

Václav Mentlík
Josef Pihera
Radek Polanský
Pavel Prosr
Pavel Trnka

Diagnostika elektrických zařízení

Praha 2008



Moderní elektrotechnika potřebuje vydatné a věrohodné informace o všech jevech, které se v její oblasti vyskytují. Jedná se o informace jak o prvcích (materiálech), tak systémech (strojích a zařízeních) ve všech fázích jejich vzniku i provozního života. Důležitost a význam diagnostických informací jsou tak zcela nezastupitelné. Svými výroky diagnostika ovlivňuje všechny fáze výrobních činností a odhaduje příští chování diagnostikovaných objektů. Kniha předkládá obecná hlediska a zákonitosti diagnostiky elektrických zařízení, dále pojednává o diagnostických signálech, a to jak o fenomenologických metodách, tak o strukturálních analýzách využitelných při sledování vývoje parametrů prvků i systémů elektrických zařízení. Dále se věnuje specifikům diagnostiky transformátorů a točivých elektrických strojů všech výkonů. Pozornost je věnována i klasifikaci a zobrazení deteriorace izolací elektrických zařízení. Současná elektrotechnologická diagnostika je pojata jako progresivní a moderní věda, jejíž výroky mají nejen technický, ale i výrazný ekonomický význam.

Recenzenti:

Prof. Ing. Ján Michalík, Ph.D. – ŽU Žilina

Doc. Ing. Miloš Hammer, CSc. – VUT Brno

Václav Mentlík, Josef Pihera, Radek Polanský, Pavel Prosr, Pavel Trnka

Diagnostika elektrických zařízení

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.

Autoři a nakladatelství nepřijímají záruku za správnost tištěných materiálů. Předkládané informace jsou zveřejněny bez ohledu na případné patenty třetích osob. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny.

Všechny registrované nebo jiné obchodní známky použité v této knize jsou majetkem jejich vlastníků. Uvedením nejsou zpochybněna z toho vyplývající vlastnická práva.

Veškerá práva vyhrazena

© Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.; Ing. Josef Pihera, Ph.D.; Doc. Ing. Radek Polanský;

Ing. Pavel Prosr, Ph.D.; Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D. Plzeň 2008

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

Václav Mentlík, Josef Pihera, Radek Polanský, Pavel Prosr, Pavel Trnka: Diagnostika elektrických zařízení
BEN – technická literatura, Praha 2008

1. vydání

ISBN 978-80-7300-232-9

Obsah

1	OBECNÉ ASPEKTY DIAGNOSTIKY ELEKTRICKÝCH ZARÍZENÍ	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 elektrotechnologické 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 $\text{tg } \delta$ 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	Napět'ové 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 bifenylyů	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 $\text{tg } \delta$, 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

ÚVOD

Vyspělá lidská společnost potřebuje ke své úspěšnosti dokonalé informace na všech úrovních svých činností. Stejně tak je tomu i v elektrotechnice. Elektrická zařízení, kterých je celá řada a svými charakteristikami se mnohdy značně liší, si systémovým přístupem představujeme jako systémy s jejich částmi – podsystémy až posléze prvky.

Škála elektrických zařízení začíná u zdrojů elektrické energie, aby pokračovala k zařízením, která podle okamžité potřeby přeměňují elektrickou energii na jiný energetický druh využívaný při lidských činnostech. Další skupinu pak tvoří elektronická zařízení, která jsou jiného charakteru, odlišných technologií vzniku i technologií zpracovatelských a uživatelských. I tato zařízení však pro svůj provoz potřebují základní energetické medium – napájecí napětí pro své zdroje – vyrobené výše uvedenými energetickými jednotkami.

Základní elektrická zařízení používaná při výrobě i přeměně elektrické energie na jiný druh energie, která jsou svým charakterem klíčová pro svět elektrotechniky, lze považovat za sériové spolehlivostní řetězce, u nichž selhání jednoho prvku znamená vyřazení celého zařízení z funkční činnosti.

Pro zajištění bezchybného chodu zmíněných zařízení je nutné znát vývoj jejich vlastností, který obecně nemusí být vždy příznivý. Tyto potřebné informace zajišťuje disciplína věnující se studiu dějů probíhajících při interakcích dotyčných zařízení s výrobou a posléze provozními podmínkami – diagnostika. Je-li zaměřena na elektrická zařízení jako v našem případě, jedná se o diagnostiku elektrických zařízení, jejímž aspektem je věnován následující text této knihy. Věnuje se jak obecným aspektům diagnostiky, tak metodám a způsobům zjišťování stavu elektrických zařízení, která jsou pochopitelně rozdělena do účelových skupin. Nedílnou součástí moderních diagnostických šetření a systémů, zejména v případě přímé on-line diagnostiky, je aplikace umělé inteligence – expertních systémů, neuronových sítí a dalších. Vzhledem k tomu, že téměř současně s touto knihou vychází také v nakladatelství BEN – technická literatura Praha kniha Doc. Ing. Miloše Hammera, CSc. „Prvky umělé inteligence v diagnostice elektrických zařízení“, není tato problematika v následujícím textu zahrnuta.

Na tomto místě je povinností autorů knihy upřímně poděkovat za cenné připomínky a pomoc při jejím vzniku kolegům Ing. Miroslavu Burianovi, Ph.D., Ing. Jaroslavu Fronkovi, Ing. Evě Müllerové, Ph.D., Ing. Petru Pondělíkovi, Ing. Lumíru Šaškovi, CSc. a Pavlu Šebíkovi.

Za svůj vznik kniha děkuje výzkumnému záměru MŠMT České republiky MSM 4977705310 „Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice“, jehož jsou autoři řešiteli.

