

Jaroslav Doleček

## **MODERNÍ UČEBNICE ELEKTRONIKY**

# 2. díl Polovodičové prvky a elektronky

---

dioda • bipolární tranzistor • unipolární tranzistor • tyristor • triak • diak  
trioda • vícemřížkové elektronky • obrazovka  
Hallova sonda • magnetorezistor • magnetodiody • termistor • varistor

Praha 2005



---

Jaroslav Doleček

## **Moderní učebnice elektroniky 2. díl**

Lektor Ing. Jiří Hozman

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, 2005

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

Jaroslav Doleček, MODERNÍ UČEBNICE ELEKTRONIKY

BEN – technická literatura, Praha 2005

**ISBN 80-7300-161-6**

# 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 PŘIZPŮSOBENÍ**
- 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 O SVĚTLE**
- 2 DIODY LED**
- 3 LASEROVÉ DIODY**
- 4 DETEKTORY SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ**
- 5 OPTOELEKTRONICKÉ VAZEBNÍ ČLENY – OPTRONY**
- 6 ZOBRAZOVACÍ JEDNOTKY – DISPLEJE**
- 7 OBRAZOVÉ SENZORY**
- 8 OPTICKÁ VLÁKNA**

# PODROBNÝ OBSAH

<b>O KNIZE .....</b>	<b>8</b>
----------------------	----------

<b>1 POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY S JEDNÍM PŘECHODEM PN .....</b>	<b>9</b>
---	----------

<b>1.1 Úvod .....</b>	<b>10</b>
1.1.1 Základní vlastnosti polovodičového materiálu .....	10
1.1.2 Vodivost polovodičů .....	11
<b>1.2 Vlastní polovodiče (intrinsické) .....</b>	<b>11</b>
<b>1.3 Nevlastní polovodiče (extrinsické) .....</b>	<b>13</b>
1.3.1 Polovodiče typu N .....	13
1.3.2 Polovodiče typu P .....	14
1.3.3 Vliv teploty na vodivost polovodiče .....	15
<b>1.4 PN přechod .....</b>	<b>15</b>
1.4.1 PN přechod bez přiloženého napětí .....	15
1.4.2 PN přechod s přiloženým napětím .....	16
1.4.2.1 Přechod PN polarizovaný v závěrném směru .....	16
1.4.2.2 Přechod PN polarizovaný v propustném směru .....	17
<b>1.5 Polovodičová dioda .....</b>	<b>18</b>
1.5.1 Náhradní zapojení (model) diody .....	19
1.5.1.1 Kapacita a indukčnost PN přechodu diody .....	20
1.5.2 Teplotní závislost PN přechodu .....	21
1.5.3 Průrazy PN přechodu .....	22
1.5.3.1 Zenerův průraz .....	22
1.5.3.2 Lavinový průraz .....	22
1.5.3.3 Tepelný průraz .....	23
1.5.4 Typy diod .....	23
1.5.4.1 Hrotové diody .....	24
1.5.4.2 Plošné diody .....	25
1.5.5 Parametry diod .....	27
1.5.5.1 Mezní parametry diody .....	27
1.5.5.2 Provozní parametry diod .....	28
1.5.5.3 Dynamické parametry diod .....	28
1.5.6 Typy diod z hlediska funkce .....	30
1.5.6.1 Diody pro všeobecné použití .....	30
1.5.6.2 Usměrňovací diody .....	30
1.5.6.3 Vysokofrekvenční (signálové) diody .....	33
1.5.6.4 Stabilizační a referenční diody .....	33
1.5.6.5 Transil a trisil .....	34
1.5.6.6 Kapacitní diody – varikapy a varistory .....	36
1.5.6.7 Tunelová dioda (Esakiho) .....	39
1.5.6.8 PIN dioda .....	39
1.5.6.9 Schottkyho dioda .....	40

1.5.7	Příklady obvodů s diodami .....	42
1.5.7.1	Jednocestný usměrňovač .....	42
1.5.7.2	Dvojcestný usměrňovač – zapojení do hvězdy .....	43
1.5.7.3	Graetzovo zapojení dvojcestného usměrňovače .....	45
1.5.7.4	Použití Zenerových diod .....	46

