Dalibor Biolek

Řešíme elektronické obvody

aneb kniha o jejich analýze

Praha 2004

TECHNICKÁ LITERATURA ®
BEN

Dalibor Biolek

ŘEŠÍME ELEKTRONICKÉ OBVODY aneb kniha o jejich analýze

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 nepřejímají 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
© Dalibor Biolek, Brno 2003
© Nakladatelství BEN – technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

Dalibor Biolek: Řešíme elektronické obvody aneb kniha o jejich analýze
BEN – technická literatura, Praha 2004
1. vydání

ISBN 80-7300-125-X

Obsah

MÍSTO ÚVODU 11

1 ANALÝZA ELEKTRICKÝCH OBVODŮ 15

1.1 Modelování, analýza, simulace 16

1.2 Metody analýzy heuristické a algoritmické 18

1.3 Metody analýzy podle charakteru modelu 19

1.4 Nejčastější cíle a postupy analýzy 22

METODY ANALÝZY LINEÁRNÍCH OBVODŮ 25

2.1 Přehled heuristických a algoritmických metod 26

2.1.1 Heuristické metody 26

2.1.2 Algoritmické metody 27

2.2 Příklady na heuristické postupy 28

2.2.1 Řešení stejnosměrných poměrů v pasivních odporových obvodech 28

2.2.2 Výpočty napětí a proudů u obvodů v harmonickém ustáleném stavu 33

2.2.3 Řešení střídavých poměrů v linearizovaných obvodech 37

2.2.4 Řešení přechodných dějů v jednoduchých setrvačných obvodech 40

2.2.5 Analýza odporových obvodů s operačními zesilovači VFA 44

2.2.6 Analýza setrvačných obvodů s operačními zesilovači VFA 50

2.2.7 Analýza obvodů se zesilovači OTA 54

2.2.8 Analýza obvodů s proudovými konvejory (CCII) a s proudovými operačními zesilovači (CFA) 56

2.3 Maticové algoritmické metody se zaměřením na MMUN 60
2.3.1 Klasická metoda uzlových napětí (MUN) 61
2.3.1.1 Podstata metody 61
2.3.1.2 Ilustrativní příklad 62
2.3.1.3 Pravidla pro sestavování rovnic 64
2.3.1.4 Vodivostní matice se skládá z matic dílčích prvků 65
2.3.1.5 Maticový linearizovaný model tranzistoru a MUN 66
2.3.1.6 Souvislost maticového popisu se zjednodušeným modelováním tranzistoru 69
2.3.1.7 Příklady na analýzu linearizovaných obvodů s tranzistory 70
2.3.1.8 Analýza obvodů se zesilovači OTA 72
2.3.1.9 Způsob výpočtu obvodových funkcí z admitanční matice 73
2.3.2 Modifikovaná metoda uzlových napětí (MMUN) 77
2.3.2.1 Metoda razítek 78
2.3.2.2 Metoda zakázaného řádku 88
2.3.2.3 Metoda U/I 91
2.3.2.4 Podrobněji o analýze obvodů s proudovými konvejory CCII 93
2.3.2.5 Analýza obvodů s magnetickými vazbami 97
2.3.3 Závěrečná shrnutí a doporučení 104
2.4 Grafové algoritmické metody se zaměřením na M-C grafy 105
2.4.1 Klasické M-C grafy s vlastními neorientovanými smyčkami 106
2.4.1.1 Sestavení M-C grafu 106
2.4.1.2 Vyhodnocení M-C grafu zobecněným Masonovým pravidlem 108
2.4.1.3 Úplný a zkrácený M-C graf 111
2.4.1.4 Ilustrativní příklady 112
2.4.2 Modifikované M-C grafy pro obvody s OZ a dalšími aktivními prvky 117
2.4.2.1 Modifikace na principu metody razítek 118
2.4.2.2 M-C grafy modifikované na principu metody zakázaného řádku 126
2.4.2.3 M-C grafy modifikované na principu metody U/I 129

