

7. TEPLOTNÍ A ELEKTRICKÉ ZNEHODNOCOVÁNÍ

Teplota ovlivňuje vlastnosti materiálů ve všech etapách jeho existence, počínajíc výrobou přes technologické zpracování až po období, kdy materiál plní svoji funkci v elektrickém zařízení. Teplotní namáhání může mít charakter jak krátkodobého, tak dlouhodobého působení. Zatím co krátkodobé působení teploty má za následek obvykle vratné změny vlastností, dlouhodobé působení teploty zapříčiňuje vždy změny nevratné.

7.1 Mechanismus degradace při krátkodobém působení teploty

Krátkodobé působení teploty se často projevuje jako kolísání teploty. Kolísání teploty vyvolává rozměrové změny, jejichž následkem je vznik mechanického pnutí v materiálu. To může být příčinou vzniku trhlinek a praskání materiálu. Střídání teplot může způsobit změny krystalinity polymeru, což kromě změny mechanických vlastností ovlivňuje difuzi ozonu nebo kyslíku do polymeru a tím i průběh stárnutí.

Působení vyšší teploty po krátkou dobu může být příčinou vytékání některých druhů tmelů a impregnantů (např. na bázi asfaltu), nebo vytékání některých složek polymerů (např. změkčovadel a stabilizátorů).

Vlivem krátkodobého působení teploty se mění v poměrně širokém rozsahu základní charakteristiky izolantu.

7.1.1 Vliv teploty na elektrickou vodivost tuhého izolantu

Elektrická vodivost tuhých izolantů je způsobena pohybem iontů uvolněných ze struktury materiálu vlivem tepelného pohybu a pohybem iontů nečistot a příměsí v materiálu. Pohyblivost těchto částic lze vyjádřit vztahem:

$$b = \frac{v}{E} \quad (159)$$

Vnitřní elektrickou vodivost lze zjistit z rovnice:

$$\gamma = n_0 q b \quad (160)$$

V tomto výrazu n_0 je koncentrace nábojů q v jednotce objemu (uvolněných vlivem vnějších sil nebo teplem):

$$n_0 = N e^{-\frac{E}{2 k T}} \quad (161)$$

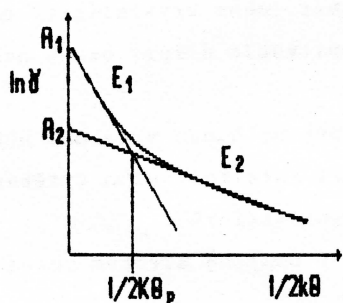
Vztah (160) lze upravit do tvaru:

$$\gamma = A e^{-\frac{E}{2 k T}} \quad (162)$$

kde A je maximální dosažitelná vodivost způsobená příslušným druhem částic. Reálný izolant je soustava s velmi složitou vnitřní strukturou a vodivost takového materiálu je proto vyvolána řadou různých částic:

$$\gamma_c = \sum A_i e^{-\frac{\sum E_i}{2 k T}} \quad (163)$$

Ve většině případů se v rozmezí běžných teplot uplatňují pouze dva druhy částic s různou hustotou A_i a aktivační energii E_i . To se v grafické závislosti $\ln \gamma$ na $1/2kT$ projeví jako dvě asymptotické přímky, kde bod přechodu



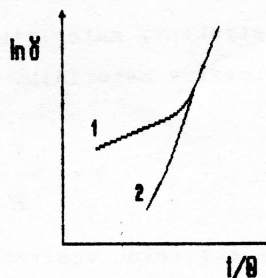
(θ_p) charakterizuje druh izolantu (obr. 65). V rozsahu běžných teplot se s tímto zlomem u izolačních systémů s termoplastickým pojivem nesetkáváme.

V praxi se pro nepříliš široký teplotní interval používá pro stanovení elektrické vodivosti přibližný vzorec:

Obr. 65.
Vodivost tuhé látky se dvěma typy vodivostních částic

$$\gamma = \gamma_0 e^{\alpha} \quad (164)$$

kde α je materiálová konstanta. Závislost $\ln \gamma$ jako funkce $1/\theta$ je vynesena na obr. 66. Křivka 2 v tomto grafu vyjadřuje závislost elektrické vodivosti neznečištěného izolantu na teplotě. Bude-li materiál obsahovat větší množství vnitřní nečistoty např. vlivem termooxidačního stárnutí bude se vodivost na teplotě měnit podle křivky 1.



