

Jaroslav Doleček

# **MODERNÍ UČEBNICE ELEKTRONIKY**

## **1. díl**

### **Základy elektroniky, ideální a reálné prvky**

---

**rezistor • kondenzátor • cívka**

Praha 2005



---

Jaroslav Doleček

## **Moderní učebnice elektroniky 1. 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 80-7300-146-2**

# 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>11</b>
----------------------	-----------

<b>NĚKTERÁ DATA Z HISTORIE ELEKTROTECHNIKY .....</b>	<b>12</b>
--	-----------

<b>1 ZÁKLADNÍ ELEKTRICKÉ VELIČINY A POJMY .....</b>	<b>15</b>
---	-----------

<b>1.1 Základní veličiny .....</b>	<b>16</b>
1.1.1 Elektrický náboj .....	16
1.1.2 Elektrické pole .....	19
1.1.3 Elektrický proud .....	20
1.1.4 Elektrické napětí .....	23
1.1.5 Účinky elektrického proudu .....	25
<b>1.2 Elektronický obvod .....</b>	<b>29</b>
1.2.1 Elektrický signál .....	30
1.2.1.1 Charakteristické hodnoty signálů .....	37
1.2.1.2 Pravidla značení elektrických signálů .....	38
1.2.1.3 Vstupní a výstupní signály elektronického obvodu .....	38
1.2.2 Základní pojmy elektronického obvodu .....	39
1.2.2.1 Schematické značky .....	39
1.2.2.2 Schéma zapojení .....	39
<b>1.3 Klasifikace elektronických obvodů a jejich prvků .....</b>	<b>42</b>
1.3.1 Klasifikace elektronických obvodů z hlediska počtu svorek .....	42
1.3.2 Pasivní a aktivní obvody .....	43
1.3.2.1 Pasivní prvky elektronických obvodů, pasivní obvod .....	43
1.3.2.2 Aktivní prvky elektronických obvodů, aktivní obvod .....	43
1.3.3 Ideální prvek elektronického obvodu .....	44
1.3.3.1 Charakteristiky jednobranů (dvojpólů) .....	45
1.3.3.2 Charakteristiky $n$ -branů .....	46
1.3.4 Vliv charakteristik obvodových prvků na elektrický signál .....	46
1.3.4.1 Lineární S-X charakteristika .....	46
1.3.4.2 Nelineární S-X charakteristika .....	47
1.3.5 Parametrické obvodové prvky .....	47

<b>2 IDEÁLNÍ ELEMENTÁRNÍ AKTIVNÍ A PASIVNÍ PRVKY .....</b>	<b>49</b>
--	-----------

<b>2.1 Ideální zdroj napětí a proudu .....</b>	<b>50</b>
2.1.1 Ideální nezávislý zdroj napětí .....	50
2.1.2 Ideální nezávislý zdroj proudu .....	50
2.1.3 Ideální řízený zdroj napětí .....	51
2.1.4 Ideální řízený zdroj proudu .....	52

<b>2.2</b>	<b>Ideální rezistor .....</b>	<b>53</b>
2.2.1	Ideální lineární rezistor .....	53
2.2.2	Ideální nelineární rezistor .....	56
2.2.3	Statický a dynamický (diferenciální) odpor .....	58
2.2.3.1	Pracovní bod .....	58
2.2.3.2	Statický odpor .....	59
2.2.3.3	Dynamický (diferenciální) odpor .....	60
2.2.3.4	Výkon přeměněný na odporu o velikosti R na teplo .....	63
<b>2.3</b>	<b>Ideální kondenzátor (kapacitor) .....</b>	<b>65</b>
2.3.1	Elektrická indukce .....	65
2.3.2	Princip a hlavní vlastnosti ideálního kondenzátoru .....	65
2.3.3	Lineární kondenzátory .....	68
2.3.4	Nelineární kondenzátory .....	70
2.3.5	Řízený kondenzátor .....	71
2.3.6	Energie akumulovaná v kondenzátoru .....	72
2.3.6.1	Silové působení mezi deskami kondenzátoru .....	72
2.3.6.2	Nabíjení kondenzátoru .....	73
<b>2.4</b>	<b>Ideální cívky (induktory) .....</b>	<b>75</b>
2.4.1	Magnetické pole .....	75
2.4.1.1	Intenzita magnetického pole válcové cívky .....	76
2.4.1.2	Intenzita pole toroidní cívky .....	77
2.4.1.3	Magnetické napětí .....	77
2.4.2	Charakteristická rovnice cívky .....	78
2.4.3	Základní zákony a pravidla vztahující se k cívkě v magnetickém poli .....	79
2.4.3.1	Faradayův zákon .....	79
2.4.3.2	Lencovo pravidlo .....	80
2.4.3.3	Hopkinsonův zákon .....	82
2.4.4	Lineární cívka .....	82
2.4.4.1	Magnetická vodivost (permeance) .....	83
2.4.4.2	Vlastní indukčnost cívky .....	83
2.4.5	Nelineární cívka .....	84
2.4.5.1	Cívky s jednoduchou nelinearitou .....	84
2.4.5.2	Cívky s jádry z feromagnetických látek .....	85
2.4.6	Parametrické induktory .....	87
2.4.7	Vázané cívky .....	88
2.4.7.1	Vzájemná indukčnost .....	88
2.4.7.2	Vzájemná indukčnost dvou cívek .....	88
2.4.7.3	Energie akumulovaná v cívkě .....	92
2.4.7.4	Nabíjení cívky .....	93
2.4.7.5	Napětí na vývodech cívky při odpojení zdroje .....	94

