Obsah

1 OBECNÉ ASPEKTY DIAGNOSTIKY ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ 15

1.1 Současná diagnostika a její úkoly 16
1.2 Diagnostický systém a jeho části 18
1.3 Důležité momenty diagnostických šetření 22
1.4 Diagnostika off-line a on-line 28
1.4.1 Systém off-line – testovací diagnostiky 28
1.4.2 Systém on-line – funkční diagnostiky 29
1.5 Možnosti předpovědi dalšího chování 30
diagnostikovaného objektu 30
Literatura kapitola 1 34

2 DIAGNOSTICKÉ SIGNÁLY 35

2.1 Absorpční a resorpční charakteristiky a z nich určované parametry 37
2.2 Další vybrané metody měření odporu 41
2.3 Ztrátový činitel a permitivita 43
2.4 Měření kapacity 47
2.5 Napěťové zkoušky 47
2.5.1 Zkoušky stejnosměrným napětím 48
2.5.2 Zkoušky střídavým napětím 49
2.5.3 Zkoušky atmosférickým impulzním napětím 49
2.5.4 Elektrická pevnost 51
2.6 Částečné výboje 51
2.6.1 Typy částečných výbojů 52
2.6.2 Veličiny charakterizující částečné výboje 67
2.6.2.1 Veličiny vztažené k jednotlivým impulzům 67
2.6.2.2 Veličiny integrované 68
2.6.2.3 Napětí vztahovaná k částečným výbojům 69

2.6.3 Modelování vnitřních částečných výbojů – průběh napětí na vnitřní nehomogenitě 70
2.6.3.1 Gemant-Philippovův model 70
2.6.3.2 Böningův pětikapacitní model 74
2.6.4 Působení vnitřních částečných výbojů na materiály 81
2.6.4.1 Růst elektrického stromečku 84
2.6.5 Metody detekce částečných výbojů 87
2.6.5.1 Elektrické metody detekce 87
2.6.5.2 Neelektrické metody detekce 99
2.6.6 Kalibrace měřicích obvodů při měření částečných výbojů 102
Literatura kapitola 2 105

3 STRUKTURÁLNÍ METODY PRO DIAGNOSTIKU ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ 109
3.1 Obecné aspekty aplikace strukturálních analýz v elektrotechnologické diagnostice 110
3.2 Rozdělení strukturálních analýz 118
3.3 Diferenční termická analýza (DTA) 120
3.3.1 Princip DTA 121
3.3.2 Popis konstrukčního uspořádání 124
3.3.3 Vliv podmínek měření 126
3.3.4 Aplikace DTA v elektrotechnologické diagnostice 127
3.4 Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) s metodou DTA 128
3.4.1 Základní principy DSC a jejich srovnání s metodou DTA 128
3.4.2 Tepelně modulovaná DSC (TMDSC) 135
3.4.3 Aplikace DSC v elektrotechnologické diagnostice 138
3.5 Termogravimetrie (TG) 141
3.5.1 Princip metody 141
3.5.2 Popis konstrukčního uspořádání 145
3.5.3 Vliv podmínek měření 147
3.5.4 Aplikace TG v elektrotechnologické diagnostice 152
3.6 Termomechanická analýza (TMA) 152

3.6.1 Princip metody 154
3.6.2 Popis konstrukčního uspořádání 161
3.6.3 Vliv podmínek měření 162
3.6.4 Aplikace TMA v elektrotechnologické diagnostice 164
3.7 Dynamická mechanická analýza (DMA) 164
3.7.1 Princip metody 165
3.7.2 Popis konstrukčního uspořádání 170
3.7.3 Vliv podmínek měření 171
3.7.4 Aplikace DMA v elektrotechnologické diagnostice 173
3.8 Infračervená spektroskopie (IR) 173
3.8.1 Obecná teorie infračervené spektroskopie 174
3.8.2 Teorie molekulových vibrací 177
3.8.3 Konstrukční uspořádání IČ spektrometrů 181
3.8.4 Výběr techniky a příprava vzorků pro FT-IR měření 184
3.8.5 Aplikace IČ spektroskopie v elektrotechnogické diagnostice 185
3.9 Rentgenová fluorescenční spektrometrie (XRF) 186
3.9.1 Obecné principy rentgenové spektrometrie 186
3.9.2 Princip rentgenové fluorescenční spektrometrie 188
3.9.3 Konstrukční uspořádání 188
3.9.4 Příprava vzorků 190
3.9.5 Aplikace XRF v elektrotechnologické diagnostice 190
3.10 Chromatografické techniky 191
3.10.1 Rozdělení chromatografických technik 191
3.10.2 Popis chromatogramu 193
3.10.3 Plynová chromatografie 194
3.10.4 Kapalinová chromatografie 195
3.10.5 Aplikace chromatografie v elektrotechnologické diagnostice 196
Literatura kapitola 3 197

4 DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ 201
4.1 Zkoušky transformátorů 203
4.1.1 Měření činného odporu vinutí 205

