

**Alexandr Krejčířík
Zdeněk Burian**

.SIMULUJ!

Simulace vlastností analogových elektronických
obvodů s diskrétními součástkami

Praha 2001



Alexandr Krejčířík, Zdeněk Burian

.SIMULUJ! – Simulace vlastností analogových elektronických obvodů s diskrétními součástkami

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.

A. Krejčířík, Z. Burian, 2001

Nakladatelství BEN – technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

A. Krejčířík, Z. Burian: **Simuluj!**

BEN – technická literatura, Praha 2001

1. vydání

ISBN 80-7300-005-9

1.	POPIS PROGRAMU PSPICE 5.0A	16
2.	PŘEHLED DEKLARACÍ PROGRAMU PSPICE 5.0A	30
3.	PŘEHLED PŘÍKAZŮ PROGRAMU PSPICE 5.0	57
4.	MAKROMODELY	82
5.	PRÁCE S PROGRAMEM PSPICE	106
6.	VÝSLEDKY SIMULACE A JEJICH ZPRACOVÁNÍ	122
7.	SIMULACE VYBRANÝCH TYPŮ OBVODŮ S DISKRÉTNÍMI SOUČÁSTKAMI	130
8.	SIMULACE PASIVNÍCH OBVODŮ	176
9.	SIMULACE REZONANČNÍCH OBVODŮ	198
10.	SIMULACE KLOPNÝCH OBVODŮ	204
11.	SIMULACE ZESILOVAČŮ S TRANZISTORY	222
12.	SIMULACE LINEÁRNÍCH STABILIZÁTORŮ NAPĚTÍ	278

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	9
ÚVOD	14
1. POPIS PROGRAMU PSPICE 5.0A	16
1.1 Funkční klávesy	16
1.2 Roleta FILES (Soubory)	20
1.3 Roleta CIRCUIT (Obvod)	23
1.4 Roleta StmEd	24
1.5 Roleta ANALYSIS (Analýzy)	26
1.6 Roleta DISPLAY (Zobrazení)	27
1.7 Roleta PROBE (roleta programu PROBE)	27
1.8 Roleta QUIT (Ukončení programu, výstup)	28
2. PŘEHLED DEKLARACÍ PROGRAMU PSPICE 5.0A ..	30
2.1 Syntaxe vstupního souboru	30
2.2 Hodnoty parametrů prvků	32
2.3 Uzly	32
2.4 Přehled deklarací	33
2.4.1 B Tranzistor GaAs FET	33
2.4.2 C Kapacitor (ideální kondenzátor)	35
2.4.3 D Dioda	35
2.4.4 E Zdroj napětí řízený napětím	37
2.4.5 F Zdroj proudu řízený proudem	38
2.4.6 G Zdroj proudu řízený napětím	39
2.4.7 H Zdroj napětí řízený proudem	40
2.4.8 I Nezávislý zdroj proudu	41
2.4.9 J Tranzistor JFET	42
2.4.10 K Transformátor (jen specifikace vazby)	44
2.4.11 L Induktor (ideální cívka)	44
2.4.12 M Tranzistor MOSFET	45
2.4.13 Q Bipolární tranzistor	48
2.4.14 R Rezistor	50
2.4.15 S Spínač řízený napětím	51
2.4.16 Základní typy číslicových prvků	51
2.4.17 V Nezávislý zdroj napětí	51
2.4.18 W Spínač řízený proudem	53

3.	PSPICE 5.0 – PŘEHLED PŘÍKAZŮ	57
3.1	.AC Střídavá analýza	57
3.2	.DC Stejnoseměrná analýza	58
3.3	.DISTRIBUTION Uživatelem definované rozdělení	59
3.4	.END Konec vstupního souboru	59
3.5	.ENDS Konec funkčního bloku	60
3.6	.FOUR Fourierova analýza	60
3.7	.FUNC Definice funkce	61
3.8	.IC Počáteční podmínky	61
3.9	.INC Připojení souboru (úspora opisování shodných částí vstup.souborů)	62
3.10	.LIB Knihovna prvků	62
3.11	.MC Analýza metodou Monte Carlo	63
3.12	.MODEL Definice modelu prvku	65
3.13	.NODESET Nastavení pracovního bodu	67
3.14	.NOISE Šumová analýza	67
3.15	.OP Pracovní bod	68
3.16	.OPTIONS Předvolby a parametry simulátoru	68
3.17	.PARAM Globální parametry	70
3.18	.PLOT Výpis grafů	70
3.19	.PRINT Výpis (tisk) tabulek	72
3.20	.PROBE Data pro grafický postprocesor	73
3.21	.SENS Citlivostní analýza	74
3.22	.STEP Krokování analýzy	75
3.23	.SUBCKT Definice funkčního bloku	76
3.24	.TEMP Teplota	77
3.25	.TF Přenosová funkce	77
3.26	.TRAN Přechodová (tranzientní) analýza	78
3.27	.WCASE Nejhorší případ analýzy	79
3.28	.WIDTH Šířka výpisu	80
4.	MAKROMODELY	82
4.1	Tvorba makromodelů	82
4.2	Nejpoužívanější prezentace zdroje E	82
4.3	Nejpoužívanější prezentace zdrojů řízených proudem (zdroj napětí H, zdroj proudu F)	84
4.4	Základní makromodely	85
4.4.1	Makromodel bipolárního tranzistoru	85
4.4.2	Makromodel ideálního transformátoru	86
4.4.3	Makromodel fotodiody a fotorezistoru	88
4.4.4	Makromodel fotoodporu	89
4.4.5	Makromodel optronu s fotodiodou	90
4.4.6	Makromodel optronu s fotorezistorem	91