### **3 ODPOROVÉ OBVODY A VÝKONOVÉ PŘÍZPŮSOBENÍ ..... 97**

<b>3.1</b>	<b>Odporové obvody .....</b>	<b>98</b>
3.1.1	Základní vlastnosti odporových obvodů .....	98
3.1.2	Reálné stejnosměrné zdroje .....	98
3.1.2.1	Model zdroje stejnosměrného napětí a zdroje stejnosměrného proudu .....	99
<b>3.2</b>	<b>Výkonové přizpůsobení .....</b>	<b>101</b>

## **4 EKVIVALENCE PASIVNÍCH JEDNOBRANŮ ..... 105**

<b>4.1</b>	<b>Ekvivalence pasivních jednobranů .....</b>	<b>106</b>
4.1.1	Sériové spojení jednobranů .....	106
4.1.1.1	Sériové spojení rezistorů .....	107
4.1.1.2	Sériové spojení cívek .....	107
4.1.1.3	Sériové spojení kondenzátorů .....	109
4.1.2	Paralelní spojení jednobranů .....	110
4.1.2.1	Paralelní spojení rezistorů .....	110
4.1.2.2	Paralelní spojení cívek .....	111
4.1.2.3	Paralelní spojení kondenzátorů .....	113
4.1.3	Sériové spojení nelineárních jednobranů .....	113
4.1.4	Paralelní spojení nelineárních rezistorů .....	115
<b>4.2</b>	<b>Ekvivalence aktivních jednobranů .....</b>	<b>117</b>
4.2.1	Ekvivalence zdrojů napětí .....	117
4.2.2	Ekvivalence zdrojů proudu .....	117
<b>4.3</b>	<b>Ekvivalentní trojpóly .....</b>	<b>119</b>
4.3.1	Transfigurace trojúhelník–hvězda .....	119
4.3.2	Transfigurace hvězda–trojúhelník .....	119
<b>4.4</b>	<b>Věty o náhradních zdrojích .....</b>	<b>121</b>
4.4.1	Náhrada zdroje napětí zdrojem proudu .....	121
4.4.2	Přemístění zdrojů .....	122

## **5 ANALÝZA LINEÁRNÍCH ELEKTRONICKÝCH OBVODŮ ..... 125**

<b>5.1</b>	<b>Théveninova a Nortonova věta .....</b>	<b>126</b>
<b>5.2</b>	<b>Analýza obvodů metodou Kirchhoffových rovnic .....</b>	<b>128</b>
5.2.1	Použití názvosloví .....	129
5.2.2	Výpočet metodou Kirchhoffových rovnic .....	130
5.2.3	Metoda smyčkových proudů .....	132
5.2.3.1	Výpočet smyčkových proudů pomocí odporových matic .....	136
5.2.4	Metoda uzlových napětí .....	137
5.2.4.1	Postup sestavení rovnic pro metodu uzlových napětí .....	137
5.2.4.2	Použití maticového počtu pro konstrukci rovnic metodou uzlových napětí .....	139
5.2.4.3	Výpočet uzlových napětí pomocí vodivostních matic .....	141
<b>5.3</b>	<b>Metoda úměrných veličin .....</b>	<b>144</b>
<b>5.4</b>	<b>Metoda superpozice .....</b>	<b>146</b>

