

# STRUKTURNÍ ZMĚNA IZOLAČNÍHO KOMPOZITU

## STRUCTURE CHANGE OF THE INSULATING COMPOSITE

V. Mentlík, P. Trnka, O. Tábořík, J. Pihera

*Katedra technologií a měření, Elektrotechnická fakulta ZČU v Plzni,  
Univerzitní 26, 306 14, Plzeň, tel.: +420 377 634 518, email: [pavel@ket.zcu.cz](mailto:pavel@ket.zcu.cz)*

**Anotace** Moderní pohony s měničem kmitočtu přinesly řadu výhod v řízení motorů. Objevily se však také problémy s vysokofrekvenčními napěťovými pulzy produkovanými měniči kmitočtu. Tyto měniče na svém výstupu produkují napěťové pulzy s vysokou strmostí náběžných hran, které dosahují strmosti až desítky kilovoltů za mikrosekundu. Opakovací frekvence se pohybuje v řádu desítek kilohertz. Tato technologie znamená pokrok v řízení pohonů, zároveň však přináší zvýšenou možnost degradace izolačních systémů motoru a tím snižuje spolehlivost celého pohonu. Článek se zabývá jednou z možných cest jak tento problém řešit. Experimentálně je zde testován materiál s modifikovanou vnitřní strukturou.

**Summary** Modern power electric drives brought advantages in induction motor control. In the same time appeared problems with high frequency square waveform voltage (pulse stress) produced by the voltage converters. Voltage converters produce repetitive pulses with high level of voltage rise fronts (slew rates). Rise fronts attained values of up to tens kilovolts per microsecond and voltage pulse repetition frequency up to some tens of kilohertz. This technology is an advantage for a drive control. Significant is the impact of these voltage waveforms on the motor insulations. Degradation of the main wall insulation can reduce the reliability of the electric motor and whole drive. In this paper is discussed one possible solution. The promising modification in the insulation material structure is presented in the paper.

### 1. ÚVOD

Hlavní izolace točivých elektrických strojů jsou v praxi vystaveny celé řadě degradačních faktorů způsobujících zhoršování jejich izolačních vlastností a mohou způsobit následnou poruchu. Izolační systém jako takový musí splňovat celou řadu náročných kritérií, které jsou dány provozními stavy, působením okolního prostředí a dalšími faktory. Materiály pro hlavní izolační systémy točivých strojů jsou během let stále inovovány. Jejich vlastnosti sledují trendy a potřeby aktuální poptávky a úrovně současného poznání. Jako příklad může být uvedena v minulosti požadovaná vyšší třída teplotní odolnosti. Na základě toho požadavku byly vyvinuty nové vysokoteplotní izolační materiály používané v současné době. V dnešní době je kladen důraz na zvýšení odolnosti izolačních materiálů a systémů při pulzním namáhání, tj. namáhání způsobované napájením motorů z měničů kmitočtu. Negativní důsledky napětí generovaných měniči kmitočtu na izolační materiály jsou již známé. Stále je však hledán takový materiál, který by byl vhodný do těchto podmínek. Jednou z možných cest jak učinit materiál odolnějším je modifikace jeho struktury. Ve vysokonapěťové technice se jedná o tříslůžkové kompozitní materiály zejména pro technologie Resin-rich nebo VPI.

### 2. PULZNÍ NAMÁHÁNÍ

Klíčovým faktorem v problematice pulzního namáhání izolantů je velikost přiloženého napětí a rychlost jeho změny. Zvýšení hodnoty elektrického napětí za jednotku času nazýváme strmost nárůstu elektrického napětí  $SR$  ( $\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ ).

$$SR = \frac{du}{dt} \quad (1)$$

V současné době jsou vyráběny výkonové spínací součástky, s nimiž je možné dosáhnout strmosti řádově desítky  $\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ , což samo o sobě klade vysoké nároky na kvalitu izolačního systému. V praxi se s „čistými“ pulzy na řízených strojích prakticky nesetkáváme. Na napěťové pulzy generované frekvenčním měničem se superponují vysokofrekvenční kmity, na jejichž vznik má kromě dalších parametrů vliv také tvar a strmost náběžné hrany.

