

Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů

P. Trnka

Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,

Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : pavel@ket.zcu.cz

Anotace:

Diagnostika stavu zařízení, jeho schopnosti nadále vykonávat bez poruchy svou funkci je důležitým technickým oborem. Pro přesnou diagnostiku jsou potřebné diagnostické systémy off-line i on-line – diagnostiky jednotlivých podsystémů sledovaného zařízení. U elektrického zařízení je klíčový izolační podsystém. U izolačního materiálu se sleduje řada elektrických parametrů a z nich se usuzuje na dobu životnosti v daném zařízení. K vlastnímu návrhu zařízení se přidávají i další fyzikální a chemické faktory, které na sledovaný materiál působí. Tato studie se zabývá určováním životnostních charakteristik izolačních materiálů za pomoci modelů stárnutí.

ÚVOD

Návrh izolačního systému s definovanou mírou spolehlivosti vyžaduje co nejlepší pochopení dějů k jakým během jeho deteriorizace bude docházet. Pro lepší popis stárnutí materiálu je výhodné použití modelů stárnutí, které budou popisovat životnost daného materiálu. Matematický či fyzikální model napomáhá k pochopení dějů probíhajících v materiálu. Čím lepší máme znalosti o fyzikálně chemických vlastnostech zkoumaného materiálu tzn. např. hodnoty aktivační energie, teploty skelného přechodu, rychlosti koagulace, informace o injektaci náboje, rychlost pohybu náboje, vznik prostorového náboje atd. a o vnějších měřitelných fenomenologických projevech jako např. doby do průrazu, průrazná napětí, resorpční charakteristiky, izolační odpor atd., tím lepší model stárnutí lze sestavit. Na druhou stranu matematický popis stárnutí izolačního materiálu nám umožňuje předpovědět fyzikální procesy, ke kterým v izolačním materiálu dochází. Zahrnout do modelu stárnutí všechny deteriorizační faktory působící na izolační systém nebude asi nikdy možno. Mezi působící faktory můžeme kromě elektrického namáhání, které je pro nás klíčové, také zahrnout stárnutí mechanické, tepelné, biologické faktory, účinky chemikálií, záření atd. Elektrické namáhání bylo dlouho rozdělováno, pomíneme-li velikost napětí, pouze na stejnosměrné a střídavé. Toto rozdělení spolu s rozvojem moderních technologií přestalo stačit. V současnosti jsou sledovány účinky např. vysokofrekvenčních napětí s ohledem na jeho tvar, fázi i amplitudu. Tato napětí jsou generována např. měniči kmitočtu v pohonech s asynchronními motory. Další sledovaným jevem jsou účinky impulzů v interakci s prostorovým nábojem v obvodech stejnosměrných apod. Důležité je sledovat životnost elektroizolačních materiálů a stanovovat po jakou dobu jsou schopny plnit svoji funkci. K tomuto účelu se používají rozličné modely stárnutí.

MODELÝ STÁRNUTÍ

Modely stárnutí materiálu při působení jednoho faktoru

Modely stárnutí z hlediska druhů působícího degradačního faktoru můžeme rozdělit na:

- **Modely tepelného stárnutí** - odolnost elektrických zařízení závisí na tepelné odolnosti izolačního systému, který většinou tvoří nejslabší článek sériového spolehlivostního řetězce celého zařízení. Zařazení izolačního systému do určité třídy tepelné odolnosti může být provedeno jen podle výsledků zkoušek zrychleného stárnutí. Souvislost mezi délkou experimentu, tj. životností izolace τ_T (h) a teplotou T (K), při které izolace stárne vychází z empirického Montsingerova pravidla [1].

$$\tau_T = A \cdot e^{-BT} \quad (1)$$

kde: A a B jsou materiálové konstanty, které musí být určeny experimentálně. Doba života lze určit také z Arrheniovy rovnice:

$$\tau_T = a \cdot e^{\frac{W_a}{RT}} \quad (2)$$

kde: W_a - aktivační energie procesu (eV),
R - univerzální plynová konstanta,
a - konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul,
T - absolutní teplota (K).

