

Jaroslav Doleček

# **MODERNÍ UČEBNICE ELEKTRONIKY**

**Kmitočtové filtry, generátory signálů  
a převodníky dat**

**6. díl**

Praha 2009



Recenzenti:

Doc. Ing. Josef Vedral, CSc.

Doc. Ing. Jiří Hozman, Ph.D.

---

Jaroslav Doleček

## **Moderní učebnice elektroniky 6. díl – Kmitočtové filtry, generátory signálů a převodníky dat**

Bez předchozího písemného svolení nakladatelství nesmí být kterákoli část kopírována nebo rozmnožována jakoukoli formou (tisk, fotokopie, mikrofilm nebo jiný postup), zadána do informačního systému nebo přenášena v jiné formě či jinými prostředky.

Autor a nakladatelství nepřijímají záruku za správnost tištěných materiálů. Předkládaná zapojení a informace jsou zveřejněny bez ohledu na případné patenty třetích osob. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny.

Veškerá práva vyhrazena.

© Ing. Jaroslav Doleček, 2009

© Nakladatelství BEN – technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

Jaroslav Doleček, MODERNÍ UČEBNICE ELEKTRONIKY

BEN – technická literatura, Praha 2009

**ISBN 978-80-7300-240-4**

# STRUČNÝ OBSAH

## obsah 1. dílu – Základní pojmy, R, L, C

- 1 ZÁKLADNÍ ELEKTRICKÉ VELIČINY A POJMY
- 2 IDEÁLNÍ ELEMENTÁRNÍ AKTIVNÍ A PASIVNÍ LINEÁRNÍ PRVKY
- 3 ODPOROVÉ OBVODY A VÝKONOVÉ PŘÍZPŮSOBNÍ
- 4 EKVIVALENCE PASIVNÍCH JEDNOBRANŮ
- 5 ANALÝZA LINEÁRNÍCH ELEKTRONICKÝCH OBVODŮ
- 6 SLOŽENÉ JEDNOBRANY OBSAHUJÍCÍ IDEÁLNÍ OBVODOVÉ PRVKY
- 7 PŘENOSOVÉ VLASTNOSTI DVOJBRANŮ
- 8 REÁLNÉ LINEÁRNÍ SOUČÁSTKY ELEKTRONICKÝCH OBVODŮ
- 9 PŘÍLOHA MATICE A DETERMINANT

## obsah 2. dílu – Polovodiče a elektronky

- 1 POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY S JEDNÍM PŘECHODEM PN
- 2 TRANZISTORY A POLOVODIČOVÉ VÝKONOVÉ A SPÍNACÍ PRVKY
- 3 ELEKTRONKY
- 4 POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY BEZ PŘECHODU PN

## obsah 3. dílu – Optoelektronika

- 1 OPTOELEKTRONIKA
- 2 DIODY LED
- 3 LASEROVÉ DIODY (LD)
- 4 DETEKTORY SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ
- 5 OPTOELEKTRONICKÉ VAZEBNÍ ČLENY – OPTRONY
- 6 ZOBRAZOVACÍ JEDNOTKY
- 7 OBRAZOVÉ SENZORY
- 8 OPTICKÁ VLÁKNA

## obsah 4. dílu – Zesilovače a filtry

- 1 PŘENOSOVÉ VLASTNOSTI PASIVNÍCH LINEÁRNÍCH KOMPLEXNÍCH JEDNOBRANŮ A DVOJBRANŮ
- 2 PASIVNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY 1. A 2. ŘÁDU
- 3 ANALÝZA ČASOVÉ PROMĚNNÝCH SIGNÁLŮ
- 4 ZESILOVAČE

## obsah 5. dílu – Zesilovače a komparátory

- 1 ZESILOVAČE
- 2 OPERAČNÍ ZESILOVAČE (OZ)
- 3 PŘÍSTROJOVÉ (MĚŘICÍ) ZESILOVAČE
- 4 NAPĚŤOVÉ KOMPARÁTORY
- 5 AUDIO ZESILOVAČE

## obsah 6. dílu – Kmitočtové filtry, generátory signálů a převodníky dat

- 1 REÁLNÉ VLASTNOSTI PASIVNÍCH OBVODOVÝCH PRVKŮ KMITOČTOVÝCH FILTRŮ A GENERÁTORŮ SIGNÁLŮ
- 2 KMITOČTOVÉ FILTRY
- 3 GENERÁTORY SIGNÁLŮ
- 4 ANALOGOVĚ-DIGITÁLNÍ PŘEVODNÍKY – ADP

