

| | |
|---|-----------|
| OBSAH | 3 |
| 1. Úvod | 8 |
| 2. Základní vztahy | 10 |
| 2.1. Maticový popis dvojbranů | 11 |
| 2.1.1. Vstupní a výstupní impedance dvojbranu | 12 |
| 2.2. Elementární dvojbrany | 12 |
| 2.2.1. Nulor | 12 |
| 2.2.2. Ideální řízené zdroje napětí a proudu | 13 |
| 2.2.3. Imitanční konvertory | 15 |
| 2.2.4. Imitanční. invertory | 16 |
| 2.3. Zpětná vazba | 17 |
| 2.3.1. Klasifikace elektronických zpětných vazeb | 17 |
| 2.3.2. Vliv zpětné vazby na vstupní a výstupní impedanci | 19 |
| 2.3.3. Vliv zpětné vazby na kmitočtovou závislost přenosu | 20 |
| 2.3.4. Vliv zpětné vazby na kolísání zesílení soustavy | 20 |
| 2.3.5. Vliv zpětné vazby na rušivé jevy ve zpětnovazební soustavě | 21 |
| 2.3.6. Vliv zpětné vazby na stabilitu zpětnovazební soustavy | 21 |
| 2.3.6.1. Nyquistovo a Bodeho kritérium stability | 21 |
| 2.3.6.2. Imitanční kritérium stability. | 23 |
| 2.4. Korekce zesilovačů | 25 |
| 2.4.1. Integrační korekce | 26 |
| 2.4.2. Derivační korekce | 27 |
| 2.4.3. Integračně-derivační korekce | 28 |
| 3. Tranzistorové zesilovače | 29 |
| 3.1. Nastavení a stabilizace pracovního bodu | 29 |
| 3.1.1. Pracovní bod bipolárního tranzistoru | 29 |
| 3.1.2. Pracovní bod unipolárního tranzistoru | 33 |
| 3.1.3. Stabilizace polohy pracovního bodu | 34 |
| 3.2. Jednostupňové tranzistorové zesilovače | 35 |
| 3.2.1. Zesilovače s bipolárním tranzistorem | 36 |
| 3.2.2. Zesilovač s unipolárním tranzistorem | 39 |
| 3.3. Vazby zesilovacích stupňů | 40 |
| 3.3.1. Stejnoseměrné vazby | 41 |
| 3.3.2. Střídavé vazby | 43 |
| 3.4. Rozdílový zesilovač | 45 |
| 3.5. Kmitočtové charakteristiky zesilovačů | 46 |
| 3.5.1. Kmitočtové charakteristiky tranzistorů | 46 |
| 3.5.2. Millerův jev | 47 |
| 3.5.3. Kmitočtové charakteristiky zesilovačů | 49 |