4.4.7	Makromodel napětím řízeného odporu	92
4.4.8	Makromodel napětím řízené impedance	93
4.4.9	Makromodel napětím řízené admitance	94
4.4.10	Makromodel transformátoru s feromagnetickým jádrem	95
4.5	Příklady makromodelů	96
5.	PRÁCE S PROGRAMEM PSPICE	106
5.1	Nastavení parametrů simulace	106
5.2	Vstupní soubor	107
5.3	Popis obvodu – netlist	107
5.4	Příkazový blok	108
5.4.1	Fourierova analýza	110
5.4.2	Šumová analýza	111
5.5	Chyby a chybová hlášení	114
5.5.1	Výpočet	116
5.5.2	Chybové hlášení při chybě ve vstupním souboru	119
5.5.3	Knihovna neobsahuje zadanou součástku	119
5.5.4	Chyba při použití obecného editoru	119
5.5.5	Grafický postprocesor	120
6.	VÝSLEDKY SIMULACE A JEJICH ZPRACOVÁNÍ ...	122
6.1	Grafické zobrazení výsledků simulace	122
6.2	Příklad	124
7.	SIMULACE VYBRANÝCH TYPŮ OBVODŮ S DISKRÉTNÍMI SOUČÁSTKAMI	130
7.1	Jednocestný usměrňovač s nabíjecím kondenzátorem naprázdno	131
7.2	Jednocestný usměrňovač s nabíjecím kondenzátorem zatížený	135
7.3	Jednocestný usměrňovač s nárazovou tlumivkou naprázdno	137
7.4	Jednocestný usměrňovač s nárazovou tlumivkou zatížený	139
7.5	Jednocestný usměrňovač s protinapětím	140
7.6	Dvoucestný usměrňovač s nabíjecím kondenzátorem naprázdno	142
7.7	Dvoucestný usměrňovač s nabíjecím kondenzátorem zatížený	144
7.8	Dvoucestný usměrňovač s nárazovou tlumivkou naprázdno	146

7.9	Dvoucestný usměrňovač s nárázovou tlumivkou zatížený	148
7.10	Dvoucestný usměrňovač s protinapětím	150
7.1.11	Můstkový usměrňovač s nabíjecím kondenzátorem naprázdno	151
7.1.12	Můstkový usměrňovač s nabíjecím kondenzátorem zatížený	155
7.1.13	Můstkový usměrňovač s protinapětím	162
7.1.14	Delonův zdvojovač s nabíjecími kondenzátory naprázdno	163
7.1.15	Delonův zdvojovač s nabíjecími kondenzátory zatížený	165
7.1.16	Násobič s nabíjecími kondenzátory naprázdno	169
7.1.17	Násobič s nabíjecími kondenzátory zatížený	171
8.	SIMULACE PASIVNÍCH OBVODŮ	176
8.1	Integrační článek (filtr) RC naprázdno	176
8.2	Integrační článek (filtr) RCR (zatížený)	179
8.3	Integrační článek (filtr) RC s parazitními prvky	181
8.4	LC filtr naprázdno	183
8.5	LCR filtr (zatížený LC článek)	186
8.6	Kapacitní dělič RC-RC	189
8.7	Derivační článek (vazební člen, horní propust, dolní zádrž) CR	192
8.8	vazební člen CL	195
9.	SIMULACE REZONANČNÍCH OBVODŮ	198
9.1	Paralelní rezonanční obvod LC	198
9.2	Sériový rezonanční obvod LC	200
10.	SIMULACE KLOPNÝCH OBVODŮ	204
10.1	Astabilní klopný obvod (multivibrátor, AKO) symetrický	204
10.2	Astabilní klopný obvod nesymetrický	208
10.3	Monostabilní klopný obvod (MKO) – zkracující impulzy	211
10.4	Monostabilní klopný obvod – prodlužující impulzy	215
10.5	Schmittův klopný obvod (tvarovač, SKO)	217
11.	SIMULACE ZESILOVAČŮ S TRANZISTORY	222
11.1	Nastavení a stabilizace pracovního bodu bipolárních tranzistorů	222
11.1.1	Zapojení SE (se společným emitorem)	223
11.1.1.1	Nastavení (pohyb) pracovního bodu změnou R_b	228
11.1.1.2	Proudová zpětná vazba	231
11.1.1.3	Vliv blokovací kapacity emitorového kondenzátoru	235
11.1.1.4	Napěťová zpětná vazba	236

