

Robert Láníček

ELEKTRONIKA

obvody • součástky • děje



V knize jsou probrány základní elektronické obvody. Publikace je doplněna velkým množstvím obrázků a řadou názorně řešených příkladů. Při řešení příkladů se předpokládá znalost středoškolské matematiky.

Kniha může sloužit jako studijní pomůcka pro posluchače průmyslových i vysokých škol. Některé pasáže mohou být užitečné i vývojovým pracovníkům v oblasti elektroniky.

Robert Lániček

ELEKTRONIKA

obvody • součástky • děje

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. Robert Lániček 1998

Nakladatelství BEN - technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

Robert Lániček: Elektronika, obvody - součástky - děje

BEN - technická literatura, Praha 1998

1. vydání

ISBN 80-86056-25-2

ÚVOD	11
1. ZÁKLADNÍ OBVODY	13
1.1 Elektronický obvod	13
1.2 Elektronické prvky	13
1.3 Statické a dynamické parametry	14
Příklad 1.1 Určení průběhů statického a dynamického parametru	15
Příklad 1.2 Určení dynamického odporu diody z VA charakteristiky	16
Příklad 1.3 Konstrukce VA charakteristiky z katalogových údajů	16
1.4 Parametrické charakteristiky	17
1.5 Jednobrany a dvojbřany	18
1.6 Model tranzistoru	19
Příklad 1.4 Řešení obvodu pomocí impedančních matic	20
Příklad 1.5 Určení parametrů dvojbřanu a sestrojení charakteristik	21
1.7 Náhradní schéma zdroje	22
Příklad 1.6 Zjištění vnitřního odporu zdroje	23
Příklad 1.7 Změna vnitřního odporu zdroje	24
1.8 Přizpůsobení zdroje a spotřebiče	24
Příklad 1.8 Důkaz nastavení pracovního bodu pro výkonové přizpůsobení	26
Příklad 1.9 Grafické určení polohy optimálního pracovního bodu	27
Příklad 1.10 Optimální zatěžovací odpor fotoprůvku	27
Příklad 1.11 Optimální sestava baterie	28
1.9 Princip náhradního zdroje	28
Příklad 1.12 Návrh děliče s požadovanou tvrdostí	29
Příklad 1.11 Návrh napětového děliče generátoru I	30
Příklad 1.13 Návrh napětového děliče generátoru II	30
Příklad 1.14 Transfigurace hvězda-trojúhelník	31
Příklad 1.15 Vliv nastavení potenciometru na parametry zdroje	32
Příklad 1.16 Citlivostní analýza	33
Příklad 1.17 Vliv odporu zátěže na linearity potenciometru	33
1.10 Analytické metody řešení obvodů	35
Příklad 1.18 Řešení obvodu se dvěma zdroji	37
Příklad 1.19 Řešení obvodu smyčkovými proudy	38
Příklad 1.20 Příklad na uzlová napětí	40
1.11 Grafické metody řešení obvodů	41
Příklad 1.21 Připojení svítivé diody ke zdroji	43
Příklad 1.22 Nezatížený stabilizátor napětí	44
Příklad 1.23 Zatížený stabilizátor napětí	45
1.12 Nelineární grafické papíry	46
Příklad 1.24 Určení funkční závislosti z grafu	48
Příklad 1.25 Grafické znázornění Ohmova zákona	50

1.13	Nomogramy	51
Příklad 1.26	Příklad nomogramů pro určení U , I , R a P součástky	52
Příklad 1.27	Nomogram pro určení převrácené hodnoty komplexního čísla	53
Příklad 1.28	Nomogram pro sériový součet odporů z řady E24	54
Příklad 1.29	Nomogram pro paralelní součet odporů z řady E24	55
Příklad 1.30	Znázornění všech kombinací hodnot řady E24	56
	Příloha-tabulka kombinací hodnot řady E24	57
2.	ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY	71
2.1	Pasivní prvky a elektrotechnické řady	71
Příklad 2.1	Toleranční pole prvků elektrotechnické řady	72
2.2	Spojování prvků	73
Příklad 2.2	Nevhodné spojení prvků z řady E12	73
2.3	Výběr prvků z elektrotechnické řady	74
Příklad 2.3	Návrh děliče voltmetru s konstantním vstupním odporem	74
2.4	Značení rezistorů a kondenzátorů	75
2.5	Rezistory	76
2.6	Nelineární rezistory	76
Příklad 2.4	Omezení nárazového proudu při zapnutí obvodu	78
2.7	Řízené rezistory	79
2.8	Kondenzátory	80
2.9	Elektrolytické kondenzátory	81
2.10	Druhy kondenzátorů	81
Příklad 2.5	Energie nabitého kondenzátoru	82
Příklad 2.6	Náhrada akumulátoru kondenzátorem	83
2.11	Teplotní závislost pasivních prvků	83
Příklad 2.7	Změna odporu vlákna žárovky	84
2.12	Kompenzace teplotní závislosti	84
Příklad 2.8	Návrh teplotně nezávislého kondenzátoru	85
2.13	Induktivní prvky	86
2.14	Cívky	87
2.15	Druhy cívek	88
Příklad 2.9	Orientační návrh tlumivky spínaného zdroje	89
2.16	Transformátory	90
Příklad 2.9	Návrh síťového transformátoru	91
2.17	Relé	92
2.18	Proměnné prvky	94
Příklad 2.10	Průběh závislosti kapacity varikapu na závěrném napětí	96
2.19	Nelineární elektronické součástky	96
2.20	Unipolární tranzistory	97