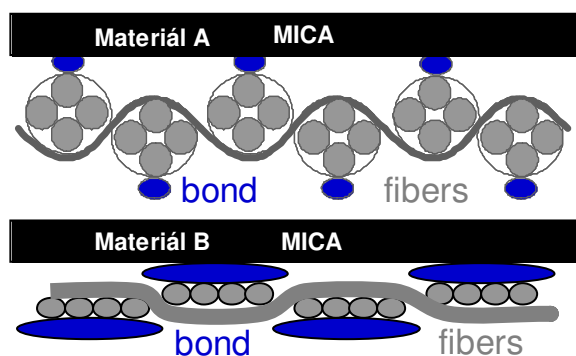
Zvyšováním strmosti nárůstu elektrického napětí zvyšujeme také transienční jevy v kabelu a samotném stroji. Možná dosahovaná přepětí jsou dvou- i třínásobek napětí ve stejnosměrném obvodu měniče. Naopak, pokud je náběžná hrana extrémně omezená (např. při použití filtru typu DP), jsou přepětí i kmity na stroji zanedbatelné.

### 3. MODIFIKACE PROFILU SKLENĚNÝCH PROVAZCŮ V KOMPOZITU

V oblasti izolačních systémů zmiňovaných technologií se kromě klasických postupů zpracování skelných vláken objevují také způsoby nové, spočívající v modifikaci profilu provazců skelných vláken a v odlišné skladbě ve tkanině samotné (viz. obr. 1).

Nová vnitřní struktura materiálu (varianta B) vykazuje při stejném průměru vláken menší tloušťku vrstvy laminátu. Změnou rozvrstvení vláken ve skleněné tkanině se změní i rozvrstvení impregnantu v materiálu, obr. 1. Dochází tak ke zvýšení

homogenity materiálu, což znamená předpoklad lepších elektrických vlastností.



Obr. 1. Řez kompozitním materiálem. Materiál A – konvenční způsob skladby vláken, materiál B – nový způsob.

Fig. 2. Composites material profile. Material A – ordinary roving structure, material B – new structure.

Díky menšímu obsahu mikrodutin by se měla snížit výbojová činnost – jeden z hlavních degračních činitelů vysokonapěťových izolačních systémů.

Tímhle způsobem vyrobený kompozit zajišťuje stejnou mechanickou pevnost, jako kompozit konvenční. Zda se zlepší i elektrické vlastnosti kompozitu a hlavně jeho odolnost při namáhání pulzním napětím je předmětem výzkumu.

#### 4. EXPERIMENT

Ke zkoumání byly vybrány dva druhy skloslídových kompozitů (pojivo 40 % modifikované epoxidové pryskyřice), lišících se pouze provedením nosné složky, jak je naznačeno na obr. 1. V tab. 1. je popsáno označení vzorků.

Tab. 1. Označení zkoumaných materiálů.

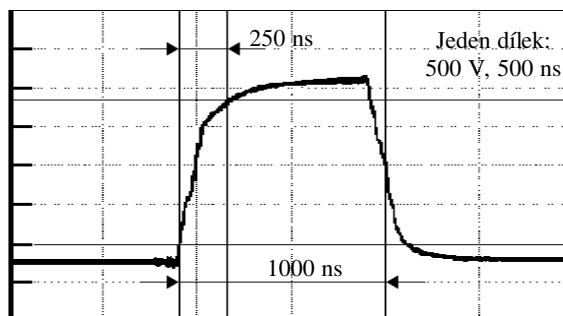
Tab. 1. Specification of evaluated materials.

| Materiál  | Označení |
|---|----------|
| Skloslídový kompozit s konvenčním uložením skleněných vláken    | A        |
| Skloslídový kompozit s novou koncepcí uložení skleněných vláken | B        |

Oba materiály byly exponovány jak sinusovým elektrickým namáháním  $11 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  síťové frekvence, tak i pulzním namáháním (sinusově namáhané - četnost 10, pulzně namáhané - četnost 4 vzorky). Na obr. 2 je zachycen oscilogram jednoho pulzu.

