

Bohumil BRTNÍK

ANALOGOVÉ SOUSTAVY

Praha 2013



Publikace prezentuje některé poznatky z obsáhlé oblasti analogových soustav, které v poslední době prodělávají rozvoj. Z toho důvodu ani nemůže podat úplný přehled a není ani přesným návodem k použití.

Text je rozdělen do tří celků. V prvním jsou vysvětleny základní vlastnosti obvodů v proudovém módu a řešení jednoduchých obvodů s nimi. Druhá část je úvodem do problematiky elektrických filtrů, jsou uvedeny principy jak LC, aktivních RC (ARC) a číslicových filtrů, tak filtrů se spínanými kapacitami a proudy. Třetí část pak pojednává o některých aplikacích smyčky fázového závěsu.

Protože pro pochopení činnosti obvodu jsou vhodné heuristické metody analýzy, vycházející z Ohmova a obou Kirchhoffových zákonů (neboť z nich plyne princip činnosti) zatímco pro analýzu složitějších obvodů jsou vhodné metody algoritmické (které vedou k cíli mnohem snadněji, nežli aplikace základních zákonů, poskytujících soustavu rovnic v takovýchto případech nepřehlednou), jsou vždy u složitějších obvodů (s proudovými konvejory a transimpedančními operačními zesilovači, se spínanými proudy a spínanými kapacitami) nejprve vysvětleny elementární části heuristicky (tedy užitím Ohmova a Kirchhoffových zákonů), jimiž je odvozen maticový zápis s tím, že obvody složitější se řeší již algoritmicky těmito maticemi.

V části pojednávající o filtrech jsou kromě obecných principů uvedeny i základní metody návrhu filtrů LC, ARC, SC, SI a číslicových filtrů, některé jsou demonstrovány vyřešenými příklady.

Bohumil Brtník

Analogové soustavy

Recenzovali:

David Matoušek (Univerzita Pardubice Fakulta elektrotechniky a informatiky)

Miroslav Stehlík (TESCAN Brno)

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. Předkládané informace jsou zveřejněny bez ohledu na případné patenty třetích osob. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny.

Všechny registrované nebo jiné obchodní známky použité v této knize jsou majetkem jejich vlastníků. Uvedením nejsou zpochybněna z toho vyplývající vlastnická práva.

Veškerá práva vyhrazena

© Bohumil Brtník, 2013

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

Bohumil Brtník: Analogové soustavy

BEN – technická literatura, Praha 2013

1. vydání

ISBN 978-80-7300-490-3 (tištěná kniha)

ISBN 978-80-7300-491-0 (elektronická kniha v PDF)

