

|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. ÚVOD .....                                                                                                                   | 5   |
| 2. SPOJITÉ SIGNÁLY A SOUSTAVY .....                                                                                             | 9   |
| 2.1. Spojité systémy .....                                                                                                      | 9   |
| 2.2. Popis LTIC systému .....                                                                                                   | 10  |
| 2.3. Fourierův integrál .....                                                                                                   | 12  |
| 2.4. Delta funkce $\delta(t)$ (Diracův impuls) .....                                                                            | 17  |
| 2.5. Impulsní odezva .....                                                                                                      | 19  |
| 2.6. Výpočet konvolutorního integrálu .....                                                                                     | 20  |
| 2.7. Periodické signály časově spojitě .....                                                                                    | 20  |
| 2.8. Geometrie nul a pólů .....                                                                                                 | 22  |
| 3. PŘECHODY MEZI SIGNÁLY SPOJITÝMI V ČASE A SIGNÁLY DISKRÉTNÍMI V ČASE<br>(VZORKOVANÝMI). VZORKOVACÍ VĚTA .....                 | 24  |
| 3.1. Odvození vzorkovací věty .....                                                                                             | 25  |
| 3.1.1. Odvození bez použití Diracových impulsů .....                                                                            | 25  |
| 3.1.2. Rekonstrukce signálu spojitěho v čase ze vzorkovaného signálu bez použití<br>Diracových impulsů .....                    | 28  |
| 3.1.3. Odvození spektra vzorkovaného průběhu s použitím Diracových impulsů .....                                                | 30  |
| 3.1.4. Základní typy interpolátorů používané pro rekonstrukci signálu do oblasti<br>spojitého času .....                        | 32  |
| 3.1.4.1. Ideální dolní propust .....                                                                                            | 32  |
| 3.1.4.2. Vzorkovač s pamětí řádu 0 .....                                                                                        | 33  |
| 3.1.4.3. Lineární interpolátor .....                                                                                            | 35  |
| 3.1.5. Chyba způsobená nedokonalou interpolací .....                                                                            | 36  |
| 3.1.6. Bloková struktura systému pro číslicové zpracování signálu .....                                                         | 36  |
| 4. SIGNÁLY A SYSTÉMY DISKRÉTNÍ V ČASE .....                                                                                     | 38  |
| 4.1. Popis diskrétních signálů v časové oblasti .....                                                                           | 38  |
| 4.2. Popis diskrétních signálů ve frekvenční oblasti .....                                                                      | 40  |
| 4.3. Vlastnosti Fourierovy transformace pro diskrétní signály (FTD) .....                                                       | 43  |
| 4.4. Příklady spekter důležitých diskrétních signálů .....                                                                      | 44  |
| 4.5. Lineární časově invariantní diskrétní systémy (LTIDS) .....                                                                | 46  |
| 4.5.1. Popis LTID systému lineárními diferenčními rovnicemi s konstantními<br>koeficienty .....                                 | 48  |
| 4.5.2. Popis LTID systému impulsní odezvou. Diskrétní konvoluce .....                                                           | 49  |
| 4.5.3. Popis LTID systému frekvenční odezvou .....                                                                              | 51  |
| 5. TRANSFORMACE Z .....                                                                                                         | 54  |
| 5.1. Definice, oblasti konvergence .....                                                                                        | 54  |
| 5.2. Zpětná transformace Z - nalezení $x(n)$ integrací obrazu .....                                                             | 56  |
| 5.3. Základní vlastnosti transformace Z .....                                                                                   | 56  |
| 5.4. Jednodušší metody zpětné transformace Z .....                                                                              | 58  |
| 5.4.1. Příklad, kdy $X(z)$ je polynom v $z$ nebo (nekonečná) mocninná řada .....                                                | 58  |
| 5.4.2. Příklad, kdy $X(z)$ je racionální lomená funkce .....                                                                    | 59  |
| 5.5. Využití transformace Z pro popis LTID systémů. Systémová funkce .....                                                      | 62  |
| 5.6. Geometrie nul a pólů systémové funkce $H(z)$ .....                                                                         | 63  |
| 6. DISKRÉTNÍ FOURIEROVA TRANSFORMACE (DFT) A ALGORITMY JEJÍHO RYCHLÉHO<br>VÝPOČTU (FFT) .....                                   | 65  |
| 6.1. Základní vlastnosti DFT .....                                                                                              | 68  |
| 6.2. Volba N pro DFT a použití DFT pro zpracování spojitých signálů .....                                                       | 71  |
| 6.2.1. Volba počtu bodů transformace (N) pro periodické signály .....                                                           | 71  |