2.4.3 Shrnutí a doporučení 131
2.5 Maticové nebo grafové metody? 132
3 METODY ANALÝZY NELINEÁRNÍCH OBVODŮ 135
3.1 Přehled metod 136
3.2 Příklady řešení jednoduchých obvodů 137
3.2.1 Zjednodušování stejnosměrných charakteristik 137
3.2.2 Metoda zatěžovací přímky (křivky) 139
3.2.3 Numerické řešení nelineárních rovnic 139
3.2.3.1 „Ruční“ řešení 139
3.2.3.2 Algoritmický postup při počítačové simulaci 143
3.2.4 Analýza po částech lineárních odporových obvodů s operačními zesilovači 146
3.2.5 Přibližná analýza obvodů s diodami a tranzistory 148
3.3 Shrnutí a doporučení 151
4 POČÍTAČOVÁ ANALÝZA A SIMULACE 153
4.1 Úvod 154
4.2 Symbolické, semisymbolické a numerické výsledky analýzy lineárních obvodů 155
4.3 Symbolické, semisymbolické a numerické algoritmy analýzy lineárních obvodů 158
4.4 Struktura simulačního programu, založeného na symbolických algoritmech (SNAP) 160
4.5 Základy práce s programy pro (nejen symbolickou) analýzu obvodů 163
4.5.1 Úvod 163
4.5.2 První praktické kroky k počítačové simulaci v programu SNAP 164

4.5.2.1 LEKCE 1 – Rychlé seznámení se základními možnostmi programu; soubor DEMRC.CIR ... 164
4.5.2.2 LEKCE 2 – Rezonanční obvod RLC jako pásmová propust, soubor DEMRLC1.CIR ... 171
4.5.2.3 LEKCE 3 – Operační zesilovač zapojený jako sledovač napětí – jednopólový model, soubor DEMOPA1.CIR ... 178
4.5.3 Tvorba vlastního zadání ... 183
4.5.3.1 Můj první obvod ve SNAPu ... 183
4.5.3.2 Obvod se součástkami, které jsou popsány několika parametry ... 193
4.5.3.3 Obvod s několika součástkami stejného typu ... 197
4.5.3.4 Vazby mezi parametry různých součástek ... 200
4.5.4 Princip tvorby modelů prvků SNAPu na základě modifikované metody uzlových napětí ... 201
4.5.5 Shrnutí a zobecnění ... 203
4.6 Struktura simulačního programu, založeného na numerických algoritmech (MicroCap) ... 205
4.7 Základy práce s programy pro numerickou analýzu obvodů ... 209
4.7.1 Úvod ... 209
4.7.2 První praktické kroky v programu MicroCap 7 ... 210
4.7.2.1 LEKCE 1 – Toulky schematickým editorem ... 210
4.7.2.2 LEKCE 2 – Analýza „Transient“ ... 215
4.7.2.3 LEKCE 3 – Analýza „DC“ ... 219
4.7.2.4 LEKCE 4 – Analýza „AC“ ... 222
4.7.3 Tvorba vlastního zadání ... 228
4.7.3.1 Můj první obvod v MicroCapu ... 228
4.7.3.2 Práce s modely SPICE ... 242
4.7.3.3 Začleňování modelů prvků do vstupních souborů ... 252
4.7.3.4 Práce s příkazem .DEFINE a s „Formula Textem“ ... 255
4.8 Analýza pomocí numerického simulátoru ... 263
4.8.1 Typy analýz, analyzační módy a režimy ... 263
4.8.2 Co je dobré vědět před zahájením vlastní analýzy ... 265

