

Roman Cimbala, Lukáš Kruželák, Samuel Bucko, Juraj Kurimský

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

## Model dielektrika pre vonkajšie izolátory

**Abstrakt.** Tento príspevok sa zaoberá problematikou sledovania zmien vlastností izolátorov pre vonkajšie použitie. Je vyhodnocovaný vplyv externých faktorov, ktoré pôsobia na izolátor pri jeho nasadení v prevádzke. Je analyzované nielen hľadisko vyhodnocovania kvality izolácie posudzovaním zmien v jej elektrofyzikálnej štruktúre, ale v úvode je diskutovaný aj vplyv časovej hodnoty financií potrebných na vykonávanie diagnostických a profylaktických zásahov. V článku je popísaný experiment pre získanie zvolených kvalitatívnych parametrov popisujúcich stav povrchu izolačného systému vonkajšieho izolátora. Sú vyhodnotené ich frekvenčné závislosti pre sériový a paralelný model dielektrika.

**Abstract.** This contribution deals with the monitoring of the changes in the properties of insulators for outdoor use. It is assessed the impact of external factors that affect an insulator for his deployment in service. It is analysed not only insulation quality by the assessment of changes in the electro-physical structure, but also the effect of the time value of funds required to carry out the diagnostic and prophylactic interventions is discussed in the introduction. The article describes an experiment for obtaining the selected qualitative parameters describing the condition of the outer surface of the insulating insulator. They are evaluated according to their frequency dependence in the serial and parallel dielectric models.

**Kľúčové slová:** vonkajší izolátor, náhradný model dielektrika, kapacita, činiteľ dielektrických strát.

**Keywords:** outside insulator, dielectric equivalent model, capacity, dissipation factor.

### Úvod

Z dôvodu neustále rastúceho dopytu po elektrickej energii je zaistenie spoľahlivej a cenovo efektívnej prevádzky prenosovej a distribučnej sústavy zložitá úloha, ktorú musí elektroenergetika spĺňať. Vzhľadom na charakter elektroenergetických systémov je možné ich považovať za sériovo radený spoľahlivostný model. Porucha ktorejkoľvek bázovej časti má za následok obmedzenie alebo aj prerušenie ich činnosti.

Najdôležitejšou a zároveň najcitlivejšou časťou týchto systémov z hľadiska prevádzky je ich izolačný systém. Jeho porucha, t.j. dosiahnutie hraničného stavu, ovplyvňuje prevádzkyschopný stav nielen špecifického zariadenia, ale v dôsledku technologického prepojenia strojov aj funkčnosť celého výrobného procesu.

Jedným z opatrení, ktoré sa v poslednej dobe zásadným spôsobom presadili, je výmena keramických izolátorov vonkajších vedení za izolátory na báze polymérov alebo silikónových materiálov. Stabilita hydrofóbných vlastností polymérovej izolácie [1-4], najmä vo veľmi znečistenom prostredí [5, 6], ich nízka hmotnosť a jednoduchá inštalácia, rovnako aj podstatné výhody v ich konštrukcii a pri ich výrobe, sú kľúčové prvky, ktoré podporujú náhradu tradičnej keramiky novými materiálmi [5]. Avšak obmedzené prevádzkové skúsenosti z nasadenia izolátorových reťazcov tvorených polymérovými izolátormi a nutnosť, aby zodpovedali vlastnostiam keramických či sklenených izolátorov [8], viedla k veľkému množstvu štúdií o mechanizmoch starnutia polymérovej izolácie [7-17]. Na prekonanie týchto ťažkostí bolo potrebné analyzovať staré a vypracovať nové diagnostické techniky pre vyhodnocovanie a monitorovanie stavu izolátorov [18-20]. Výpovedeschopnosť diagnostických metód, ktoré sú v súčasnosti k dispozícii na posúdenie starnutia izolátora, je nesporná. Tie sú založené na optickej, chemickej, elektrickej alebo mechanickej báze. Avšak pri ich nasadení v praxi vyvstáva dôležitá otázka, ktorá sa týka potenciálu týchto metód pre efektívnu správu pri prevádzke nasadených izolátorov, a to v rámci nástrojov pre celkovú starostlivosť o zariadenia, využívaných najmä manažmentom ich prevádzkovateľa alebo vlastníka. Odpoveď na túto otázku spočíva v pochopení:

- procesov starnutia polymérnych izolácií,
- režimov porúch, ktoré môžu nastať,

- potenciálu dostupných diagnostických techník,
- potenciálu využiteľných diagnostických techník pre inžinierske siete.