| 6.2.2. Volba počtu bodů transformace (N) pro signály konečné délky .....                                                        | 73  |
| 6.2.3. Volba N pro neperiodické časově neomezené signály .....                                                                  | 73  |
| 6.2.4. Použití DFT pro zpracování spojitých signálů .....                                                                       | 74  |
| 6.3. Kruhová konvoluce .....                                                                                                    | 75  |
| 6.3.1. Výpočet aperiodické konvoluce dvou signálů konečné délky pomocí kruhové<br>konvoluce .....                               | 76  |
| 6.3.2. Použití DFT k číslicové filtraci - výpočet konvoluce konečného signálu se<br>signálem časově neomezeným .....            | 76  |
| 6.4. Rychlá Fourierova transformace - FFT .....                                                                                 | 78  |
| 6.5. Vyjádření DFT pomocí matic .....                                                                                           | 82  |
| 6.6. Využití DFT pro frekvenční analýzu periodických signálů .....                                                              | 83  |
| 6.7. Souvislost spektra získaného DFT s koeficienty Fourierovy řady a<br>s hodnotami Fourierova spektra spojitěho signálu ..... | 87  |
| 7. ČÍSLICOVÉ FILTRY (DISKRÉTNÍ FILTRY) .....                                                                                    | 89  |
| 7.1. Rozdělení číslicových filtrů .....                                                                                         | 89  |
| 7.1.1. Nerekurzivní diskrétní filtry (NRDF) .....                                                                               | 90  |
| 7.1.2. Rekurzivní diskrétní filtry (RDF) .....                                                                                  | 93  |
| 7.1.2.1. Přímá forma realizace RDF filtru .....                                                                                 | 95  |
| 7.1.2.2. Kaskádová forma realizace rekurzivních filtrů (RDF) .....                                                              | 96  |
| 7.1.2.3. Paralelní struktura filtru RDF .....                                                                                   | 98  |
| 7.2. Rozdělení diskrétních filtrů podle účelu .....                                                                             | 98  |
| 7.2.1. Frekvenčně selektivní diskrétní filtry .....                                                                             | 98  |
| 7.2.2. Diskrétní integrátory .....                                                                                              | 99  |
| 7.2.3. Diskrétní derivátory .....                                                                                               | 101 |

|                   |                                                                                              |     |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.2.4.            | Diskrétní filtry pro výpočet klouzavého průměru .....                                        | 103 |
| 7.3.              | Filtry se speciální strukturou .....                                                         | 107 |
| 7.3.1.            | Hřebenový filtr .....                                                                        | 107 |
| 7.3.2.            | Frekvenčně vzorkovaný filtr .....                                                            | 108 |
| 7.3.3.            | Křížové filtry .....                                                                         | 109 |
| 7.4.              | Adaptivní filtry a příklady jejich aplikace .....                                            | 111 |
| 7.5.              | Metody návrhu diskretních filtrů .....                                                       | 113 |
| 7.5.1.            | Návrh filtru typu FIR .....                                                                  | 115 |
| 7.5.1.1.          | Metoda užití Fourierovy transformace diskretních signálů a oken ..                           | 115 |
| 7.5.1.2.          | Nalezení koeficientů horní propusti a pásmové zádrže pomocí koeficientů dolní propusti ..... | 121 |
| 7.5.1.3.          | Výpočty koeficientů FIR filtrů pomocí počítačových programů .....                            | 122 |
| 7.5.2.            | Návrh filtrů typu IIR (rekurzivních filtrů - RDF) .....                                      | 122 |
| 7.5.2.1.          | Základní analogové dolní propusti .....                                                      | 123 |
| 7.5.2.2.          | Bilineární transformace .....                                                                | 125 |
| 7.5.2.3.          | Frekvenční transformace .....                                                                | 128 |
| 7.6.              | Transpozice .....                                                                            | 131 |
| 7.7.              | Nabídka hardwarové realizace číslicových filtrů .....                                        | 131 |
| 7.8.              | Porovnání vlastností FIR a IIR filtrů .....                                                  | 132 |
| 8.                | ZPRACOVÁNÍ STOCHASTICKÝCH SIGNÁLŮ .....                                                      | 133 |
| 8.1.              | Popis náhodných signálů z hlediska amplitudové struktury .....                               | 135 |
| 8.1.1.            | Popis funkčními vlastnostmi .....                                                            | 135 |
| 8.1.2.            | Popis amplitudového rozložení pomocí číselných hodnot .....                                  | 141 |
| 8.1.3.            | Základní typy rozložení pravděpodobnosti .....                                               | 145 |