4.8.2.1 Zápis napětí a proudů ... 265
4.8.2.2 Význam symbolů V a I v různých typech analýz ... 267
4.8.2.3 Zápis odvozených veličin pomocí vzorců ... 268
4.8.2.4 Co mají všechny základní analýzy společné ... 268
4.8.3 Analýza „Transient“ neboli časová analýza ... 274
4.8.3.1 Cíle analýzy ... 274
4.8.3.2 „Inteligentní osciloskop“ ... 274
4.8.3.3 Stavové proměnné a počáteční podmínky pro časovou analýzu ... 277
4.8.3.4 Jak postupuje simulátor při časové analýze ... 278
4.8.3.5 Menu „Transient Analysis Limits“ ... 281
4.8.3.6 Typická nastavení časové analýzy při řešení různých typů obvodů ... 281
4.8.3.7 Konkrétní příklady časové analýzy ... 282
4.8.3.8 Využívání příkazů .IC a .NODESET ... 289
4.8.3.9 Fourierova analýza ... 292
4.8.4 Analýza „AC“ neboli kmitočtová analýza ... 305
4.8.4.1 Cíle analýzy ... 305
4.8.4.2 „Inteligentní obvodový analyzátor“ ... 305
4.8.4.3 Jak postupuje simulátor při kmitočtové analýze ... 306
4.8.4.4 Atributy součástek při kmitočtové analýze ... 308
4.8.4.5 Menu „Frequency Analysis Limits“ ... 309
4.8.4.6 Zásady pro práci s proměnnými u analýzy „AC“ ... 311
4.8.4.7 Konkrétní příklady kmitočtové analýzy ... 312
4.8.4.8 Šumová analýza ... 314
4.8.4.9 Inverzní Fourierova transformace ... 322
4.8.5 Analýza „DC“ neboli stejnosměrná analýza ... 327
4.8.5.1 Cíle analýzy ... 327
4.8.5.2 „Inteligentní charakterograf“ ... 328
4.8.5.3 Jak postupuje simulátor při stejnosměrné analýze ... 329
4.8.5.4 Atributy součástek při stejnosměrné analýze ... 330
4.8.5.5 Menu „DC Analysis Limits“ ... 331
4.8.5.6 Příklady stejnosměrné analýzy ... 332
4.8.6 Rozšiřující typy analýz ... 337
4.8.6.1 Dynamická stejnosměrná analýza („Dynamic DC“) ... 337

4.8.6.2 Přenosová funkce („Transfer Function“) ... 339
4.8.6.3 Citlivostní analýza („Sensitivity“) ... 342
4.8.7 Analyzační režimy ... 346
4.8.7.1 Krokování („Stepping“) ... 346
4.8.7.2 Teplotní analýza ... 349
4.8.7.3 Vyhodnocovací analýza („Performance Analysis“) ... 353
4.8.7.4 Statistická analýza („Monte Carlo“) ... 365
4.8.7.5 Optimalizace („Optimization“) ... 378
4.8.7.6 Veřejné a privátní knihovny modelů a jejich úloha v analyzačních režimech ... 385
4.8.8 Další speciální funkce simulátoru ... 387
4.8.8.1 Možnosti detailního sledování proměnných a trasování během analýzy ... 387
4.8.8.2 Další užitečné funkce ... 390
4.9 Problémy při počítačové simulaci a jak se s nimi vypořádat ... 391
4.9.1 Vybrané problémy při simulaci a jejich příčiny ... 391
4.9.2 Problémy s konvergencí vnitřních algoritmů a cesty k jejich řešení ... 395
4.9.2.1 „Global Settings“ (globální nastavení simulátoru) ... 395
4.9.2.2 Možné přístupy k řešení problémů s konvergencí ... 398
4.9.2.3 Příklad analýzy tranzistorového bistabilního klopného obvodu ... 401
4.9.2.4 Příklad analýzy obvodu s nesnadno zjistitelným pracovním bodem ... 404
5 MÍSTO ZÁVĚRU ... 409
6 PŘÍLOHY ... 411
P1 Elektrické obvody a jevy v nich ... 412
P1.1 Klasifikace elektrických obvodů ... 412
P1.2 Stavy a jevy v obvodech ... 414
P1.3 Stavy a děje podrobněji ... 415
P1.4 Malosignálové linearizované modely nelineárních obvodů ... 421