- **Modely elektrického stárnutí** - elektrické stárnutí izolace je jedním z dominantních faktorů ovlivňujících stárnutí izolačního systému. Bohužel o přesném mechanismu působení elektrického pole na stárnutí materiálu je v současnosti známo jen velmi málo a většina poznatků jsou spíše empirického charakteru. Pro modelování vlivu elektrického pole na dobu života materiálu jsou používány následující modely [2]:

Mocninný model:

$$\tau_E = k \cdot E^{-n} \quad (3)$$

Exponenciální model:

$$\tau_E = e^{-bE} \quad (4)$$

kde: τ_E - je doba života (h),

E - je intenzita elektrického pole a konstanty ($\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$),

a, k, n, b - jsou konstanty které je třeba určit empiricky.

Zmíněné modely popisují stárnutí v jakémkoli materiálu, který je vystaven působení elektrického pole. Pro tyto modely není třeba znát dokonale všechny procesy, které elektrické pole v materiálu indukuje, ani další okolnosti, jako např. přítomnost částečných výbojů. Model dokonce není závislý ani na struktuře systému ani na konfiguraci elektrod a rozložení elektrického pole. Vztahy (3) a (4) jsou pouze empiricky odvozené modely, které popisují vliv intenzity elektrického pole na stárnutí izolačního systému. Přesto tyto modely poskytují poměrně dobré výsledky a vypočtené doby života korespondují s realitou. Zmíněné modely (zejména exponenciální model) ovšem selhávají při nižších hladinách intenzity elektrického pole. To je vysvětlováno teorií, podle které existuje určitá prahová intenzita, pod kterou již elektrické pole stárnutí materiálu nepůsobuje.

- **Modely mechanického stárnutí** – jichž existuje velké množství v závislosti na různých vlastnostech materiálů a různých druzích mechanického namáhání vycházejí z různých předpokladů. Například exponenciální model vycházející z teorie mechanismu růstu trhlin při tahovém napětí dle Odinga [3]. Model předpokládá, že vakantní místa se budou přemisťovat z objemu, který podléhá pružnému roztažení do objemů méně roztažených. Počítá změny koncentrace vakancí ve vztahu k vytvoření trhlin vlivem tahového zatížení.

$$V_{oc} = \frac{dN}{d\tau} \quad (5)$$

V_{oc} je rychlost koagulace a usazování vakancí úměrná jejich počtu (N) za jednotku času (τ).

$$\tau_M = \left(\frac{C}{A} \right)^{\frac{1}{m}} e^{-\left(\frac{\alpha+\beta}{m} \right) \sigma} \quad (6)$$

kde: τ_M je doba do lomu (h),

σ je mechanické napětí (Pa)

m je ukazatel charakterizující způsobilost hromadit vakance,

C, A, β jsou konstanty,

α je parametr při odvození (6) použitého vztahu dle J. Nadie [3].

Další modely jsou např. Dechřarův a Usipovovův vycházející z představ o úloze vakancí. Předpokládají, že fyzikální stav oblasti rozrušení je podobný zárodkům natavování (vakance je obklopena skupinou neuspořádaných atomů, takže krystalografická mřížka v jejím okolí nabývá podoby blízké kapalnému stavu při teplotě tání). Rozrušování je spojeno se vznikem určitého kritického množství zárodků kapalně fáze následkem zvětšování koncentrace „natavovaných“ center [3].

Výsledkem odvození je vztah (7),

$$\tau_p = B \cdot e^{\frac{Q_0}{RT}} e^{-\left(\frac{qV_a\sigma}{2RT} \right)} \quad (7)$$

kde: τ_p je doba do lomu (h),

V_a je objem molu atomů (m^3),

q je koeficient charakterizující koncentraci napětí v oblasti porušování,

Q_0 je aktivační energie samodifúze,

T je teplota (K),

σ je mechanické napětí (Pa),

R je univerzální plynová konstanta,

B je konstanta.

