

# Obsah

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Základní poznatky z teorie měření a vyhodnocování</b>        | <b>19</b> |
| 1.1      | Teorie chyb . . . . .   | 19        |
| 1.1.1    | Základní pojmy a zákonitosti . . . . .                          | 19        |
| 1.1.2    | Zákony rozložení náhodných chyb . . . . .                       | 20        |
| 1.1.3    | Pravděpodobnosti chyb . . . . .                                 | 21        |
| 1.2      | Vlivy omezeného počtu měření . . . . .                          | 22        |
| 1.2.1    | Stanovení nejpravděpodobnější hodnoty měřené veličiny . . . . . | 22        |
| 1.2.2    | Přesnost měření . . . . .                                       | 23        |
| 1.3      | Náhodné veličiny . . . . .                                      | 25        |
| 1.3.1    | Základní pojmy a definice . . . . .                             | 25        |
| 1.3.2    | Příklady rozdělení náhodných veličin . . . . .                  | 26        |
| 1.3.3    | Momenty náhodné veličiny . . . . .                              | 28        |
| 1.3.4    | Vyhodnocování náhodných jevů . . . . .                          | 29        |
| 1.3.5    | Poznámka o statistických rozborech . . . . .                    | 30        |
| <br>     |   |           |
| <b>2</b> | <b>Zpracování signálů</b>                                       | <b>33</b> |
| 2.1      | Náhodný proces . . . . .  | 33        |
| 2.1.1    | Základní pojmy . . . . .  | 33        |
| 2.1.2    | Stacionarita a ergodičnost . . . . .                            | 34        |
| 2.1.3    | Fourierova transformace . . . . .                               | 35        |
| 2.2      | Spektrální charakteristiky . . . . .                            | 36        |
| 2.2.1    | Základní pojmy a vztahy . . . . .                               | 36        |
| 2.2.2    | Souvislosti . . . . .   | 37        |
| 2.3      | Okénka . . . . .  | 38        |
| 2.3.1    | Obdélníkové okénko . . . . .                                    | 39        |
| 2.3.2    | Kosinové okénko a jeho modifikace . . . . .                     | 39        |
| 2.3.3    | Exponenciální okénko . . . . .                                  | 40        |
| 2.3.4    | Waveletové okénko . . . . .                                     | 40        |
| 2.4      | Cepstrum . . . . .  | 41        |
| 2.5      | Průchod náhodného procesu soustavou . . . . .                   | 42        |
| 2.5.1    | Frekvenční přenos . . . . .                                     | 42        |
| 2.5.2    | Výpočet charakteristik . . . . .                                | 44        |
| 2.5.3    | Koherence . . . . .   | 45        |
| 2.6      | Zvláštnosti při číslicovém zpracování signálů . . . . .         | 45        |
| 2.6.1    | Vzorkování . . . . .  | 45        |
| 2.6.2    | Chyby a jejich potlačování . . . . .                            | 46        |
| 2.6.3    | Ukládání spektrálních dat . . . . .                             | 49        |
| <br>     |   |           |
| <b>3</b> | <b>Matematické modely pro aproximaci naměřených dat</b>         | <b>51</b> |
| 3.1      | Základní postup sestavení modelu . . . . .                      | 51        |
| 3.1.1    | Formulace úlohy . . . . .                                       | 51        |
| 3.1.2    | Návrh modelu . . . . .  | 51        |
| 3.1.3    | Postup výpočtu . . . . .  | 52        |
| 3.1.4    | Zkrácený postup . . . . .                                       | 53        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.2      | Transformace předcházející regresnímu výpočtu . . . . .                                | 53        |
| 3.3      | Poznámky k tvorbě modelů . . . . .   | 54        |
| 3.4      | Zvláštní typy modelů . . . . .   | 54        |
| 3.5      | Sestavení pseudoinverzní matice . . . . .  | 55        |
| 3.6      | Vícerozměrné regrese u datových bází . . . . .   | 56        |
| <b>4</b> | <b>Rozměrová analýza</b> . . . . .   | <b>59</b> |
| 4.1      | Základní pojmy a skutečnosti . . . . .   | 59        |