| | |
|---|-----------|
| OBSAH | 3 |
| 1. Úvod | 8 |
| 2. Základní vztahy | 10 |
| 2.1. Maticový popis dvojbranů | 11 |
| 2.1.1. Vstupní a výstupní impedance dvojbranu | 12 |
| 2.2. Elementární dvojbrany | 12 |
| 2.2.1. Nulor | 12 |
| 2.2.2. Ideální řízené zdroje napětí a proudu | 13 |
| 2.2.3. Imitanční konvertory | 15 |
| 2.2.4. Imitanční. invertory | 16 |
| 2.3. Zpětná vazba | 17 |
| 2.3.1. Klasifikace elektronických zpětných vazeb | 17 |
| 2.3.2. Vliv zpětné vazby na vstupní a výstupní impedanci | 19 |
| 2.3.3. Vliv zpětné vazby na kmitočtovou závislost přenosu | 20 |
| 2.3.4. Vliv zpětné vazby na kolísání zesílení soustavy | 20 |
| 2.3.5. Vliv zpětné vazby na rušivé jevy ve zpětnovazební soustavě | 21 |
| 2.3.6. Vliv zpětné vazby na stabilitu zpětnovazební soustavy | 21 |
| 2.3.6.1. Nyquistovo a Bodeho kritérium stability | 21 |
| 2.3.6.2. Imitanční kritérium stability. | 23 |
| 2.4. Korekce zesilovačů | 25 |
| 2.4.1. Integrační korekce | 26 |
| 2.4.2. Derivační korekce | 27 |
| 2.4.3. Integračně-derivační korekce | 28 |
| 3. Tranzistorové zesilovače | 29 |
| 3.1. Nastavení a stabilizace pracovního bodu | 29 |
| 3.1.1. Pracovní bod bipolárního tranzistoru | 29 |
| 3.1.2. Pracovní bod unipolárního tranzistoru | 33 |
| 3.1.3. Stabilizace polohy pracovního bodu | 34 |
| 3.2. Jednostupňové tranzistorové zesilovače | 35 |
| 3.2.1. Zesilovače s bipolárním tranzistorem | 36 |
| 3.2.2. Zesilovač s unipolárním tranzistorem | 39 |
| 3.3. Vazby zesilovacích stupňů | 40 |
| 3.3.1. Stejnoseměrné vazby | 41 |
| 3.3.2. Střídavé vazby | 43 |
| 3.4. Rozdílový zesilovač | 45 |
| 3.5. Kmitočtové charakteristiky zesilovačů | 46 |
| 3.5.1. Kmitočtové charakteristiky tranzistorů | 46 |
| 3.5.2. Millerův jev | 47 |
| 3.5.3. Kmitočtové charakteristiky zesilovačů | 49 |

| | |
|--|------------|
| 4. Operační zesilovače | 52 |
| 4.1. Ideální operační zesilovač | 52 |
| 4.2. Rozdělení a parametry reálných oper. zesilovačů | 53 |
| 4.2.1. Druhy operačních zesilovačů | 53 |
| 4.2.2. Základní parametry reálného OZ | 54 |
| 4.3. Vnitřní struktura, stabilita a korekce OZ | 56 |
| 4.3.1. Vnitřní struktura OZ | 56 |
| 4.3.2. Kmitočtová korekce OZ | 57 |
| 4.4. Použití OZ | 59 |
| 4.4.1. Základní zapojení s OZ | 59 |
| 4.5. Chyby reálných operačních sítí | 65 |
| 4.5.1. Vliv vstupního odporu R_I a konečného zesílení A_{OL} . | 65 |
| 4.5.2. Vliv nedostatečného potlačení souhlasného signálu CMR | 66 |
| 4.5.3. Vliv vstupních offsetů | 67 |
| 4.5. Měření na operačních zesilovačích | 68 |
| 4.6. Speciální operační zesilovače | 71 |
| 4.6.1. Výkonové zesilovač | 71 |
| 4.6.2. Izolační zesilovače | 73 |
| 4.7. Komparátory | 75 |
| 4.7.1. Ideální komparátor | 76 |
| 4.7.2. Reálný komparátor | 76 |
| 4.7.3. Komparátory s hysterezí | 76 |
| 4.7.4. Speciální komparátory | 78 |
| 5. Relaxační generátory, převodníky U/f, f/U | 80 |
| 5.1. Jednoduché relaxační generátory | 80 |
| 5.2. Převodníky napětí / kmitočet | 83 |
| 5.3. Monostabilní klopné obvody | 85 |
| 5.4. Obvod NE555 | 86 |
| 5.5. Převodníky kmitočet / napětí | 89 |
| 6. Harmonické oscilátory | 92 |
| 6.1. Oscilátory se záporným odporem | 92 |
| 6.2. Zpětnovazební oscilátory | 96 |
| 6.2.1. Zpětnovazební oscilátory RC | 96 |
| 6.2.2. Stabilizace amplitudy kmitů RC oscilátorů | 98 |
| 6.2.3. Zpětnovazební oscilátory LC | 99 |
| 6.3. Krystalové oscilátory | 101 |
| 7. Počítačová simulace analogových obvodů | 103 |
| 7.1. Program PSpice | 104 |
| 7.1.1. Vstupní soubor *.cir | 104 |