Modely stárnutí při působení více faktorů současně

Jestliže je izolační materiál vystaven současně vlivu elektrického pole a zvýšené teploty, ve výsledku většinou k selhání materiálu dochází dříve než kdyby byl materiál vystaven působení obou faktorů zvlášť. Výsledné stárnutí totiž nutně nemusí být prostým algebraickým součtem účinků. To nastává v případě interakce dvou nebo více mechanismů stárnutí. V zásadě rozlišujeme dva druhy interakce: přímou a nepřímou. Přímou interakci lze popsat jako stav, kdy se jednotlivé působící vlivy navzájem ovlivňují do takové míry, že jejich působení je diametrálně, odlišné od stavu kdy působí tyto vlivy jednotlivě. Typickým příkladem takového působení je oxidace za zvýšené teploty. Samotná zvýšená teplota nijak radikálně na materiál nepůsobí, ovšem za přítomnosti kyslíku velmi výrazně urychluje oxidační reakce. Stejně tak jako oxidace při pokojové teplotě nijak radikálně materiál nedegraduje. Nepřímou interakci můžeme definovat jako situaci, kdy několik faktorů působí současně na materiál, jednotlivé působící vlivy zůstávají nezměněny, jako by působily samostatně, ale k ovlivnění dochází prostřednictvím jejich účinků. Jako nepřímou interakci můžeme označit například současné působení mechanického namáhání a elektrického pole. Mechanické namáhání může rozrušit materiál a tím dojde k nárůstu částečných výbojů, které způsobí rychlejší zestárnutí materiálu. Fakt, že dochází k interakcím mezi jednotlivými faktory ovlivňujícími stárnutí je třeba

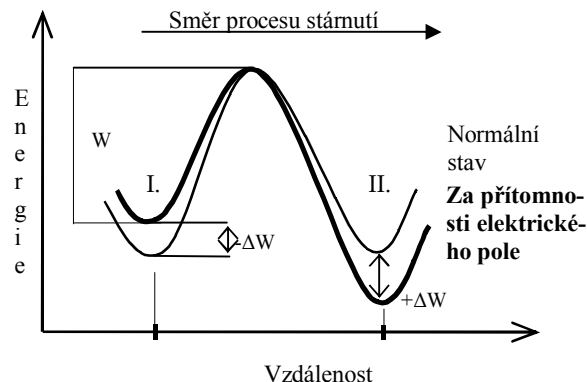
zahrnout do matematických modelů které tyto děje popisují. V současné době existuje několik modelů, které popisují chování materiálů při současném působení elektrického pole a zvýšené teploty. Jako příklad používaných modelů stárnutí můžeme uvést: Simonioho model, Ramuův model, Fallouův model a model podle Crinea. Tyto modely nám ukazují rozdílné přístupy k této problematice. Zatímco Simonioho, Ramuův a Faluův model jsou více méně empirickými vztahy, kde je třeba některé konstanty získat experimentálně v modelových podmínkách, model podle Crinea se snaží být plnohodnotnou fyzikální teorií stárnutí.

• **Crineaův model** - Crine vysvětluje proces stárnutí pomocí představy dvojité potenciálové jámy. Tato teorie je blíže popsána např. v [4]. Energetická bariéra odděluje provozuschopný stav od stavu selhání. Aby se systém dostal z provozuschopného stavu do stavu selhání potřebuje dostatečnou energii potřebnou k překonání energetické bariéry. Pravděpodobnost získání dostatečné energie k přechodu bariéry a tj. pravděpodobnost selhání systému je dána Boltzmanovou statistikou. Tomuto procesu významně napomáhá elektrické pole, tím že deformuje energetickou bariéru obr. 1.

Výška energetické bariéry se na straně provozuschopného vztahu snižuje o ΔW a o stejnou hodnotu se na straně poruchového stavu zvyšuje o stejnou hodnotu. Tím se velmi významně zvyšuje pravděpodobnost přechodu. Čas potřebný k přechodu energetické bariéry do stavu selhání je podle Crinea doba života izolačního systému. Crine uvádí že střední doba života materiálu je střední doba přechodu energetické bariéry kterou lze vyjádřit pomocí Boltzmanovy statistiky a pomocí zákonů termodynamiky.

$$\tau = \left(\frac{h}{k_B T} \right) e^{\frac{\Delta W}{k_B T}} \cosh \left(\frac{e \lambda E}{k_B T} \right) \quad (8)$$

kde: h je Plankova konstanta, k_B je Boltzmanova konstanta, ΔW je volná aktivační energie, λ je vzdálenost mezi oběma stavy a e je elektrický náboj částic ovlivňujících proces stárnutí. To znamená, že pokud není přítomno elektrické pole, Crineaův model přestává být definován, tj. ztrácí význam. Parametry ΔW a λ jsou funkcemi teploty, jsou Crineaem blíže neurčené a je třeba je stanovit individuálně přičemž se vychází z konkrétních podmínek, např. jakými mechanismy ovlivňuje zvýšená teplota kinetiku chemických reakcí apod. Určení těchto funkcí je ovšem velmi obtížné a je třeba říci že v tomto bodě ještě Crineaova teorie není zcela dokončená a je třeba ji dopracovat. Ovšem v tomto modelu je ještě více podobně nedořešených bodů a je třeba konstatovat, že použití tohoto modelu je v praxi velmi omezené.



