

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 ELEKTROMĚŘŮ | 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 nepřilišitě 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