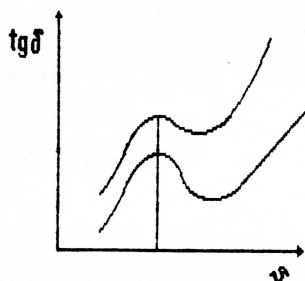
Obr. 66.
Teplotní závislost konduktivity tuhé látky s různým vnitřním znečištěním
1 - silně znečištěná látka
2 - látka bez znečištění

7.1.2 Vliv teploty na dielektrické ztráty

Ztráty v tuhém dielektriku, na které působí střídavé elektrické pole, jsou způsobeny ustálenou vodivostí a různými typy relaxačních polarizací, které mají původ ve složení a struktuře dielektrika. Proto také teplotní závislosti dielekt-

rických ztrát různých izolantů mají odlišný průběh. Závisí především na typu polarizace materiálu. Ta je dána chemickým složením, vnitřní stavbou, původem vnitřních nečistot.

V neutrálních tuhých izolantech jsou pouze pružné polarizace. Organické nepolární polymery mají nízkou permitivitu a ztrátový činitel řádu 10^{-4} . Příčinou ztrát v nepolárních polymerech je přítomnost karbonylových skupin vznikajících při výrobě polymeru. Většina polymerů má však polární



Obr. 67.
Teplotní závislost dielektrických ztrát tuhého dielektrika

vazby přímo v molekulách. Dielektrické ztráty v těchto materiálech jsou vodivostního a polarizačního charakteru. Přítomnost polárních skupin v molekulách polymeru má za následek výskyt více maxim v průběhu teplotní závislosti ztrátového činitele. Tato maxima, resp. jejich velikost a poloha, jsou dána velikostí částí molekuly, které se mohou s dipóly v elektrickém poli natáčet. Nejčastěji se vyskytují dvě maxima. Příklad teplotní závislosti $\text{tg } \delta$ je na obr. 67.

V anorganických materiálech jako je např. sklo jsou vodivostní ztráty spojeny s vibračními ztrátami, které jsou způsobené elastickou iontovou polarizací. Ztráty vodivostní a relaxační jsou vyvolány přítomností volných nebo slabě vázaných iontů, deformační ztráty určovány posuvem atomů v krystalové mřížce. Vibrační ztráty souvisejí s vlastními kmity atomů mřížky. Z toho vyplývá, že teplotní závislost dielektrických ztrát těchto materiálů je ovlivňována především jejich složením. Od určitých teplot $\text{tg } \delta$ vždy roste vlivem růstu elektrické vodivosti.

7.1.3 Vliv teploty na elektrickou pevnost

Elektrická pevnost je základní vlastností každého tuhého izolantu. Jeden z mechanismů elektrického průrazu izolantů – *tepelný průraz* je závislý na teplotě.

Fyzikálním základem tepelného průrazu je vznik tepelné nestability vyvolané nelineárním poklesem izolačního odporu na teplotě. Rychlejší vzrůst ztrát než odvod tepla z povrchu izolantu a v důsledku toho narůstající teplota vede k tepelnému průrazu.

Energetickou bilanci elementu izolantu lze vyjádřit jako rovnováhu vznikajících ztrát s teplem odvedeným do okolí a teplem zvyšujícím teplotu izolantu:

$$\gamma_{i^2} = - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q \frac{\partial T}{\partial t} \quad (164)$$

S ohledem na (162) nelze tuto rovnici analyticky řešit. V ustáleném stavu, když je tloušťka izolantu tak tenká že chlazení se děje jen povrchem je:

$$\frac{dT}{dt} = 0 \quad (165)$$

a jednotka plochy odvede za 1 s teplo $Q = \alpha (T - T_0)$. Bilanční rovnici (164) lze potom nahradit výrazem:

$$\frac{U^2}{R} = 2 \alpha (T - T_0) \quad (166)$$

kde

$$R = f(T) = R_0 e^{\frac{E (T - T_0)}{2 k T}} \quad (167)$$

Funkce (166) má maximum pro:

$$\frac{dU^2}{dT} = 2\alpha \left(\frac{dR}{dT} (T - T_0) + R \right) = 0 \quad (168)$$