2.21	Vlastnosti a druhy FET	100
Příklad 2.11	Nastavení pracovního bodu tranzistoru JFET	101
Příklad 2.12	Grafické odvození napětového zesílení zesilovače s JFET	102
2.22	Polovodičová dioda	104
2.23	Základní zapojení diod	105
2.24	Rozdělení a speciální typy diod	107
Příklad 2.13	Určení parametrů modelu diody ze změřené charakteristiky	110
Příklad 2.14	Grafické řešení tvarovacího obvodu	113
2.25	Bipolární tranzistory	114
2.26	Charakteristiky tranzistoru	114
2.27	Volba pracovního bodu tranzistoru	116
2.28	Mezní a tranzitní kmitočty	117
2.29	Vliv teploty na vlastnosti tranzistoru	118
2.30	Nastavení pracovního bodu	119
Příklad 2.15	Nastavení pracovního bodu tranzistoru	120
Příklad 2.16	Vliv teploty na nastavení pracovního bodu	121
2.31	Rozdělení a použití tranzistorů	122
2.32	Vícevrstvé spínací součástky	124
2.33	Struktura a funkce tyristoru	127
2.34	Dynamické vlastnosti tyristoru	128
2.35	Způsoby řízení tyristoru	129
Příklad 2.17	Vliv úhlu sepnutí na parametry signálu	130
2.36	Dvoubázová dioda	132
2.37	Tyristory ve stejnosměrných obvodech	132
2.38	Speciální elektronické prvky	135
2.39	Značení elektronických prvků	139
2.40	Chlazení polovodičových součástek	139
Příklad 2.17	Návrh deskového chladiče	142
3.	KMITOČTOVĚ ZÁVISLÉ OBVODY	143
3.1	Fázorový počet v elektronice	143
3.2	Reaktance v obvodu střídavého proudu	144
Příklad 3.1	Reaktance jako předřadník	146
3.3	Použití symbolického počtu	146
Příklad 3.2	Odvození reaktancí pomocí symbolického počtu	147
Příklad 3.3	Náhradní schéma cívky a kondenzátoru	148
3.4	Impedanční a výkonové diagramy	149
Příklad 3.4	Měření indukčnosti metodou tří ampérmetrů	149
3.5	Komplexní jednobrany	151
Příklad 3.5	Návrh duálního obvodu	152
Příklad 3.6	Zjednodušený výpočet paralelních impedancí RL a RC	153