Obr. 1: Model stárnutí materiálu jako dvojité potenciálové jámy [4], [8].

V oblasti velmi vysokých hodnot elektrického pole kdy je možno konstatovat že $e \lambda E < k_B T$ lze vztah (8) zjednodušit:

$$\tau = \left(\frac{h}{k_B T} \right) e^{\frac{\Delta W - e \lambda E}{k_B T}} \quad (9)$$

Z této rovnice je lépe patrné jakým způsobem Crine zahrnuje vliv interakce mezi elektrickým a tepelným polem do svého modelu. Výška energetické bariéry ΔW je snížena o $e \lambda E$ a tím se snižuje doba života τ .

Pro hodnoty teploty a intenzity elektrického pole pro které platí $e \lambda E \ll k_B T$, tj. oblast vysokých hodnot elektrického pole má křivka životnosti spíše exponenciální charakter. Pro oblast nízkých intenzit elektrického pole křivka životnosti má jen velmi zvolna klesající profil, což koresponduje se Simonioho teorií prahové intenzity elektrického pole.

Pro střídavé elektrické pole E , uvádí Crine et al., uvedeno např. v [4] model (9).

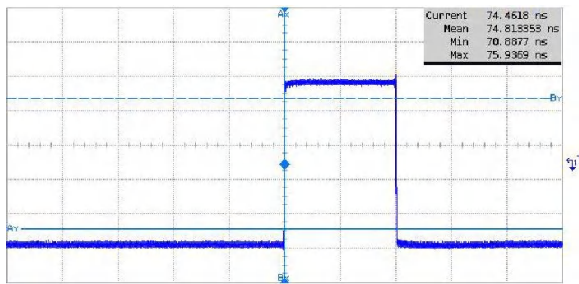
$$\tau = \left(\frac{h}{2 f k T} \right) e^{\left(\frac{\Delta W_0}{k T} \right)} \csc h \left(\frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon' \frac{\Delta V_F E^2}{k T} \right) \quad (9)$$

kde: ΔV_F je aktivační úroveň procesu při namáhání elektrickým polem, f je akcelerační koeficient úměrný frekvenci.

URČOVÁNÍ ŽIVOTNOSNÍ KŘIVKY

Experimenty

Výzkum v oblasti stárnutí materiálů je poměrně propracovaný z hledisek elektrického, tepelného, mechanického stárnutí i vlivů okolí. V oblasti elektrického stárnutí izolačních materiálů jsou dlouho sledovány vlivy střídavého i stejnosměrného namáhání/stárnutí. Poměrně novým problémem je elektrické stárnutí sice střídavým napětím ne



Obr. 2: Charakteristický tvar vysokofrekvenčního napětového pulzu.

sinusového tvaru vlny, ale napětovými pulzy se strmými náběžnými hranami, obr. 2. Tyto tvary napětí se objevují např. v elektrických pohonech s měniči kmitočtu.

V době, kdy se ve výkonové elektronice používaly jako spínací součástky tyristory se strmostí nárůstů napětí pohybovaly pod hranicí $500 \text{ V}/\mu\text{s}$, která bývá označována jako hranice, kde se již „pulzní namáhání“ začíná silně projevovat. Současné strmosti nárůstů napětí na izolačním materiálu dosahují až $15 \text{ kV}/\mu\text{s}$ při opakovacích frekvencích v řádu jednotek kilohertz.

V této práci jsou prezentovány výsledky testování vlivu pulzního namáhání na izolační systémy. Testovány byly izolační materiály pro hlavní i drážkovou izolaci točivých strojů. Pro porovnání byly vzorky stárnuty také na střídavém napětí 50 Hz běžné sinusové vlny. Během stárnutí byly prováděny odběry pro testování vybraných elektrických parametrů.

Na obr. 3 je zachyceno pracoviště pro vysokonapětové, vysokofrekvenční pulzní namáhání vzorků [5]. Vzorky jsou dlouhodobě stárnuty ve stíněných komorách s odsáváním zplodin vzniklých degradací během testu. V podobném zařízení jsou stárnuty vzorky při střídavém napětí 50 Hz .



Obr. 3: Pracoviště pro vysokonapětové a vysokofrekvenční pulzní namáhání vzorků izolačních materiálů.