Obsah

| | |
|---|--------|
| Úvod..... | - 7 - |
| 1. Aktivní prvky v proudovém módu | - 8 - |
| 1.1 Vlastnosti operačního zesilovače | - 8 - |
| 1.2 Proudový konvektor CCII | - 12 - |
| 1.3 Proudový operační zesilovač CFA | - 15 - |
| 1.4 Základní obvody v proudovém módu | - 18 - |
| 1.4.1. Zesilovač s proudovým konvektorem | - 18 - |
| 1.4.2 Filtr s proudovým konvektorem | - 23 - |
| 1.4.3 Zesilovač s transimpedančním operačním zesilovačem..... | - 24 - |
| 1.5 Transformační dvojbrany | - 30 - |
| 1.6 Transkonduktanční zesilovač | - 33 - |
| 1.6.1 Řešení zobecněnou metodou uzlových napětí | - 35 - |
| 1.6.2 Řešení metodou MC grafů | - 35 - |
| 1.7 Gyrátor sestavený z OTA | - 36 - |
| 1.8 Transkonduktanční zesilovač řízený rozdílovým proudem..... | - 37 - |
| 1.9 Nortonův zesilovač..... | - 38 - |
| 1.10 Přidružená transformace..... | - 41 - |
| 1.11 Základní obvody v proudovém módu | - 42 - |
| 1.11.1 Integrátor v proudovém módu s CCII+ | - 42 - |
| 1.11.2 Integrátor v proudovém módu s OTA | - 43 - |
| 1.11.3 Zesilovač proudu s transadmitančním zesilovačem | - 43 - |
| 2. Analogové obvody | - 44 - |
| 2.1 Obvody s operačními zesilovači | - 44 - |
| 2.1.1 Spínače, vzorkovače..... | - 44 - |
| 2.1.8 Číslicově analogové převodníky | - 47 - |
| 2.1.9 Analogověčíslicové převodníky | - 50 - |
| 2.2 Lineární obvody s proudovými konvektory druhé generace..... | - 56 - |
| 2.2.1 Zesilovač proudu | - 56 - |
| 2.2.2 Přebodník napětí na proud..... | - 57 - |
| 2.2.3 Přístrojový zesilovač s konvektory | - 58 - |
| 2.2.4 Sčítáčka proudu | - 59 - |
| 2.2.5 Negativní impedanční konvertor | - 59 - |
| 2.3 Nelineární obvody s proudovými konvektory..... | - 60 - |
| 2.3.1 Usměrňovač..... | - 60 - |
| 3. Elektrické filtry | - 61 - |
| 3.1 Přenosová funkce filtru | - 61 - |
| 3.2 Přenosové funkce základních filtrů. | - 62 - |
| 3.2.1 Přenosová funkce dolní propusti | - 62 - |
| 3.2.2 Přenosová funkce horní propusti..... | - 63 - |
| 3.2.3 Přenosová funkce pásmové propusti | - 64 - |
| 3.2.4 Přenosová funkce pásmové zádrže..... | - 64 - |
| 3.3 Aproximace přenosových funkcí | - 66 - |
| 3.3.1 Aproximace přenosové funkce Čebyševovou funkcí (polynomem)..... | - 66 - |
| 3.3.2 Aproximace Butterworthovou funkcí (polynomem)..... | - 66 - |
| 3.3.3 Aproximace Besselovými funkcemi (polynomy)..... | - 67 - |
| 3.4 LC filtry..... | - 67 - |
| 3.4.1 Příčkové LC filtry..... | - 67 - |
| 3.4.2 Jednoduché rezonanční obvody | - 69 - |
| 3.4.3 Metoda postupného odštěpování | - 69 - |

