

Václav Mentlík

DIELEKTRICKÉ PRVKY A SYSTÉMY

Praha 2006



Pro bezporuchový chod elektrických zařízení je rozhodující stav a chování jejich dielektrických podsystemů, jejichž vlastnosti jsou dané strukturou částí, z nichž jsou sestaveny. Pro správné chápání vlastností a také opodstatněnou volbu prvků tohoto podsystemu – aplikovaných materiálů – se neobejdeme bez poznatků vysvětlujících a přibližujících jejich chování. Je třeba pochopit děje ve struktuře a jejich vazbu a odraz ve vnějším chování i vlastnostech materiálů. Při vlastní výrobě zařízení přistupuje další aspekt ve formě vznikajících vzájemných interakcí ovlivňujících vlastnosti materiálů i výrobků. Dále musíme respektovat interakci mezi zařízením a prostředím v němž pracuje. I zde bereme v úvahu fyzikální zákonitosti a hledáme jejich souvislost s měnicími se vlastnostmi materiálů i zařízení.

Výše uvedené skutečnosti jsou vedoucí myšlenkou této knihy. Po objasnění základních skutečností týkajících se problematiky dielektrik a izolantů, je její další část věnována základním aspektům fyziky dielektrik nahlíženým z aplikačního hlediska vztahu struktura – vlastnost s cílem usnadnit proniknutí do zmíněných souvislostí.

Procesy probíhající v izolantech, jejich znalost a vazby se úzce váží na akutní potřebu získávání vydatných a plně výpovědiškopných informací o vlastnostech prvků ve výchozím stavu i během zpracování, kdy se plně uplatňují vzájemné interakce prvků, technologických procesů a prostředí výroby. Tato skutečnost vede k nutnosti znalostí z oblasti diagnostiky izolantů, sloužící ke zjišťování nutných informací. Se současným nárůstem požadavků na elektrická zařízení a jejich částí, význam této problematiky neustále roste. Proto je tematika diagnostiky izolantů další náplní knihy.

Uvedený přehled hlavních skupin a představitelů izolantů usnadňuje orientaci v této oblasti s ohledem na jejich vlastnosti a zejména teplotní odolnost – klíčové hledisko jejich třídění.

Publikace je určena všem, kteří ve své práci či studiu přicházejí s problematikou dielektrických prvků a systémů do kontaktu a chtějí proniknout do jejich světa.

Václav Mentlík

Dielektrické prvky a systémy

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., Plzeň 2006

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

Václav Mentlík: Dielektrické prvky a systémy

BEN – technická literatura, Praha 2006

1. vydání

ISBN 80-7300-189-6

Obsah

1	DIELEKTRIKA A IZOLANTY	9
2	ZÁKLADNÍ ASPEKTY FYZIKY DIELEKTRIK	15
2.1	Interakce elektrického pole a látek	16
2.1.1	Makroskopické hledisko na polarizaci dielektrika	16
2.1.2	Mikroskopické hledisko na polarizaci dielektrika	22
2.1.3	Vnitřní lokální pole v dielektriku	24
2.2	Mechanismy polarizací a jejich druhy	28
2.2.1	Obecně o polarizaci	28
2.2.2	Deformační polarizace	30
2.2.2.1	Elektronová polarizace	30
2.2.2.2	Iontová polarizace	31
2.2.2.3	Polarizace pružně vázaných dipólových momentů	32
2.2.3	Relaxační polarizace	33
2.2.3.1	Iontová relaxační polarizace	33
2.2.3.2	Dipólová relaxační polarizace	39
2.2.4	Migrační polarizace	41
2.2.4.1	Účinky prostorového náboje	45
2.2.4.2	Dynamický model nehomogenního dielektrika	45
2.3	Dielektrikum v elektrostatickém poli	49
2.4	Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli	55
2.5	Dielektrická absorpce	65
2.6	Elektrická vodivost dielektrik	69
2.6.1	Elektrická vodivost plyných izolantů	70
2.6.1.1	Pohyblivost volných nosičů elektrického náboje v plyných izolantech	74
2.6.1.2	Voltampérová charakteristika plyných izolantů	76
2.6.2	Elektrická vodivost kapalných izolantů	78
2.6.2.1	Teplotní závislost konduktivity kapalných izolantů	83
2.6.2.2	Závislost elektrické vodivosti na struktuře kapalného izolantu	86