| | |
|--|------------|
| 4. Operační zesilovače | 52 |
| 4.1. Ideální operační zesilovač | 52 |
| 4.2. Rozdělení a parametry reálných oper. zesilovačů | 53 |
| 4.2.1. Druhy operačních zesilovačů | 53 |
| 4.2.2. Základní parametry reálného OZ | 54 |
| 4.3. Vnitřní struktura, stabilita a korekce OZ | 56 |
| 4.3.1. Vnitřní struktura OZ | 56 |
| 4.3.2. Kmitočtová korekce OZ | 57 |
| 4.4. Použití OZ | 59 |
| 4.4.1. Základní zapojení s OZ | 59 |
| 4.5. Chyby reálných operačních sítí | 65 |
| 4.5.1. Vliv vstupního odporu R_I a konečného zesílení A_{OL} . | 65 |
| 4.5.2. Vliv nedostatečného potlačení souhlasného signálu CMR | 66 |
| 4.5.3. Vliv vstupních offsetů | 67 |
| 4.5. Měření na operačních zesilovačích | 68 |
| 4.6. Speciální operační zesilovače | 71 |
| 4.6.1. Výkonové zesilovač | 71 |
| 4.6.2. Izolační zesilovače | 73 |
| 4.7. Komparátory | 75 |
| 4.7.1. Ideální komparátor | 76 |
| 4.7.2. Reálný komparátor | 76 |
| 4.7.3. Komparátory s hysterezí | 76 |
| 4.7.4. Speciální komparátory | 78 |
| 5. Relaxační generátory, převodníky U/f, f/U | 80 |
| 5.1. Jednoduché relaxační generátory | 80 |
| 5.2. Převodníky napětí / kmitočet | 83 |
| 5.3. Monostabilní klopné obvody | 85 |
| 5.4. Obvod NE555 | 86 |
| 5.5. Převodníky kmitočet / napětí | 89 |
| 6. Harmonické oscilátory | 92 |
| 6.1. Oscilátory se záporným odporem | 92 |
| 6.2. Zpětnovazební oscilátory | 96 |
| 6.2.1. Zpětnovazební oscilátory RC | 96 |
| 6.2.2. Stabilizace amplitudy kmitů RC oscilátorů | 98 |
| 6.2.3. Zpětnovazební oscilátory LC | 99 |
| 6.3. Krystalové oscilátory | 101 |
| 7. Počítačová simulace analogových obvodů | 103 |
| 7.1. Program PSpice | 104 |
| 7.1.1. Vstupní soubor *.cir | 104 |

| | |
|--|------------|
| 7.1.2. Součástky v PSpice | 110 |
| 7.1.3. Příkazy PSpice | 118 |
| 7.1.4. Standardní modely součástek v PSpice | 129 |
| 7.2. Program Probe | 132 |
| 7.3. Program Schematics | 135 |
| 7.3.1. Základní operace se Schematics | 135 |
| 7.3.2. Tvorba schémat pomocí Schematics | 139 |
| 8. Aktivní filtry | 143 |
| 8.1. Přehled vlastností filtrů | 143 |
| 8.1.1. Přenos filtru | 143 |
| 8.1.2. Typy filtrů | 145 |
| 8.1.2.1. Normalizované přenosy filtrů 1. a 2. řádu | 147 |
| 8.1.2.2. Transformace filtrů | 148 |
| 8.1.3. Aproximace filtrů | 150 |
| 8.1.3.1. Výpočty přenosů filtrů | 155 |
| 8.1.4. Filtry pro nízké kmitočty | 158 |
| 8.2. Aktivní filtry s jedním operačním zesilovačem | 160 |
| 8.2.1. Aktivní filtry 1. řádu | 160 |
| 8.2.2. Aktivní filtry 2. řádu | 164 |
| 8.2.2.1. Aktivní filtry s vícenásobnou ZV | 165 |
| 8.2.2.2. Aktivní Filtry Sallen-Key | 167 |
| 8.3. Aktivní filtry s větším počtem OZ | 171 |
| 8.3.1. Filtry vyšších řádů | 175 |
| 8.4. Aktivní filtry se syntetickými součástkami | 176 |
| 8.5. Aktivní filtry s přepínanými kondenzátory | 179 |
| 8.6. Počítačové modelování filtrů | 182 |
| 8.6.1. Vliv vlastností součástek na parametry aktivních filtrů | 182 |
| 8.6.2. Modelování aktivních filtrů v PSpice | 183 |
| 9. Fázový závěs | 184 |
| 9.1. Princip fázového závěsu | 184 |
| 9.2. Funkční bloky fázového závěsu | 187 |
| 9.2.1. Fázové detektory | 187 |
| 9.2.2. Filtry | 194 |
| 9.2.3. Napěťově řízené oscilátory | 195 |
| 9.3. Přenos fázového závěsu | 197 |
| 9.3.1. Přenos na výstup kmitočtu | 197 |
| 9.3.2. Přenos na výstup napětí | 198 |
| 9.3.3. Fázová chyba | 198 |
| 9.3.4. Vliv filtru na chování fázového závěsu | 200 |
| 9.4. Dynamické vlastnosti fázového závěsu | 202 |

