

ELEKTROTECHNICKÁ MĚŘENÍ

Praha 2002



ELEKTROTECHNICKÁ MĚŘENÍ

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.

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

Elektrotechnická měření

BEN – technická literatura, Praha 2002

1. vydání

ISBN 80-7300-022-9

OBSAH

O KNIZE	10
1. ÚVOD	11
1.1 DEFINICE MĚŘENÍ	11
1.2 ZÁKLADNÍ POJMY	12
2. SOUSTAVY JEDNOTEK A ETALONY	15
2.1 VZNIK ZÁKLADNÍCH FYZIKÁLNÍCH JEDNOTEK A JEJICH ETALONŮ	15
2.2 ETALONY ELEKTRICKÝCH JEDNOTEK	16
2.2.1 <i>Neproměnné normály</i>	17
2.2.1.1 <i>Normál elektrického proudu</i>	17
2.2.1.2 <i>Normály elektrického napětí</i>	17
2.2.1.3 <i>Normály elektrického odporu</i>	19
2.2.1.3.1 <i>Normály odporu na stejnosměrný proud</i>	19
2.2.1.3.2 <i>Normály odporu na střídavý proud</i>	21
2.2.1.4 <i>Normály elektrické kapacity</i>	22
2.2.1.5 <i>Normály vlastní indukčnosti</i>	23
2.2.1.6 <i>Normály vzájemné indukčnosti</i>	23
2.2.2 <i>Proměnné normály</i>	24
3. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	27
3.1 PŘESNOST MĚŘENÍ	27
3.2 CHYBY MĚŘENÍ ANALOGOVÝMI MĚŘICÍMI PŘÍSTROJI	28
3.2.1 <i>Absolutní a relativní chyba</i>	29
3.2.2 <i>Třída přesnosti</i>	30
3.2.3 <i>Ověřování měřicích přístrojů</i>	33
3.3 CHYBY DIGITÁLNÍCH MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ	37
3.4 CHYBY NEPŘÍMÝCH MĚŘENÍ	38

4.	ANALOGOVÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	41
4.1	PRINCIP FUNKCE	41
4.2	ROZDĚLENÍ ANALOGOVÝCH MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ	42
4.3	UKAZATELE ANALOGOVÝCH MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ	43
4.3.1	<i>Ručky</i>	43
4.3.2	<i>Světelná stopa</i>	45
4.4	TLUMENÍ OTOČNÉHO ÚSTROJÍ	45
4.5	ULOŽENÍ OTOČNÉ ČÁSTI MĚŘICÍHO ÚSTROJÍ	47
4.6	ARETACE OTOČNÉ ČÁSTI MĚŘICÍHO ÚSTROJÍ	48
4.7	ČÍSELNÍK A STUPNICE MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ	50
4.8	PROVEDENÍ MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ	51
4.9	KONSTANTA A CITLIVOST MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE	52
4.10	VLASTNÍ SPOTŘEBA MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ	54
4.11	PŘETÍŽITELNOST MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ	55
4.12	RUŠIVÉ VLIVY PŘI MĚŘENÍ	55
4.13	MAGNETOELEKTRICKÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	56
4.13.1	<i>Princip, konstrukce, použití</i>	56
4.13.2	<i>Magnetoelektrické přístroje s usměrňovačem</i>	61
4.13.3	<i>Univerzální přístroje</i>	63
4.13.4	<i>Magnetoelektrické přístroje s termočlánkem</i>	64
4.14	FEROMAGNETICKÉ (ELEKTROMAGNETICKÉ) MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	65
4.15	ELEKTRODYNAMICKÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	69
4.16	FERODYNAMICKÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	73
4.17	INDUKČNÍ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	74
4.18	TEPELNÉ PŘÍSTROJE S BIMETALEM	77
4.19	ELEKTROSTATICKÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	78
4.20	REZONANČNÍ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	79
4.21	MĚŘICÍ PŘÍSTROJE S POMĚROVÝM MĚŘICÍM ÚSTROJÍM	80

