BODMI (SVORKOVNICAMI)	608
9.7 OCHRANA TENZOMETROV PRED VPLYVOM PROSTREDIA.....	609
9.8 PRIPÁJANIE KÁBLOV NA NEPRILEPENÉ TENZOMETRE.....	611
9.9 TECHNIKY SPÁJKOVANIA TENZOMETROV	614
9.10 PRITLÁČANIE TENZOMETROV V PRIEBEHU ICH APLIKÁCIE	619
9.11 INŠTALÁCIA TENZOMETROV NA BETÓNOVÉ KONŠTRUKCIE	622
9.12 TROJDRÔTIKOVÉ VEDENIE PRI ŠTVRŤMOSTÍKOVOM ZAPOJENÍ TENZOMETRA.....	624

9.13 OPTIMALIZÁCIA NAPÁJANIA TENZOMETRA.....	626
9.14 RIADENIE ŠUMU PRI TENZOMETRICKÝCH MERANIACH.....	634
9.15 CHYBY V DÔSLEDKU NELINEARITY WHEATSTONOVHO MOSTÍKA	641
9.16 TEPLOTNÝ VÝSTUP TENZOMETERA A ZMENA DEFORMAČNÉHO FAKTORA S TEPLOTOU	648
9.16.1. Kompenzácia vplyvu teploty	651
9.16.2. Korekcia teplotného výstupu.....	654
9.16.3. Zmena deformačného faktora s teplotou	660
9.16.4. Súčasná korekcia teplotného výstupu a chýb deformačného faktora	662
9.16.5. Zohľadnenie krivosti povrchu na teplotný výstup.....	663
9.17 MERANIE TEPLOTNEJ ROZŤAŽNOSTI.....	665
9.17.1. Princíp meracej metódy	666
9.17.2. Postupy merania	668
9.17.3. Výber tenzometra.....	669
9.17.4. Inštalácia tenzometra.....	670
9.17.5. Prístrojové vybavenie pre pomerné deformácie a teplotu	672
9.17.6. Realizácia merania rozťažnosti.....	673
9.17.7. Špeciálne predbežné opatrenia a postupy pre zvýšenie presnosti	675
9.17.8. Obmedzenia.....	677
9.18 PRIEČNÁ CITLIVOSŤ TENZOMETROV A JEJ VPLYV NA VÝSLEDKY MERANIA.....	678
9.18.1. Chyby v dôsledku priečnej citlivosti	679
9.18.2. Korekcia priečnej citlivosti.....	681
9.18.3. Korekcia šmykovej deformácie	683
9.18.4. Pravouhlá (45°) ružica s tromi tenzometrami	684
9.18.5. Delta ružica	684
9.18.6. Korekcia hlavných deformácií.....	685
9.19 VPLYV ODKLONU TENZOMETROV NA VÝSLEDKY MERANIA.....	687
9.20 POSTUP VÝBERU TENZOMETRA A VOĽBA KRITÉRIA.....	692
9.20.1. Parametre pre výber tenzometra	693
9.20.2. Materiály nosnej fólie	695
9.20.3. Série tenzometrov	696
9.20.4. Dĺžka tenzometra	700
9.20.5. Reťazce tenzometrov.....	701
9.20.6. Voliteľné vlastnosti	703
9.20.7. Charakteristiky štandardného katalógu volieb tenzometrov série EA	707
9.20.8. Postup výberu tenzometra	708
9.21 POSTUP PRI VÝBERE TENZOMETRICKÝCH RUŽÍC	710
9.22 LITERATÚRA	716
10 KVANTIFIKÁCIA ZVYŠKOVÝCH NAPÄTÍ ODVŔTAVANÍM	721
10.1 VYBRANÉ POSTUPY URČENIA ZVYŠKOVÝCH NAPÄTÍ	722
10.1.1. Ultrazvukové (akustické) metódy.....	722
10.1.2. Akustoelastické metódy	725



10.1.3. Využitie röntgenového žiarenia.....	727
10.1.4. Fotomechanické techniky	732
10.1.5. Využitie metód numerickej analýzy.....	732
10.1.6. Odvrtavacie metódy	733
10.1.6.1 Matharova metóda.....	733
10.1.6.2 Soeteova a Vancrombruggeova metóda	734
10.1.6.3 Riparbelliho metóda.....	736
10.1.6.4 Boitenova a Ten Gateova metóda	736
10.1.6.5 Kelseyho metóda	737
10.1.6.6 Nisidova a Takabayashiho metóda	739
10.1.6.7 Rendlerova a Vignessova metóda.....	739
10.1.6.8 Bathgateova metóda.....	741
10.1.6.9 Cordianova a Salernova metóda	741
10.1.6.10 Bertova metóda	742
10.1.6.11 Shewchukova metóda	743
10.2 TEÓRIA TENZOMETRICKEJ METÓDY PRI ODVRTAVANÍ OTVORU	745
10.2.1. Analýza priechodného otvoru	746
10.2.2. Analýza slepého otvoru.....	751
10.2.3. Určenie koeficientov \bar{A} a \bar{B}	752
10.2.3.1 Experimentálna kalibrácia.....	753
10.2.3.2 Konštanty pre ružice na určenie zvyškových napätí	755
10.2.3.3 Numericky určené koeficienty.....	758
10.3 TECHNIKA EXPERIMENTU	760
10.3.1. Výber snímačov a ich inštalácia	760
10.3.2. Meracie reťazce pre meranie deformácie pri odvrtaní.....	761