# PODROBNÝ OBSAH

## **1 REÁLNÉ VLASTNOSTI PASIVNÍCH OBVODOVÝCH PRVKŮ KMITOČTOVÝCH FILTRŮ A GENERÁTORŮ SIGNÁLŮ ..... 9**

<b>1.1</b>	<b>Vlastnosti reálných pasivních komponent .....</b>	<b>10</b>
1.1.1	Reálná indukční cívka .....	10
1.1.2	Reálný kondenzátor .....	12
1.1.3	Reálný rezistor .....	13
<b>1.2</b>	<b>Piezeelektrické rezonátory .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Dielektrický rezonátor .....</b>	<b>19</b>

## **2 KMITOČTOVÉ FILTRY (Frequency Filters) ..... 21**

<b>2.1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>22</b>
2.1.1	Co to jsou kmitočtové filtry .....	22
2.1.2	Klasifikace filtrů podle impulzní odezvy .....	23
2.1.3	Dělení filtrů podle kmitočtové charakteristiky .....	24
2.1.4	Klasifikace filtrů podle způsobu realizace .....	26
<b>2.2</b>	<b>Analogové selektivní filtry .....</b>	<b>31</b>
2.2.1	Jednoduché RC a RL články jako filtry RC a RL 1. řádu .....	31
2.2.2	Filtry RC 2. řádu .....	35
<b>2.3</b>	<b>Přenosová funkce filtru .....</b>	<b>45</b>
2.3.1	Řád přenosové funkce (řád filtru) a jeho význam .....	45
2.3.2	Nuly a póly přenosu .....	46
2.3.3	Fázové charakteristiky filtru, skupinové zpoždění .....	52
2.3.4	Specifikace filtru .....	55
<b>2.4</b>	<b>Filtry RLC 2. řádu .....</b>	<b>55</b>
2.4.1	Základní principy filtrů RLC 2. řádu .....	56
2.4.2	Fázové charakteristiky filtrů 2. řádu .....	63
2.4.3	Filtry s nulou přenosu .....	65
2.5	Filtry vyšších řádů .....	68
2.5.1	Impedanční a kmitočtové normování .....	68
2.5.2	Toleranční pole filtru .....	69
2.5.3	Kmitočtová transformace na NDP .....	71
2.5.4	Hlavní typy aproximací přenosové funkce .....	74
<b>2.6</b>	<b>Filtry RLC vyšších řádů .....</b>	<b>79</b>
2.6.1	Impedanční transformace a kmitočtové odnormování .....	82

<b>2.7</b>	<b>Aktivní filtry RC – ARC (Active RC Filters)</b> .....	<b>87</b>
2.7.1	Úvod .....	87
2.7.2	Realizace filtrů ARC na základě kaskádní syntézy .....	88
2.7.2.1	Princip kaskádní syntézy filtrů .....	88
2.7.2.2	Realizace dolní a horní propusti 1. řádu .....	90
2.7.2.3	Bloky filtrů ARC 2. řádu s jedním OZ .....	91
2.7.2.4	Bloky 2. řádu pro kaskádní syntézu filtrů se dvěma OZ .....	99
2.7.2.5	Univerzální funkční blok filtru s integrátory (state variable) .....	100
2.7.2.6	Realizace filtrů ARC vyšších řádů kaskádním zapojením filtrů 2. a 1. řádu .....	103
2.7.3	Přímá náhrada příčkových RLC struktur .....	106
2.7.3.1	Zobecněný impedanční konvertor – GIC (Generalized Impedance Converter) .....	107
2.7.3.2	Realizaci filtrů ARC 2. řádu jako přímá náhrada obvodů RLC 2. řádu .....	109
2.7.3.3	Filtry ARC vyšších řádů přímou náhradou struktur RLC .....	110
<b>2.8</b>	<b>Filtry se spínanými kapacitami (Switched-Capacitor Filters), SC filtry</b> .....	<b>113</b>
<b>2.9</b>	<b>Kmitočtové korektory (Equalizers)</b> .....	<b>116</b>
<b>2.10</b>	<b>Fázovací články (All Pass Filters)</b> .....	<b>121</b>
2.10.1	Fázovací článek 1. řádu .....	121
2.10.2	Fázovací článek 2. řádu .....	122
<b>2.11</b>	<b>Hlavní etapy návrhu kmitočtových filtrů</b> .....	<b>123</b>
<b>2.12</b>	<b>Piezoelektrické filtry</b> .....	<b>124</b>
2.12.1	Krystalové filtry (Crystal filters) .....	124
2.12.1.1	Monolitické krystalové filtry (Monolithic Crystal Filters – MCF) .....	124
2.12.1.2	Diskrétní krystalové filtry .....	125
2.12.1.3	Výhody krystalových filtrů .....	125
2.12.1.4	Nevýhody krystalových filtrů .....	126
2.12.1.5	Důležité parametry krystalových filtrů .....	127
2.12.2	Piezokeramické filtry .....	129
2.12.3	Jak specifikovat piezoelektrický filtr .....	129
2.12.4	Principy zapojení piezoelektrických filtrů .....	130
<b>2.13</b>	<b>Některé další fyzikální principy filtrů</b> .....	<b>131</b>
2.13.1	Elektromechanické filtry .....	131
2.13.2	Filtry s povrchovou akustickou vlnou – PAV (Surface Acoustic Wave – SAW) .....	131
2.13.3	Mikrovlnné filtry .....	132
<b>3</b>	<b>GENERÁTORY SIGNÁLŮ</b> .....	<b>133</b>
<b>3.1</b>	<b>Generátory harmonických signálů – oscilátory (Oscillators)</b> .....	<b>134</b>
3.1.1	LC oscilátory se záporným diferenciálním odporem – jednobranové (Negative Resistance Oscillators) .....	135
3.1.2	Zpěťovazební oscilátory (Feedback Oscillators) .....	137