| | |
|--|------------|
| 7.1.2. Součástky v PSpice | 110 |
| 7.1.3. Příkazy PSpice | 118 |
| 7.1.4. Standardní modely součástek v PSpice | 129 |
| 7.2. Program Probe | 132 |
| 7.3. Program Schematics | 135 |
| 7.3.1. Základní operace se Schematics | 135 |
| 7.3.2. Tvorba schémat pomocí Schematics | 139 |
| 8. Aktivní filtry | 143 |
| 8.1. Přehled vlastností filtrů | 143 |
| 8.1.1. Přenos filtru | 143 |
| 8.1.2. Typy filtrů | 145 |
| 8.1.2.1. Normalizované přenosy filtrů 1. a 2. řádu | 147 |
| 8.1.2.2. Transformace filtrů | 148 |
| 8.1.3. Aproximace filtrů | 150 |
| 8.1.3.1. Výpočty přenosů filtrů | 155 |
| 8.1.4. Filtry pro nízké kmitočty | 158 |
| 8.2. Aktivní filtry s jedním operačním zesilovačem | 160 |
| 8.2.1. Aktivní filtry 1. řádu | 160 |
| 8.2.2. Aktivní filtry 2. řádu | 164 |
| 8.2.2.1. Aktivní filtry s vícenásobnou ZV | 165 |
| 8.2.2.2. Aktivní Filtry Sallen-Key | 167 |
| 8.3. Aktivní filtry s větším počtem OZ | 171 |
| 8.3.1. Filtry vyšších řádů | 175 |
| 8.4. Aktivní filtry se syntetickými součástkami | 176 |
| 8.5. Aktivní filtry s přepínanými kondenzátory | 179 |
| 8.6. Počítačové modelování filtrů | 182 |
| 8.6.1. Vliv vlastností součástek na parametry aktivních filtrů | 182 |
| 8.6.2. Modelování aktivních filtrů v PSpice | 183 |
| 9. Fázový závěs | 184 |
| 9.1. Princip fázového závěsu | 184 |
| 9.2. Funkční bloky fázového závěsu | 187 |
| 9.2.1. Fázové detektory | 187 |
| 9.2.2. Filtry | 194 |
| 9.2.3. Napěťově řízené oscilátory | 195 |
| 9.3. Přenos fázového závěsu | 197 |
| 9.3.1. Přenos na výstup kmitočtu | 197 |
| 9.3.2. Přenos na výstup napětí | 198 |
| 9.3.3. Fázová chyba | 198 |
| 9.3.4. Vliv filtru na chování fázového závěsu | 200 |
| 9.4. Dynamické vlastnosti fázového závěsu | 202 |