10.4 SPRACOVANIE A INTERPRETÁCIA ÚDAJOV PRE SLEPÝ OTVOR	764
10.4.1. Základné údaje o tenzometroch vo väzbe na spracovanie výsledkov	767
10.4.2. Určenie napätí pre tenkú, ale aj hrubú vzorku	771
10.4.3. Príklad postupu vyhodnocovania zvyškových napätí	773
10.5 LITERATÚRA	778
11 ZARIADENIA NA URČOVANIE ZVYŠKOVÝCH NAPÄTÍ METÓDOU ODVRTAVANIA	787
11.1 ODVRTAVACÍ PRÍPRAVOK RY 61.....	787
11.2 ODVRTAVACIE ZARIADENIE RS-200.....	787
11.2.1. Postupnosť základných operácií.....	788
11.2.2. Opis zariadenia	788
11.2.3. Výber snímačov a lepidiel.....	791
11.2.4. Príprava povrchu.....	791
11.2.5. Aplikácia ružice a jej pripojenie.....	791
11.2.6. Situovanie, pripojenie a vyváženie	792
11.2.7. Vytvorenie otvoru a prípadné nastavenia zariadenia pre vysokorychlostné odvrtavanie	794
11.2.8. Vŕtanie otvoru pomocou zostavy odvrtavacej tyče	799

11.3 ZARIADENIE PRE MERANIE ZVYŠKOVÝCH NAPÄTÍ ODVŔTAVANÍM	
SINT – MTS 3000	800
11.3.1. Opis odvŕtavacieho zariadenia	801
11.3.2. Použitie a údržba zariadenia.....	807
11.3.3. Program kontroly a získavania dát (Residual stress analyzer [RESTAN]).....	816
11.3.4. Metódy určenia zvyškových napätí	831
11.3.4.1 Výpočet zvyškových napätí metódou ASTM	837
11.3.4.2 Výpočet zvyškových napätí integrálnou metódou	837
11.3.4.3 Výpočet zvyškových napätí metódou mocninových radov	837
11.3.4.4 Výpočet zvyškových napätí Kockelmannovou metódou	838
11.4 PRESNOSŤ A NEISTOTA MERANÍ ZVYŠKOVÝCH NAPÄTÍ	838
11.5 LITERATÚRA	839
12 PODOBNOSŤ, MODELOVANIE A DIMENZIONÁLNA ANALÝZA	841
12.1 PODOBNOSŤ A JEJ VYUŽITIE PRI MODELOVANÍ	842
12.1.1. Určovanie ďalších mierok pre modelovú podobnosť	844
12.1.2. Modelová podobnosť nosníkov a prútov.....	844
12.1.2.1 Nosník zaťažený osamelými silami	845
12.1.2.2 Nosník zaťažený spojitým rovnomerne rozloženým zaťažením.....	846
12.1.2.3 Zaťaženie vlastnou tiažou.....	846
12.1.2.4 Nosník zaťažený kombináciou viacerých zaťažení	847
12.1.3. Modelová podobnosť stien.....	847
12.1.4. Modelovanie rovinatej deformácie rovinnou napätosťou.....	850
12.1.5. Modelová podobnosť hriadelov namáhaných krútením	851
12.1.6. Modelová podobnosť pri vzpere	851
12.1.7. Modelová podobnosť dosiek.....	852
12.1.8. Modelová podobnosť škrupinových konštrukcií.....	855
12.1.9. Rozmery, jednotky a rovnice.....	855
12.2 DIMENZIONÁLNA ANALÝZA	858
12.2.1. Teória dimenzionálnej analýzy	864
12.2.2. Niektoré aplikácie dimenzionálnej analýzy	866
12.2.2.1 Opakujúce sa premenné.....	866
12.2.2.2 Alternatívny postup	868
12.2.2.3 Vytváranie pi - členov pomocou kontroly	869
12.3 TEÓRIA MODELOV	871
12.3.1. Podmienky návrhu modelu	871
12.3.2. Mierky.....	873
12.4 KONŠTRUKČNÉ MODELY	873
12.4.1. Pružné konštrukcie zaťažené statickým zaťažením	874
12.4.2. Pružné konštrukcie s malými deformáciami	875
12.4.3. Gravitačné zaťaženie	876
12.4.4. Efekt Poissonovho čísla.....	878
12.4.5. Dynamické zaťažovanie.....	878



12.4.6. Nelineárne správanie materiálu	880
12.5 MODELY PRÚDENIA TEKUTINY	881
12.5.1. Prúdenie potrubím	883
12.5.2. Prúdenie v otvorenom kanáli	883
12.5.3. Interakcia tekutina-konštrukcia	884
12.6 TEPLTNÉ MODELY	885
12.6.1. Prenos tepla pri prúdení v potrubí	885
12.6.2. Prenos tepla do ponorených telies	886
12.7 PRAVDIVOSŤ, ADEKVÁTNOSŤ A SKRESLENÉ MODELY	886
12.8 PODOBNOSTNÉ ZÁKONY VYPLÝVAJÚCE Z DIFERENCIÁLNYCH ROVNÍC	888
12.8.1. Tlmené kmitanie	888
12.8.2. Pohyb tekutiny	890
12.9 LITERATÚRA	891
13 FOTOELASTICIMETRIA	893
13.1 FYZIKÁLNE ZÁKLADY A MATEMATICKÉ MODELY VO FOTOELASTICIMETRII	893