## **2 TRANZISTORY A POLOVODIČOVÉ VÝKONOVÉ A SPÍNACÍ PRVKY ..... 53**

### **2.1 Tranzistory ..... 54**

#### **2.2 Bipolární tranzistor ..... 54**

2.2.1	Základní uspořádání a princip činnosti bipolárního tranzistoru .....	54
2.2.2	Hlavní vlastnosti NPN a PNP tranzistorů v aktivním režimu .....	58
2.2.2.1	Základní zapojení tranzistoru .....	59
2.2.2.2	Proudové zesilovací činitele a a b .....	59
2.2.2.3	Porovnání hlavních vlastností Si tranzistorů NPN a PNP .....	61
2.2.2.4	Statické charakteristiky a parametry bipolárních tranzistorů .....	61
2.2.2.5	Zatěžovací přímka .....	63
2.2.2.4	Hlavní vlastnosti základních zapojení tranzistorů .....	66
2.2.2.5	Čtyřpólové parametry tranzistoru pro malé signály .....	67
2.2.2.6	Teplovní závislost parametrů bipolárních tranzistorů .....	71
2.2.2.7	Důležité mezní parametry bipolárních tranzistorů .....	73
2.2.3	Principy využití bipolárních tranzistorů .....	74
2.2.3.1	Tranzistor pracuje v lineárním režimu .....	74
2.2.3.2	Tranzistor ve spínacím režimu v zapojení SE .....	78
2.2.4	Darlingtonovo a Sziklaiovo zapojení .....	80
2.2.4.1	Darlingtonovo zapojení .....	80
2.2.4.2	Sziklaiovo zapojení (komplementární Darlingtonovo zapojení) .....	81

#### **2.3 Unipolární tranzistory ..... 83**

2.3.1	Princip tranzistoru řízeného polem .....	83
2.3.1.1	Něco z historie .....	83
2.3.1.2	Základní idea FET .....	84
2.3.2	Tranzistory řízené elektrickým polem typu JFET .....	85
2.3.2.1	Úvod .....	85
2.3.2.2	Princip činnosti .....	86
2.3.2.3	Konstrukční uspořádání JFET .....	90
2.3.2.4	Důležité parametry tranzistorů JFET .....	90
2.3.2.5	Využití tranzistorů JFET .....	91
2.3.3	Tranzistory s izolovaným hradlem (IGFET) .....	93
2.3.3.1	Tranzistor MOSFET s indukovaným kanálem .....	93
2.3.3.2	Tranzistor typu MOSFET s vodivým kanálem (se zabudovaným kanálem, s trvalým kanálem) .....	96
2.3.3.3	Teplovní závislost tranzistorů MOSFET .....	99
2.3.3.4	Důležité parametry tranzistorů MOSFET .....	100
2.3.4	Mikrovlonné unipolární tranzistory .....	101
2.3.4.1	Tranzistor MESFET .....	101
2.3.4.2	Tranzistor HEMT .....	101
2.3.5	Zapojení s unipolárními tranzistory .....	103
2.3.5.1	Unipolární tranzistor jako spínací prvek .....	103

2.3.5.2	Příklady zapojení s tranzistory JFET .....	105
2.3.5.3	Příklady zapojení s tranzistory MOSFET .....	107
2.3.6	Model tranzistorů řízených elektrickým polem pomocí čtyřpólových parametrů .....	109
2.3.7	Tranzistory MOSFET s dvojitým hradlem (Dual Gate MOS FET) .....	109
2.3.8	Komplementární MOS technologie (CMOS) .....	110
2.3.9	Zásady pro manipulaci s tranzistory řízenými elektrickým polem .....	111
2.3.10	Porovnání charakteristik tranzistorů řízených polem .....	112
<b>2.4</b>	<b>Výkonové polovodičové součástky .....</b>	<b>114</b>
2.4.1	Výkonové unipolární tranzistory .....	114
2.4.1.1	Výkonové tranzistory JFET a SIT tranzistory .....	114
2.4.1.2	Výkonové tranzistory MOSFET .....	115
2.4.1.3	Buzení výkonových spínacích tranzistorů .....	119
2.4.1.4	Ztrátový výkon PDS výkonových tranzistorů .....	121
2.4.1.5	Některé aplikace výkonových tranzistorů MOSFET .....	121
2.4.2	Bipolární výkonové tranzistory .....	126
2.4.3	Tranzistory IGBT .....	127
2.4.3.1	Některé důležité parametry tranzistorů IGBT .....	131
<b>2.5</b>	<b>Porovnání vlastností bipolárních a unipolárních tranzistorů ...</b>	<b>134</b>
2.5.1	Průrazy tranzistorů .....	134
2.5.1.1	Průrazy tranzistorů MOSFET .....	134
2.5.1.2	Průrazy bipolárních tranzistorů .....	135
2.5.2	Přednosti a nedostatky unipolárních tranzistorů vůči bipolárním .....	136
<b>2.6</b>	<b>Vícevrstvé spínací polovodičové součástky .....</b>	<b>139</b>
<b>2.7</b>	<b>Tyristory .....</b>	<b>140</b>
2.7.1	Důležité parametry tyristoru .....	141
2.7.2	Spínání tyristoru .....	144
2.7.2.1	Spínání tyristoru napětím mezi anodou a katodou – spínacím napětím $U(B_0)$ .....	144
2.7.2.2	Spínání proudovým impulzem do řídicí elektrody .....	144
2.7.2.3	Sepnutí kapacitním proudem .....	145
2.7.3	Vypínání tyristoru .....	146
2.7.3.1	Vypínání tyristorů v obvodech střídavého proudu .....	146
2.7.3.2	Vypínání v obvodech stejnosměrného proudu .....	147
2.7.4	Dvouhradlový tyristor .....	148
<b>2.8</b>	<b>Triak .....</b>	<b>149</b>
<b>2.9</b>	<b>Diak .....</b>	<b>152</b>
<b>2.10</b>	<b>Vypínací tyristory .....</b>	<b>154</b>
2.10.1	Vypínací tyristor GTO .....	154
2.10.2	Vypínací tyristory IGCT .....	154
2.10.3	MCT – Mos Controlled Thyristor .....	155
2.10.4	Tyristory SiC a GaN .....	155
<b>3</b>	<b>ELEKTRONKY .....</b>	<b>157</b>
<b>3.1</b>	<b>Princip elektronky .....</b>	<b>158</b>
3.1.1	Katoda .....	158

