

Martin Pajtáš, Juraj Kurimský, Beáta Stehlíková, Roman Cimbala

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

## Štatistická analýza prierzneho napätia polypropylénu počas urýchleného starnutia

**Abstrakt.** Publikácia sa venuje experimentálnemu meraniu a porovnaniu prierzneho napätia dvoch typov biaxiálne orientovanej polypropylénovej fólie počas troch etáp kombinovaného elektrotepelného starnutia. Každá etapa obsahovala 22 ks fólie, pričom maximálna doba starnutia bola štyri týždne (667 hodín). Namerané hodnoty boli štatisticky vyhodnotené pomocou Weibullovoho rozdelenia.

**Kľúčové slová:** polypropylén, urýchlené starnutie, prierzné napätie, Weibullovo rozdelenie.

**Abstract.** This publication investigates the experimental measurements and comparison of breakdown voltage of two types biaxially oriented polypropylene films during the three stages of accelerated electro-thermal aging. Every stage contained 22 samples and maximal aging time was four weeks (667 hours). The measured values were statistically evaluated by the Weibull distribution.

**Keywords:** polypropylene accelerated aging, breakdown voltage, Weibull distribution.

### Úvod

S rozvojom elektrotechnického priemyslu, ktorý v súčasnosti zažívame, je spojený aj rozvoj a vývoj dielektrických a izolačných materiálov. Ako perspektívny materiál pre tieto účely sa ukazuje polypropylén, ktorý sa vďaka schopnosti uskladniť veľké množstvo energie [1] využíva napríklad ako dielektrikum v kondenzátoroch. Dôležitým údajom pri dimenzovaní týchto systémov je hodnota prierzneho napätia, a to aj v priebehu životnosti materiálov. Podstatnou časťou meraní prierzneho napätia je aj vyhodnocovacia metóda, ktorá by mala podať čo najlepší obraz o dosiahnutých výsledkoch.

### Meranie prierzneho napätia

Je to proces, pri ktorom sa meraná vzorka vloží do elektródového systému a zvyšuje sa priložené napätie až do momentu, kým nenastane prierz. Napätie môže byť buď striedavé alebo jednosmerné. V tomto experimente bolo použité jednosmerné napätie, nakoľko problematika DC prierzneho napätia je menej rozvinutá a v súčasnosti sa polypropylén využíva v jednosmerných aplikáciách čoraz častejšie.

Samotné zvyšovanie napätia môže prebiehať viacerými spôsobmi : lineárnou zmenou napätia (s presne určenou rýchlosťou rastu napätia) [2], lineárnou zmenou s rôznymi rýchlosťami (od určitej hodnoty napätia sa rýchlosť nárastu zníži kvôli presnosti merania) [3] alebo skokovou zmenou. Pri meraní sa napätie zvyšovalo skokovo, s napäťovým krokom 10 V.

### Weibullovo rozdelenie

Ide o štatistickú metódu vyhodnocovania experimentálnych údajov v prípadoch, keď bezporuchovosť závisí od veku respektíve od počtu odpracovaných hodín materiálu. Vyjadrenie náhodnej premennej – doby do poruchy môže byť realizované pomocou funkcie hustoty pravdepodobnosti alebo pomocou distribučnej funkcie [4]. Dôležité pre určenie týchto funkcií sú tri parametre Weibullovoho rozdelenia : parameter shape (ovplyvňuje priebeh funkcie hustoty pravdepodobnosti), parameter scale (jeho funkcia je zmena časovej mierky; nadobúda hodnotu napätia, pri ktorej došlo k prierzmu pri 63,2 % vzorkách) a parameter location (udáva minimálnu dobu, po ktorej nastane porucha) [4]. V súčasnosti sa však pri vyhodnocovaní experimentov tohto typu využíva dvojparametrové Weibullovo rozdelenie, a teda parameter location sa zanedbáva [3][5].

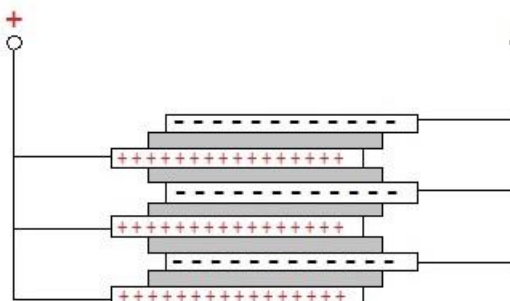
### Charakterizácia materiálu

Materiál pre účely merania nám bol poskytnutý priamo od výrobcu. Jednalo sa o dva typy biaxiálne orientovanej polypropylénovej fólie (BOPP), s hrúbkou 6,5  $\mu\text{m}$  ( $\pm 3\%$ ). Prvý typ, ďalej označovaný ako sample 1 (resp. S1), sa vyznačoval viac kryštalickejšou štruktúrou ako druhý typ, ďalej označovaný ako sample 2 (resp. S2).