13.2 URČENIE PARAMETROV SVETELNÝCH VĹN PRECHÁDZAJÚCICH ČASŤAMI OPTICKÝCH SÚSTAV S VYUŽITÍM JONESOVHO VÝPOČTU	899
13.3 ODRAZ A LOM SVETLA NA ROZHRANÍ DVOCH PROSTREDÍ	902
13.4 TEÓRIA MECHANICKO-OPTICKÉHO EFEKTU	907
13.5 OPTICKÉ SÚSTAVY PRE VYŠETROVANIE DEFORMÁCIE METÓDOU FOTOELASTICIMETRIE	912
13.6 MATEMATICKÉ MODELY POLARISKOPOV PRE ANALÝZU METÓDOU FOTOELASTICIMETRIE	918
13.6.1. Matematický model priamkového polariskopu	918
13.6.2. Matematický model kruhového polariskopu	922
13.6.3. Matematické modely polariskopov pre určovanie zlomkových radov izochróm s použitím kompenzácie	924
13.6.3.1 Určovanie zlomkových radov izochróm Tardyho kompenzačnou metódou	924
13.6.3.2 Určovanie zlomkového radu izochróm použitím Soleilovho-Babinetovho kompenzátora	925
13.6.4. Matematický model polariskopu pre šikmé asymetrické osvetlenie	927
13.7 VYUŽITIE METÓDY FOTOELASTICIMETRIE PRE ANALÝZU DEFORMÁCIE A NAPÄTOSTI	928
13.7.1. Analýza fotoelastických pruhových obrazcov	933
13.7.1.1 Výklad o celkovom rozložení deformácií	934
13.7.1.2 Vytváranie pruhov	934
13.7.1.3 Identifikácia pruhov	936
13.7.1.4 Určenie radu pruhov	937
13.7.2. Meranie hlavných smerov deformácií – základný princíp	938
13.7.3. Meranie veľkosti deformácií a napätí v bode	940
13.7.3.1 Vzťahy medzi radmi pruhu a veľkosťou deformácie a napätia	940

13.7.3.2 Oneskorená goniometrická (Tardyho) kompenzácia.....	942
13.7.3.3 Meranie použitím kompenzácie s nulovou rovnováhou	944
13.8 SEPARÁCIA HLAVNÝCH POMERNÝCH DEFORMÁCIÍ A NAPĚTÍ PRI MERANÍ FOTOELASTICIMETRICKOU METÓDOU	946
13.8.1. Deformácia a podmienka spojitosti	947
13.8.2. Napätosť a diferenciálne rovnice vnútornej rovnováhy	948
13.8.3. Fyzikálne rovnice	950
13.8.4. Experimentálna analýza deformačného a napätového poľa	951
13.8.5. Určenie poľa deformácií z poľa izochróm a izoklín	952
13.8.5.1 Rozdelenie deformácie v hraničných bodoch.....	953
13.8.5.2 Určenie rozloženia zložiek deformácií riešením Laplaceovej diferenciálnej rovnice	955
13.8.5.3 Rozloženie deformácií pozdĺž ľubovoľnej priamky	956
13.8.6. Určenie poľa napätí z poľa izochróm a izoklín.....	958
13.8.6.1 Zostrojenie poľa izostatických čiar.....	958
13.8.6.2 Výpočet šmykových napätí	959
13.8.6.3 Metódy separácie napätí	960
13.8.6.3.1 Separácia hlavných normálových napätí pozdĺž izostatickej čiary.	960
13.8.6.3.2 Metóda rozdielov šmykových napätí	963
13.8.7. Separácia deformácií pri využití len poľa izochróm alebo poľa izoklín.....	967
13.8.7.1 Metóda charakteristík založená na využití poľa izochróm	967
13.8.7.1.1 Zvláštne prípady využitia metódy charakteristík.....	971
13.8.7.1.2 Numerické spracovanie výsledkov experimentu pri uplatnení metódy charakteristík	972
13.8.7.2 Modifikovaná metóda charakteristík	974
13.8.7.3 Priama separácia pomerných deformácií na osi symetrie založená na využití charakteristík	978
13.8.7.4 Separácia pomerných deformácií založená na výlučnom využití poľa izoklín	979
13.9 URČENIE DEFORMAČNÉHO A NAPĚTĽOVÉHO POĽA NA ZÁKLADE ĎALŠIEHO PARAMETRA URČENÉHO EXPERIMENTOM.....	982
13.9.1. Využitie metódy šikmého osvetlenia pre separáciu zložiek deformácií	982
13.9.1.1 Metóda šikmého osvetlenia v rovinách hlavných smerov	983
13.9.1.2 Metóda šikmého osvetlenia v ľubovoľných rovinách	985
13.9.1.3 Metóda šikmého osvetlenia pri využití nesymetrického šikmého osvetlenia	986
13.9.2. Separácia hlavných pomerných deformácií, resp. hlavných napätí pomocou tenzometrov	987