| 4.2      | Bezrozměrová čísla . . . . .   | 61        |
| 4.2.1    | Sestavování bezrozměrových čísel . . . . .   | 61        |
| 4.2.2    | Ukázka výpočtu . . . . .   | 62        |
| 4.2.3    | Programovaný výpočet bezrozměrových čísel . . . . .                                    | 63        |
| 4.2.4    | Kombinování bezrozměrových čísel . . . . .   | 64        |
| 4.2.5    | Komentář k volbě bezrozměrových čísel . . . . .  | 65        |
| 4.2.6    | Příklady významných praktických aplikací . . . . .                                     | 66        |
| 4.2.7    | Často užívaná bezrozměrová čísla . . . . .   | 70        |
| 4.3      | Bezrozměrové rovnice . . . . .   | 71        |
| 4.3.1    | Kmitavá soustava s jedním stupněm volnosti . . . . .                                   | 71        |
| 4.3.2    | Příčně kmitající nosník . . . . .  | 72        |
| 4.3.3    | Příčně kmitající deska . . . . .   | 73        |
| 4.3.4    | Nelineární rovnice samobuzených kmitů . . . . .  | 74        |
| 4.3.5    | Užití bezrozměrovosti k převodu diferenciální rovnice parciální na obyčejnou . . . . . | 74        |
| <b>5</b> | <b>Podobnost a modelování</b> . . . . .  | <b>78</b> |
| 5.1      | Souvislost měřítek díla a modelu . . . . .   | 78        |
| 5.2      | Kriteria podobnosti . . . . .  | 80        |
| 5.3      | Podobnost u mechanických soustav . . . . .   | 80        |
| 5.3.1    | Elementární dynamická podobnost modelu a díla . . . . .                                | 80        |
| 5.3.2    | Návrh modelu pro vyšetřování dynamického chování mechanické soustavy . . . . .         | 81        |
| 5.3.3    | Podobnost u mechanismů . . . . .   | 83        |
| 5.4      | Užití podobnosti a modelování pro zvláštní úlohy . . . . .                             | 84        |
| 5.5      | Materiály pro stavbu mechanických modelů . . . . .                                     | 84        |
| <b>6</b> | <b>Měření kmitavého chování</b> . . . . .  | <b>86</b> |
| 6.1      | Zdroje poznatků o kmitavém chování mechanických soustav . . . . .                      | 86        |
| 6.2      | Volba měřené veličiny . . . . .  | 88        |
| 6.3      | Vztah mezi namáháním a rychlostí kmitání . . . . .                                     | 90        |
| 6.4      | Přípustné úrovně kmitání strojů . . . . .  | 91        |
| 6.5      | Působení kmitavých účinků na člověka . . . . .   | 91        |
| 6.6      | Snímání mechanických kmitů . . . . .   | 92        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>7</b> | <b>Jednoduché způsoby a prostředky pro měření mechanických veličin</b> | <b>94</b>  |
| 7.1      | Minimální výbava . . . . .   | 94         |
| 7.2      | Vybrané elementární výpočty . . . . .                                  | 94         |
| 7.2.1    | Staticky zatížené nosníky . . . . .                                    | 94         |
| 7.2.2    | Výpočet vlastních frekvencí kmitavé soustavy . . . . .                 | 95         |
| 7.3      | Přímé měření výchylek . . . . .  | 96         |
| 7.3.1    | Měrné klíny a kroužky . . . . .  | 96         |
| 7.3.2    | Přímý zápis . . . . .  | 97         |
| 7.3.3    | Ukazovátka s laserovým paprskem . . . . .                              | 97         |
| 7.3.4    | Mikroskop . . . . .  | 98         |
| 7.3.5    | Dalekohled . . . . .   | 98         |
| 7.3.6    | Videokamera . . . . .  | 99         |
| 7.4      | Měření frekvencí . . . . .   | 99         |
| 7.4.1    | Stopky . . . . .   | 100        |
| 7.4.2    | Kmitající planžeta . . . . .   | 100        |
| 7.4.3    | Hudební stupnice . . . . .   | 101        |
| 7.4.4    | Stroboskopická lampa . . . . .   | 101        |
| 7.5      | Měření otáček . . . . .  | 102        |
| 7.5.1    | Indukční snímač . . . . .  | 102        |
| 7.5.2    | Optický snímač . . . . .   | 103        |
| 7.5.3    | Stroboskopická metoda . . . . .  | 103        |
| 7.6      | Silové účinky . . . . .  | 103        |
| 7.6.1    | Vyvozování silových účinků . . . . .                                   | 104        |
| 7.6.2    | Siloměrný kroužek . . . . .  | 104        |