### Príprava vzoriek a realizácia urýchleného starnutia

Keďže súčasťou experimentu bolo aj porovnanie oboch materiálov, z každého typu boli pripravené 4 sady vzoriek (prvá sa pre referenčné meranie a tri sady pre jednotlivé etapy starnutia), pričom každá sada obsahovala 22 ks vzoriek. Veľkosť vzoriek bola zvolená, vzhľadom na použitý elektródový systém, na 70 mm x 70 mm.

Aby boli pri starnutí čo najviac simulované reálne namáhania pôsobiace na materiál v praxi, bolo zvolené kombinované elektrotepelné starnutie realizované formou doskového kondenzátora. Pripravené vzorky BOPP boli vložené medzi elektródy, ktoré boli tvorené hliníkovou fóliou. Rozmer týchto elektród bol zvolený na 80 x 60 mm aby nedošlo k spojeniu elektród opačných polarít (elektrické oddelenie zabezpečovala vzorka materiálu medzi elektródami). Celkové usporiadanie je načrtnuté na obrázku 1, kde sivou farbou je označená polypropylénová fólia.



Obr. 1 Konštrukcia doskového kondenzátora

Takto navrstvené doskové kondenzátory boli vložené do teplotzdušnej pece a elektródy boli pripojené na jednosmerné napätie. Teplota starnutia bola zvolená na 65 °C a napätie na 125 V. Díky jednotlivých etáp sú znázornené v tabuľke 1.

Tab. 1 Etapy urýchleného starnutia

	Dátum ukončenia	Doba starnutia
Etapa 1	10.3.2016	164 hodín
Etapa 2	17.3.2016	335 hodín
Etapa 3	31.3.2016	667 hodín

**Priebeh merania**

Meranie bolo realizované pomocou zariadenia pre testovanie izolácie UNILAP ISO 5kV, ktorý bol pomocou USB zbernice pripojený k počítaču, obr.2. Elektródový systém pozostával z vrchnej elektródy (meď, priemer 48 mm) a spodnej elektródy (oceľ, priemer 54 mm). Cez počítač bolo nutné zadať tri vstupné parametre: počiatočné napätie, napäťový krok a koncové napätie. Pri meraní bolo použité počiatočné napätie 200 V, s krokom 10 V (minimálny možný), pričom koncové napätie bolo nastavené vždy na maximálnu hodnotu 5000 V. Nakoľko použité elektródy boli predchádzajúcimi meraniami mierne poškodené, pre určenie vplyvu na výsledky merania bola počas merania realizovaná zhluková analýza (bola zaznamenávaná poloha prerazu každej vzorky).