4.1.2 Kontrola sledu fází 206
4.1.3 Kontrola natočení fází – určení hodinového úhlu 207
4.1.4 Měření převodu, napětí naprázdno 209
a ztrát naprázdno 209
4.1.5 Měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko 214
4.1.6 Měření nulové složky reaktance 216
4.1.7 Oteplovací zkouška 217
4.1.7.1 Provedení zkoušek 217
4.1.7.2 Měření teploty chladiva 218
4.1.7.3 Určení teploty vinutí 218
4.1.7.4 Teplota horní vrstvy oleje 219
4.1.7.5 Střední teplota oleje 219
4.1.7.6 Teplota konstrukčních prvků, magnetického obvodu a oleje v jejich blízkosti 219
4.1.8 Měření izolačního odporu, určení polarizačního indexu a časové konstanty transformátoru 220
4.1.9 Měření ztrátového činitele tg δ a kapacity vinutí 222
4.1.10 Poznámky k měření izolačních odporů a ztrátového činitele 226
4.1.11 Měření poměru kapacit C_2/C_{50} 227
4.1.12 Napěťové zkoušky vinutí 229
4.1.12.1 Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje 229
4.1.12.2 Zkouška indukovaným napětím 229
4.1.12.3 Výsledky zkoušek přiloženým napětím a jejich hodnocení 230
4.1.12.4 Zkouška elektrické pevnosti izolace atmosférickým impulzem 232
4.1.12.5 Zkouška elektrické pevnosti vnitřní izolace spínacími impulzy 233
4.1.13 Měření hladin částečných výbojů výkonových transformátorů při střídavém napětí 234
4.1.13.1 Galvanická metoda měření 234
4.1.13.2 Akustická emise částečných výbojů v olejových transformátorech 238

4.1.14 Detekce poruch vinutí ... 238
4.1.14.1 Metoda referenčního impulzu ... 239
4.1.14.2 Metoda přenosové funkce ... 239
4.1.14.3 Metoda nízkonapěťových impulzů ... 240
4.1.14.4 Metody vycházející z měření reaktance vinutí ... 241
4.1.14.5 Metoda frekvenčních charakteristik (Sweep Frequency Response Analyzer – SFRA) ... 241
4.2 Kapalné izolanty a jejich diagnostika ... 243
4.2.1 Metodika odběru vzorků ... 243
4.2.2 Diagnostika izolačních kapalin ... 245
4.2.2.1 Barva kapalných izolantů ... 245
4.2.2.2 Hustota ... 246
4.2.2.3 Viskozita ... 247
4.2.2.4 Bod vzplanutí ... 248
4.2.2.5 Bod tuhnutí ... 248
4.2.2.6 Obsah vody v oleji ... 249
4.2.2.7 Číslo kyselosti ... 249
4.2.2.8 Mezipovrchové napětí na rozhraní voda – kapalina ... 251
4.2.2.9 Usazeniny a rozpustné kaly ... 252
4.2.2.10 Mikroskopické stanovení velikosti a počtu částic nečistot ... 252
4.2.2.11 Elektrická pevnost ... 253
4.2.2.12 Oxidační stabilita ... 254
4.2.2.13 Obsah inhibitoru ... 255
4.2.2.14 Vnitřní rezistivita ... 255
4.2.2.15 Ztrátový činitel a relativní permitivita ... 256
4.2.2.16 Přítomnost síry ... 258
4.2.2.17 Obsah polycyklických aromátů a polychlorovaných bifenylů ... 258
4.2.2.18 Plynování ... 258
4.2.2.19 Analýza plynů plynovou chromatografií ... 259
4.2.3 Regenerace kapalných izolantů ... 264
4.2.3.1 Technologie regenerace náplně ... 265
4.2.3.2 Inhibování olejů ... 267

4.2.4 Diagnostika pevné složky transformátorových izolantů 267
4.2.4.1 Olej jako diagnostické medium pro pevné složky izolačního systému 268
4.2.4.2 Analýza furanových složek v transformátorovém oleji 269
4.2.5 Sušení transformátorů v provozu 270
4.2.5.1 Sušení horkým vzduchem kombinované s vakuem 272
4.2.5.2 Sušení parami solventu 273
4.2.5.3 Sušení transformátorů metodou kombinovaného nízkofrekvenčního sušení 274
4.2.5.4 Vysoušení transformátoru metodou Oil-Spray 275
4.3 Diagnostika kondenzátorových průchodek 277
4.3.1 Izolační odpor 277
4.3.2 Kapacita a ztrátový činitel 279
4.3.3 Měření izolačního oleje 279
4.3.4 Částečné výboje 280
4.4 Přepínač odboček 280
4.5 On-line diagnostika transformátorů 282
4.5.1 Volba parametrů pro sledování 284
4.5.2 Měření základních provozních veličin – napětí a proudů 285
4.5.3 Měření teplot 286
4.5.3.1 Teplota oleje v horní části transformátoru a teplota okolí 286
4.5.3.2 Teplota vinutí 288
4.5.3.3 Rozložení teplot – magneticky montovaný senzor teploty 290
4.5.3.4 Hot-Spot teplota 290
4.5.3.5 Stárnutí izolace 292
4.5.3.6 Kontrola stavu chlazení – intenzita chlazení 293
4.5.3.7 Zabudování dotykových teploměrů 295
4.5.4 Měření výšky hladiny v dilatační nádobě 296