11.1.1.5	Můstková stabilizace	239
11.1.2	Zapojení SK (se společným kolektorem)	243
11.1.2.1	Závislost vstupního odporu na hodnotě emitorového odporu	246
11.1.3	Darlingtonovo zapojení tranzistorů	250
11.1.4	Zesilovač SK + SE se stejnosměrnou vazbou	253
11.1.5	Kapacitní vazba zesilovacího stupně	256
11.1.6	Vypínání indukční zátěže	259
11.1.7	Rozdílový zesilovač	265
11.1.8	Koncový výkonový stupeň s komplementárními tranzistory	270
11.2	Nastavení pracovního bodu unipolárních tranzistorů	272
12.	SIMULACE LINEÁRNÍCH STABILIZÁTORŮ NAPĚTÍ	278
12.1	Lineární parametrický stabilizátor napětí se ZD naprázdno	278
12.2	Lineární parametrický stabilizátor napětí se ZD zatížený	280
12.3	Zpěťovazební stabilizátor napětí s tranzistory	281
12.4	Stabilizátor napětí s referenčním napětím	285
	LITERATURA	290

ÚVOD

Program PSPICE je účinným nástrojem pro vyšetřování chování elektronických obvodů před jejich realizací. Může ušetřit mnoho práce i zklamání z realizace neúspěšných konstrukcí. Podmínkou správné simulace je však sestavení správných modelů a to jak jednotlivých součástek, tak celých obvodů.

Tato publikace by měla přispět právě ke správnému sestavování simulačních obvodů, které se v řadě případů liší od obvodů reálných. V tomto prvním díle se věnujeme pouze vlastnímu programu a lineárním obvodům, sestaveným z diskrétních součástek. Ve všech případech je provedeno porovnání s matematickými výpočty a ukázáno na omezení buď výpočtu (zejména přechodové stavy obvodů po jejich zapnutí) nebo na omezení simulací (zejména vlivem nedokonalostí modelů jednotlivých součástek).

Vybrané simulované obvody pokrývají sice velkou oblast slaboproudé elektroniky, ale nelze předpokládat, že by se publikace mohla věnovat všem oblastem. Proto bylo upuštěno od simulace vysokofrekvenčních obvodů, radiofrekvenčních obvodů apod. Publikace se tak zaměřuje na základní obvody, které se opakují v řadě profesionálních i amatérských konstrukcí.

Knihu lze použít nejen jako soubor příkladů, jak napsat vstupní soubory pro simulaci a jak upravit schémata zapojení, ale vzhledem ke konkrétním číselným příkladům i jako učebnici základů elektroniky.

Sám program PSPICE je velmi finančně náročný a tak jsme se rozhodli používat pouze jeho zjednodušenou volně šiřitelnou školní verzi s označením 5.0a. Tato verze umožňuje modelovat pouze obvody s omezeným počtem součástek a uzlů. Tento program PSPICE je volně šiřitelný a spolu s knihovnami jednotlivých prvků je možno si jej zkopírovat na adresách (<http://www.ee.byu.edu/ee/vlsi/download/> nebo také <http://noel.feld.cvut.cz/vyu/eo/spice/>).

Publikace byla zpracována v rámci řešení vědeckovýzkumného úkolu č. 15 ČVUT: Výzkum nových metod pro měření fyzikálních veličin a jejich aplikace v přístrojové technice. Budeme vděční za připomínky a názory čtenářů a budeme rádi za jejich poskytnutí na e-mailové adresy:

burian@feld.cvut.cz
krejciri@feld.cvut.cz

autoři