| 7.6.3    | Válcová pružina . . . . .  | 105        |
| 7.7      | Speciální případy měření . . . . .                                     | 106        |
| 7.7.1    | Absolutní hodnota zrychlení . . . . .                                  | 106        |
| 7.7.2    | Snímání geometrie prostorových ploch . . . . .                         | 106        |
| <b>8</b> | <b>Budiče</b>  | <b>109</b> |
| 8.1      | Všeobecně . . . . .  | 109        |
| 8.1.1    | Požadavky na budicí účinky . . . . .                                   | 109        |
| 8.1.2    | Typy budičů . . . . .  | 109        |
| 8.1.3    | Typy signálů . . . . .   | 110        |
| 8.2      | Elektromagnetické budiče . . . . .                                     | 110        |
| 8.2.1    | Bezdotykové připojení . . . . .  | 111        |
| 8.2.2    | Připojení tyčkou . . . . .   | 111        |
| 8.3      | Rázová kladiva . . . . .   | 111        |
| 8.3.1    | Všeobecně . . . . .  | 111        |
| 8.3.2    | Parametry rázového jevu . . . . .                                      | 112        |
| 8.3.3    | Provedení impaktních kladiv . . . . .                                  | 113        |
| 8.4      | Budiče s rotující excentrickou hmotou . . . . .                        | 114        |
| 8.4.1    | Budič s rotujícím silovým účinkem . . . . .                            | 114        |
| 8.4.2    | Budič s usměrněným silovým účinkem . . . . .                           | 116        |
| 8.4.3    | Autosynchronizace nespřážených vibrátorů . . . . .                     | 116        |
| 8.5      | Piezoelektrické budiče . . . . .                                       | 117        |
| 8.5.1    | Všeobecně . . . . .  | 117        |
| 8.5.2    | Vlastnosti . . . . .   | 118        |
| 8.5.3    | Příklad výpočtu vlastností piezoaktuátoru . . . . .                    | 118        |
| 8.5.4    | Poznámky k montáži . . . . .   | 120        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>9 Akcelerometry</b>  | <b>121</b> |
| 9.1 Podstata činnosti . . . . .   | 121        |
| 9.2 Konstrukční provedení . . . . .   | 122        |
| 9.3 Obory použitelnosti . . . . .   | 123        |
| 9.4 Upevnění . . . . .  | 124        |
| 9.5 Rušivé vlivy . . . . .  | 125        |
| 9.6 Předzesilovače . . . . .  | 126        |
| <br>  |            |
| <b>10 Tenzometry</b>  | <b>129</b> |
| 10.1 Princip . . . . .  | 129        |
| 10.1.1 Kovové tenzometry . . . . .  | 129        |
| 10.1.2 Polovodičové tenzometry . . . . .                                      | 130        |
| 10.1.3 Foliové tenzometry . . . . .   | 131        |
| 10.2 Vlastnosti . . . . .   | 131        |
| 10.3 Měřicí obvody . . . . .  | 132        |
| 10.4 Měření základních typů namáhání . . . . .                                | 133        |
| 10.4.1 Tah a tlak . . . . .   | 133        |
| 10.4.2 Ohyb . . . . .   | 134        |
| 10.4.3 Krut . . . . .   | 134        |
| 10.5 Zjišťování hlavních napětí . . . . .                                     | 135        |
| 10.6 Kalibrace . . . . .  | 137        |
| 10.7 Instalace . . . . .  | 137        |
| <br>  |            |
| <b>11 Laserové interferometry</b>   | <b>140</b> |
| 11.1 Všeobecně . . . . .  | 140        |
| 11.2 Zdroj koherentního světla . . . . .                                      | 141        |
| 11.3 Rušivé vlivy . . . . .   | 142        |
| 11.4 Měření vzdálenosti . . . . .   | 142        |
| 11.5 Měření náklonu . . . . .   | 144        |
| 11.6 Laser s užitím Dopplerova jevu . . . . .                                 | 145        |
| 11.7 Přístrojové vybavení . . . . .   | 147        |
| 11.8 Sestavování optické cesty . . . . .                                      | 148        |
| 11.9 Skenovací laser . . . . .  | 149        |
| <br>  |            |
| <b>12 Využití modulace a demodulace</b>                                       | <b>151</b> |
| 12.1 Základní poznatky z teorie . . . . .                                     | 151        |
| 12.1.1 Amplitudová modulace . . . . .   | 151        |
| 12.1.2 Fázová modulace . . . . .  | 152        |