Pro $T = T_k$ je $U = 0$. Řešením tohoto výrazu s respektováním uvedené podmínky dostaneme vztah pro kritickou teplotu:

$$T_k = T_0 - R \frac{1}{dR/dT} = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 T_0}{\alpha}} \right) \quad (169)$$

a kritické napětí:

$$U_k^2 = 2 \alpha R_0 e^{\frac{T_0 E}{2 k T_k}} \quad (170)$$

Kritický stav nastává tehdy je-li:

$$T_0 < \frac{E}{8k} \quad (171)$$

Pro vyšší teploty okolí teplotní nestabilita nenastane a izolant se chová jako polovodič. Kritické napětí izolantu odpovídá napětí, které by izolant

právě ještě vydržel (za předpokladu, že by v materiálu nenastaly nevratné změny vyvolané stárnutím). Není to tedy ještě průrazné napětí izolantu.

Pro výpočet napětí tepelného průrazu U_p při střídavém napětí s frekvencí 50 Hz lze použít vzorců:

pro tenkou desku tloušťky $d < 2 \lambda / \alpha$

$$U_p = 1,6 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{\alpha d k}{\epsilon \operatorname{tg} \delta}} \quad (172)$$

pro silnou desku tloušťky $d > 20 \lambda / \alpha$

$$U_p = 3,6 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{\lambda k}{\epsilon \operatorname{tg} \delta}} \quad (173)$$

kde

$$k = 0,43 \frac{\nu_1 - \nu_2}{\log(\nu_1 / \nu_2)} \quad (174)$$

Veličiny vystupující v těchto vztazích jsou závislé na teplotě. Obecně platí, že napětí tepelného průrazu s teplotou klesá. Pokles je tím výraznější, čím nižší je napětí tepelného průrazu izolantu při teplotě okolí.

7.1.4 Vliv teploty na mechanické vlastnosti

Izolace je v elektrickém zařízení vystavena vedle namáhání elektrickým polem, teplotou i mechanickým silám, zejména mechanickým rázům a vibracím. Musí mít proto vhodné mechanické vlastnosti nejen při teplotě okolí, ale i v rozsahu teplot, které přicházejí v úvahu při provozu zařízení. Takovými vlastnostmi jsou obvykle teplotní roztažnost, pevnost v ohybu, pevnost v tlaku a pevnost v tahu. Tyto vlastnosti izolace jsou dány především složením izolantu, které izolaci tvoří.

Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny všemi složkami izolace. Charakter teplotní závislosti mechanických vlastností je ale rozhodující měrou dán teplotní závislostí mechanických vlastností organické, tj. polymerní části izolace.

Změna mechanických vlastností polymerů s teplotou souvisí se změnami v pohybech částí molekul a tím i prázdných míst ve struktuře polymeru. Polymery s krystalickou strukturou se vyznačují mimo jiné ostrým přechodem mezi krystalickou a kapalnou fází při dosažení bodu tání. Např. ve slídivých izolantech se používaná pojiva většinou vyznačují chováním typickým pro polymery s amorfni strukturou. Veškerý pohyb částí molekul amorfni polymerů ustává při absolutní nule. Při každé jiné teplotě existuje v amor-

fním polymeru pohyb části molekul. Čím vyšší je teplota, tím větší části molekul se pohybují. Tato závislost však není spojitá. Má několik nespojitostí, z nichž nejvýraznější je při teplotě, při které ochlazováním polymeru dochází k zamrznání pohybu hlavních řetězců molekul a volný objem dosahuje hodnoty, která se již dalším snižováním teploty nemění (obvykle asi 2,5 % z celkového objemu polymerů).

Tento jev má za následek nespojistost teplotních závislostí polymeru. Dochází např. ke skokové změně koeficientu teplotní roztažnosti. Teplota, při které nastane změna koeficientu teplotní roztažnosti, se nazývá *teplotou skelného přechodu* T_g . Jedná se velmi důležitou charakteristikou polymeru, neboť kromě koeficientu teplotní roztažnosti obdobnou změnu vykazují tepelná kapacita, difuzní koeficient a moduly mechanických vlastností.