Parametry pulzní deteriorace:

- deteriorační napětí:  $\pm 2 \text{ kV}$
- doba náběžné hrany:  $250 \text{ ns}$
- strmost náběžné hrany:  $16 \text{ kV} \cdot \mu\text{s}^{-1}$
- doba trvání pulzu:  $1 \mu\text{s}$
- frekvence:  $1 \text{ kHz}$



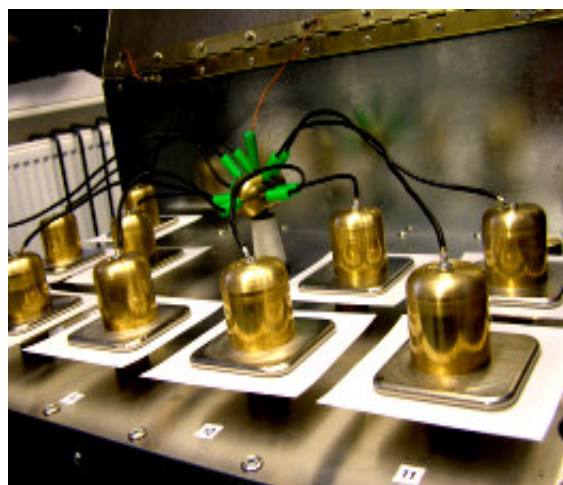
Obr. 2. Tvar napěťového pulzu.  
Fig. 2. Shape of the high voltage pulse.

Za účelem realizace stárnutí sinusovým napětím bylo navrženo a zkonstruováno zařízení umožňující stárnutí vzorků izolace, pohled na přístroj je na obr. 3. Detail chráněného vysokonapěťového prostoru je zachycen na obr. 4.



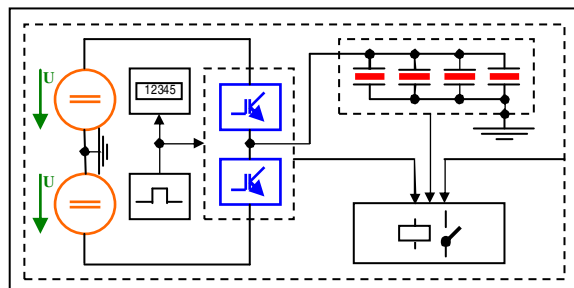
Obr. 3. Zařízení určené pro sinusové namáhání vzorků izolací.

Fig. 3. Appliance for sinusoidal aging.



Obr. 4. Detail vysokonapěťového chráněného prostoru.  
Fig. 4. Detail of high voltage screenroom.

Zařízení pro stárnutí vzorků vysokonapětovým pulzním napětím je schematicky znázorněno na obr. 5. Z důvodu zamezení nežádoucí emise elektromagnetického rušivého pole byly vzorky umístěny do stíněného prostoru.



Obr. 5. Blokové schéma laboratorního systému pro pulzní namáhání.

Fig. 5. Diagram of pulse voltage aging system.

Stíněný prostor byl opatřen nucenou ventilací, s odváděním vzniklých plyných zplodin. Uvnitř byly umístěny elektrody pro stárnutí testovaných vzorků. Elektrody spolu s pohledem do stíněného prostoru jsou zachyceny na obr. 6.



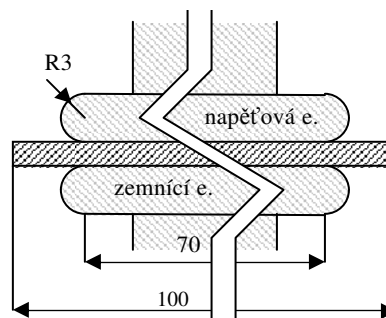
Obr. 6. Celkový pohled na vysokonapětový box pro pulzní namáhání.

Fig. 6. High voltage box for pulse stress aging.

Elektrické namáhání probíhalo na plošných vzorcích testovaných materiálů (o tloušťce 0,5 mm a ploše 100×100 mm) v elektrodovém systému, který byl použit stejný pro sinusové i pulzní namáhání (napětová i zemnicí elektroda o rozměrech 70×70 mm, na okrajích rádius 3 mm pro potlačení okrajových jevů) je znázorněn na obr. 7. Na základě vstupních testů a předchozích zkušeností byly stanoveny doby expozice jednotlivých souborů vzorků na 8 hodin. Vždy po uplynutí tohoto času bylo provedeno měření sledovaných elektrických diagnostických veličin (viz. níže) určujících okamžitý izolační stav.