| | |
|---|------------|
| 9.4.1. Pásmo udržení | 203 |
| 9.4.2. Pásmo zachycení | 204 |
| 9.4.3. Pásmo vtažení | 205 |
| 9.4.4. Spektrální čistota výstupního signálu | 208 |
| 9.5. Aplikace fázového závěsu | 209 |
| 10. Výkonové zesilovače | 211 |
| 10.1. Vlastnosti výkonových tranzistorů | 211 |
| 10.1.1. Vlastnosti bipolárního výkonového tranzistoru | 211 |
| 10.1.2. Vlastnosti výkonového tranzistoru MOS FET | 214 |
| 10.2. Nelineární zkreslení v zapojení SE a SK | 215 |
| 10.3. Třídy výkonových zesilovačů | 218 |
| 10.3.1. Třída A | 218 |
| 10.3.2. Třída B | 220 |
| 10.3.3. Třída AB | 223 |
| 10.3.4. Třída C | 224 |
| 10.3.5. Třída D | 225 |
| 10.4. Chlazení výkonových polovodičových součástek | 229 |
| 10.5. Výkonové zesilovače třídy AB | 233 |
| 10.5.1. Koncové stupně | 234 |
| 10.5.2. Ochranné obvody koncových stupňů | 239 |
| 10.5.3. Budící stupně | 241 |
| 10.5.4. Zapojení výkonových zesilovačů | 243 |
| 10.6. Počítačové modelování výkonových zesilovačů | 245 |
| 11. Nelineární obvody | 249 |
| 11.1. Spínače | 249 |
| 11.2. Vzorkovací obvody | 255 |
| 11.3. Paměť maxima | 259 |
| 11.4. Násobičky | 259 |
| 11.4.1. Násobička s proměnnou strmostí | 261 |
| 11.4.2. Logaritmická násobička | 266 |
| 11.4.3. Násobička s řízenými odpory | 269 |
| 11.4.4. Kvadratická násobička | 270 |
| 11.4.5. Impulsní násobička | 270 |
| 11.4.6. Použití násobiček | 271 |
| 11.5. Přesné usměrňovače | 274 |
| 11.5.1. Půlvlnný přesný usměrňovač | 274 |
| 11.5.2. Celovlnný přesný usměrňovač | 276 |
| 11.5.3. Výběr maximální hodnoty | 277 |
| 11.6. Omezovače | 278 |
| 11.7. Generátory funkcí | 279 |

| | |
|---|------------|
| 9.4.1. Pásmo udržení | 203 |
| 9.4.2. Pásmo zachycení | 204 |
| 9.4.3. Pásmo vtažení | 205 |
| 9.4.4. Spektrální čistota výstupního signálu | 208 |
| 9.5. Aplikace fázového závěsu | 209 |
| 10. Výkonové zesilovače | 211 |
| 10.1. Vlastnosti výkonových tranzistorů | 211 |
| 10.1.1. Vlastnosti bipolárního výkonového tranzistoru | 211 |
| 10.1.2. Vlastnosti výkonového tranzistoru MOS FET | 214 |
| 10.2. Nelineární zkreslení v zapojení SE a SK | 215 |
| 10.3. Třídy výkonových zesilovačů | 218 |
| 10.3.1. Třída A | 218 |
| 10.3.2. Třída B | 220 |
| 10.3.3. Třída AB | 223 |
| 10.3.4. Třída C | 224 |
| 10.3.5. Třída D | 225 |
| 10.4. Chlazení výkonových polovodičových součástek | 229 |
| 10.5. Výkonové zesilovače třídy AB | 233 |
| 10.5.1. Koncové stupně | 234 |
| 10.5.2. Ochranné obvody koncových stupňů | 239 |
| 10.5.3. Budící stupně | 241 |
| 10.5.4. Zapojení výkonových zesilovačů | 243 |
| 10.6. Počítačové modelování výkonových zesilovačů | 245 |
| 11. Nelineární obvody | 249 |
| 11.1. Spínače | 249 |
| 11.2. Vzorkovací obvody | 255 |
| 11.3. Paměť maxima | 259 |
| 11.4. Násobičky | 259 |
| 11.4.1. Násobička s proměnnou strmostí | 261 |
| 11.4.2. Logaritmická násobička | 266 |
| 11.4.3. Násobička s řízenými odpory | 269 |
| 11.4.4. Kvadratická násobička | 270 |
| 11.4.5. Impulsní násobička | 270 |
| 11.4.6. Použití násobiček | 271 |
| 11.5. Přesné usměrňovače | 274 |
| 11.5.1. Půlvlnný přesný usměrňovač | 274 |
| 11.5.2. Celovlnný přesný usměrňovač | 276 |
| 11.5.3. Výběr maximální hodnoty | 277 |
| 11.6. Omezovače | 278 |
| 11.7. Generátory funkcí | 279 |