Modul pružnosti ve smyku G amorfních polymerů ve sklovitém stavu ($T < T_g$) je řádově 10^3 MPa, v přechodové oblasti ($T \approx T_g$) klesá na 10^0 až 10^{-1} MPa. Při dalším zvyšování teploty přechází polymer do oblasti kaučukovitého toku ($G \approx 10^{-2,5}$ MPa) případně do stavu kapalného toku $G \leq 10^{-3}$ MPa. Rozdíly v teplotách skelného přechodu se odrážejí v mechanických vlastnostech polymerů. Polymery s T_g nižší než pokojová teplota jsou za normální teploty měkké a stávají se tvrdými při ochlazení pod T_g .

Mezi hodnotami T_g polymerů a jejich chemickou strukturou je úzká souvislost. Nízkou hodnotu T_g mají polymery s lineárními řetězci. Vysoké hodnoty T_g mají silně zesítené polymery (např. fenolformaldehydové pryskyřice), někdy i nad teplotou rozkladu.

Podstatný vliv na T_g má obsah plniv v izolantu. Obecně platí, že čím je polárnost plniva větší, tím silnější je absorpce polymeru a tím vyšší je hodnota nárůstu T_g v porovnání s T_g čistého polymeru.

7.2 Mechanismus degradace při dlouhodobém působení teploty

Dlouhodobé působení vysokých teplot vyvolává nevratné změny ve struktuře a vlastnostech izolace. V praxi se přitom většinou nejedná o dlouhodobé nepřetržité působení teploty, ale o řadu po sobě jdoucích různě dlouhých časových úseků, při kterých se teplota působící na materiál mění. Pro matematický popis a modelování reálného dlouhodobého působení teploty se obvykle používá dlouhodobého nepřetržitého působení teploty, které může v materiálu vyvolat jednak změny fyzikální podstaty:

- změna hmotnosti (vysoušení)
- změna pružnosti, pevnosti

a jednak *chemické* změny. Aby došlo v materiálu ke změnám chemického původu musí být splněny dva základní předpoklady a to molekuly musí mít dostatečnou energii a musí být velká statistická pravděpodobnost střetu molekul v materiálu. Mechanismus chemických reakcí objasňuje reakční kinetika.

Z hlediska reakční kinetiky můžeme reakce rozřadit podle různých kritérií. Tak probíhá-li reakce v jedné fázi, nazývá se *homogenní*. Reakce probíhající na styku dvou fází se nazývají *heterogenní*. Chemické reakce způsobující termooxidační stárnutí jsou reakce homogenní.

Podle jiného hlediska lze chemické reakce dělit na reakce *izolované* a *simultánní*. V reálné soustavě jsou častější reakce simultánní. Ty můžeme rozdělit do tří základních typů:

První typ tvoří reakce *zvratné*, které jsou charakterizovány tím, že současně s danou reakcí probíhá reakce zpětná. tento typ reakce lze vyjádřit obecným schématem



Produkty reakce se opět rozkládají na výchozí látku.

Druhým typem simultánních reakcí jsou reakce *bočné*. Výsledkem procesu jsou různé reakční produkty. Schematicky lze bočné reakce vyjádřit takto:



Termooxidační stárnutí je typická boční reakce.

Posledním typem simultánních reakcí jsou reakce *následné* (konsekutivní). Jejich obecné schéma má tvar:



Produkty výchozí reakce reagují mezi sebou a výsledkem je nový reakční produkt. Tímto mechanismem se řídí korozní děje.

V chemické reakci s postupujícím časem ubývá výchozích látek a přibývá reakčních produktů:



Rozsah chemické reakce lze vyjádřit rovnicí:

$$\xi = \frac{n_{\text{zreag. A}}}{a} + \frac{n_{\text{zreag. B}}}{b} = \frac{n_{\text{vznik}}}{z} \quad (179)$$