13.9.2.1 Separačný tenzometer photostress	988
13.9.2.2 Tenzometrické korekcie.....	990
13.9.2.3 Poznámky k využitiu špeciálnych tenzometrov k separácii zložiek deformácií	995
13.9.3. Separácia pri využití drážky (Slitting).....	996
13.9.4. Metóda separácií deformácií založená na využití poľa izopách	996



13.10 TROJROZMERNÁ FOTOELASTICIMETRIA	998
13.10.1. Vyhodnotenie napätosti pomocou trojrozmerných modelov	1001
13.10.2. Metódy priestorovej fotoelasticimetrie s rozptýleným svetlom	1002
13.10.2.1 Polariskopy pre analýzu v rozptýlenom svetle.....	1006
13.11 POČÍTAČOM PODPOROVANÁ FOTOELASTICIMETRIA	1006
13.12 DYNAMICKÁ FOTOELASTICIMETRIA.....	1010
13.12.1. Dynamická kalibrácia	1011
13.12.2. Postup pri dynamickom vyšetovaní polí napätí, resp. deformácií	1012
13.12.3. Metódy nahrávania	1013
13.13 FOTOTERMOELASTICIMETRIA.....	1013
13.14 FOTOPLASTICITA	1014
13.15 FOTOELASTICIMETRIA PRI PRÚDENÍ.....	1015
13.16 DVOJLOMNÉ TEKUTINY	1015
13.17 ORTOTROPNÁ FOTOELASTICIMETRIA	1016
13.18 NOVÉ VÝSLEDKY A APLIKÁCIE FOTOELASTICIMETRICKÝCH METÓD.....	1016
13.19 LITERATÚRA	1017
14 FOTOELASTICKÉ MATERIÁLY, VÝROBA MODELOV, APLIKÁCIA POVRSTVENÍ, KALIBRÁCIA MATERIÁLOV A KOREKcie PORADIA PRUHOV	1031
14.1 MODELOVÉ MATERIÁLY A VLASTNOSTI.....	1031
14.1.1. Dvojdimenziálna modelová analýza	1032
14.1.2. Trojdimenziálna modelová analýza	1033
14.1.3. Materiály pre fotoelastické povrstvenie a ich výber	1035
14.1.3.1 Metóda aplikácie povrstvenia	1035
14.1.3.2 Citlivosť	1036
14.1.3.3 Efekt vystuženia.....	1039
14.1.3.4 Maximálne predĺženie	1043
14.1.3.5 Vplyv teploty pri skúškach	1043
14.1.3.6 Materiály povrstvení.....	1044
14.1.3.7 Lepidlá pre aplikáciu povrstvenia	1046
14.2 TVORBA MODELOV	1046
14.2.1. Výroba modelov obrábaním.....	1047
14.2.2. Modely vyrábané odlievaním	1048
14.2.3. Výroba modelov z plátov polymérov	1051
14.2.4. Zmrazovanie napätia	1052
14.3 KALIBRÁCIA MODELOVÝCH FOTOELASTICKÝCH MATERIÁLOV A POVRSTVENÍ.....	1054
14.3.1. Kalibrácia fotoelastických dosiek pre 2-D a 3-D modelovú analýzu	1054
14.3.1.1 Dvojdimenziálna modelová analýza	1055
14.3.1.2 Modelová trojdimenziálna analýza	1058
14.3.2. Kalibrácia fotoelastického povrstvenia a príčiny vzniku systematických chýb.....	1062

14.3.2.1	Postup pri kalibrovaní povrstvenia.....	1062
14.3.2.2	Príčiny vzniku systematických chýb pri odrazovej fotoelasticimetrii	1067
14.4	KOREKCIA PORADIA RADU PRUHOV PRI METÓDE FOTOELASTICKÉHO POVRSTVENIA.....	1070
14.4.1.	Počiatočný dvojlom	1071
14.4.2.	Spevňujúce efekty povrstvenia pri rovinnej napätosti.....	1074
14.4.3.	Spevnenie a extrapolácia spevňujúcich efektov pri ohybe	1078
14.4.4.	Zaťaženie ohybom alebo ohybovou deformáciou.....	1080
14.4.5.	Spevnenie a korekcia pri krútení	1082
14.4.6.	Spevnenie a korekcia pri tlakových nádobách.....	1083
14.4.7.	Korekcia účinkov tepelných zmien.....	1084
14.4.7.1	Povrstvené oblasti neobsahujúce okraj (vo vzdialenostiach, ktoré sú štyrikrát väčšie než hrúbka povrstvenia).....	1084
14.4.7.2	Voľná hrana telesa a okraja povrstvenia skúšobného telesa	1085
14.4.8.	Určenie citlivosti materiálu povrstvenia a jej dôsledky na určenie deformácií skúmanej súčiastky.....	1086
14.5	LITERATÚRA	1088
15	POLARISKOPY A ICH PRÍSLUŠENSTVO	1091
15.1	MERANIE DEFORMÁCIÍ A NAPÄTÍ TRANSMISNÝM POLARISKOPOM PHOTOELASTIC 060	1091
15.1.1.	Všeobecný opis polariskopu	1091
15.1.2.	Interpretácia fotoelastických pruhov v celom poli	1093
15.1.2.1	Vzťah medzi poradím pruhov a hodnotami napätí	1094