3.1.2	Anoda .....	160
<b>3.2</b>	<b>Dioda .....</b>	<b>160</b>
<b>3.3</b>	<b>Trioda .....</b>	<b>162</b>
<b>3.4</b>	<b>Vícemřížkové elektronky .....</b>	<b>166</b>
3.4.1	Tetroda .....	166
3.4.2	Pentoda .....	167
3.4.3	Směšovací elektronky hexoda a heptoda .....	169
<b>3.5</b>	<b>Obrazové elektronky – obrazovky .....</b>	<b>170</b>
3.5.1	Konstrukční uspořádání obrazovek .....	170
3.5.1.1	Elektronová tryska .....	170
3.5.1.2	Vychylovací obvody elektronového paprsku .....	171
3.5.1.3	Barevné obrazovky .....	173

## **4 POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY BEZ PŘECHODU PN ..... 177**

<b>4.1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>178</b>
<b>4.2</b>	<b>Součástky z monokrystalických polovodičů .....</b>	<b>179</b>
4.2.1	Hallova sonda .....	179
4.2.1.1	Hallův jev – princip .....	179
4.2.1.2	Polovodičová Hallova sonda .....	180
4.2.1.3	Využití Hallova jevu .....	183
4.2.2	Magnetorezistor .....	184
4.2.3	Magnetodioda .....	185
<b>4.3</b>	<b>Součástky z polykrystalického materiálu .....</b>	<b>186</b>
4.3.1	Termistory .....	186
4.3.1.1	Termistory se záporným teplotním koeficientem – termistory NTC .....	186
4.3.1.2	Termistory s kladným teplotním koeficientem – termistory PTC .....	189
4.3.1.3	Důležité parametry termistorů .....	190
4.3.2	Varistory .....	191

## **LITERATURA ..... 195**

## **ODBORNÁ LITERATURA A ČLÁNKY ..... 197**

## **REJSTŘÍK ..... 200**

## **KNIHY NAKLADATELSTVÍ BEN – TECHNICKÁ LITERATURA ..... 204**

## **KONTAKTY NA PRODEJNÝ TECHNICKÉ LITERATURY ..... 207**

Začátkem 60. let vedly ke snížení rozměrů a spotřeby první číslicové integrované obvody. V roce 1971 začíná nová éra rozvoje elektroniky vyrobením prvního mikroprocesoru. Zdokonalování technologických výrobních pochodů vedlo k soustavnému zmenšování rozměrů a spotřeby elektřiny a zároveň ke zvyšování množství polovodičových prvků v jednom integrovaném obvodu, ke zmenšování jejich rozměrů. Známy Moorův zákon říká, že se počet tranzistorů, které mohou být umístěny na jeden čip každých 18 měsíců zdvojnásobí. Nové objevy v oblasti fyziky dávají předpoklad, že se tento trend podaří udržet i v následujících letech, kdy se rozměry jednotlivých prvků integrovaných obvodů zmenší do oblasti nanometrů.

Pro technika v praxi je velmi obtížné být průběžně informován o většině novinek, které jsou výsledkem současného rychlého rozvoje. Konstruktor elektronických zařízení musí řešit široký komplex otázek počínaje volbou základní koncepce celého zařízení, návrhem dílčích bloků a jejich schémat a konče způsobem jejich realizace, včetně typových zkoušek. Pro rozbor, návrh, či použití elektronického obvodu je nutná znalost chování jeho součástek z hlediska působení různých vnějších vlivů.

Technik v praxi musí, podle svého zařízení, držet krok s dosaženým pokrokem v oboru svého působení nepřetržitým sledováním dostupných technických informací uveřejňovaných v technické literatuře a na Internetu.

Schopnost porozumět je založena na znalostech. Dobrý elektronik umí na příslušné úrovni kombinovat využívání potřebného matematického aparátu, poznatků přírodních věd a elektroniky.

Hlavní úlohou těchto textů je na úrovni průmyslové školy dát základní přehled možností využití a řešení moderních elektronických součástek.