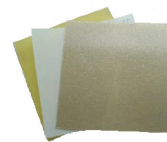
Vzorky

Pro elektrické stárnutí byly použity vzorky dvou základních tvarů. Plošné vzorky o velikosti $10 \times 10 \text{ cm}$ různých tloušťek, dle daného materiálu a vzorky ve tvaru izolovaných tyčí, obr. 4 (a), (b).

Jedná se o testování vinutí asynchronních strojů. Prvně jmenované vzorky měly lepší tvar pro precizní měření elektrických parametrů během stárnutí, druhé pak se svým prostorovým uspořádáním maximálně blížily tvaru izolovaných tyčí vinutí asynchronního motoru.



(a)



(b)

Obr. 4: Tyčový (a) a plošné (b) vzorky izolačních materiálů pro elektrické stárnutí.

Testované elektrické parametry

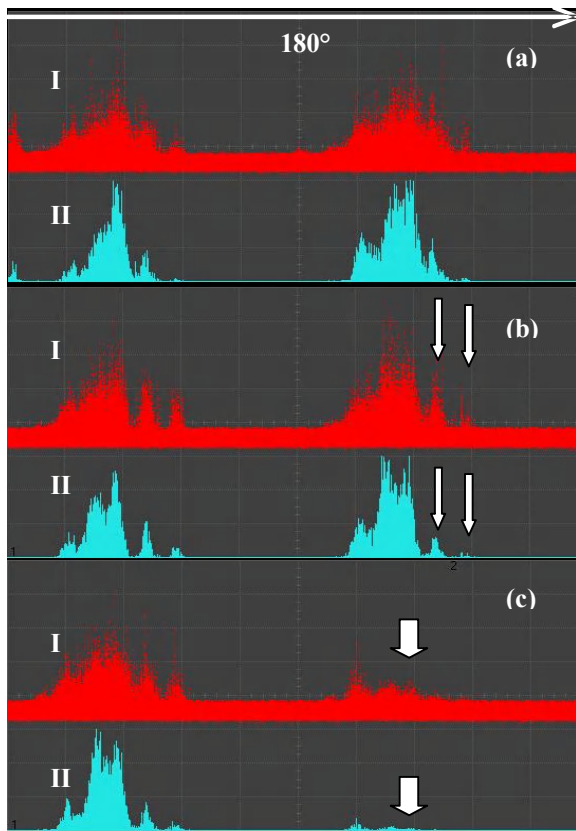
Během elektrického či kombinovaného stárnutí byly testovány vybrané elektrické parametry. Tyto parametry i zobecněné výsledky z mnoha měření jsou uvedeny v tab. 1. V tabulce jsou uvedeny výsledky měření vývoje elektrických parametrů během elektrického stárnutí pulzním napětím. Pro zvýraznění rozdílu byly vztaženy k výsledkům naměřeným pro elektrické stárnutí při sinusovém namáhání 50 Hz . Tyto výsledky shrnují dlouhodobé zkoušky prováděné na různých izolačních materiálech.

Tab. 1: Změny elektrických parametrů během elektrického stárnutí.

<i>Testovaný elektrický parametr</i>	<i>Vývoj parametru během elektrického stárnutí pulzním napětím vztaheno k vývoji při 50 Hz</i>	
Zapalovací napětí částečných výbojů	bez rozdílu	
Náboj částečných výbojů	mírně rostoucí	
Poloha částečných výbojů na vlně napětí	měřeno při 50 Hz sinus	zatím neprokázáno
	měřeno při pulzním u	aktivita na hranách napětových pulzů
Počet impulsů částečných výbojů za jednotku času	zatím neprokázáno	
Izolační odpor vzorku	klesající	
Ztrátový činitel	rostoucí	
Plocha pod absorpční křivkou	rostoucí	
Kapacita vzorku Polovodivé ochrany	rostoucí silně degradují	