## **6 SLOŽENÉ JEDNOBRANY OBSAHUJÍCÍ IDEÁLNÍ OBVODOVÉ PRVKY ..... 149**

<b>6.1</b>	<b>Ideální obvodové prvky v prostředí střídavého proudu .....</b>	<b>150</b>
6.1.1	Činný odpor v prostředí střídavého proudu .....	150
6.1.2	Ideální kondenzátor v prostředí střídavého proudu .....	151
6.1.3	Ideální cívka v prostředí střídavého proudu .....	153

<b>6.2</b>	<b>Impedance a admitance .....</b>	<b>155</b>
6.2.1	Impedance .....	155
6.2.2	Impedance cívky a kondenzátoru .....	156
6.2.3	Admitance .....	157
6.2.4	Impedance spojených ideálních pasivních jednobranů .....	158
6.2.4.1	Sériové spojení ideálních pasivních jednobranů .....	158
6.2.4.2	Paralelní spojení ideálních pasivních jednobranů .....	163
6.2.4.3	Paralelní spojení cívky, kondenzátoru a rezistoru .....	165
6.2.4.4	Kombinované spojení obvodových prvků rozdílného typu .....	168
<b>6.3</b>	<b>Duální obvody .....</b>	<b>169</b>

## **7 PŘENOSOVÉ VLASTNOSTI DVOJBRANŮ ..... 171**

<b>7.1</b>	<b>Nejdůležitější vlastnost dvojbranů .....</b>	<b>172</b>
7.1.1	Hlavní funkce dvojbranů .....	172
7.1.2	Charakteristické rovnice dvojbranu .....	175
7.1.3	Charakteristiky dvojbranu .....	175
7.1.4	Čtyřpólové parametry dvojbranu .....	176
7.1.4.1	Statické a dynamické parametry dvojbranu .....	177
7.1.4.2	Model vstupu a výstupu dvojbranu .....	178
7.1.4.3	Impedanční parametry dvojbranu (Z parametry) .....	179
7.1.4.4	Admitanční parametry dvojbranu .....	181
7.1.4.5	Hybridní (smíšené) parametry dvojbranu .....	183
7.1.5	Čtyřpólové parametry řízených zdrojů napětí a proudů .....	185
7.1.5.1	Ideální proudem řízený zdroj napětí .....	185
7.1.5.2	Ideální proudem řízený zdroj proudu .....	186
7.1.5.3	Ideální zdroj napětí řízený napětím .....	186
7.1.5.4	Ideální napětím řízený zdroj proudu .....	187
<b>7.2</b>	<b>Rozdělení dvojbranu na více částí .....</b>	<b>187</b>
7.2.1	Vzájemné ovlivňování propojených dvojbranů .....	188

## **8 REÁLNÉ LINEÁRNÍ SOUČÁSTKY ELEKTRONICKÝCH OBVDŮ ..... 191**

<b>8.1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>192</b>
8.1.1	Normalizované řady pasivních součástek .....	192
8.1.2	Parametry a charakteristiky pasivních součástek .....	193
<b>8.2</b>	<b>Reálné rezistory .....</b>	<b>194</b>
8.2.1	Důležité vlastnosti reálných rezistorů .....	194
8.2.1.1	Model reálného rezistoru .....	194
8.2.1.2	Rezistivita a teplotní součinitel odporu .....	195
8.2.1.3	Kmitočtová závislost rezistorů .....	195
8.2.1.4	Povrchový jev (skin efekt) .....	197
8.2.1.5	Tepelné účinky proudu .....	198
8.2.1.6	Tepelný šum rezistorů .....	198
8.2.2	Důležité parametry rezistorů .....	199
8.2.2.1	Mezní parametry rezistorů .....	199
8.2.2.2	Charakteristické (provozní) parametry rezistorů .....	200
8.2.2.3	Některé další uváděné parametry rezistorů .....	200