5.	MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO NAPĚTÍ	83
5.1	MĚŘENÍ STEJNOSMĚRNÉHO NAPĚTÍ	83
5.2	MĚŘENÍ STŘÍDAVÝCH NAPĚTÍ	84
5.3	ZMĚNA ROZSAHU VOLTMETRU	85
5.3.1	<i>Předřadník</i>	<i>85</i>
5.3.2	<i>Odporový dělič</i>	<i>88</i>
5.3.3	<i>Předřadný kondenzátor</i>	<i>89</i>
5.3.4	<i>Kapacitní dělič</i>	<i>90</i>
5.3.5	<i>Měřicí transformátor napětí</i>	<i>90</i>
5.4	VOLTMETRICKÝ PŘEPÍNAČ	93
6.	MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO PROUDU	95
6.1	MĚŘENÍ STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU	96
6.2	MĚŘENÍ STŘÍDAVÉHO PROUDU	96
6.3	ZMĚNA ROZSAHU AMPÉRMETRU	97
6.3.1	<i>Bočník</i>	<i>97</i>
6.3.2	<i>Přepínání částí proudové cívky</i>	<i>101</i>
6.3.3	<i>Změna počtu závitů měřicí cívky</i>	<i>103</i>
6.3.4	<i>Měřicí transformátor proudu</i>	<i>103</i>
6.3.5	<i>Klešťové ampérmetry</i>	<i>108</i>
6.3.6	<i>Hallova sonda</i>	<i>108</i>
7.	MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU	111
7.1	OHMOVA METODA	111
7.1.1	<i>Zapojení pro malé odpory</i>	<i>112</i>
7.1.2	<i>Zapojení pro velké odpory</i>	<i>114</i>
7.1.3	<i>Měření velmi malých odporů</i>	<i>115</i>
7.1.4	<i>Měření velmi velkých odporů</i>	<i>116</i>
7.2	SROVNÁVACÍ METODA	117
7.2.1	<i>Zapojení pro malé odpory</i>	<i>117</i>
7.2.2	<i>Zapojení pro velké odpory</i>	<i>118</i>
7.3	SUBSTITUČNÍ METODA	119

7.4	MĚŘENÍ ODPORU VOLTMETREM	120
7.5	OHMMETRY	121
7.5.1	<i>Ohmmetry s magnetoelektrickým voltmetrem</i>	<i>121</i>
7.5.2	<i>Ohmmetry s poměrovým měřicím ústrojím</i>	<i>123</i>
7.6	MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU ELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ	124
7.7	MĚŘENÍ ZEMNÍCH ODPORŮ ZEMNICŮ	127
7.8	MĚŘENÍ MĚRNÉHO ODPORU PŮDY	129
7.9	MŮSTKOVÉ METODY MĚŘENÍ ODPORU	130
7.9.1	<i>Wheatstoneův můstek</i>	<i>131</i>
7.9.2	<i>Thomsonův můstek</i>	<i>133</i>
8.	MĚŘENÍ IMPEDANCÍ	135
8.1	MĚŘENÍ IMPEDANCE VOLTMETREM, AMPÉRMETREM A WATTMETREM	135
8.2	METODA TŘÍ AMPÉRMETRŮ	136
8.3	METODA TŘÍ VOLTMETRŮ	138
8.4	OBECNÝ MŮSTEK	140
9.	MĚŘENÍ KAPACITY	141
9.1	MĚŘENÍ KAPACITY VOLTMETREM A AMPÉRMETREM	142
9.2	ANALOGOVÉ MĚŘIČE KAPACITY	143
9.3	MĚŘENÍ KAPACITY KONDENZÁTORU BALISTICKÝM GALVANOMETREM	144
9.4	MŮSTKOVÉ METODY MĚŘENÍ KAPACITY	145
9.4.1	<i>De Sautyho můstek</i>	<i>145</i>
9.4.2	<i>Wienův můstek</i>	<i>146</i>
9.4.3	<i>Scheringův můstek</i>	<i>147</i>
10.	MĚŘENÍ VLASTNÍ INDUKČNOSTI	149
10.1	MĚŘENÍ VLASTNÍ INDUKČNOSTI VOLTMETREM A AMPÉRMETREM	150
10.2	MŮSTKOVÉ METODY MĚŘENÍ VLASTNÍ INDUKČNOSTI	151
10.2.1	<i>Maxwell-Wienův můstek</i>	<i>151</i>