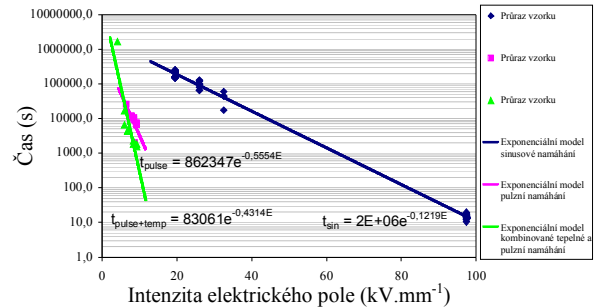
VÝSLEDKY

Na obr. 5 jsou zobrazeny výsledky měření aktivity částečných výbojů na vzorcích před elektrickým stárnutím a po zestárnutí elektrickým polem. V případě (b) se jedná o vzorky materiálu Relanex, stárnutého sinusovým napětím 5 kV, 50 Hz po dobu 600 h. Rozdíl oproti měření (a), na vzorku ještě před samotnými expozicemi je pozorovatelný hlavně na fázovém rozložení výbojů na sinusové vlně napětí. Na zestárnutém vzorku můžeme pozorovat určité oddělení části výbojů od hlavní obalové křivky, označené v obr. 5 (b) bílými šipkami. Toto oddělení indikuje vytvoření dutinek na povrchu izolačního materiálu vlivem degradace elektrickým polem. Jev byl experimentálně namodelován v [6]. V případě pulzního namáhání vzorku po dobu 300 h napětím ± 1 kV a šířkou pulzu 10 μ s, obr. 5 (c), došlo k výraznému snížení výbojové aktivity, zejména v záporné půlperiodě měření. Tento jev nastává vyplněním mikrodutinek v materiálu uhlíkem, který vzniká rozkladem vlastního izolačního materiálu při elektrickém stárnutí. Tím dojde k vytvoření vodivé vrstvy, která brání další výbojové činnosti. Toto stádium je charakteristické pro elektrickým polem „zahořené“ izolační materiál. V následné degradaci opět dojde ke zvýšení výbojové činnosti spojováním dutinek v kanálky a v předprůrazových stavech.



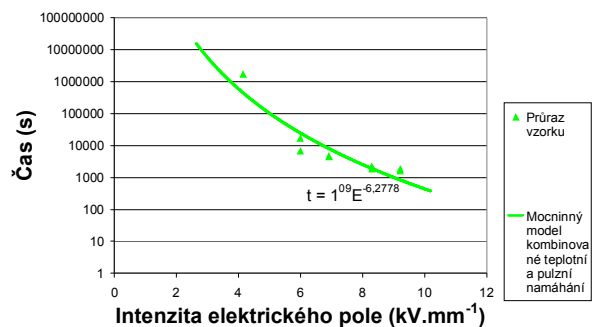
Obr. 5: I – zdánlivý náboj částečných výbojů, II – četnost impulzů částečných výbojů. Měření 30 s při 2,5 kV, (a) Relanex dodaný stav, (b) relanex, vzorek namáhaný po dobu 600 h sinusovým napětím 50 Hz, 5 kV, (c) Relanex, vzorek namáhaný po dobu 300 h pulzním napětím 1 kHz, šířka pulzu 10 μ s.

Na obr. 6 jsou uvedeny životnostní křivky pro testovanou drážkovou izolaci malých točivých strojů. Testovaná izolace se skládá ze tří polyesterových vrstev.



Obr. 6: Příklad vyhodnocených životnostních křivek dle exponenciálního modelu stárnutí.

Jak z grafu vyplývá, exponenciální model je vhodný pro vysoké intenzity elektrického pole. Jak se blížíme k hraniční hodnotě, pod kterou již k elektrickému stárnutí nedochází, začíná tento model selhávat – viz. obr. 6 zelená křivka pro kombinované elektrické a teplotní namáhání. Na tuto křivku proto můžeme použít mocninový model elektrického stárnutí, obr. 7.



Obr. 7: Mocninový model kombinované teplotní a pulzní namáhání.

Na testovaném drážkovém materiálu jsou patrné změny způsobené elektrickým stárnutím, obr. 8 (b)(c). Při pulzním napětí $\pm 2,4$ kV/6 kHz/10 μ s se již objeví viditelné výboje na povrchu testovaného materiálu. Tyto výboje mají jiný charakter než výboje způsobované vysokým napětím 50 Hz. To způsobuje odlišnou degradaci polovodivých vrstev používaných v motorech [7].

Obr. 9 zobrazuje detaily povrchu vzorků pořízené mikroskopem před a během expozic. Patrné jsou zde změny barvy vzorku a místa, kde se mění vnitřní složení materiálu.

Obr. 10 zachycuje laboratoř dielektrických systémů, kde bylo prováděno měření elektrických parametrů testovaných izolačních materiálů a vzorků.