3.6	Filtrační články	154
Příklad 3.7	Určení komplexního přenosu děliče	154
3.7	Přenos v decibelech	157
Příklad 3.8	Konstrukce logaritmické a decibelové stupnice	159
Příklad 3.9	Určení přenosu pomocí decibelových úrovní	161
Příklad 3.10	Zjednodušené počítání s decibely	161
3.8	Integrační články	162
3.9	Derivační články	163
3.10	Mezní kmitočty a přenos článků	164
3.11	Vliv článků na tvar signálu	168
Příklad 3.11	Integrační článek RC zatížený rezistorem	169
3.12	Jednoduché pásmové propusti	170
Příklad 3.12	Odvození šířky pásma propusti	171
Příklad 3.13	Odvození přenosu pásmové propusti a zádrže	172
3.13	Wienův článek	173
Příklad 3.14	Laditelný Wienův článek	174
3.14	Rezonanční obvody	175
Příklad 3.15	Reálný paralelní rezonanční obvod	176
Příklad 3.16	Rezonance v sériově paralelním obvodu	177
3.15	Rezonanční pásmová propust a zádrž	178
Příklad 3.17	Vliv jakosti Q na tvar přenosových charakteristik	179
Příklad 3.18	Přenosové charakteristiky zádrže	181
3.16	Složitější RC filtry	184
Příklad 3.19	Odvození šířky pásma přemostěného T článku	186
Příklad 3.20	Odvození přenosu dvojitého T článku	186
Příklad 3.21	Odvození přenosu fázovacího RC článku	188
Příklad 3.22	Výpočet fázorového diagramu fázovacího článku	190
3.17	Pasivní kmitočtové korektory	191
Příklad 3.23	Návrh korektoru hloubek	193
Příklad 3.24	Návrh nízkofrekvenčního sdruženého korektoru	194
3.18	Symbolické řešení článků	195
Příklad 3.25	Asymptotické řešení přenosových charakteristik	196
3.19	Rozdělení elektronických filtrů	198
Příklad 3.26	Návrh reproduktorové výhybky 6 dB na oktávu	199
Příklad 3.27	Návrh reproduktorových výhybek 12 dB na oktávu	200
3.20	Útlumové články	201
4.	PŘECHODNÉ DĚJE	203
4.1	Význam přechodných dějů	203
4.2	Příklady analogií	203
4.3	Exponenciální charakter dějů	206
4.4	Časová konstanta přechodného děje	207
Příklad 4.1	Určení parametrů funkce $u = U_{\text{MAX}} \cdot (1 - e^{-t/\tau})$	208

Příklad 4.2	Grafická konstrukce parametrů přechodného děje	209
4.5	Přechodné děje v RC obvodu	210
Příklad 4.3	Odvození vztahů pro vybíjení kondenzátoru	212
4.6	Přechodné děje v RL obvodu	213
Příklad 4.4	Odvození vztahů pro připojení zdroje k RL obvodu	214
4.7	Výkonové poměry v RC obvodu	215
Příklad 4.5	Určení maximálního výkonu dodávaného do kondenzátoru	215
4.8	Výkonové poměry v RL obvodu	216
Příklad 4.6	Energetické poměry v obvodech po odpojení zdroje	217
4.9	Využití přechodných dějů v elektronice	218
Příklad 4.7	Určení počátku nekonečna při nabíjení kondenzátoru	219
Příklad 4.8	Návrh astabilního klopného obvodu s časovačem 555	219
Příklad 4.9	Návrh monostabilního klopného obvodu s časovačem 555	221
Příklad 4.10	Rozmítaný generátor s časovačem 555	221
Příklad 4.11	Generátor obdélníků se střídou 1 : 1	222
Příklad 4.12	Zapojení multivibrátoru s diodovou výhybkou	223
Příklad 4.13	AD převod metodou dvojí integrace (dual slope)	224
4.10	Řešení složitějších obvodů	224
Příklad 4.14	Závislost zvlnění na poměru periody k časové konstantě	226
Příklad 4.15	Poměry v obvodu při proměnné střídě $S = t_i/T$	228
Příklad 4.16	Analogový měřič kmitočtu s časovačem 555	229
Příklad 4.17	Převodník napětí-kmitočet s časovačem 555	231
Příklad 4.18	Zjednodušení obvodu Théveninovou větou	232
Příklad 4.19	Přenos energie mezi kondenzátory	233
Příklad 4.20	Odezva integračního článku na obdélníkový impuls	237
Příklad 4.21	Řešení rezonančního obvodu operátorovým počtem	238
4.11	Přechodné děje v RLC obvodech	240
Příklad 4.22	Odvození průběhů složitějšího přechodného děje	243
Příklad 4.23	Určení činitele jakosti rezonančního obvodu	244
Příklad 4.24	Připojení střídavého zdroje do RL obvodu	246
	Příloha - Operátorový slovník	247
5.	ANALÝZA SIGNÁLŮ	259
5.1	Úvod do harmonické analýzy	259
5.2	Vznik napětí sinusového průběhu	261
Příklad 5.1	Odvození komplexního tvaru zápisu harmonické funkce	262
5.3	Fourierův rozvoj signálu	263
Příklad 5.2	Výpočet spektra obdélníkového signálu ± 5 V/1 kHz	264
5.4	Grafickočetní metoda analýzy	267
Příklad 5.3	Numerický výpočet spektra obdélníků ± 5 V/1 kHz	267
Příklad 5.4	Program pro výpočet koeficientů Fourierovy řady	269
5.5	Střední a efektivní hodnota	271
Příklad 5.5	Výpočet střední a efektivní hodnoty obdélníkového napětí	274
Příklad 5.5	Výpočet střední a efektivní hodnoty usměrněného napětí	274