2.6.3	Elektrická vodivost pevných izolantů	87
2.6.3.1	Povrchová vodivost pevných izolantů	92
2.7	Dielektrické ztráty	94
2.7.1	Dielektrické ztráty v plynných izolantech	104
2.7.2	Dielektrické ztráty v kapalných izolantech	106
2.7.3	Dielektrické ztráty v pevných izolantech	109
2.7.4	Dielektrické ztráty homogenních a nehomogenních izolantů	110
2.8	Elektrická pevnost	111
2.8.1	Elektrická pevnost plynných izolantů	113
2.8.1.1	Townsendovy výboje	114
2.8.1.2	Paschenův zákon	118
2.8.1.3	Kanálový výboj	119
2.8.1.4	Výboje v nehomogenním poli	120
2.8.1.5	Závislost elektrické pevnosti plynů na frekvenci	122
2.8.2	Elektrická pevnost kapalných izolantů	123
2.8.3	Elektrická pevnost pevných izolantů	127
2.8.3.1	Čistě elektrický průraz	128
2.8.3.2	Tepelný průraz	129
2.8.3.3	Elektrochemický průraz – stárnutí izolantů	133
3	DIAGNOSTIKA IZOLANTŮ A JEJÍ METODY	137
3.1	Elektrotechnologická diagnostika v oblasti izolantů	138
3.1.1	Základní aparát a aspekty diagnostiky izolantů	138
3.1.2	Aktuální diagnostické procesy a metody	140
3.2	Standardní podmínky při diagnostice izolantů	141
3.3	Absorpční a resorpční charakteristiky a z nich určené parametry	144
3.3.1	Obecné aspekty problematiky	144
3.3.2	Diagnostické metody pro tuto oblast	146
3.3.2.1	Voltampérmetrová metoda	146
3.3.2.2	Metoda Wheatstonova můstku	147
3.3.2.3	Kompenzační metoda	147

3.3.3	Metodika zkoušek a jejich vyhodnocování	148
3.3.4	Polarizační indexy	154
3.3.5	Redukované resorpční křivky (RRK)	154
3.4	Ztrátový činitel a permitivita	156
3.4.1	Můstkové metody	156
3.4.1.1	Metoda Scheringova můstku	156
3.4.1.2	Metoda čtyřkapacitního můstku	159
3.4.1.3	Metoda modifikovaného můstku pro rozsah 30 Hz do 300 kHz	159
3.4.1.4	Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát	161
3.4.2	Rezonanční metoda měřením nakmitaného napětí (Q-metr)	161
3.4.3	Vzorky a elektrodové systémy pro měření dielektrických ztrát	163
3.4.4	Výsledky měření a jejich přesnost	166
3.5	Elektrická pevnost	167
3.5.1	Elektrody a experimentální vzorky	167
3.5.2	Provedení zkoušek elektrické pevnosti	172
3.6	Mechanické vlastnosti izolanů	175
3.6.1	Tahové vlastnosti izolanů	176
3.6.2	Ohybové vlastnosti izolanů	181
3.6.3	Rázová houževnatost izolanů	185
3.7	Možnosti měření rozložení prostorového náboje	190
3.8	Sledování entalpie izolanů	193
3.8.1	Obecně k principu metody	194
3.8.2	Provedení analýz a aplikace jejich výsledků	195
3.9	Určování teploty skelného přechodu (T_g) izolanů	197
3.9.1	Obecně k principu metody	197
3.9.2	Průběh zkoušky a využití získaných výsledků	201
3.10	Zjišťování hmotnostních úbytků izolanů	203
3.10.1	Obecně k principu metody	203
3.10.2	Průběh zkoušky a využití získaných výsledků	204