| | |
|---|------------|
| 12. Převodníky A/D, D/A | 282 |
| 12.1. Kódování | 282 |
| 12.2. A/D převodníky | 283 |
| 12.2.1. Vzorkování analogového signálu | 285 |
| 12.2.2. Kvantovací šum, efektivní počet bitů A/D převodníku | 286 |
| 12.3. D/A převodníky | 287 |
| 12.4. Principy převodu A/D | 290 |
| 12.4.1. Paralelní A/D převodník | 290 |
| 12.4.2. A/D převodník s postupnou aproximací | 292 |
| 12.4.3. Sledovací A/D převodník | 293 |
| 12.4.4. Integrovační A/D převodník | 294 |
| 12.4.5. Σ - Δ A/D převodník | 295 |
| 12.5. Principy převodu D/A | 297 |
| 12.5.1. D/A převodník s váhovými odpory | 297 |
| 12.5.2. D/A převodník s rezistorovou sítí R/2R | 298 |
| 12.5.3. D/A převodník s kapacitorovou sítí | 300 |
| 12.6. Analogový podsystém mikropočítače. | 301 |
| 12.6.1. Galvanické oddělení analogových vstupů / výstupů | 301 |
| 12.6.2. Moderní A/D převodník | 304 |

| | |
|-------------------|------------|
| Literatura | 305 |
|-------------------|------------|

Příloha A – Přehled nejdůležitějších součástek a příkazů PSPICE

Příloha B – Počítačová simulace číslicových obvodů programem PSPICE

Autorem kapitol 1, 7, 8, 9, 10, 11 je Prof. Ing. Jiří Pinker, CSc.

Autorem kapitol 2, 3, 4, 5, 6, 12 je Ing. Václav Koucký, CSc.

| | |
|---|------------|
| 12. Převodníky A/D, D/A | 282 |
| 12.1. Kódování | 282 |
| 12.2. A/D převodníky | 283 |
| 12.2.1. Vzorkování analogového signálu | 285 |
| 12.2.2. Kvantovací šum, efektivní počet bitů A/D převodníku | 286 |
| 12.3. D/A převodníky | 287 |
| 12.4. Principy převodu A/D | 290 |
| 12.4.1. Paralelní A/D převodník | 290 |
| 12.4.2. A/D převodník s postupnou aproximací | 292 |
| 12.4.3. Sledovací A/D převodník | 293 |
| 12.4.4. Integrovaný A/D převodník | 294 |
| 12.4.5. Σ - Δ A/D převodník | 295 |
| 12.5. Principy převodu D/A | 297 |
| 12.5.1. D/A převodník s váhovými odpory | 297 |
| 12.5.2. D/A převodník s rezistorovou sítí R/2R | 298 |
| 12.5.3. D/A převodník s kapacitorovou sítí | 300 |
| 12.6. Analogový podsystém mikropočítače. | 301 |
| 12.6.1. Galvanické oddělení analogových vstupů / výstupů | 301 |
| 12.6.2. Moderní A/D převodník | 304 |

| | |
|-------------------|------------|
| Literatura | 305 |
|-------------------|------------|

Příloha A – Přehled nejdůležitějších součástek a příkazů PSPICE

Příloha B – Počítačová simulace číslicových obvodů programem PSPICE

Autorem kapitol 1, 7, 8, 9, 10, 11 je Prof. Ing. Jiří Pinker, CSc.

Autorem kapitol 2, 3, 4, 5, 6, 12 je Ing. Václav Koucký, CSc.