3.1.2.1	RC oscilátory .....	138
3.1.2.2	Zpětnovazební LC oscilátory .....	145
3.1.2.3	Piezoelektrické oscilátory .....	154
3.1.2.4	Piezoelektrické generátory s logickými obvody .....	156
<b>3.2</b>	<b>Generátory impulzních průběhů .....</b>	<b>157</b>
3.2.1	Generátory pravoúhlých impulzů .....	157
3.2.1.1	Generátory a tvarovače pravoúhlých impulzů (Bistable Multivibrators, Flip Flops) .....	157
3.2.1.2	Multivibrátory (astabilní klopné obvody) .....	159
3.2.1.3	Monostabilní klopné obvody (Monostable Multivibrators) .....	162
3.2.2	Generátor periodických neobdélníkových průběhů .....	163
3.2.2.1	Generátor pravoúhlých a trojúhelníkových průběhů .....	163
3.2.2.2	Generátor pilových průběhů .....	164
3.2.3	RC generátor sinusového průběhu s astabilním klopným obvodem a s filtrem .....	165
<b>3.3</b>	<b>Generátory a oscilátory s vysokou stabilitou .....</b>	<b>166</b>
3.3.1	Generátory s fázovým závěsem .....	166
3.3.2	Přímá digitální syntéza – DDS (Direct Digital Synthesis) .....	168
<b>3.4</b>	<b>Integrované obvody pro generátory impulzních signálů .....</b>	<b>170</b>
3.4.1	Monostabilní integrované klopné obvody .....	170
3.4.1.1	Monostabilní a astabilní klopné obvody .....	171
3.4.1.2	Časovač 555 (Timer 555) .....	172
3.4.1.3	Multivibrátor bez externích komponent .....	175

## **4 ANALOGOVĚ-DIGITÁLNÍ PŘEVODNÍKY – ADP (ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTERS – ADC) ..... 177**

<b>4.1</b>	<b>Analogově-digitální převodníky – ADP (Analog to Digital Converters – ADC) .....</b>	<b>178</b>
4.1.1	Vzorkování analogového signálu .....	179
4.1.1.1	Hlavní pravidla vzorkování analogových signálů .....	183
4.1.1.2	Nyquistův vzorkovací teorém .....	185
<b>4.2</b>	<b>Digitálně-analogové převodníky – DAP (Digital to Analog Converters – DAC) .....</b>	<b>185</b>
<b>4.3</b>	<b>Chyby A/D a D/A převodníků .....</b>	<b>186</b>
4.3.1	Statické chyby A/D převodníků .....	187
4.3.2	Statické chyby D/A převodníků .....	189
<b>4.4</b>	<b>Základní architektury A/D převodníků .....</b>	<b>192</b>
4.4.1	Princip A/D převodu .....	192
4.4.2	ADP s přímým převodem .....	194
4.4.2.1	Převodníky s paralelním převodem (all-parallel converter, flash converter) .....	194
4.4.2.2	Kaskádní zapojení ADP (pipelined ADC) .....	196
4.4.2.3	Převod napětí na časový interval (voltage to time converter) .....	199