| 12.1.3 Hilbertova transformace . . . . .                                      | 153        |
| 12.2 Zjišťování viskozního útlumu . . . . .                                   | 154        |
| 12.3 Zjišťování nerovnoměrnosti rotace . . . . .                              | 155        |
| 12.3.1 Uspořádání měření . . . . .  | 155        |
| 12.3.2 Zpracování naměřeného signálu . . . . .                                | 155        |
| 12.4 Měření velkých nerovnoměrných translačních pohybů užitím fázové modulace | 156        |
| 12.4.1 Uspořádání měření . . . . .  | 157        |
| 12.4.2 Zpracování naměřeného signálu . . . . .                                | 157        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>13</b> | <b>Intenzitimetrie</b>   | <b>160</b> |
| 13.1      | Akustická intenzitimetrie . . . . .                                  | 160        |
| 13.1.1    | Některé základní poznatky z akustiky . . . . .                       | 160        |
| 13.1.2    | Definice a postup výpočtu akustické intenzity . . . . .              | 161        |
| 13.1.3    | Uspořádání měření . . . . .  | 162        |
| 13.1.4    | Přímé vyhodnocení intenzity . . . . .                                | 162        |
| 13.1.5    | Vyhodnocení pomocí výkonových spektrálních hustot . . . . .          | 163        |
| 13.1.6    | Vlastní měření . . . . .   | 164        |
| 13.1.7    | Komentáře k užití v praxi . . . . .                                  | 165        |
| 13.1.8    | Poznámka o akustických hladinách . . . . .                           | 166        |
| 13.2      | Strukturální intenzitimetrie . . . . .                               | 167        |
| 13.2.1    | Definice . . . . .   | 167        |
| 13.2.2    | Postup výpočtu . . . . .   | 168        |
| 13.2.3    | Uspořádání měření . . . . .  | 170        |
| 13.2.4    | Postup při měření . . . . .  | 172        |
| <br>      |  |            |
| <b>14</b> | <b>Experimentální modální analýza</b>                                | <b>175</b> |
| 14.1      | Úvod . . . . .   | 175        |
| 14.1.1    | Základní pojmy . . . . .   | 175        |
| 14.1.2    | Možnosti použití . . . . .   | 176        |
| 14.1.3    | Historické poznámky . . . . .  | 177        |
| 14.2      | Teoretický základ metody . . . . .                                   | 177        |
| 14.2.1    | Matematický model kmitavé soustavy . . . . .                         | 177        |
| 14.2.2    | Modální transformace . . . . .                                       | 178        |
| 14.2.3    | Vyjádření přenosu pomocí modálních parametrů . . . . .               | 178        |
| 14.3      | Přípravné práce . . . . .  | 180        |
| 14.3.1    | Vytvoření sítě bodů . . . . .  | 180        |
| 14.3.2    | Volba referenčního bodu . . . . .                                    | 181        |
| 14.3.3    | Zachycení struktury v prostoru . . . . .                             | 182        |
| 14.4      | Měřicí aparatura . . . . .   | 183        |
| 14.4.1    | Zařízení pro vyvození buzení a pro snímání odezvy . . . . .          | 183        |
| 14.4.2    | Zařízení pro záznam signálů . . . . .                                | 184        |
| 14.4.3    | Kalibrace . . . . .  | 186        |
| 14.5      | Vlastní odměření frekvenčních přenosů . . . . .                      | 187        |
| 14.5.1    | Části programu pro sběr dat . . . . .                                | 187        |
| 14.5.2    | Rektifikace fázového zkreslení . . . . .                             | 188        |
| 14.6      | Určení modálních parametrů z naměřených dat . . . . .                | 188        |
| 14.6.1    | Formulace úlohy . . . . .  | 188        |
| 14.6.2    | Regrese podle kružnice v Gaussově rovině . . . . .                   | 189        |
| 14.6.3    | Vyhledání hodnoty vlastní frekvence a hysteretzního útlumu . . . . . | 190        |
| 14.7      | Využití modálních modelů . . . . .                                   | 190        |
| 14.7.1    | Znázorňování vlastních tvarů kmitu . . . . .                         | 191        |