10.2.2	Owenův můstek.....	152
10.3	Q-METR	153
11.	MĚŘENÍ VZÁJEMNÉ INDUKČNOSTI CÍVEK	155
11.1	MĚŘENÍ VZÁJEMNÉ INDUKČNOSTI CÍVEK VOLTMETREM A AMPÉRMETREM	155
11.2	MĚŘENÍ VZÁJEMNÉ INDUKČNOSTI SÉRIOVÝM SPOJENÍM CÍVEK	156
11.3	CAMPBELLŮV MŮSTEK	157
12.	MĚŘENÍ KMITOČTU	159
12.1	VIBRAČNÍ KMITOMĚRY	159
12.2	RUČKOVÉ KMITOMĚRY	159
12.3	CAMPBELLŮV MŮSTEK	160
12.4	PŘÍMÉ ČÍSLICOVÉ MĚŘENÍ KMITOČTU	161
13.	MĚŘENÍ FÁZOVÉHO POSUNU	163
13.1	MĚŘENÍ FÁZOVÉHO POSUNU POMOCÍ OSCILOSKOPU	164
13.2	FÁZOMĚRY	166
14.	MĚŘENÍ VÝKONU ELEKTRICKÉHO PROUDU	169
14.1	MĚŘENÍ VÝKONU STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU VOLTMETREM A AMPÉRMETREM	169
14.2	MĚŘENÍ ČINNÉHO VÝKONU JEDNOFÁZOVÉHO PROUDU	173
14.2.1	<i>Měření výkonu a jednofázového střídavého proudu wattmetrem</i>	<i>173</i>
14.2.2	<i>Měření výkonu jednofázového proudu s měřicím transformátorem proudu</i>	<i>178</i>
14.2.3	<i>Měření výkonu jednofázového proudu s měřicími transformátory proudu a napětí</i>	<i>179</i>
14.3	MĚŘENÍ ČINNÉHO VÝKONU V TROJFÁZOVÉ SÍTI	179
14.3.1	<i>Základní pojmy</i>	<i>179</i>
14.3.2	<i>Měření příkonu trojfázové souměrné zátěže</i>	<i>180</i>
14.3.3	<i>Měření příkonu trojfázové nesouměrné zátěže</i>	<i>181</i>

14.3.4	<i>Měření výkonu trojfázového proudu s měřicími transformátory proudu</i>	186
14.3.5	<i>Měření výkonu trojfázového proudu s měřicími transformátory proudu a napětí</i>	187
14.4	MĚŘENÍ JALOVÉHO VÝKONU	188
14.5	MĚŘENÍ ZDÁNLIVÉHO VÝKONU	190
15.	MĚŘENÍ PRÁCE ELEKTRICKÉHO PROUDU	191
15.1	ELEKTROMĚRY PRO STEJNOSMĚRNÝ PROUD	192
15.2	ELEKTROMĚRY PRO MĚŘENÍ ČINNÉ PRÁCE	192
15.3	ELEKTROMĚRY PRO MĚŘENÍ JALOVÉ PRÁCE	198
15.4	KONTROLA ELEKTROMĚRŮ	199
16.	GALVANOMETRY	203
16.1	KONSTRUKCE GALVANOMETRU	203
16.2	VLASTNOSTI GALVANOMETRŮ	205
16.3	POUŽITÍ GALVANOMETRŮ	208
16.4	CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY GALVANOMETRU	208
16.4.1	<i>Doba kmitu netlumeného galvanometru</i>	208
16.4.2	<i>Vnitřní a vnější mezní odpor galvanometru</i>	209
16.4.3	<i>Konstanty galvanometru</i>	210
16.4.3.1	<i>Proudová konstanta</i>	210
16.4.3.2	<i>Napěťová konstanta</i>	211
16.4.3.3	<i>Balistická konstanta</i>	212
16.5	STANOVENÍ CHARAKTERISTICKÝCH HODNOT GALVANOMETRU	212
16.5.1	<i>Měření doby kmitu</i>	213
16.5.2	<i>Stanovení vnějšího mezního odporu</i>	213
16.5.3	<i>Stanovení proudové konstanty</i>	213
16.5.4	<i>Stanovení napěťové konstanty</i>	215
16.5.5	<i>Stanovení balistické konstanty</i>	216
17.	KOMPENZÁTORY	217