8.2.3	Rozdělení a druhy rezistorů .....	201
8.2.4	Konstrukce rezistorů, odporové materiály .....	202
8.2.4.1	Rezistory pro klasickou montáž .....	203
8.2.4.2	Rezistory pro povrchovou montáž (rezistory SMD) .....	210
8.2.4.3	Speciální typy rezistorů .....	215
<b>8.3</b>	<b>Kondenzátory .....</b>	<b>220</b>
8.3.1	Vlastnosti reálných kondenzátorů .....	220
8.3.1.1	Model reálného kondenzátoru .....	220
8.3.1.2	Činitel jakosti kondenzátoru Q a ztrátový činitel tgδ .....	222
8.3.1.3	Impedance kondenzátoru .....	224
8.3.1.4	Mezní parametry kondenzátorů .....	225
8.3.1.5	Provozní parametry kondenzátorů .....	226
8.3.2	Hlavní typy kondenzátorů z hlediska použitého dielektrika .....	226
8.3.2.1	Kondenzátory vzduchové .....	227
8.3.2.2	Kondenzátory s papírovým dielektrikem .....	228
8.3.2.3	Kondenzátory s dielektrikem z plastů .....	229
8.3.2.4	Keramické kondenzátory .....	236
8.3.2.5	Slídivé kondenzátory .....	241
8.3.2.6	Kondenzátory se skleněným dielektrikem .....	242
8.3.2.7	Elektrolytické kondenzátory .....	243
8.3.2.8	Křemíkové kondenzátory .....	254
<b>8.4</b>	<b>Proměnné lineární rezistory a kondenzátory .....</b>	<b>258</b>
8.4.1	Proměnné lineární rezistory .....	258
8.4.1.1	Důležité elektrické parametry potenciometrů a odporových trimrů .....	261
8.4.1.2	Typy odporových drah proměnných rezistorů .....	263
8.4.1.3	Provedení potenciometrů a odporových trimrů .....	265
8.4.2	Proměnné lineární kondenzátory .....	270
8.4.2.1	Ladící kondenzátory .....	270
8.4.2.2	Kapacitní trimry .....	271
8.4.2.3	Hlavní parametry proměnných kondenzátorů .....	273
8.4.2.4	Nové směry ve vývoji kapacitních trimrů .....	273
<b>8.5</b>	<b>Induktory (indukční cívky) .....</b>	<b>276</b>
8.5.1	Vlastnosti reálných cívek .....	276
8.5.1.1	Náhradní zapojení (model) cívky .....	276
8.5.1.2	Výpočet indukčnosti cívky .....	277
8.5.1.3	Reálná cívka v obvodu stejnosměrného proudu .....	278
8.5.1.4	Reálná cívka v obvodu střídavého proudu, impedance cívky .....	278
8.5.1.5	Činitel jakosti cívky .....	279
8.5.1.6	Teplotní závislost indukčnosti cívky .....	280
8.5.1.7	Další faktory, které ovlivňují vlastnosti cívky .....	281
8.5.1.8	Ztráty v cívce .....	283
8.5.1.9	Nejdůležitější parametry cívek .....	284
8.5.2	Materiály používané pro jádra cívek .....	285
8.5.3	Konstrukce indukčních cívek .....	290
8.5.3.1	Cívky pro klasickou montáž .....	290
8.5.3.2	Cívky pro povrchovou montáž .....	293
8.5.3.3	Návrh cívky s feritovým jádrem .....	295



<b>8.6</b>	<b>Transformátory .....</b>	<b>299</b>
8.6.1	Co to je a k čemu slouží transformátor .....	299
8.6.2	Ideální transformátor .....	299
8.6.2.1	Převod transformátoru p .....	300
8.6.3	Reálný transformátor .....	304
8.6.3.1	Hlavní parametry transformátoru .....	304
8.6.3.2	Ztráty v reálném transformátoru .....	305
8.6.3.3	Volba materiálu jádra pro některé typy transformátorů .....	309
8.6.3.4	Vodiče pro vinutí cívek transformátorů .....	310
8.6.4	Návrh síťového transformátoru .....	311
8.6.4.1	Postup návrhu transformátoru .....	311
8.6.4.2	Příklad zjednodušeného návrhu síťového transformátoru s EI jádrem .....	312
<b>8.7</b>	<b>Cívky s feromagnetickým jádrem .....</b>	<b>318</b>
8.7.1	Magnetický obvod .....	318
8.7.2	Použití cívek s feromagnetickým jádrem .....	319
<b>DODATEK MATICE A DETERMINANT .....</b>		<b>323</b>
<b>INFORMAČNÍ ZDROJE .....</b>		<b>330</b>
<b>ODBORNÉ KNIHY A LITERATURA, ČLÁNKY .....</b>		<b>332</b>
<b>REJSTŘÍK .....</b>		<b>333</b>
<b>KNIHY NAKLADATELSTVÍ BEN – TECHNICKÁ LITERATURA .....</b>		<b>339</b>
<b>KONTAKTY NA PRODEJNY TECHNICKÉ LITERATURY .....</b>		<b>343</b>