| 14.7.2    | Kriterium modální věrnosti (MAC) . . . . .                           | 193        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>15 Zjišťování útlumu</b>                                   | <b>195</b> |
| 15.1 Matematické modely útlumu                                | 195        |
| 15.1.1 Soustava s viskozním tlumením                          | 195        |
| 15.1.2 Hysterezní tlumení                                     | 196        |
| 15.1.3 Proporcionální tlumení                                 | 196        |
| 15.1.4 Modální útlum  | 197        |
| 15.1.5 Přehled modelů útlumu                                  | 197        |
| 15.2 Metody určování parametrů útlumu                         | 199        |
| 15.2.1 Z doznívání kmitavého děje                             | 199        |
| 15.2.2 Regresí podle fázové charakteristiky                   | 200        |
| 15.2.3 Z obálky přechodové odezvy                             | 201        |
| 15.2.4 Metodou Monte Carlo                                    | 202        |
| 15.2.5 Regresí podle rezonanční křivky                        | 202        |
| 15.3 Praktická měření útlumu                                  | 203        |
| 15.3.1 Příklad s užitím měření vynuceného kmitání             | 203        |
| 15.3.2 Příklad s užitím metody experimentální modální analýzy | 204        |
| <br>  |            |
| <b>16 Sledování chodu strojů</b>                              | <b>206</b> |
| 16.1 Některé poznatky z teorie spolehlivosti                  | 206        |
| 16.1.1 Základní pojmy a souvislosti                           | 206        |
| 16.1.2 Zákony spolehlivosti                                   | 208        |
| 16.2 Provozní tvary kmitu                                     | 209        |
| 16.2.1 Teoretické poznatky                                    | 210        |
| 16.2.2 Vlastní měření   | 211        |
| 16.2.3 Vyhodnocení naměřených dat                             | 212        |
| 16.3 Průběžné sledování chodu strojů                          | 213        |
| 16.3.1 Širokopásmové vyhodnocování                            | 214        |
| 16.3.2 Užití spektrální analýzy                               | 215        |
| 16.4 Některé příčiny a příznaky nadměrných kmitů              | 216        |
| 16.4.1 Trhliny v materiálu                                    | 216        |
| 16.4.2 Opotřebení valivých ložisek                            | 216        |
| 16.4.3 Opotřebení záběru ozubených kol                        | 217        |
| 16.5 Metody vyhodnocování chodu pohonů                        | 219        |
| 16.5.1 Testování špičatosti                                   | 219        |
| 16.5.2 Crest faktor   | 219        |
| 16.5.3 Použití obálek   | 219        |
| 16.5.4 Cepstrální analýza                                     | 219        |
| 16.5.5 Synchronní filtrace                                    | 220        |
| 16.6 Nadměrné kmitání rotorů                                  | 220        |
| 16.6.1 Rotory s uložením ve valivých ložiskách                | 220        |
| 16.6.2 Rotory s anizotropní tuhostí ložisek                   | 221        |
| 16.6.3 Rotory s uložením v kluzných ložiskách                 | 223        |
| 16.6.4 Spektrální mapy  | 223        |
| 16.6.5 Sledování harmonických složek                          | 224        |
| 16.6.6 Orbitální mapy   | 225        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>17 Formální náležitosti a dokumentace měření</b> | <b>227</b> |
| 17.1 Písemné záznamy pořizované během měření        | 227        |
| 17.2 Protokol o měření                              | 228        |
| 17.3 Zpráva o měření                                | 228        |
| 17.3.1 Všeobecně                                    | 228        |
| 17.3.2 Titulní list                                 | 229        |
| 17.3.3 Shrnutí                                      | 230        |
| 17.3.4 Obsah  | 230        |
| 17.3.5 Úvod   | 230        |
| 17.3.6 Popis vlastního měření                       | 231        |
| 17.3.7 Závěry                                       | 231        |