18.	MAGNETICKÁ MĚŘENÍ	221
18.1	ZÁKLADNÍ POJMY	221
18.2	PROBLÉMY PŘI MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH VELIČIN	223
18.3	MAGNETICKÉ PŘEVODNÍKY	224
18.3.1	<i>Měřicí cívka</i>	<i>224</i>
18.3.2	<i>Rogowskiho potenciometr</i>	<i>226</i>
18.3.3	<i>Hallova sonda</i>	<i>227</i>
18.3.4	<i>Dvojitá feromagnetická sonda</i>	<i>228</i>
18.4	MĚŘENÍ STŘÍDAVÝCH MAGNETICKÝCH POLÍ	230
18.5	MĚŘENÍ MAGNETIZAČNÍCH CHARAKTERISTIK FEROMAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ	231
18.5.1	<i>Měření křivky prvotní magnetizace</i>	<i>231</i>
18.5.2	<i>Měření hraniční hysterezní smyčky</i>	<i>234</i>
18.6	MĚŘENÍ ZTRÁT V ŽELEZE	234
19.	PŘÍLOHY	237
	<i>Srovnání měřicích soustav elektromechanických přístrojů</i>	<i>237</i>
	<i>Značky druhu proudu a počtu měřicích ústrojí</i>	<i>238</i>
	<i>Značky pro vyjádření zkoušky elektrické pevnosti</i>	<i>238</i>
	<i>Značky polohy stupnice</i>	<i>238</i>
	<i>Značky tříd přesnosti</i>	<i>238</i>
	<i>Značky pro označení ústrojí přístroje</i>	<i>239</i>
	<i>Uspořádání základních měřicích soustav</i>	<i>240</i>
	<i>Magnetoelektrická soustava</i>	<i>240</i>
	<i>Feromagnetická (elektromagnetická) soustava</i>	<i>241</i>
	<i>Elektrodynamická soustava</i>	<i>242</i>
	<i>Ferodynamická soustava</i>	<i>243</i>
20.	POUŽITÁ LITERATURA	244
	Prezentace firmy GM Electronic	246
	Prezentace firmy GMC – měřicí technika	248
	Knihy nakladatelství BEN – technická literatura	250
	Kontaktní adresy na firmu BEN – technická literatura	255

O KNIZE

Tento učební text byl původně určen k domácí přípravě z předmětu „Elektrotechnická měření“ pro studenty III. ročníku Střední průmyslové školy elektrotechnické v Brně. Vznikl na základě nedostatku vhodných studijních materiálů přepracováním dostupných středoškolských učebnic, vysokoškolských skript a jiných odborných publikací.

Text byl koncipován tak, aby student získal přehled o základních analogových měřících přístrojích a metodách měření základních aktivních i pasivních elektrických veličin. Student by měl být schopen po absolvování třetího ročníku samostatně zvolit vhodnou metodu měření a měřící prostředky pro danou měřící úlohu, provést praktické měření a vypracovat protokol o provedeném měření. Na výuku teoretické části předmětu by měly navazovat praktická laboratorní cvičení, kde by si studenti prakticky ověřili získané vědomosti.

Brno, prosinec 1999

autor

Kniha tedy vznikla podstatným přepracováním zmíněného učebního skriptu. Na tuto knihu měl navazovat ještě další díl, zaměřený na problematiku číslicových měřících přístrojů. K jeho vydání však nejspíše nikdy nedojde, neboť autor změnil zaměstnání z důvodu neutěšené situace v našem školství. Proto si ani nepřeje být v souvislosti s touto knihou jakkoliv zmiňován.

Po dlouhém váhání jsme se rozhodli nakonec tuto učebnici vydat, i když jsme si vědomi, že se místy v knize vyskytují nepřiliš aktuální informace. Byl to totiž jediný text, který jsme za poslední desetiletí objevili.

Ač jsme vyvinuli značné úsilí v jednání s několika dalšími autory, nikdo z nich nebyl schopen vytvořit a posléze dokončit rukopis na problematiku měření v elektrotechnice, natož ho ještě koncipovat jako učebnici pro střední školy.

Protože se náplň předmětů „Elektrotechnická měření“ na každé škole mírně liší, doporučujeme každému, kdo je zodpovědný za výuku, aby si vybral pouze ty části, které zapadají do jeho učebních osnov.

Skutečně šlo pouze o to, aby tu alespoň „něco bylo“ a aby se na tomto základě mohlo začít dále stavět. Budiž to impulzem pro ty, kteří s napsáním podobné publikace ještě váhají.

Praha, červenec 2002

nakladatel