Pre splnenie vyššie uvedených úloh bol definovaný päťvrstvový model vytvárajúci rámec pre prepájanie vedomostí o starnutí izolácie s rozhodovaním v rámci asset manažmentu [21,22]. Tento model je nástroj, ktorý poskytuje správcovi aktív, inžinierom a vedcom spoločnú platformu. Na jej základe je možné identifikovať potrebný tok informácií medzi jednotlivými vrstvami modelu a odhaliť tak prípadné chýbajúce informácie. Definovaný model je všeobecný nástroj, ktorý nie je špecificky zameraný na jednotlivé časti elektrizačnej sústavy či konkrétneho izolačného systému. Preto môže byť aplikovaný napríklad na káble, transformátory, či prenosové alebo distribučné vedenia. Vo všeobecnosti môže tento model poskytnúť platformu pre zber a spracovanie informácií o monitorovacích metódach a o mechanizmoch starnutia v rámci určitej technológie. Cieľom je vytvoriť efektívny nástroj pre správu napríklad aj kompozitných izolátorov. Efektívna správa aktív je v prípade keramických a kompozitných vonkajších izolátorov podmienená dobrým porozumením procesov starnutia a z pohľadu financií účelným, nákladovo efektívnym uplatnením monitorovacích techník.

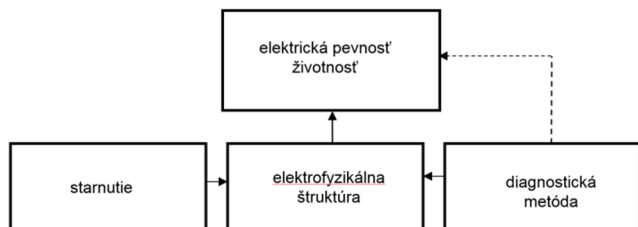
### Určenie stupňa degradácie

Diagnostika stavu izolačných systémov elektrotechnických zariadení sa zameriava na včasné odhalovanie zdrojov možných porúch, resp. slabých miest systému a zvyšuje tým spoľahlivosť a bezpečnosť.

Ďalšou oblasťou, pre ktorú je možné exaktnšie vyčísliť finančné úspory, je oblasť generálnych opráv a údržby izolačných systémov veľkých vn a vvn strojov točivých aj netočivých. Tu je možné zaradiť nielen jednotkovo investične náročné zariadenia, ale je potrebné uvažovať aj situáciu, pri ktorej je jednotková cena zariadenia siete nižšia, avšak počet nasadených zariadení do prevádzky je značne vysoký. Vonkajšie izolátory sú jedným druhom takýchto zariadení.

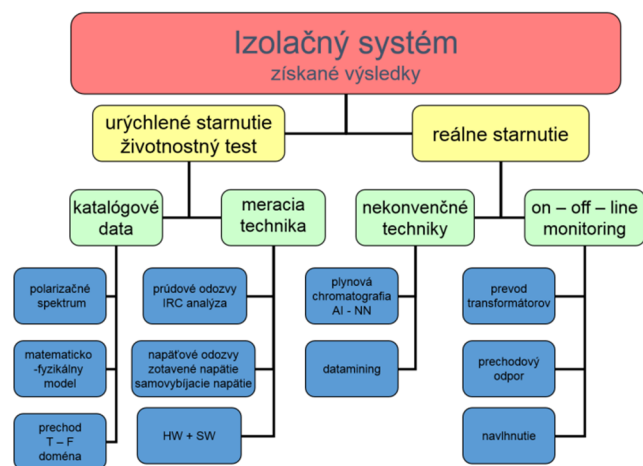
Dnešná úroveň poznatkov v tomto odbore neumožňuje jednoznačne stanoviť zvyškovú dobu životnosti skúmaného izolačného systému. Preto výrobcovia predpisujú výmenu starého izolačného systému po uplynutí definovanej doby

prevádzky (samozrejme, ak porucha nenastane skôr). Ak však sú k dispozícii diagnostické metódy s vysokou účinnosťou a presnosťou predpovedania zvyškovej životnosti izolácie, potom, ak je to technologicky a konštrukčne možné, nedochádza k výmene celého systému po uplynutí výrobcom predpísaného času, ale až po dobe, ktorá je určená na základe objektívne zisteného stavu izolácie. Vzťah medzi starnutím, štruktúrou a diagnostikou je znázornený na obr. 1.