ZÁVĚR

Provedená studie slouží jako základ pro další zkoumání životnosti jednotlivých izolačních systémů pulzně namáhaných. Naměřená data tvoří základ báze znalostí budoucího diagnostického systému pro menší asynchronní stroje používané jako přesné pohony pro výrobní linky. V návaznosti budou testovány speciálně modifikované izolační systémy, které budou zabraňovat zvýšené degradaci izolačního systému vysokofrekvenčním pulzním napětím.

Pro zkoumané materiály je hodnota zkrácení životnosti při pulzním namáhání patrná z naměřených výsledků zobrazených v životnostních křivkách na obr. 6. Studie potvrzuje, že vliv pulzního namáhání na drážkovou izolaci je podobný jako na již dříve sledovanou hlavní izolaci točivých strojů např. [9]. Stárnutí izolačního materiálu je urychleno napětíovou strmostí přiváděných pulzů i hodnotou frekvence. Při vysokofrekvenčním pulzním namáhání má výbojová činnost jiný charakter než při střídavém napětí 50 Hz. Výbojová činnost začíná na nižších hodnotách intenzity elektrického pole a poškozuje izolační materiál na menších vzdálenostech od elektrod.

PODĚKOVÁNÍ

Tento výzkum je podporován výzkumným záměrem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky, MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice.

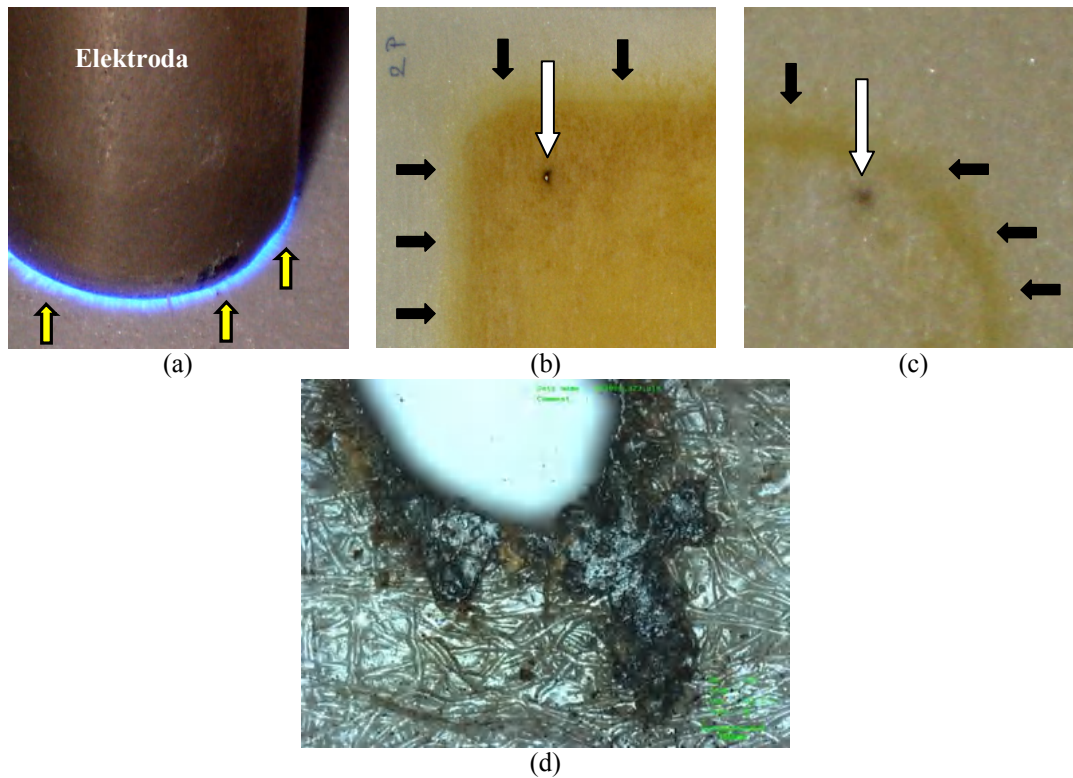
Autor by chtěl poděkovat prof. Ing. Václavu Mentlíkovi, CSc. za dlouhodobou podporu, cenné rady a připomínky.