15.1.2.2	Identifikácia poradia pruhov.....	1095
15.1.2.3	Celoplošná analýza fotoelastických obrazcov	1098
15.1.3.	Meranie smerov hlavných napätí.....	1099
15.1.3.1	Meranie smerov hlavných napätí v bode.....	1100
15.1.3.2	Meranie smerov hlavných napätí v celom poli.....	1100
15.1.3.3	Alternatívny postup pre záznam izoklín v celom poli.....	1101
15.1.4.	Meranie poradia pruhov pri kolmom osvetlení kompenzáciou s nulovou rovnováhou	1102
15.1.4.1	Princíp kompenzácie s nulovou rovnováhou	1103
15.1.4.2	Kompenzátor s nulovou rovnováhou - model 067	1103
15.1.4.3	Meranie poradia pruhov s kompenzátorom - model 067	1104
15.1.4.4	Príklad nastavovania kompenzátora	1106
15.1.5.	Meranie poradia pruhov pri kolmom osvetlení goniometrickou (Tardyho) kompenzáciou.....	1106
15.1.5.1	Princíp goniometrickej (Tardyho) kompenzácie	1107
15.1.5.2	Znamienkové a symbolové dohovory používané pri polariskope model 060	1108
15.1.5.3	Meranie v bode na voľnej hrane	1109
15.1.5.4	Meranie v bode neležiacom na voľnej hrane.....	1110



15.1.6. Separácia hlavných napätí.....	1111
15.1.6.1 Prídavné zariadenie so šikmým dopadom - model 163	1111
15.1.6.2 Nastavenie a polohovanie modelu 163 pre separáciu napätí	1112
15.1.6.3 Vyhodnotenie údajov pri rovinatej napätosti v dvojrozmernom modeli.....	1113
15.1.7. Príslušenstvo – opis a použitie	1114
15.1.7.1 Difúzny zdroj bieleho svetla, model 361	1115
15.1.7.2 Zaťažovací rám – model 162.....	1115
15.1.7.3 Elektrický systém pre určenie hodnoty zaťaženia - model 262	1116
15.1.7.4 Mechanický silový merací systém - model 362	1116
15.1.7.5 Telemikroskop – model 065.....	1117
15.1.7.6 Kolimačný svetelný systém – model 461.....	1119
15.1.7.7 Fotoaparáty - modely 066 a 166.....	1122
15.1.7.8 Monochromátor – model 068 (pre použitie s difúznym svetelným systémom).....	1125
15.1.7.9 Násobiaca a zaostrovacia jednotka – model 064.....	1125
15.2 MERANIE POMERNÝCH DEFORMÁCIÍ A NAPÄTÍ ODRAZOVÝM POLARISKOPOM PHOTOELASTIC - MODEL 030	1129
15.2.1. Opis odrazového polariskopu, jeho montáž a nastavenie	1129
15.2.2. Interpretácia fotoelastických pruhov v celom poli	1134
15.2.3. Meranie smerov hlavných pomerných deformácií	1142
15.2.4. Meranie poradia pruhov pri kolmom osvetlení kompenzáciou s nulovou rovnováhou	1146
15.2.4.1 Princíp kompenzácie s nulovou rovnováhou	1146
15.2.4.2 Meranie poradia pruhov pri kolmom osvetlení metódou Tardyho (goniometrickej) kompenzácie	1150
15.2.5. Separácia hlavných pomerných deformácií.....	1155
15.2.5.1 Zariadenie so šikmým osvetlením - model 033	1155
15.2.6. Príslušenstvo odrazového polariskopu.....	1162
15.2.6.1 Telemikroskop - model 137	1162
15.2.6.2 Fotoaparát - model 335	1166
15.2.6.3 Monochromátor - model 036.....	1167
15.2.6.4 Stroboskopické svetlá - modely 134 a 234.....	1168
15.2.7. Automatické snímanie údajov	1169
15.2.7.1 Nastavenie a opis zariadenia na určovanie deformácie.....	1170
15.2.7.2 Postup pri meraní smerov a veľkosti rozdielu hlavných pomerných deformácií	1172
15.2.7.3 Kalibrovanie	1174
15.2.7.4 Prevádzka zapisovacieho zariadenia - model 532P.....	1176
15.3 MERANIE DEFORMÁCIÍ A NAPÄTÍ ODRAZOVÝM POLARISKOPOM PHOTOELASTIC - MODEL 040	1177
15.3.1. Opis odrazového polariskopu, jeho montáž a nastavenie	1178
15.3.2. Identifikácia poradia pruhov	1182
15.3.3. Meranie smerov hlavných pomerných deformácií	1185

15.3.4. Meranie poradia pruhov pri kolmom osvetlení kompenzáciou s nulovou rovnováhou	1187