| | | |
|--------|--|-------|
| 3.4.4 | Metoda normované (referenční) dolní propusti..... | 70 - |
| 3.4.3 | ZOBELovy standardní L-C příčkové k-články | 76 - |
| 3.4.4 | ZOBELovy standardní L-C příčkové m-články (půlčlánky) | 77 - |
| 3.4.5 | Složený Zobelův filtr typu dolní propust | 79 - |
| 3.5. | Aktivní filtry..... | 80 - |
| 3.5.1 | Kaskádní filtry | 80 - |
| 3.5.2 | Nekaskádní filtry | 93 - |
| 3.6. | Syntéza filtrů užitím grafů..... | 98 - |
| 3.6.1 | Konstrukce grafu přímou realizační strukturou zavedením pomocné proměnné do vztahu pro přenosovou funkci | 100 - |
| 3.6.2 | Syntéza filtrů druhého řádu (bikvadů) | 101 - |
| 3.6.3 | Filtry s dvojnými kapacitami | 105 - |
| 4. | Diskrétní systémy | 106 - |
| 4.1 | Číslicové filtry..... | 106 - |
| 4.1.1 | Znázornění činnosti analogového filtru typu dolní propust | 107 - |
| 4.1.2 | Znázornění činnosti číslicového filtru typu dolní propust | 108 - |
| 4.1.3 | Popis činnosti filtrů | 109 - |
| 4.1.4 | Obecná rovnice číslicového filtru | 114 - |
| 4.1.5 | Stabilita číslicového filtru | 115 - |
| 4.1.6 | Impulsní charakteristika číslicového filtru | 116 - |
| 4.1.7 | Metoda návrhu filtru bilineární transformací z analogového prototypu | 117 - |
| 4.1.8 | Metoda vycházející z tolerančního pole filtru | 122 - |
| 4.1.9 | Metoda impulsní invariance vycházející z analogového prototypu | 128 - |
| 4.1.10 | Návrh analogových filtrů na základě digitálních prototypů..... | 130 - |
| 4.1.11 | Realizace číslicových filtrů | 132 - |
| 4.2 | Filtry se spínanými kapacitami | 136 - |
| 4.2.1 | Syntéza obvodu se spínanými kapacitami | 138 - |
| 4.2.2 | Realizace filtrů se spínanými kapacitami | 144 - |
| 4.2.3 | Syntéza přímou náhradou všech rezistorů spínanými kapacitami | 145 - |
| 4.3 | Filtry se spínanými proudy..... | 146 - |
| 4.3.1 | Paměťová buňka spínaného proudu | 147 - |
| 4.3.2 | Matematický popis buňky SI..... | 149 - |
| 4.3.3 | Sestavení matice soustavy | 151 - |
| 4.3.4 | Příklad | 152 - |
| 4.3.5 | Syntéza filtru se spínanými proudy | 154 - |
| 4.4 | Antialiasingový a rekonstrukční filtr..... | 158 - |
| 4.5 | Převodníky s přepínanými kapacitami..... | 161 - |
| 4.5.1 | Analogověčíslícový převodník..... | 161 - |
| 4.5.2 | Číslicověanalogový převodník..... | 162 - |
| 4.6 | Zdroje se spínanými kapacitami | 164 - |
| 4.6.1 | Princip zdrojů se spínanými kapacitami | 164 - |
| 4.6.2 | Provedení zdrojů | 165 - |
| 4.7 | Impulsní zesilovače | 165 - |
| 4.7.1 | Zesilovače třídy D | 165 - |
| 4.7.2 | Zesilovač třídy E | 165 - |
| 4.7.3 | Zesilovač třídy G | 166 - |
| 4.7.4 | Zesilovač třídy H..... | 167 - |
| 4.7.5 | Zesilovač s PCM | 167 - |
| 5. | Soustavy s fázovým závěsem | 168 - |
| 5.1 | Princip smyčky fázového závěsu | 168 - |

| | |
|--|---------|
| 5.1.1 Prvky smyčky fázového závěsu | - 168 - |
| 5.1.3 Fázový detektor pro číslicový signál..... | - 170 - |
| 5.1.4 Základní charakteristiky fázového závěsu | - 171 - |
| 5.2 Užití fázového závěsu | - 172 - |
| 5.2.1 Kmitočtová syntéza | - 172 - |
| 5.2.2 Digitální interpolace | - 173 - |
| 5.2.3 Kmitočtová modulace a demodulace | - 173 - |
| 5.2.4 Synchronizace a regenerace signálu..... | - 174 - |
| Literatura | - 175 - |

Text prezentuje některé poznatky z oblasti analogových soustav, které v poslední době prodělávají rozvoj. Z toho důvodu nepodává úplný přehled, není ani přesným návodem k použití.

Protože pro pochopení činnosti obvodu jsou vhodné heuristické metody analýzy, vycházející z Ohmova a obou Kirchhoffových zákonů (neboť z nich jasně plyne princip činnosti) zatímco pro analýzu obvodů složitějších jsou vhodné metody algoritmické (které i u rozsáhlých obvodů vedou k cíli mnohem snadněji, nežli aplikace základních zákonů, poskytující systém rovnic v takovýchto případech naprosto nepřehledný), jsou vždy u složitějších obvodů (jimiž jsou obvody s proudovými konvejory a transimpedančními operačními zesilovači a se spínanými proudy a spínanými kapacitami) nejprve vysvětleny elementární části heuristicky (tedy užitím Ohmova a Kirchhoffových zákonů), jimiž je odvozen maticový zápis, a obvody složitější se řeší již algoritmicky těmito maticemi.