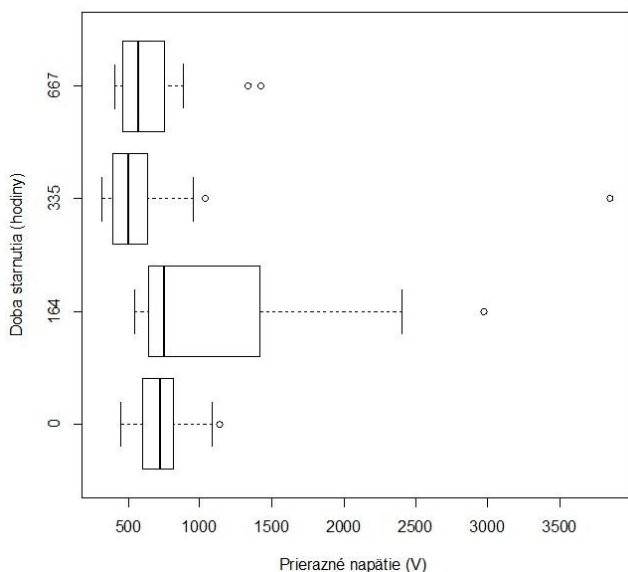


Obr. 2 Pracovisko

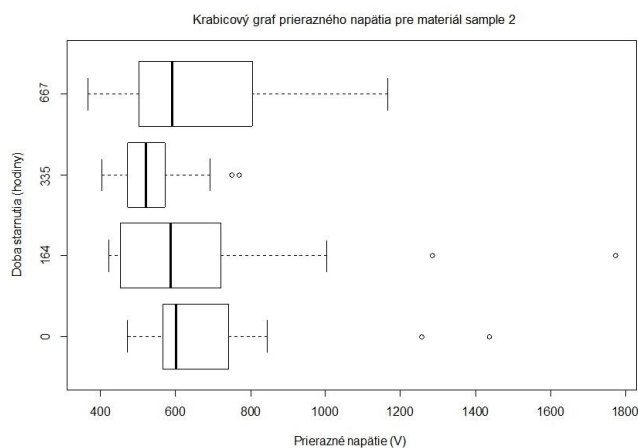
**Výsledky merania**

Výsledné hodnoty prierazného napätia pre oba materiály sú spracované pomocou krabicových grafov na nasledujúcich obrázkoch 3 a 4.

Krubicový graf prierazného napätia pre materiál sample 1

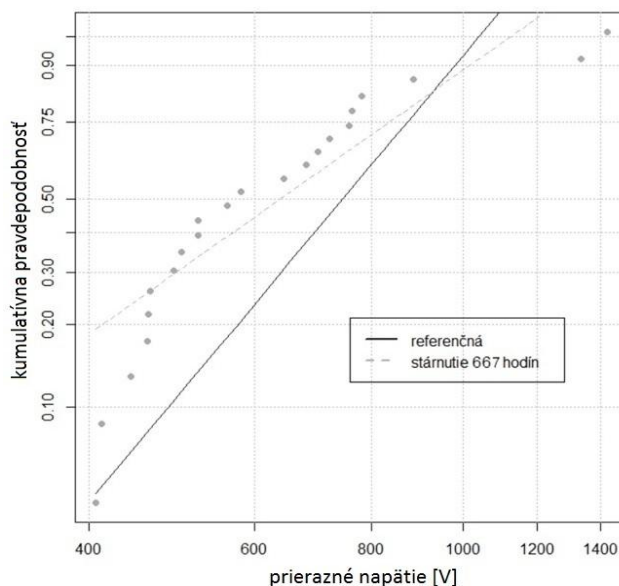


Obr. 3 Krubicový graf prierazného napätia – sample 1

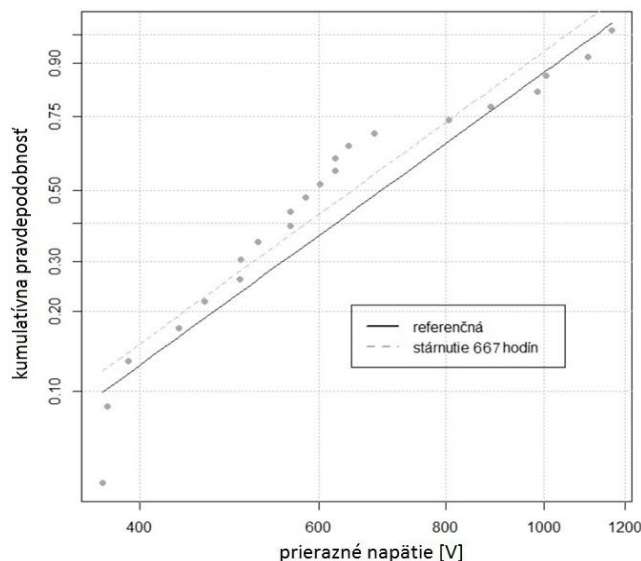


Obr. 4 Krubicový graf prierazného napätia – sample 2

Z týchto grafov je možné usúdiť, že materiál sample 1 dosahoval lepšie výsledky pri všetkých etapách starnutia. Celkovo najvyššia hodnota prierazného napätia bola nameraná pri dobe starnutia 164 hodín a materiály sample 1, je však nutné podotknúť, že pri tejto sade sme dosahovali aj najväčší rozptyl nameraných hodnôt.