15.3.5. Separácia hlavných pomerných deformácií a hlavných normálových napätí	1192
15.3.5.1 Separácia s využitím separačných tenzometrov	1193
15.3.6. Príslušenstvo odrazového polariskopu	1195
15.4 MERANIE DEFORMÁCIÍ A NAPÄTÍ ODRAZOVÝM POLARISKOPOM LF/Z-2	1196
15.4.1. Príprava počítača a nastavenie a ovládanie polariskopu	1200
15.4.2. Analýza v celom poli	1200
15.4.3. Smery hlavných normálových napätí a hlavných pomerných deformácií	1203
15.4.4. Meranie hlavných normálových napätí a hlavných pomerných deformácií pomocou kompenzátora - model 832	1203
15.4.5. Program PSCalc™ na výpočet napätia a deformácie	1205
15.4.6. Rovnice programu PSCalc™ pre metódu drážky ak je drážka v smere ε_1	1207
15.5 LITERATÚRA	1210
16 KMITANIE A MODÁLNA ANALÝZA MECHANICKÝCH SÚSTAV	1213
16.1 CHARAKTERISTIKY KMITAVÝCH PROCESOV MECHANICKÝCH SÚSTAV	1213
16.1.1. Klasifikácia dynamických procesov a mechanických sústav	1213
16.1.2. Fourierova transformácia a ďalšie funkcionálne operácie	1215
16.1.2.1 Komplexný Fourierov rad	1215
16.1.2.2 Amplitúdové spektrum	1217
16.1.2.3 Výkonové spektrum	1218
16.1.2.4 Fourierova transformácia, amplitúdová a výkonová spektrálna hustota	1219
16.1.2.5 Konvolúcia dvoch funkcií	1221
16.1.3. Ďalšie charakteristické funkcie signálov a sústav	1222
16.1.3.1 Distribučná funkcia, hustota pravdepodobnosti	1222
16.1.3.2 Autokorelačná funkcia	1224
16.1.3.3 Kepstrálna analýza	1224
16.1.3.4 Vzájomná korelačná funkcia	1225
16.1.3.5 Vzájomná spektrálna hustota	1225
16.1.3.6 Váhová funkcia	1226
16.1.3.7 Prechodová funkcia	1226
16.1.3.8 Komplexný frekvenčný prenos	1226
16.1.3.9 Prenosová funkcia $H(p)$	1228
16.1.3.10 Fázová informácia	1228
16.1.3.11 Informačný aspekt pri tvorení charakteristických funkcií	1229
16.2 DIGITÁLNA FREKVENČNÁ ANALÝZA	1230
16.2.1. Princíp diskkrétnej Fourierovej transformácie	1230
16.2.2. Rýchla Fourierova transformácia (FFT)	1234



16.2.3. Dôsledky diskkrétnej Fourierovej transformácie.....	1236
16.2.3.1 Vyhodnotiteľný frekvenčný rozsah.....	1236
16.2.3.2 Chyby zdanlivosti (aliasing)	1237
16.2.3.3 Chyby vplyvom úniku (leakage).....	1239
16.2.3.4 Váhové okná	1242
16.2.4. Charakteristické funkcie pri diskkrétnej Fourierovej transformácii	1247
16.2.4.1 Autospektrum a autokorelačná funkcia	1247
16.2.4.2 Krížové spektrum a vzájomná korelačná funkcia	1248
16.2.5. Neistoty pri spektrálnej analýze	1248
16.2.6. Použitie jednotlivých typov okien	1250
16.2.7. Prekrývanie signálu pre zníženie času analýzy	1251
16.2.8. Analýza zväčšovaním pásma (analýza zoom).....	1254
16.2.8.1 Metóda zmiešavania (heterodyn)	1255
16.2.8.2 Metóda záznamu dlhého času	1257
16.2.9. Dvojkanálový analyzátor	1259
16.2.9.1 Vzťahy medzi ideálnym vstupom a výstupom	1260
16.2.9.1.1 Odhady frekvenčnej prenosovej funkcie.....	1260
16.2.9.1.2 Koherenčná funkcia	1261
16.2.9.2 Odhady pre vstup a výstup digitálneho analyzátor.....	1262
16.2.9.3 Priemerovanie autospektra a krížového spektra	1263
16.2.9.4 Príčiny zníženej hodnoty koherenčnej funkcie	1263
16.2.9.5 Blokový diagram činnosti.....	1264
16.2.10. Vplyv šumu signálu na meranie frekvenčného prenosu	1265
16.2.10.1 Šum vo vstupnom signáli.....	1265
16.2.10.2 Šum vo výstupnom signáli.....	1267
16.2.10.3 Šum vo vstupnom aj výstupnom signáli	1268
16.3 DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY LINEÁRNYCH MECHANICKÝCH	
 SÚSTAV S JEDNÝM STUPŇOM VOĽNOSTI.....	1270
16.3.1. Váhová funkcia (časová oblasť).....	1270