Tak jak se mění okamžitá koncentrace výchozích látek mění se i rychlost chemické reakce. Okamžitou reakční rychlost můžeme vyjádřit vztahem:

$$J = \frac{d\xi}{dt} \quad (180)$$

Pro jednosložkovou homogenní soustavu je zreagované množství:

$$n_{\text{zrag.}} = n_{\text{puvod.}} - n_{\text{souc.}} \quad (181)$$

Analogicky ke vztahu (179) je rozsah takovéto chemické reakce:

$$\xi = - \frac{n_A}{a} = \frac{n_Z}{z} \quad (182)$$

a její reakční rychlost:

$$J = \frac{1}{a} \left(- \frac{dn_A}{dt} \right) = \frac{1}{z} \left(\frac{dn_Z}{dt} \right) \quad (183)$$

Rychlost ubývání výchozí látky je:

$$v_A = - \frac{dn_A}{dt} \quad (184)$$

Dochází-li k chemické reakci v homogenní soustavě o konstantní objemu V je reakční rychlost:

$$J = \frac{V}{a} \left(- \frac{d\left(\frac{n_A}{V}\right)}{dt} \right) = \frac{V}{z} \left(\frac{d\left(\frac{n_Z}{V}\right)}{dt} \right) \quad (185)$$

Reakční rychlost ubývání výchozí látky (vztažená ke koncentraci) je:

$$v_{cA} = - \frac{dc_A}{dt} \quad (186)$$

Odolnost izolace vůči působení teplot vyskytujících se při provozování elektrických zařízení je limitována teplotní odolností nejslabší složky, což je např. u slídového izolačního systému pojivo případně syntetická fo-

lie či papíru. Kinetiku změn chemické podstaty izolace lze popsat v souladu s (186) rovnicí:

$$-\frac{dc}{dt} = k c^n \quad (187)$$

Rovnice platí pouze pro izotermní reakce, neboť rychlostní konstanta k závisí na teplotě podle Arrheniova vztahu:

$$k = A e^{-\frac{E}{RT}} \quad (188)$$

Arrheniuv vztah je základním vztahem chemické kinetiky. Na jeho základě odvodil Büssing zákon, který vyjadřuje souvislost mezi zákonitostí stárnutí izolace a zákonitostí chemické kinetiky. Büssingův teorém má tvar:

$$t = t_{\infty} e^{\frac{B}{T}} \quad (189)$$

kde konstanta B je dána vztahem $B = E/R$ a t_{∞} má z matematického hlediska formální význam životnosti izolace při nekonečně vysoké teplotě. Zlogaritmujeme-li tuto rovnici dostaneme tvar:

$$\ln t = A + \frac{B}{T} \quad (190)$$

což je v souřadnicovém systému $\ln t$, $1/T$ rovnice přímky. Přímková závislost doby života izolace na teplotě v tomto systému potvrzuje platnost vztahu (188). Není-li tomu tak, pak mechanismus stárnutí se neřídí reakcí prvního řádu.

Matematickou úpravou Büssingova zákona lze odvodit Montsingerovo pravidlo:

$$t = t_0 e^{-b \Delta \mathcal{V}} \quad (191)$$

kde b a t_0 jsou opět materiálové konstanty, t_0 vyjadřuje životnost izolace při nulové teplotě.

Podle Montsingerova pravidla se životnost izolace zkrátí na polovinu při zvýšení teploty stárnutí o konstantní hodnotu:

$$\Delta \mathcal{V} = 0,695/b \quad (192)$$

Hodnota $\Delta \mathcal{V}$ není pro všechny izolanty stejná, obvykle se pohybuje v rozmezí 7 až 10 °C.

Chemické reakce, jejichž kinetika vychází z rovnice (187), jsou obvykle hlavní příčinou změn vlastností izolace v důsledku dlouhodobého působení vysokých teplot. Velmi důležité změny, zejména elektrických a mechanických vlastností mohou však být i důsledkem změn relaxačních vlastností makromolekul případně jejich částí, nebo změn vazby na rozhraní plnivo - pojivo. Významným činitelem urychlujícím stárnutí izolace je elektrické pole. Výsledkem všech těchto změn může být větší zhoršení vlastností izolace, než by odpovídalo stupni degradace chemickými reakcemi probíhajícími při pouhém tepelném stárnutí.