Obr. 5 Weibullov pravdepodobnostný graf – sample 1

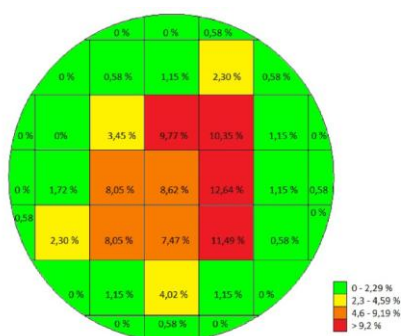


Obr. 6 Weibullov pravdepodobnostný graf – sample 2

## Diskusia

Na základe nameraných výsledkov môžeme konštatovať lepšie elektrické vlastnosti materiálu sample 1, teda platí, že pre aplikácie PP fólie, ktoré sú vystavené elektrotepelnému namáhaniu je vhodnejšia kryštalickejšia štruktúra materiálu. Najlepšie výsledky však nedosiahla referenčná sada vzoriek ale etapa, ktorá bola vystavená urýchlenému starnutiu v dĺžke 164 hodín. Týmto bol potvrdený jav typický pre materiály spadajúce do skupiny polymérov, keď nastane mierne zlepšenie elektrických parametrov po krátkom vystavení vyšším teplotám. Pri ďalšom vystavení elektrotepelnému stresu dochádzalo ku zhoršeniu elektrických vlastností.

Na základe Weibullových grafov môžeme konštatovať, že počas merania bol dosahovaný vysoký rozptyl nameraných hodnôt. Ten mohol mať za následok elektródový systém, ktorý vykazoval známky používania. Jeho vplyv na meranie sme dokázali uhlukovou analýzou uobrazenu na obrázku 7. Je možné pozorovať, že v miestach s vyšším poškodením dochádzalo k prirazom častejšie.



Obr. 7 Zhluková analýza elektródového systému

## Záver

Vykonaným experimentálnym meraním sa nám podarilo potvrdiť vhodnosť materiálov s kryštalickejšou štruktúrou pre aplikácie vystavované elektrotepelnému namáhaniu. Taktiež sa nám podarilo dokázať, že materiály zo skupiny polymérov dosahujú najlepšie elektrické vlastnosti po

krátkom vystavení vyšším teplotám, kedy dôjde k tzv. Vytvrdeniu štruktúry.

Meraním sme rovnako potvrdili vplyv elektrotepelného namáhania na hodnotu prieraznej pevnosti PP fólie. Pri dlhodobom namáhaní materiálu popísaným spôsobom dochádza k výraznému zníženiu hodnoty prierazného napätia.

## Podakovanie

Túto prácu podporili: Vedecká grantová agentúra MŠVVaŠ SR a SAV projektami VEGA č. 1/0311/15, VEGA č. 2/0141/16.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0438.

## Literatúra

- [1] M. Bramouille, J. P. Marret, P. Michalczyk, D. R. de Cervens, "Ultimate properties of the polypropylene film for energy storage capacitors," Pulsed Power Plasma Science, 2001. PPS-2001. Digest of Technical Papers, Las Vegas, NV, USA, 2001, pp. 413-416 vol.1. doi: 10.1109/PPS.2001.1002080
- [2] A. Adoum, Accelerated AC degradation of impregnated PP films. In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995 č. 6, s. 1075-1082.
- [3] I. Rytouoto, K. Lahti, M. Karttunen, M. Koponen, Large-area dielectric breakdown performance of polymer films - part I: measurement method evaluation and statistical considerations on area-dependence. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. apríl 2015. s. 689-700.
- [4] R. Novotný, Weibullovo rozdelení při analýzách bezporuchovosti [online], Brno : Elektorevue, 2002. [cit. 2016-4-21]. Dostupné na internete : <<http://www.elektorevue.cz/clanky/02017/index.html>>
- [5] R.A. Schlitz, K. Yoon, L.A. Fredin, Y. Ha, M.A.Ratner, T.J. Marks, Weibull Analysis of Dielectric Breakdown in a Self-Assembled Nanodielectric for Organic Transistors. The Journal of Physical Chemistry Letters. 18. november 2010;1(22):3292-7.

## Autori:

Martin Pajtáš, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [martin.pajtas.2@student.tuke.sk](mailto:martin.pajtas.2@student.tuke.sk)

Juraj Kurimský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [juraj.kurimsky@tuke.sk](mailto:juraj.kurimsky@tuke.sk)

Beáta Stehliková, Ústav riadenia a informatizácie výrobných procesov, Fakulta baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológií Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [beata.stehlikova@tuke.sk](mailto:beata.stehlikova@tuke.sk)

Roman Cimbala, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [roman.cimbala@tuke.sk](mailto:roman.cimbala@tuke.sk)