LITERATURA

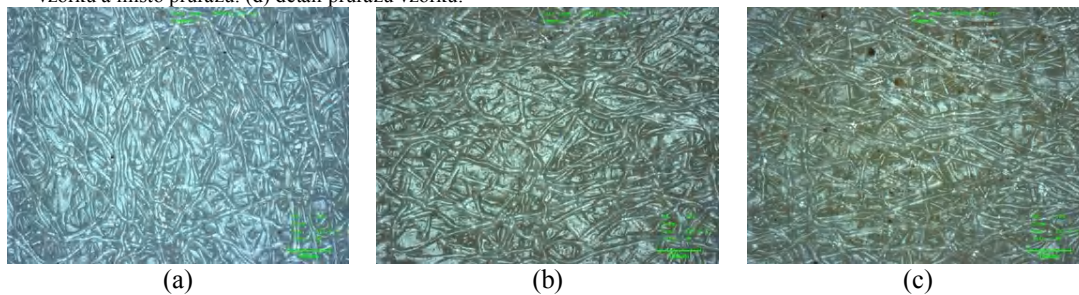
- [1] J. Artbauer, aj., Izolanty a izolácie, ALFA, Bratislava, 1969.
- [2] A. C. Gjørde, Multifactor Ageing Models – Origin and Similarities, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 1, 1997.
- [3] J. Koutský, Degradáční procesy a predikce životnosti, ZČU, FST, ISBN 80-7082-177-9, Plzeň, 1995.
- [4] G. Mazzanti, G. C. Montanari, L. A. Dissado, Electrical Aging and Life Models - The Role of Space Charge, In: IEEE Transaction on

Dielectrics and Electrical Insulation, ISSN 1070-9878, Vol. 12, No. 5, 2005.

- [5] J. Bartoň, V. Boček, F. Matějka, V. Mentlík, J. Pihera, P. Šebík, P. Trnka, Interaktivní diagnostika dielektrik, 84 s., ZČU, FEL, Výzkumná zpráva, Plzeň, 2007.
- [6] E. Gulski, Computer-aided measurement of partial discharges in HV equipment, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 28, No. 6, pp. 969-983, Dec 1993.
- [7] P. Trnka, Interakce izolačních systémů s pulzním namáháním, Disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, 86 s., Plzeň, 2005.
- [8] V. Mentlík, Dielektrické prvky a systémy, Praha, CZ, Technická literatura BEN, 2006.
- [9] V. Mentlík, P. Trnka, J. Pihera, Vývoj vlastností izolantu při pulzním namáhání, Nové směry v diagnostice a opravách elektrických strojů a zařízení, Žilina, EDIS - Žilinská univerzita, s. 35-39, ISBN 80-8070-545-3, 2006.
- [10] G. Jiang, J. Kuang, S. Boggs, Critical parameters for electrical tree formation in XLPE, IEEE Trans. Power. Del., Vol 13, pp. 292-296, 1998.
- [11] B.F. Lalam, H. The-Giam, Pressure effect on the electrical ageing of polyethylen, J. Phys. D: Appl. Phys. 33, L133 – L136, UK, 2000.
- [12] J. P. Crine, E. David, Influence of Mechanical Stresses on Some Electrical Properties of Polymers, In: CEIDP 2005, Nashville, USA, ISBN – 0-7803-9257-4, 2005, pp. 71-74.
- [13] J. P. Crine, Maxwell Stress and Some Electrical Properties of Polymers, In: CEIDP 2005, Nashville, USA, ISBN – 0-7803-9257-4, 2005, pp. 641-644.
- [14] S. Grzybowski, N. Kota, Lifetime Characteristics of Magnet Wires under Multistress Conditions, In: CEIDP 2005, Nashville, USA, ISBN – 0-7803-9257-4, 2005, pp. 605-608.



Obr. 8: Stanovování životnostní čáry – (a) viditelné výboje při krátkodobé zkoušce zvýšeným pulzním napětím $\pm 2,4 \text{ kV}/6 \text{ kHz}/10 \mu\text{s}$ šířka pulzu. (b) detail vzorku stárnutého až do průrazu střídavým napětím $5 \text{ kV } 50 \text{ Hz}$ – degradační změna barvy vzorku a místo průrazu. (c) detail vzorku stárnutého až do průrazu pulzním napětím $\pm 2 \text{ kV}/6 \text{ kHz}/10 \mu\text{s}$ šířka pulzu – degradační změna barvy vzorku a místo průrazu. (d) detail průrazu vzorku.



Obr. 9: Povrch testované drážkové izolace. (a) před expozicemi. (b) vzorek po 3h expozici $180 \text{ }^\circ\text{C}$. (c) vzorek po 8h expozici 5 kV AC .



Obr. 10: Laboratoř dielektrických systémů FEL/KET – ET ZČU Plzeň.