P1.5 Vybrané charakteristiky obvodů 423

P2 Přehled nástrojů pro popis jevů v lineárních obvodech 428

P2.1 Charakteristika používaných metod popisu 428

P2.2 Operátorový popis obvodů 433

P2.2.1 Metoda operátorových schémat 433

P2.2.2 Metoda Laplaceovy transformace a přenosové funkce 436

P2.2.3 Co všechno se dá určit z operátorové přenosové funkce 437

P3 Vybrané principy a postupy využívané k analýze obvodů 439

P3.1 Zákon, princip, metoda 439

P3.2 Princip superpozice a metoda superpozice 440

P3.3 Princip ekvivalence a jeho konkrétní varianty a aplikace 441

P3.3.1 Princip ekvivalence 441

P3.3.2 Princip kompenzace (substituce) 442

P3.3.3 Princip náhradního zdroje (Théveninův – Nortonův teorém) 443

P3.3.4 Metoda ekvivalence napěťových a proudových zdrojů 448

P3.3.5 Transfigurace hvězda – trojúhelník 449

P4 Přepočty dvojbranových parametrů tranzistoru 451

P5 Přehled vybraných aktivních prvků 453

P6 Stručný slovník a vybrané vlastnosti Laplaceovy transformace 454

P7 Vyjadřování čísel v programech SNAP a MicroCap 456

P8 Prvky z knihovny programu SNAP 2.6. 457

P9 Seznam elektronických příkladů v instalaci programu SNAP 467

P10 Vybrané prvky programu MicroCap 474

P10.1 Napájecí a signálové zdroje, zdroje pro transformaci signálů ... 474
P10.1.1 Generátory signálů ... 474
P10.1.2 Obvody pro transformaci signálů ... 479
P10.1.3 Význam atributů zdrojů v různých typech analýz ... 483
P10.2 Pasivní prvky typu R, C a L, obvody s magnetickými vazbami a transformátory ... 484
P10.2.1 Rezistory ... 484
P10.2.2 Kapacitory ... 485
P10.2.3 Induktory ... 486
P10.2.4 Transformátory ... 489
P10.3 Polovodičové a aktivní prvky ... 490
P10.3.1 Diody ... 490
P10.3.2 Tranzistory ... 493
P10.3.3 Operační zesilovače ... 496
P10.4 Jiné prvky ... 500
P11 Některé konstanty, proměnné a funkce programu MicroCap ... 500
P11.1 Některé konstanty a systémové proměnné MicroCapu ... 500
P11.2 Některé funkce MicroCapu ... 501
LITERATURA A ODKAZY ... 504
REJSTŘÍK ... 510

MÍSTO ÚVODU

Kniha, kterou máte před sebou, byla napsána zejména pro ty z vás, kteří ovládají Ohmův zákon a Kirchhoffovy zákony, mají základní vědomosti o elektrických součástkách a jejich aplikacích, často zkoumají děje v nejrůznějších analogových obvodech, nebojí se analyzovat problémy s tužkou a papírem ani experimentovat s počítačem, a mají dostatek vnitřní motivace k tomu stát se skutečně znalými uživateli současných komerčních simulačních programů, aniž by byli nuceni studovat stohy obtížně čtivých a většinou cizojazyčných manuálů. Pokud však některému z uvedených atributů nevyhovujete, nemusí to být na závadu, jak zjistíte letmým pohledem na obsah s názvy jednotlivých kapitol.

Na následujících stranách je velké množství informací z oblasti efektivních metod analýzy analogových obvodů. Neméně důležité než tyto informace je však jejich „pojivo“, totiž řetěz řešených příkladů. Tyto příklady vás budou provázet metodami jak „ruční“ analýzy obvodů, tak i metodami jejich řešení na počítači prostřednictvím simulačních programů.

Jak číst tuto knihu, aby vám přinesla co největší užitek?

Dříve než se pokusím o návod, dovolte několik vysvětlujících údajů.

Kniha je sestavena ze tří částí – v prvních dvou se píše o metodách „ruční“ analýzy a počítačové analýzy, třetí část je přílohová. Pro ty z vás, kteří se chtějí skutečně dobře naučit analyzovat elektronické obvody, doporučuji čtení od začátku. To znamená nejprve se učit řešit jednodušší obvody „ručně“, na základě snahy o pochopení jejich fungování, a teprve pak se věnovat studiu „automatizované“ analýzy na počítači. V této druhé fázi je vhodné stáhnout si z domovské stránky nakladatelství BEN – technická literatura instalační soubory programů SNAP a MicroCap spolu s elektronickými výukovými příklady.