Sledované elektrické parametry: absorpční a resorpční proudy, průběhy závislosti ztrátového činitele a závislosti velikosti zdánlivého náboje ČV

na přiloženém napětí, zapalovací a zhašecí napětí částečných výbojů, ztrátový činitel a izolační odpor.

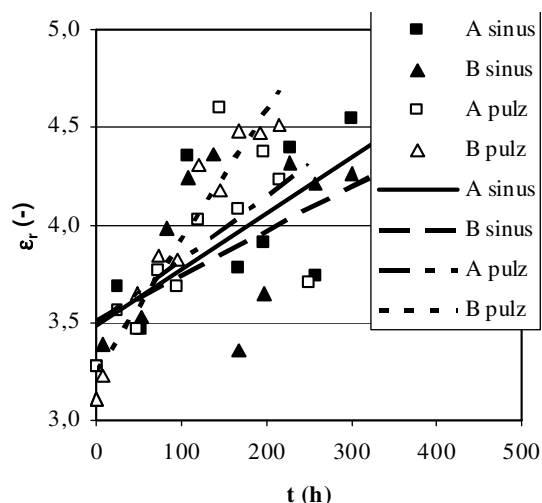


Obr. 7. Elektrodový systém.

Fig. 7. The electrode system.

#### 4. VÝSLEDKY

Vzájemným porovnáváním trendů zkoumaných veličin, ale i jejich konkrétních hodnot v určitých časových intervalech během namáhání, byla zjištěna paralela mezi výrazným nárůstem relativní permitivity  $\epsilon_r$  (Obr. 7) a zvýšenou aktivitou částečných výbojů.



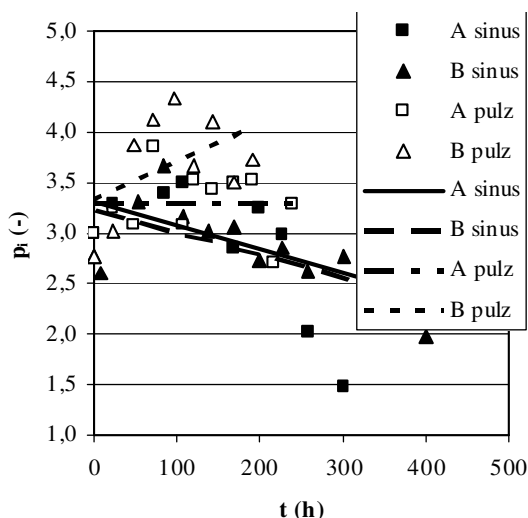
Obr. 7. Relativní permitivita  $\epsilon_r$  v závislosti na čase.

Fig. 7. Relative permittivity  $\epsilon_r$  time dependence.

Při pulzním namáhání dochází ke zvýšené aktivitě výbojové činnosti v porovnání se sinusovým namáháním. Vyšší frekvence změny vektoru intenzity elektrického pole a vyšší strmosti náběžných hran na pulzně zatěžovaných vzorcích se projeví větším nárůstem permitivity. To lze vysvětlit zvyšováním kapacity (přímá úměra s relativní permitivitou) vlivem vzniku drobných vodivých cest uvnitř materiálu, které jsou tvořeny produkty intenzivní výbojové činnosti v nehomogenitách.

Při měření polarizačního indexu  $p_i$  se projevil jeho nárůst na vzorcích namáhaných pulzním

napětím (Obr. 8). Jako nejlepší se v tomto aspektu jevil materiál B.

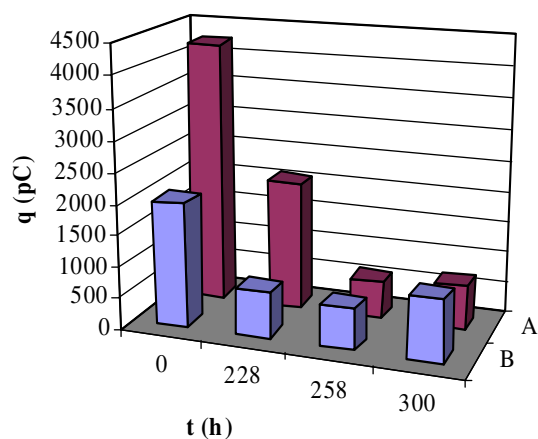


Obr. 8. Polarizační index  $p_i$  v závislosti na čase deteriorace.