Symbol: z je operátorem Z-transformace, symbol: $p = \delta + j\omega$ je pak operátorem Laplaceovy transformace a symbolem: $s = j\omega$ je vyjádřen symbolický kmitočet (jakožto operátor tzv. Steinmetzovy transformace).

Úvod

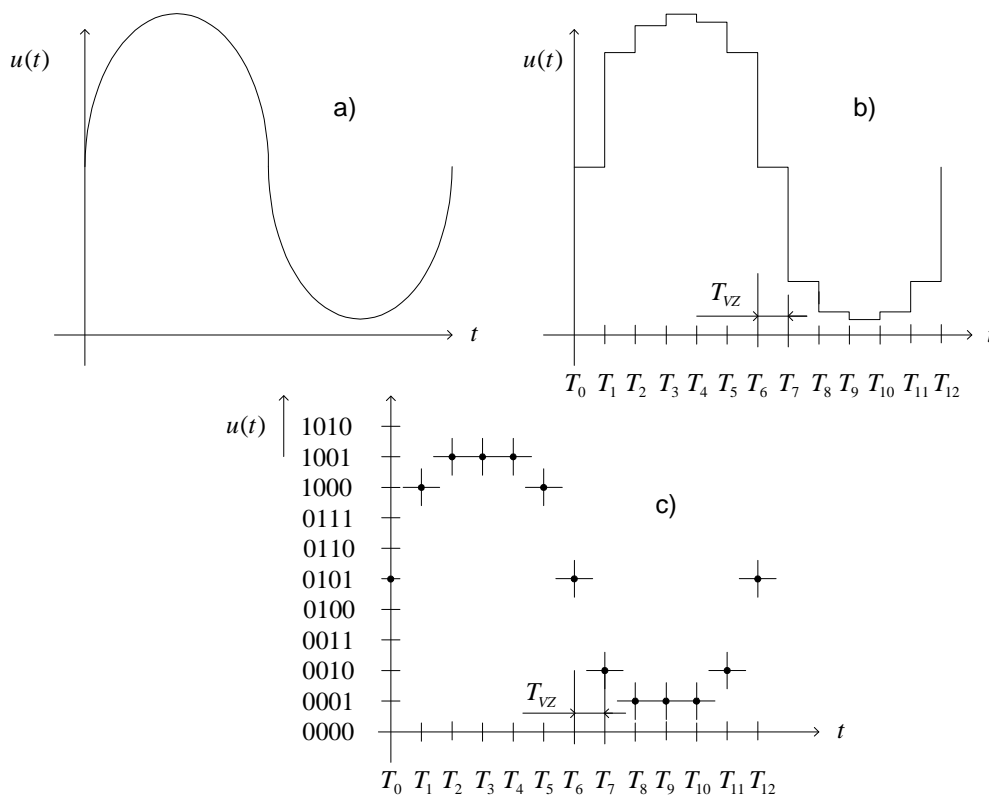
Analogové soustavy jsou určeny k vytváření, zpracování (čili přeměně) a k přenosu analogového signálu.

Analogové soustavy mohou být :

a) spojitě pracující tedy čistě analogové soustavy (kdy zpracováváný signál zůstává spojitý v amplitudě i v čase), nebo

b) nespojitě pracující soustavy, kdy vstupní signál je zpracováván nespojitě, když vnitřní signály (a proto i výstupní) mají charakter vzorkovaného signálu. Proto se takovýmto soustavám též říká kvazianalogové.

c) analogověčíslicové soustavy jsou charakteristické tím, že analogový signál zpracují v číslicové formě (čili v jeho diskretních hodnotách) a poté jej převedou zpět na analogový. Signál je zde tedy nespojitý jak v čase tak i v amplitudě (velikosti).



Obr.0.1 K rozdělení analogových soustav

Zatímco časové průběhy signálů v bodu a) charakterizují klasickou spojitou analogovou techniku, signály v bodu b) jsou charakteristické pro techniku spínaných kapacitorů a spínaných proudů, a signály v bodu c) charakterizují zpracování signályovými procesory.