Současné simulační programy vesměs pracují na základě modifikované metody uzlových napětí. Proto je této metodě věnováno hodně prostoru v úvodních kapitolách o metodách „ruční“ analýzy, hned po heuristických metodách, kterých využívají zejména ti z nás, kteří rádi řeší problémy „po svém“ tvůrčím využíváním základních zákonů a principů elektrotechniky. Jsou popsány do podrobností postupy rychlé analýzy obvodů s klasickými i moderními obvodovými prvky (různé typy operačních zesilovačů včetně transimpedančních a transkonduktančních, proudové konvejory atd). Metody jsou jednoduchou formou a na množství příkladů objasňovány jak v maticovém tvaru, tak i ve formě tzv. grafů signálových toků. Některé uvedené postupy rychlé analýzy dosud nebyly jinde publikovány. To platí i o poněkud „exotických“

metodách řešení obvodů pomocí grafů signálových toků. Jejich mistrným zvládnutím lze dosáhnout pozoruhodných efektů, například okamžitého napsání výsledku analýzy přímo ze schématu obvodu, tj. bez jakýchkoliv mezivýpočtů.

Kapitolou 4 vstoupíte do světa počítačové analýzy a simulace obvodů. Zde se na zhruba 250 stranách seznámíte s abecedou, jejíž zvládnutí vám otevře cestu k efektivní práci s jakýmkoliv současným simulačním programem z rodiny „SPICE“. Jestliže se vám podaří tuto kapitolu dočíst do konce a čtení budete prokládat pokusy na svém počítači, ověřovat popisované experimenty na demonstračních souborech a přemýšlet o výsledcích, které vám budou poskytovat programy SNAP a MicroCap, pak učiníte mnoho pro to, aby vaše „cesta na vrchol“ byla co nejpoctivější. Nejen proto, že platí rovnice: MicroCap = SPICE + „něco navíc“. Do problematiky počítačové simulace budete zasvěcováni postupně, přes relativně jednodušší programy založené na symbolických algoritmech (SNAP) až po „numerické“ simulátory (MicroCap). Program SNAP jsme vytvořili právě pro studenty, kteří potřebují rychle zvládnout první krůčky v počítačové simulaci obvodů. K zvládání výše zmíněné „abecedy“ by vám měla hodně napomoci netradičně pojatá *kapitola 4.5*, v níž jsou koncentrovány 3 na sebe navazující lekce počítačové simulace v programu SNAP. K umocnění celkového „výukového“ efektu je tato část formálně upravena poněkud odlišně od ostatních kapitol (převaha grafické informace nad textovou, vynechání číslování obrázků atd.). Nechybí zde ani náměty na samostatné experimentování v SNAPu. Máte možnost pokračovat v řešení sady 123 elektronických příkladů, které si můžete stáhnout na váš počítač z www.ben.cz. Jejich popis je uveden v *příloze P9*. Pokrývají širokou škálu problémů a jsou setříděny do kategorií „Základy elektrotechniky“, „Zesilovače“, „Oscilátory“, „Syntetické prvky“, „Filtry“, „Vysokofrekvenční obvody“. Tuto úvodní část však doporučuji i zkušeným uživatelům komerčních simulátorů. SNAP totiž poskytuje – na rozdíl od simulátorů rodiny SPICE – výsledky v tzv. symbolické formě, což vám umožňuje získávat některá řešení, která prostě komerční simulátory neumí.

Navazující kapitoly o „numerických“ simulačních programech je sice možno studovat nezávisle na předchozích částech, efektivnější je ovšem nejprve projít předchozími „základy“. Uvedený „skok“ je možné doporučit snad jen zkušenějším uživatelům některého z komerčních simulátorů. Naučíte se „pohybovat“ v profesionálním schematickém editoru, seznámíte se se základními pojmy a pravidly, jak pracovat s modely součástek, s knihovnami, jak správně používat příkazy typu .MODEL a .DEFINE atd. Naučíte se pracovat s nejrůznějšími typy analýz, v různých analyzačních módech a režimech. V závislosti na vašich