Fig. 8. Polarization index  $p_i$  time dependence.

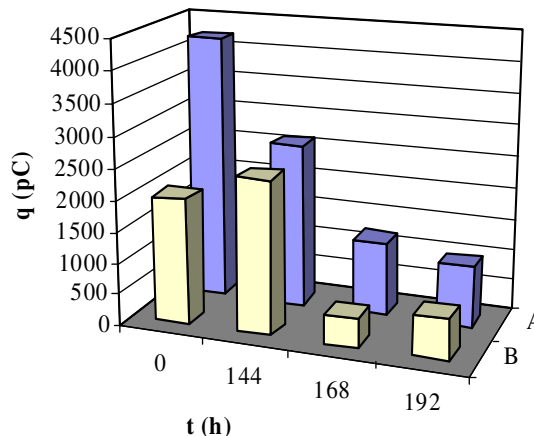
Růst polarizačního indexu při pulzním namáhání lze vysvětlit vysušováním materiálu (při pulzním namáhání dochází k zahřívání vzorků).

V případě pulzního namáhání dochází k rychlejšímu poklesu zdánlivého náboje  $q$  (Obr. 9 a 10) než v případě sinusového namáhání. Materiál B při pulzním namáhání projevuje lepší vlastnosti, tj. menší aktivitu výbojové činnosti. Menší aktivita výbojové činnosti se projevila zejména při vstupních měření. Při namáhání sinusovým napětím se projevily stejný trend.



Obr. 9. Zdánlivý náboj  $q$  v závislosti na čase deteriorace, sinusově exponované soubory.

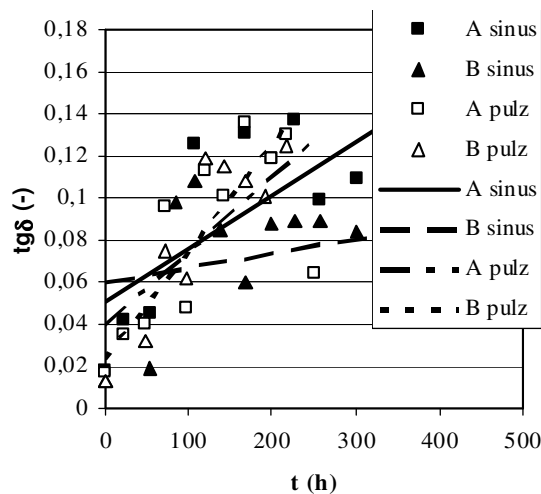
Fig. 9. Time dependance of Apparent charge  $q$ , sinusoidal stress.



Obr. 10. Zdánlivý náboj  $q$  v závislosti na čase deteriorace, pulzně exponované soubory.

Fig. 10. Time dependance of apparent charge  $q$ , pulse stress.

V souvislosti s tvorbou produktů výbojové činnosti můžeme hovořit o tzv. „počátečním zahořování“, dochází ke zlepšování vlastností materiálu (výbojová činnost), které představuje období vanové křivky používané při analýze poruch. Avšak stoupající trendy ztrátového činitele  $tg\delta$  (Obr. 11) již poukazují na probíhající degradaci.

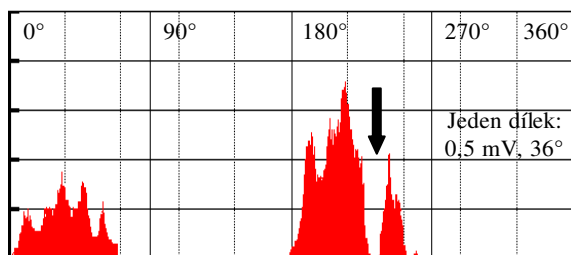


Obr. 11. Ztrátový činitel  $tg\delta$  v závislosti na čase deteriorace.

Fig. 11. Dissipation factor  $tg\delta$  time dependence.