16.3.2. Frekvenčný prenos (Fourierova oblasť).....	1271
16.3.3. Obrazový prenos (Laplaceova oblasť).....	1277
16.4 SNÍMAČE NA MERANIE MECHANICKÉHO KMITANIA	1278
16.4.1. Základné pojmy.....	1278
16.4.2. Prenosové vlastnosti absolútnych snímačov mechanických kmitov.....	1282
16.4.2.1 Voľné kmitanie s tlmením	1284
16.4.2.2 Vynútené kmitanie pri kinematickom buzení	1285
16.4.2.3 Kmitanie pri buzení mechanickými otrasmi.....	1288
16.4.3. Prenosové vlastnosti relatívnych dotkových snímačov.....	1290
16.4.4. Základy teórie elektromechanických prevodníkov	1292
16.4.4.1 Mechanická impedancia prvkov mechanickej sústavy	1293
16.4.4.2 Mechanická impedancia zotrvačnej sústavy	1295
16.4.5. Elektrické prevody snímačov	1298
16.4.5.1 Aktívne prevodníky	1298
16.4.5.2 Pasívne prevodníky	1301
16.5 BUDIČE KMITANIA.....	1303



16.5.1. Mechanické budiče	1304
16.5.2. Elektromagnetické budiče	1304
16.5.3. Elektrohydraulické budiče	1304
16.5.4. Neperiodické budenie mechanických sústav	1305
16.6 EXPERIMENTÁLNA MODÁLNA ANALÝZA	1306
16.6.1. Kmitanie sústav s viacerými stupňami voľnosti	1308
16.6.1.1 Určovanie počtu stupňov voľnosti sústavy	1308
16.6.1.2 Vlastné frekvencie a vlastné tvary kmitov	1309
16.6.1.3 Sústavy s viskóznym tlmením	1312
16.6.1.4 Priama metóda určovania frekvenčnej prenosovej funkcie	1313
16.6.1.5 Modálna metóda určovania frekvenčnej prenosovej funkcie	1314
16.6.2. Kmitanie sústav s nekonečným počtom stupňov voľnosti	1316
16.6.2.1 Vlastné frekvencie a vlastné tvary kmitov	1317
16.6.2.2 Podmienky ortogonalít, modálna transformácia pohybových rovníc	1319
16.6.3. Určovanie parametrov mechanických sústav	1322
16.6.3.1 Sústavy s jedným stupňom voľnosti	1322
16.6.3.2 Sústavy s viacerými stupňami voľnosti	1325
16.6.3.3 Sústavy s nekonečným počtom stupňov voľnosti	1329
16.7 MERACÍ SYSTÉM PULSE 6	1331
16.7.1. Meracie zariadenia 3560C a 3560D	1333
16.7.1.1 LAN rozhranie 7533	1333
16.7.1.2 Vstupno-výstupný modul 3032A	1334
16.7.2. Ovládací softvér PULSE	1335
16.8 LITERATÚRA	1338
17 HOLOGRAFIA A LASEROVÁ SPECKLE-INTERFEROMETRIA	1341
17.1 ZÁKLADY HOLOGRAFIE	1342
17.1.1. Základné rovnice holografického procesu	1344
17.1.2. Základné typy hologramov	1344
17.1.3. Základné vlastnosti hologramov	1346
17.1.4. Princípy digitálnej holografie	1348
17.2 HOLOGRAFICKÁ INTERFEROMETRIA	1350
17.2.1. Tvorba interferenčných pruhov v holografickej interferometrii	1351
17.2.2. Princíp vytvárania interferenčných pruhov pri metóde dvoch expozícií ..	1353
17.2.3. Metóda reálneho času	1355
17.2.4. Metóda časového priemeru	1356
17.2.5. Metóda posunutia fázy	1357
17.2.6. Holografické interferenčné obrazce a ich interpretácia	1358
17.2.6.1 Určenie premiestnení na základe využitia parametrov lokalizácie a kontrastu interferenčných pruhov	1360
17.2.6.2 Interpretácia interferogramov na základe absolútneho radu pruhov	1361
17.2.6.3 Interpretácia interferogramov na základe relatívneho radu pruhov	1362
17.3 APLIKÁCIE HOLOGRAFICKEJ INTERFEROMETRIE	1363



17.3.1. Meranie deformácií na povrchu objektov	1364
17.3.2. Nedeštruktívne hodnotenie materiálu	1367
17.3.3. Analýza kmitania	1368
17.3.3.1 Metóda Powella a Stetsona	1368
17.4 SPECKLE-INTERFEROMETRIA	1370
17.4.1. Speckle-efekt a jeho vlastnosti	1370
17.4.2. Princíp speckle-interferometrie	1373
17.4.2.1 Korelačná speckle-interferometria	1373
17.4.2.2 Speckle-interferometria s posunutím fázy	1376
17.4.3. Aplikácia speckle-fotografie a speckle-interferometrie	1378