| 8.1.3.1.          | Binomické rozdělení .....                                                                    | 145 |
| 8.1.3.2.          | Poissonovo rozdělení .....                                                                   | 146 |
| 8.1.3.3.          | Normální rozdělení (Gaussovo rozdělení) .....                                                | 147 |
| 8.1.3.4.          | Rovnoměrné rozdělení .....                                                                   | 149 |
| 8.1.4.            | Test chí-kvadrát .....                                                                       | 150 |
| 8.2.              | Popis náhodných signálů v časové oblasti .....                                               | 152 |
| 8.2.1.            | Korelační a kovarianční funkce určené ze souboru .....                                       | 152 |
| 8.2.2.            | Korelační a kovarianční funkce určené jako střední hodnoty v čase .....                      | 153 |
| 8.2.3.            | Užití korelačních funkcí .....                                                               | 156 |
| 8.2.4.            | Měření korelačních funkcí .....                                                              | 157 |
| 8.2.5.            | Výpočet korelačních funkcí na počítači .....                                                 | 159 |
| 8.2.5.1.          | Výpočet korelačních funkcí přímo z hodnot vzorků realizace .....                             | 159 |
| 8.2.5.2.          | Výpočet korelačních funkcí s využitím FFT .....                                              | 160 |
| 8.3.              | Popis náhodných procesů ve frekvenční oblasti .....                                          | 162 |
| 8.3.1.            | Definice a vlastnosti výkonových spektrálních hustot .....                                   | 162 |
| 8.3.2.            | Způsoby získání výkonových spektrálních hustot .....                                         | 166 |
| 8.3.2.1.          | Měření spektrální hustoty analogovou filtrací .....                                          | 166 |
| 8.3.2.2.          | Výpočet výkonové spektrální hustoty na počítači .....                                        | 166 |
| 8.3.3.            | Použití výkonových spektrálních hustot .....                                                 | 169 |
| 8.4.              | Generování pseudonáhodných posloupností počítačem .....                                      | 170 |
| 8.4.1.            | Rovnoměrně rozložené posloupnosti .....                                                      | 171 |
| 8.4.2.            | Normálně rozložené posloupnosti .....                                                        | 171 |
| 9.                | MĚŘENÍ SIGNÁLU ZA PŘÍTOMNOSTI ŠUMU .....                                                     | 172 |
| 9.1.              | Korelační filtrace .....                                                                     | 173 |
| 9.1.1.            | Měření autokorelační funkce $R_{xx}(\tau)$ .....                                             | 173 |
| 9.1.2.            | Měření vzájemné korelační funkce $R_{xy}(\tau)$ .....                                        | 174 |
| 9.2.              | Průměrování signálu .....                                                                    | 175 |
| 9.2.1.            | Sumační průměrování .....                                                                    | 175 |
| 9.2.2.            | Klouzavý průměr jako číslicový filtr .....                                                   | 176 |
| 9.3.              | Frekvenční filtrace .....                                                                    | 176 |
| 9.4.              | Synchronní detekce (koherentní detekce) .....                                                | 178 |
| 9.5.              | Společný popis metod zpracování signálu za přítomnosti šumu .....                            | 181 |
| 10.               | VLIV KONEČNÉ DÉLKY SLOVA NA ČÍSLICOVÉ ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU .....                               | 181 |
| 10.1.             | Způsoby vyjádření čísel při číslicovém zpracování signálu .....                              | 182 |
| 10.2.             | Kvantování a přetečení .....                                                                 | 184 |
| 10.3.             | Kvantizační šum analogově-číslcového převodu .....                                           | 185 |
| 10.4.             | Vliv kvantování koeficientů filtrů .....                                                     | 187 |
| 10.5.             | Vliv konečné délky slova mezivýsledků u číslicových filtrů .....                             | 189 |
| 10.6.             | Mezní cykly u rekurzivních LTID systémů .....                                                | 190 |
| 10.7.             | Závěrečné poznámky k problémům numerické přesnosti .....                                     | 194 |
| 11.               | SPECIÁLNÍ OBVODY PRO ČÍSLICOVÉ ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU - ČÍSLICOVÉ SIGNÁLOVÉ PROCESORY .....      | 194 |
| 11.1.             | Číslicový signálový mikropočítač Analog Devices ADSP-2101 .....                              | 197 |
| 11.1.1.           | Architektura obvodu ADSP-2101 .....                                                          | 199 |
| 11.1.2.           | Přehled instrukcí procesoru ADSP-2101 .....                                                  | 212 |
| 11.1.3.           | Vývojové prostředky pro procesor ADSP-2101 .....                                             | 223 |
| 11.1.3.1.         | Softwarové vývojové prostředky .....                                                         | 223 |
| 11.1.3.2.         | Hardwarové vývojové prostředky .....                                                         | 230 |
| SEZNAM LITERATURY | .....                                                                                        | 231 |