5.6	Činitelé tvaru signálu	275
	Příklad 5.6 Výpočet činitelů tvaru usměrněných napětí	277
5.7	Skládání kmitů a Lissajousovy obrazce	280
	Příklad 5.7 Určení fázového posuvu z Lissajousova obrazce	280
5.8	Průchod signálu lineární soustavou	283
	Příklad 5.8 Odvození výstupního signálu metodou Fourierovy řady	283
5.9	Nelineární zkreslení signálu	285
	Příklad 5.9 Rozbor činnosti nabíječky akumulátorů	286
	Příloha-Fourierovy rozvoje signálů	293
6.	ZESILOVAČE	295
6.1	Základní vlastnosti zesilovačů	295
6.2	Zpětná vazba	297
	Příklad 6.1 Kritérium stability zesilovače	299
6.3	Druhy zpětných vazeb	299
6.4	Vliv zpětných vazeb na obvody	300
	Příklad 6.2 Vliv zpětné vazby na šířku pásma zesilovače	301
6.5	Parazitní zpětné vazby	303
6.6	Základní tranzistorové zesilovače	304
6.7	Třídy zesilovačů	307
	Příklad 6.3 Energetická účinnost zesilovače třídy A a třídy B	309
6.8	Stabilizace pracovního bodu	310
6.9	Řešení tranzistorového zesilovače	312
	Příklad 6.4 Analýza zapojení zesilovače	314
	Příklad 6.5 Návrh jednostupňového zesilovače se zesílením $A_v = -40$	315
	Příklad 6.6 Návrh dvoustupňového zesilovače	317
6.10	Koncové výkonové zesilovače	320
	Příklad 6.7 Simulace vlivu vazební kapacity na vlastnosti zesilovače	322
6.11	Vazby mezi stupni zesilovače	323
6.12	Stejnoseměrné zesilovače	323
	Příklad 6.8 Návrh rozdílového zesilovače	325
6.13	Operační zesilovače	326
	Příklad 6.9 Zdroje proudu v operačních zesilovačích	328
	Příklad 6.10 Rozbor zapojení operačního zesilovače B080	329
6.14	Základní zapojení OZ	330
	Příklad 6.11 Součtový a rozdílový zesilovač	332
	Příklad 6.12 Výkonový můstkový zesilovač s MDA2005	333
6.15	Nelineární zesilovače	334
	Příklad 6.13 Kompenzované logaritmické zesilovače	336
6.16	Lineární usměrňovače	339
	Příklad 6.14 Návrh elektronického voltmetru	340
6.17	Aktivní filtry	341

Příklad 6.15	Butterworthova aproximace dolní propusti pátého řádu	346
Příklad 6.16	Odvození přenosu dolní propusti druhého řádu	346
Příklad 6.17	Návrh dolní propusti druhého řádu	348
Příklad 6.18	Návrh složitějšího filtru	349
6.18	Integrátor a derivátor	352
6.19	Syntetické reaktance	355
Příklad 6.18	Pásmová zadrž s umělou indukčností	355
	Příloha-příklady zapojení s operačními zesilovači	359
7.	GENERÁTORY	375
7.1	Princip generátorů	375
7.2	LC oscilátory	375
7.3	Oscilátory s krystalem	378
7.4	Dynatronové oscilátory	378
Příklad 7.1	Tranzistorový jednobran se záporným dynamickým odporem	380
7.5	RC oscilátory	380
Příklad 7.2	Rozbor zapojení nízkofrekvenčního generátoru	382
7.6	Stabilizace amplitudy oscilací	383
Příklad 7.3	Návrh regulačního obvodu	384
Příklad 7.4	Návrh Wienova oscilátoru	387
7.7	Jiná řešení oscilátorů	388
Příklad 7.5	Oscilátory se dvěma integrátory	390
7.8	Záznějové generátory	392
7.9	Fázový závěs a syntéza kmitočtu	394
7.10	Fázové detektory	395
Příklad 7.6	Rozbor zapojení PLL CMOS 4046	396
7.11	Násobičky kmitočtu	398
Příklad 7.7	Návrh tvarovacího ztrojovače kmitočtu	399
Příklad 7.8	Optimální nastavení pracovního bodu násobiče	401
Příklad 7.9	Násobič a syntezátor kmitočtu s obvodem fázového závěsu	403
7.12	Děliče kmitočtu	404
Příklad 7.10	Aplikace děličů kmitočtu	405
7.13	Napětím řízené generátory	406
Příklad 7.11	VCO z obvodu fázového závěsu 4046	408
7.14	Generátory neharmonických kmitů	411
Příklad 7.12	Generátory se zdrojem proudu	411
7.15	Komparátory napětí	413
Příklad 7.13	Multivibrátor s operačním zesilovačem	416
Příklad 7.14	Blikač jako astabilní klopný obvod	417
Příklad 7.15	Generátory trojúhelníkového průběhu	418
Příklad 7.16	Relaxační generátory s prvky s S charakteristikou	420