Lepších výsledků při sledování degradace pomocí částečných výbojů získáme, sledujeme-li fázové rozložení částečných výbojů na sinusovce přiváděného testovacího napětí. Degradace se zde projeví tak, že se při záporné periodě testovacího napětí přerušuje jinak „spojitá“ výbojová činnost při nárůstu napětí na záporné maximum (Obr. 12).





Obr. 12: Fázové rozložení výskytu částečných výbojů - mírně degradovaný vzorek

Fig. 12: Phase dependence of partial discharges appearance – slightly aged sample.

## 5. ZÁVĚR

Výsledky experimentu přinesly zajímavé průběhy sledovaných elektrických parametrů. Předpokládané vývoje se potvrdily u namáhání sinusovým napětím, kde jsou již časové závislosti těchto parametrů dobře známé. V grafech naměřených na vzorcích stárnutých pulzním napětím se dle předpokladu začala prokazovat vyšší rychlost degradace. Jak je patrné z grafů, lepší elektrické vlastnosti při sinusovém namáhání vykazuje modifikovaný materiál B. Prokázala se tedy vyšší kvalita nové koncepce uložení vláken v kompozitním izolantu. Při pulzním namáhání zatím nebylo dosaženo výraznějšího stupně degradace vzorků, proto se výrazněji rozdíl mezi koncepcí A a B neprojevil. Zajímavé bude podrobit v budoucnu materiály tohoto typu rozsáhlejšímu zkoumání, tj. zahrnout do oblasti diagnostikování i metody termické analýzy [9], a přispět tak výsledky do oblasti izolantů využívaných v technice pohonů řízených pulzní modulací.

## Poděkování

Tato práce vznikla za podpory výzkumného záměru Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České Republiky, MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice.

## LITERATURA

[1] Mentlík V., Pihera J., Tábořík O., Trnka P.: *Sledování změn výbojové činnosti namáhaných variant izolačního systému*, In Diagnostika '07, ZČU, Plzeň, 2007, ISBN 978-80-7043-557-1

- [2] Trnka P.: *Interakce izolantů s pulzním namáháním*, [disertační práce], ZČU, FEL, Plzeň, 2005.
- [3] Espino-Cortes F. P., Jayaram S. H.: *Effectiveness of Stress Grading Coatings on Form Wound Stator Coil Groundwall Insulation Under Fast Rise Time Pulse Voltages*, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2005.
- [4] Fabiani D., Montanari G. C., Cavalini A., Mazzanti G.: *Relation Between Space Charge Accumulation and Partial Discharge Activity in Enamelled Wires Under PWM-like Voltage Waveforms*, *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol. 11, No. 3, June 2004.
- [5] Grzybowski, S.; Trnka, P.; Fulper, J.: *Aging of High Voltage Cables by Switching Impulse*, In *Electric Ship Technologies Symposium, 2007, ESTS '07*, IEEE, Arlington, VA, 2007. s.165-168, ISBN 1-4244-0947-0.
- [6] Jankovský, V., Michalík, J.: *K otázce kvality a spolehlivosti vozidlových trakčních transformátorov*, *Práce a štúdie VŠDS*, č.9/1981, str. 43-50.
- [7] Gutten, M., Zahoranský, R., Michalík, J., Beňová, M.: *Automatizácia skúšobných meraní transformátorov s využitím meracieho systému*, *Odborný časopis pre elektrotechniku Elektro*, č. 5, květen 2005.
- [8] Vojenčíak, M., Beran, J.: *Izolačný systém elektrotechnických zariadení pri nízkych teplotách*, *zborník medzinárodnej konferencie „DISEE 2006“*, Častá - Píla 2006, str. 186-189, ISBN 80-227-2470-X.
- [9] Polanský, R.: *The optimalization of TMA temperature program for diagnostic of insulation materials based on mica* (In Czech), In *DISEE 2004*, Bratislava, Slovak University of Technology, 2004, s. 154-157, ISBN 80-227-2110-7.
- [10] Polanský, R.: *Correlation between Electric and Structural Methods of Diagnostics*, (In Czech) In *Elektrotechnika a informatika 2004*, Plzeň, Západočeská univerzita, 2004, s. 71-74. ISBN 80-7043-300-0.