Třída	Mezní teplota (°C)	Charakteristika izolantu
Y	90	organické vláknité látky neimpregnované z buničiny (papír, bavlna), hedvábí, nebo jejich kombinací
A	105	organické vláknité látky z buničiny hedvábí, nebo jejich kombinací, impregnované, lakované nebo ponořené do kapalného dielektrika
E	120	látky u nichž byla ověřena trvalá teplotní odolnost o 15°C vyšší než u látek třídy A
B	130	anorganické látky (slída, skleněné vlákniny, asbest) nebo jejich kombinace s vhodnými organickými pojivy třídy B, nesmějí obsahovat látky z buničiny nebo hedvábí
F	155	anorganické látky (slída, skleněné vlákniny, asbest) s vhodnými pojivy, nebo látky u nichž byla ověřena trvalá teplotní odolnost o 25 °C vyšší než u izolantů třídy B, nesmějí obsahovat látky z buničiny nebo hedvábí
H	180	anorganické látky (slída, skleněné vlákniny, asbest) se silikonovým pojivem, silikonové a fluorové elastomery
C	nad 180	anorganické látky (slída, porcelán, sklo, křemen) nebo jejich kombinace, s anorganickým pojivem nebo bez něho

Tab. 36 Teplotní třídy izolantů

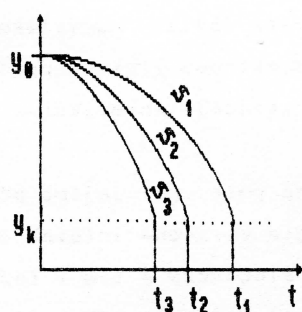
K experimentálnímu vyšetřování životnosti organických izolantů se využívá urychleného stárnutí, při němž se z poměrně krátkodobých namáhání odvozují závěry o očekávané době života při dlouhodobém působení teploty v provozních podmínkách.

Aby bylo možné posoudit, kdy materiál vlivem teplotního namáhání zestárnul je nutné nejdříve zvolit fyzikální veličinu, která se vlivem stárnu-

tí významně mění (*pozorovaný znak*). Dále je nutné vybrat *kriterium zestárnutí*, což je krajní velikost pozorovaného znaku, při jejímž dosažení je materiál již zcela nezpůsobilý. Může to být např. mechanická pevnost, ztrátový činitel, nebo v některých případech i elektrická pevnost.

K urychlení stárnutí se nejčastěji používá ohřátí materiálu na teploty vyšší než je teplota odpovídající teplotní třídě zkoušeného materiálu (tab. 36.). Zkouší se nejméně při třech různých vhodně zvolených teplotách. K napodobení provozních podmínek se izolant vedle teploty někdy současně namáhá elektricky nebo mechanicky.

Naměřené výsledky životnostních zkoušek se zpracovávají graficky. Nejprve se vynesou *čáry stárnutí*, tj. grafická závislost průběhu hodnot pozorovaného znaku y v závislosti na čase při jedné (stálé) teplotě jako parametru (obr. 68.). Experimentální údaje se vynášejí od výchozí hodnoty y_0 až po zvolené kritérium zestárnutí y_k . Průsečík kritériální hodnoty y_k s příslušnou čarou stárnutí určuje doby t_1, t_2, t_3 pro teploty τ_1, τ_2, τ_3 . Jestliže z takto získaných hodnot vyneseme do grafu závislost:



$$\log t = f(1/\theta) \quad (193)$$

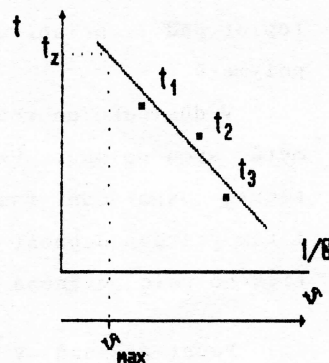
Obr. 68.
Čáry stárnutí

získáme tzv. *čáru života* (obr. 69.). Extrapolací čáry života do provozních teplot nám poskytne možnost zjistit očekávanou dobu technického života izolačního systému. Nebo naopak můžeme pro požadovanou dobu života zjistit mezní teplotu, kterou by měl izolační systém bez porušení spolehlivě snášet.

7.3 Elektrické stárnutí

Kromě tepelného stárnutí, spojeného s tepelným namáháním izolace, se v provozu uplatňuje i stárnutí elektrické, vyvolané čistě elektrickým namáháním. Elektrické stárnutí je fyzikálně a chemicky mnohem méně objasněný proces než teplotní stárnutí. Obvykle se obtížně rozlišuje příčina a následek tohoto degradačního děje.