7.16	Funkční generátory	421
Příklad 7.17	Zapojení s integrovaným generátorem XR8038	421
Příklad 7.18	Návrh pasivního tvarovače trojúhelník-sinus	423
Příklad 7.19	Generátory schodového průběhu	425
7.17	Speciální generátory	426
8.	NAPÁJECÍ ZDROJE	427
8.1	Elektrochemické zdroje	427
8.2	Vlastnosti primárních článků	427
8.3	Akumulátorové články	428
8.4	Nabíjecí obvody článků	430
Příklad 8.1	Příklady zapojení obvodů pro rychlé nabíjení článků	433
8.5	Síťové zdroje	434
8.6	Usměrňovače	435
8.7	Násobiče napětí	438
Příklad 8.2	Experimentální ověření vlastností násobiče	439
Příklad 8.3	Měniče napětí s 555	440
8.8	Filtrace napětí	441
Příklad 8.4	Návrh filtrační kapacity stabilizovaného zdroje	442
Příklad 8.5	Návrh filtrační kapacity nestabilizovaného zdroje	443
8.9	Speciální usměrňovače	445
Příklad 8.6	Řídicí obvody tyristoru	446
8.10	Stabilizátory napětí	447
Příklad 8.7	Sériový a paralelní stabilizátor s tranzistorem	449
8.11	Integrované stabilizátory	452
Příklad 8.8	Návrh regulovatelného zdroje	454
Příklad 8.9	Návrh symetrického stabilizovaného zdroje	455
8.12	Vícesvorkové stabilizátory	456
8.13	Stabilizátory s omezením proudu	457
Příklad 8.10	Příklady zapojení s obvodem L200	458
8.14	Stabilizátory proudu	460
8.15	Speciální stabilizátory	461
Příklad 8.11	Zdroj se spínaným stabilizátorem L4960	462
	LITERATURA	467
	REJSTŘÍK	469
	Knihy nakladatelství BEN - technická literatura	474
	Program VISIO (kterým byly nakresleny obrázky)	478

ÚVOD

Elektronika je obor elektrotechniky, který zasahuje téměř do všech ostatních oblastí techniky. Původně se elektronikou rozuměla nauka o chování volných elektronů v plynu a ve vakuu. Nyní se nejčastěji definuje jako odvětví elektrotechniky, které se zabývá generováním a zpracováním elektrických signálů. Kromě zpracování signálů se rozvíjí i využívání elektronických obvodů v silnoproudé elektrotechnice. Podle oblasti použití se elektronika rozděluje na: *průmyslovou*, *výkonovou*, *spotřební*, *lékařskou*, *radioelektroniku* a *autoelektroniku*. Elektronika navazuje na poznatky z obecné elektrotechniky, fyziky i matematiky a tvoří základ pro další technická odvětví, jako jsou *telekomunikace*, *radiotechnika*, *kybernetika*, *automatizace* i *výpočetní technika*.

Historie elektroniky je přitom relativně krátká. V roce 1904 vynalezl J. A. FLEMING diodu a o tři roky později byla objevena trioda (LEE DE FOREST). Dalším mezníkem je vynález tranzistoru v roce 1948 (W. SHOCKLEY, J. BARDEEN a W. BRATTAIN). Následoval vývoj integrovaných obvodů a číslicové techniky. Téměř exponenciální vývoj elektronických obvodů je nejlépe patrný v oblasti osobních počítačů. Další vývoj je obtížné předvídat, protože nelze vyloučit i technické využití zcela nových objevů.

Přestože se tato kniha zabývá pouze klasickou analogovou technikou, není a asi ani nemůže být tato omezená část elektroniky zpracována vyčerpávajícím způsobem. Nicméně základní obvody i principy jsou v publikaci vysvětleny a procvičeny v řadě řešených příkladů. Osvojení teoretických poznatků může značně urychlit praktické cvičení. Pro tento účel jsou ideální simulační programy, jako je např.: Electronics Workbench (EWB), TINA a Micro-Cap, jejichž demoverze lze stáhnout z internetu na adresách: www.interaktiv.com, www.tina.com, www.spectrum-soft.com. Předpokládám, že kniha najde své čtenáře v řadách studentů i ostatních zájemců o daný obor a rád bych ji věnoval svým žákům.

V Brně dne 1. října 1997

autor