4.4.2.4	A/D převodníky napětí na kmitočet – U/f převodníky – UFP (voltage to frequency converters, VFC) .....	200
4.4.2.5	ADP s dvojitou integrací (dual-slope ADC) .....	203
4.4.3	Zpětnovazební metody převodu .....	207
4.4.3.1	ADP s postupnou aproximací (Successive Approximation Register ADC – SAR ADC) .....	207
4.4.3.2	Sledovací A/D převodník (tracking ADC) .....	210
4.4.4	Převodník typu sigma-delta – S-D (sigma-delta converters) .....	211
4.4.5	Volba typu ADP .....	215
<b>4.5</b>	<b>Základní architektury D/A převodníků .....</b>	<b>218</b>
4.5.1	D/A převodníky s přímým převodem .....	219
4.5.1.1	Napěťový princip D/A převodu .....	219
4.5.1.2	Proudový princip D/A převodu .....	220
4.5.1.3	D/A převodník s odporovou sítí typu R–2R .....	223
4.5.1.4	Nábojový princip D/A převodníku .....	227
4.5.2	Sigma-delta architektura DAP .....	228
<b>4.6</b>	<b>Vstupní a výstupní rozhraní A/D a D/A převodníků .....</b>	<b>230</b>
<b>4.7</b>	<b>Příklady aplikací A/D a D/A převodníků .....</b>	<b>234</b>
4.7.1	Přepínání vstupů ADP .....	234
4.7.2	Mikrokontroléry s A/D a D/A převodníky .....	235
4.7.3	Použití DAP řízeného mikroprocesorem pro generaci periodických signálů .....	237
4.7.4	Digitální potenciometr a příklad jeho použití k ladění filtru typu dolní propust .....	238
<b>4.8</b>	<b>Důležité specifikace ADP a DAP .....</b>	<b>239</b>

## **DODATKY ..... 243**

DODATEK A ..... 244

DODATEK B ..... 246

## **LITERATURA ..... 249**

## **REJSTŘÍK ..... 259**

## **SLOVNÍČEK ..... 265**

## **KONTAKTY NA PRODEJNY TECHNICKÉ LITERATURY .. 273**

# O KNIZE

Tento šestý, závěrečný díl Moderní učebnice elektroniky, je věnován úvodu do problematiky konstrukce kmitočtových filtrů, generátorů signálů a převodníků dat.

V první kapitole knihy jsou zopakovány důležité vlastnosti reálných pasivních prvků, to je rezistorů, kondenzátorů a indukčních cívek, které mají rozhodující vliv na vlastnosti obvodů popisovaných v publikaci. Kromě toho v ní je věnován odstavec piezoelektrickým rezonátorům, které mají široké použití ve vysokofrekvenčních filtrech a generátorech signálů. Je uveden rozdíl mezi krystalovými a piezokeramickými rezonátory.

S kmitočtovými filtry se můžeme setkat prakticky ve všech oblastech elektroniky. Jejich problematika je značně rozsáhlá. Účelem kapitoly o kmitočtových filtrech je podat základní přehled hlavních vlastností analogových kmitočtových filtrů a uvést principy jejich návrhů. Pro úplnost je popis elektrických filtrů zahájen shrnutím poznatků o RC a RL pasivních filtrech 1. a 2. řádu, jejich podrobnější popis byl uveden ve 4. dílu učebnice. V kapitole je uveden postup princip návrhu LC pasivních filtrů vyšších řádů podle k tomu účelu vypracovaných a v odborné literatuře publikovaných tabulek. Podstatná část kapitoly se zabývá aktivními RC filtry založenými na využití operačních zesilovačů, jsou zmíněny i přístupy k návrhu kmitočtových filtrů s piezoelektrickými rezonátory. Pro názornost je kapitola doplněna množstvím příkladů.

V kapitole o generátorech signálů jsou popsány hlavní principy realizací generátorů signálů, zejména generátorů harmonických signálů, oscilátorů. Generátory signálů mají široké použití ve všech odvětvích elektroniky, od systémů určených pro přenos informací po měřicí systémy a mikroprocesorovou techniku. Stabilita a přesnost nastavení kmitočtu generátorů signálů je důležitá pro správnou funkci různých zařízení, jako jsou např. komunikační systémy, stabilita kmitočtu a šířky hodinových impulzů. Je důležitá např. také pro činnost přesných analogově číslicových a číslicově analogových převodníků.

V současné době digitalizace elektronických systémů mají velmi důležitou úlohu převodníky dat, kterými jsou analogově-číslícové a číslicově-analogové převodníky. Rozvoj techniky integrovaných obvodů umožnil výrobu množství různých typů převodníků určených pro různé aplikace od automatizační přes audiotechniku, digitální televizi, rozhlas, telefonii. Pro různé aplikace jsou vhodné různé typy převodníků. Cena převodníků roste s jejich rozlišovací schopností, přesností a s rychlostí převodu. Proto je nutné pochopit principy jejich konstrukce, jaké jsou zdroje chyb převodu na digitální nebo zpět na analogový signál a ekonomicky dosažitelné parametry jednotlivých typů převodníků.

Výrobci polovodičových prvků nabízejí široký sortiment vyráběných kmitočtových filtrů, generátorů kmitočtů, převodníků dat a dalších typů integrovaných obvodů. Mnohé z nich jsou součástí složitějších typů obvodů, jako jsou např. mikroprocesory, integrované obvody pro bezdrátovou komunikaci apod. Pro použití svých výrobků nabízejí programové prostředky usnadňující jejich aplikace.