Zpravidla se při elektrickém stárnutí izolací rozeznává narušování organických částí systému působením dílčích výbojů, od všeobecné-



Obr. 69.
Čára života

ho elektrického stárnutí, které se neprojevuje viditelným narušením rozsáhlejších partií izolačního systému.

Stárnutí organických složek izolace vlivem dílčích výbojů je spojeno především s chemickými, mechanickými a částečně i tepelnými degradačními ději. Vznikající oxidy dusíku mohou s přítomnou vlhkostí tvořit kyseliny, vůči nimž není odolný např. materiál na bázi celulózy. Na lokalizovaných místech výboje dochází kromě toho k mechanické erozi vedoucí k úplnému proděravění organických hmot. Vyvíjející se teplo může rovněž způsobovat narušení, která však vzhledem k vlivům dříve uvedeným jsou, zejména při průmyslové frekvenci, zanedbatelná.

Pravděpodobnost, že u nové izolace dojde po přiložení napětí U_n k průrazu, je:

$$P\{U_n \leq U_p\} \quad (194)$$

kde U_p je napětí elektrického průrazu. Toto napětí závisí na velikosti energie elektronů, která je dána rozdílem energie elektronů získané působením elektrického pole a energie, kterou elektrony ztrácejí interakcí s ostatními elektrony a se strukturou izolantu.

Existuje určitá hodnota intenzity elektrického pole, při jejímž překročení získaná energie elektronů je větší než energie ztracená interakcemi. V takovém případě lavinovitě vzrůstá počet volných elektronů a tím i teplota izolantu a nastává průraz. Velikost napětí čistě elektrického průrazu závisí, jak je výše uvedeno, na velikosti energetických ztrát elektronů interakcí se strukturou izolantu. Velikost ztrát tedy závisí na struktuře izolantu, která je v případě polymerů značně nepravidelná, což znemožňuje výpočet ztrát interakcí se strukturou. Navíc není struktura polymerů kompaktní, vyskytují se v ní prázdná místa, jejichž celkový objem je tzv. volným objemem polymerů.

S rostoucím volným objemem elektrická pevnost polymerů klesá. Volný objem však závisí na teplotě a to tak, že do teploty skelného přechodu T_g je téměř konstantní, při zvyšování teploty nad T_g roste. Proto v oblasti teplot nad T_g přispívá nárůst volného objemu k poklesu elektrické pevnosti polymerů.

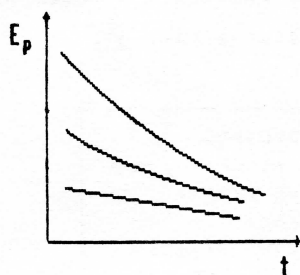
V důsledku pohybů částí molekul mění prázdná místa ve struktuře polymerů svou polohu. Vznikají stále nová uspořádání prázdných míst a počet těchto uspořádání roste s rostoucím počtem přesunů částí molekul. Roste i tak pravděpodobnost vzniku místa, v němž bude kritická intenzita elektrického pole potřebná pro průraz nižší než intenzita průměrná.

Počet přesunů v čase t je úměrný poměru t/τ , kde τ je relaxační čas molekulového pohybu a t je čas, po který je izolant namáhán gradientem blí-

žící se průraznému. Závislost elektrické pevnosti na $1/\tau$ je dána vztahem:

$$E_p = E_{p1} - A \ln\left(1 + B \frac{t}{\tau}\right) \quad (195)$$

kde E_{p1} je elektrická pevnost při neměnicím se pohybu prázdných míst.



Obr. 70.
Elektrická pevnost v závislosti
na době přiloženého napětí

Relaxační čas molekulárních pohybů τ silně závisí na teplotě. S rostoucí teplotou se zkracuje o několik řádů a proto s rostoucí teplotou elektrická pevnost polymerů silně klesá.

Odolnost různých izolantů vůči namáhání elektrickým napětím je možné hodnotit pomocí napěto-časových charakteristik. Tyto křivky udávají elektrickou pevnost jako funkci času (obr. 70.).

Základní literatura k problematice teplotního a elektrického znehodnocování [3], [21].