17.4.4. Príklady aplikácie laserových optických meracích systémov v elektronickej speckle-interferometrii	1381
17.4.4.1 Systém Q-300	1381
17.4.4.2 Systém Q-450	1383
17.4.4.3 Systém Q-500	1384
17.4.4.4 Systém Q-600	1387
17.5 LITERATÚRA	1389
18 METÓDA MOIRÉ	1393
18.1 PODSTATA METÓDY MOIRÉ	1393
18.2 PRINCÍPY MERANIA PRI METÓDE MOIRÉ	1396
18.3 METÓDA IZOTHET	1397
18.3.1. Matematická analýza moiré-efektu pri homogénnej deformácii	1397
18.3.2. Jednoosová napätosť	1398
18.3.3. Rovinné úlohy	1400
18.3.4. Vyhodnotenie poľa izothet	1404
18.4 TIEŇOVÁ METÓDA MOIRÉ	1407
18.5 ODRAZOVÁ METÓDA MOIRÉ	1408
18.6 LITERATÚRA	1410
19 TIEŇOVÁ OPTICKÁ METÓDA KAUSTÍK	1411
19.1 FYZIKÁLNY PRINCÍP METÓDY	1411
19.1.1. Modely pre tieňové optické obrazy	1411
19.1.2. Vytváranie kaustík pomocou koncentrácií napätia	1413
19.2 KVANTITATÍVNY OPIS TIEŇOVÝCH OPTICKÝCH OBRAZOV	1415
19.2.1. Všeobecné rovnice zobrazenia	1415
19.2.2. Zobrazovacie rovnice a kaustiky pre špecifické príklady	1418
19.3 KAUSTIKY ČELA TRHLINY	1424
19.3.1. Statické úlohy	1424
19.3.2. Dynamické úlohy	1431
19.4 EXPERIMENTÁLNE POSTUPY	1434
19.4.1. Osvetľovanie vzoriek a zaznamenávanie tieňových vzorov	1434
19.4.2. Mierka pre nerovnoběžné svetelné lúče	1435
19.4.3. Prístrojová technika	1436
19.4.4. Materiály modelov a príprava vzoriek	1437

19.4.5. Vplyv lokálnej plasticity a napätosti	1438
19.5 APLIKÁCIE EXPERIMENTÁLNYCH POSTUPOV	1439
19.5.1. Dynamické namáhanie ohýbaných vzoriek	1439
19.5.2. Vznik trhlín pri rázovom zaťažení	1440
19.5.3. Rozvoj trhlín	1442
19.5.4. Zastavenie trhliny	1443
19.5.5. Napätové pole vo vzorke zaťaženej projektilom	1446
19.5.6. Tvar dvojitej trhliny pri pulzujúcom ťahovom napätí	1447
19.6 LITERATÚRA	1449
20 EXPERIMENTÁLNA LOMOVÁ MECHANIKA	1453
20.1 LOM PREŤAŽENÍM	1454
20.2 VPLYV VONKAJŠÍCH FAKTOROV NA VZNIK ŠTIEPNEHO LOMU	1461
20.3 VPLYV KONCENTRÁTOROV NAPÄTOSTI (KONŠTRUKČNÝCH VRUBOV) NA VZNIK ŠTIEPNEHO LOMU	1462
20.4 VPLYV VNÚTORNÝCH FAKTOROV (ŠTRUKTÚRY) NA KREHKÝ LOM NÍZKOUHLÍKOVÝCH A NÍZKOLEGOVANÝCH OCELÍ	1464
20.5 ZÁKLADY LOMOVEJ MECHANIKY	1467
20.5.1. Rýchlosť uvoľňovania energie (hnacia sila trhliny) a húževnatosť materiálu	1469
20.5.2. Stabilný, resp. nestabilný lom, R – krivka	1471
20.5.3. Napätová analýza okolia trhliny	1473
20.5.4. Určenie súčiniteľov intenzity napätí	1477
20.5.5. Lineárne pružná úloha s uvažovaním malej plastickej zóny	1480
20.5.5.1 Irwinov model korigovanej trhliny s plastickou zónou	1480
20.5.5.2 Dugdaleov-Barenblattov model korigovanej trhliny s plastickou zónou	1482
20.5.5.3 Lomové kritériá	1483
20.5.6. Pružneplastická úloha	1483
20.5.7. Kritérium hustoty deformačnej energie	1485
20.6 DVOJPARAMETRICKÁ LOMOVÁ MECHANIKA	1489
20.6.1. K I – T koncepcia	1489
20.6.2. J – Q koncepcia	1492
20.6.3. Lomová húževnatosť JC (Q)	1495
20.7 EXPERIMENTÁLNE METÓDY LOMOVEJ MECHANIKY	1496
20.7.1. Určenie súčiniteľa intenzity napätia v nepriehľadných telesách	1496
20.7.1.1 Metóda poddajnosti	1496
20.7.1.2 Roztvorenie trhliny (COD) a roztvorenie čela trhliny (CTOD)	1499
20.7.1.3 Metóda moiré	1499
20.7.1.4 Interferometria	1500
20.7.2. Určenie súčiniteľa intenzity napätia v priehľadných telesách	1502
20.7.2.1 Dvojrozmerné metódy	1502
20.7.2.2 Trojrozmerné metódy	1507
20.7.2.3 Hybridná experimentálno-numerická analýza	1508



20.7.2.4 Dynamická fotoelasticimetria a metóda kaustík	1509
20.7.3. Rast únavovej trhliny.....	1509
20.7.4. Rast creepovej trhliny	1512
20.8 LITERATÚRA	1513