4	ELEKTROIZOLAČNÍ SYSTÉMY A JEJICH PRVKY	207
4.1	Teplotní klasifikace elektroizolačních materiálů	208
4.2	Přiřazení charakteristických materiálů jednotlivým teplotním třídám	209
4.3	Drážkové izolace	212
4.4	Nomex®	214
4.5	Kapton®	215
4.6	Kompozitní materiály	215
4.7	Slída a slídové výrobky	217
4.7.1	Slída	217
4.7.1	Slídové výrobky	217
4.7.1.1	Mikanity	218
4.7.1.2	Materiály z rekonstruované slídy	219
4.8	Izolační systémy transformátorů	220
4.8.1	Materiály pro izolační systémy transformátorů	220
4.9	Izolační systémy točivých elektrických strojů.....	221
4.9.1	Nízkonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů	221
4.9.2	Vysokonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů	222
4.9.2.1	Systém resin-rich.....	223
4.9.2.2	Systém VPI (Vacuum Pressure Impregnation).....	224
4.9.2.3	Porovnání technologií VPI a resin-rich	225
	LITERATURA	226
	REJSTŘÍK	227
	KNIHY NAKLADATELSTVÍ	
	BEN – TECHNICKÁ LITERATURA	237
	ADRESY PRODEJEN TECHNICKÉ LITERATURY	239
	PÁR SLOV O NAKLADATELSTVÍ.....	240

Základním elementem při výrobě elektrických zařízení je použitý materiál. Ten chápeme jednak jako pro daný účel upravenou látku, jednak jako systém sestávající z podřazených podsystémů a prvků. Těmi jsou myšleny z hlediska současného stavu vědění „nedělitelné“ elementární částice. Dotyčné elektrické zařízení pochopitelně opět chápeme jako systém sestávající z funkčních podsystémů a sice mechanického, magnetického, elektrického, dielektrického a termoventilačního. Z úhlu spolehlivostních aspektů, kdy elektrické zařízení chápeme jako sériový spolehlivostní řetězec u něhož výpadek jednoho článku znamená konec funkčnosti celého zařízení, je dielektrický tím podsystémem, který svojí povahou obvykle nejvíce ovlivňuje to, co od těchto zařízení požadujeme – jejich životnost a spolehlivost. Dielektrický podsystém je tedy klíčovým pro správnou činnost elektrického zařízení.

Chování dielektrického podsystému je funkcí fyzikálních vlastností jeho jednotlivých elementů. Elektrotechnik se tak, aby správně chápal jednotlivé vlastnosti materiálů, neobejde při své práci a volbě materiálů, bez poznatků vysvětlujících a přibližujících chování izolantů vycházející z dějů odehrávajících se v jeho struktuře. Musí chápat dění ve struktuře a vazbu či odraz těchto dějů ve vnějším obrazu izolantu – jeho vlastnostech. Při vlastní výrobě přistupuje další moment a sice interakce, které zde vznikají a pochopitelně také ovlivňují finální vlastnosti výrobku. V neposlední řadě musíme vzít v úvahu i interakce mezi zařízeními a prostředím v němž pracuje. I zde je nutné brát v úvahu fyzikální zákonitosti a umět najít jejich souvislost s měnicími se vlastnostmi materiálů i zařízení.

Souvislosti struktury a vlastností se úzce váží na akutní potřebu získávání vydatných a plně relevantních informací o prvcích a to ve výchozím stadiu i během zpracování, kdy se plně uplatňují vzájemné interakce prvků, technologických procesů a prostředí výroby. To vede k nutnosti znalostí z oblasti diagnostiky sloužící ke zjišťování uvedených nutných informací. Je třeba připomenout, že význam těchto informací neustále roste.

Uvedené skutečnosti naznačují důvod, proč se zabývat elementy dielektrického podsystému, pronikat do souvislostí struktura – vlastnost a chápat zákonitosti jejich interakcí s prostředím. To vedlo ke snaze zpřístupnit dostupnou formou zmíněné skutečnosti a tím ke zrodu této publikace. Je určena všem, kteří ve své činnosti – práci či studiu – přicházejí s uvedenou problematikou do styku.

Je milou povinností autora upřímně poděkovat panu Prof. Ing. Danielu Mayerovi, DrSc., Ing. Lumíru Šaškovi, CSc., Doc. Ing. Pavlu Kalábovi, CSc. a Pavlu Šebíkovi za cenné rady a připomínky, dále kolegům Ing. Jiřímu Langovi, Ph.D. a Ing. Robertu Vikovi za účinnou pomoc při vzniku textů a obrázků knihy.

Za svůj vznik kniha děkuje výzkumnému záměru MŠMT České republiky MSM 4977705131 „Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice“, jehož je autor vedoucím řešitelem.