4.5.5 Obsah plynů v oleji ... 298
4.5.6 Vlhkost v oleji ... 301
4.5.7 Senzory pro on-line monitoring plynů a vlhkosti ... 304
4.5.7.1 Princip analyzátorů plynů ... 305
4.5.7.2 Princip analyzátorů vlhkosti ... 305
Literatura kapitola 4 ... 307

5 DIAGNOSTIKA MALÝCH A STŘEDNÍCH TOČIVÝCH STROJŮ ... 313
5.1 Výrobní zkoušky malých a středních točivých strojů ... 315
5.1.1 Mezioperační zkoušky ... 316
5.1.1.1 Mechanické mezioperační zkoušky ... 316
5.1.1.2 Elektrické mezioperační zkoušky ... 317
5.1.2 Zkoušky kusové ... 319
5.1.3 Přehled prováděných výrobních zkoušek ... 322
5.1.4 Profylaktická šetření ... 325
5.2 Speciální zkouška – vodní test ... 329
5.3 Vibrodiagnostika ... 330
5.4 Aspekty provozování malých a středních točivých strojů – namáhání pulzním napětím ... 332
5.5 Diagnostika pulzně namáhaných točivých strojů ... 334
5.5.1 Důsledky pulzního namáhání izolačních systémů točivých strojů ... 335
5.5.2 Elektrické namáhání ... 338
5.5.3 On-line diagnostický systém ... 341
Literatura kapitola 5 ... 344

6 DIAGNOSTIKA VELKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ ... 347
6.1 Diagnostická šetření ... 348
6.1.1 Měření na nových strojích – vstupní diagnostika ... 349
6.1.2 Profylaktická měření ... 350
6.2 Diagnostická měření velkých točivých strojů v režimu off-line ... 351
6.2.1 Vizuální kontrola statorového vinutí ... 351

6.2.2 Izolační odpor statorového vinutí 353
6.2.3 Izolační odpor rotorového vinutí 355
6.2.4 Napěťová závislost izolačního odporu vinutí na stejnosměrném napětí 356
6.2.5 Ztrátový činitel tg δ, kapacita a časová konstanta statorového vinutí 357
6.2.6 Měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou 359
6.2.7 Měření částečných výbojů statorového vinutí akustickou sondou 361
6.2.8 Měření částečných výbojů statorového vinutí diferenciální elektromagnetickou sondou 361
6.2.9 Měření částečných výbojů statorového vinutí induktivně vázanou sondou 363
6.2.10 Zkouška statorového vinutí střídavým napětím 50 Hz 363
6.2.11 Zkouška rotorového vinutí střídavým napětím 50 Hz ... 364
6.2.12 Zkouška statorového vinutí stejnosměrným napětím 365
6.2.13 Zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu 367
6.2.14 Zkouška závitové izolace statorového vinutí proudovými impulzy 368
6.2.15 Zkouška závitové izolace rotorového vinutí s vyniklými póly 369
6.2.16 Strukturální analýzy v diagnostice velkých točivých strojů 371
6.3 Diagnostická měření velkých točivých strojů v režimu on-line 372
6.3.1 Detekce ozónu 372
6.3.2 Detekce příměsí v chladícím vodíku turboalternátorů 374
6.3.3 Frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole 375
6.3.4 Analýza rozběhového proudu 377
6.3.5 Měření hluku 379
6.3.6 On-line monitoring částečných výbojů 379

6.3.6.1 Galvanická metoda on-line měření částečných výbojů ... 380
6.3.6.2 Používané senzory pro on-line měření částečných výbojů ... 381
6.3.6.3 Elektrická rušení při on-line měření částečných výbojů ... 382
6.3.6.4 On-line monitoring generátorů a VN motorů ... 383
6.3.6.5 Získání a vyhodnocení dat ... 384
6.3.7 Vibrace čel vinutí ... 386
6.3.8 Sledování vzduchové mezery ... 387
6.3.9 Tribodiagnostika ... 388
Literatura kapitola 6 ... 390

7 DETERIORACE IZOLACÍ A JEJÍ KLASIFIKACE ... 393
7.1 Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů ... 396
7.2 Tepelné stárnutí a určení tepelné odolnosti ... 398
7.3 Modely stárnutí ... 405
7.4 Otázka souhrnné klasifikace ... 420
Literatura kapitola 7 ... 421

REJSTŘÍK ... 423

INZERCE ... 431

KNIHY BEN – TECHNICKÁ LITERATURA ... 436

Kontakty na prodejny technické literatury ... 439

Pár slov o nakladatelství ... 440