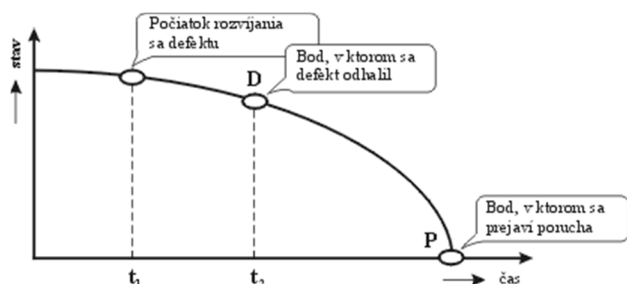
Obr.1. Vzťah medzi starnutím, štruktúrou a diagnostikou

Tento prístup má evidentný potenciál pre úsporu značných finančných nákladov. Pre správcov zariadení je preto výhodné, ba nutné poznať aktuálne uvedené kvalitatívne parametre a mať k dispozícii časové trendy pre odhad ich budúcich hodnôt.



Obr.2. Diagnostické metódy pre monitorovanie starnutia izolačného systému

Dostupné diagnostické metódy pre monitorovanie starnutia izolačného systému sú na obr. 2. Je potrebné uviesť, že nie je možné dostupnými diagnostickými postupmi odhaliť defekt v okamžiku jeho vzniku v čase  $t_1$ . Jeho prejav je možné odhaliť v zmene elektrofyzikálnej štruktúry až vtedy, keď sa táto zmena prejaví na úrovni citlivosti diagnostickej metódy. Uvedená skutočnosť je zobrazená na obr. 3.



Obr.3. Detekovateľnosť poruchy v čase

### Degradačné vplyvy pôsobiace na vonkajšie izolátory

Na vonkajších izolátoroch sa vyskytujú dve základné triedy porúch. Ak sa jedná o mechanickú poruchu, predčasná fatálna mechanická porucha ihneď po inštalácii je zvyčajne pripisovaná výrobné chybe. Oveľa lepšie spôsoby spracovania kovov používaných pri výrobe izolátora majú za následok zníženie počtu prípadov ich havárie po inštalácii na prijateľnú úroveň [23].

V dlhšom časovom horizonte, mechanická porucha môže tiež viesť k závažnému narušeniu povrchov izolácie, čo má za následok ich degradáciu a korózne praskanie jadra vystuženého sklenenými vláknami. Mechanizmy, ktoré vedú k závažnej erózii, sú zvyčajne z dôvodu elektrického namáhania a vplyvom okolitého prostredia, t.j. elektrický oblúk alebo výbojová činnosť.

Rovnako závažná je aj elektrická porucha. V praxi to znamená, že pravdepodobnosť preskoku po povrchu izolátora je príliš vysoká, a tak priamo vplyva na spoľahlivosť elektroenergetickej siete. K tejto situácii dochádza v dôsledku zvýšeného zvodového prúdu, často po strate hydrofóbnosti, s výsledným vysokým výskytom spomínaného preskoku po povrchu izolátora. Ďalšie elektrické poruchy sú dôsledkom vytvorenia vnútorných elektricky vodivých dráh na rozhraní izolačného materiálu a jadra v dôsledku erózie povrchu a prenikania vlhkosti smerom k jadrú. Výsledkom týchto vplyvov je mechanická porucha izolátora.

Podľa [24] degradačné vplyvy v postupujúcom čase môžu mať nasledovný charakter:

- UV starnutie + poveternostný vplyv,
- zníženie hydrofóbnosti,
- zvýšenie intenzity elektrického poľa v lokálnych oblastiach, napr. rast a spájanie vodných kvapiek na povrchoch izolátorov,
- koróna a elektrické výboje,
- kumulatívne chemické poškodenie,
- zvýšenie elektrickej vodivosti resp. unikajúceho prúdu,
- výboje po povrchu,
- zvýšená pravdepodobnosť preskoku,
- erózia izolácie,
- zníženie pevnosti jadra,
- mechanická porucha.

### Monitorovanie dielektrických veličín kvality povrchu polymérového izolátora

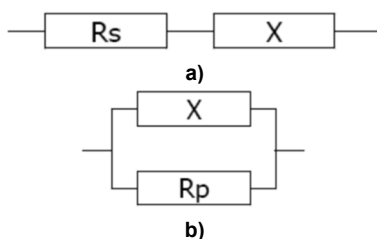
Pre meranie frekvenčnej závislosti dielektrických veličín povrchu vonkajšieho izolátora bol navrhnutý a realizovaný experiment, v ktorom sa merali parametre elektrofyzikálneho náhradného modelu izolačného systému. Model je popísaný nižšie.

Testovaným objektom bol závesný polymérový izolátor, ktorý bol dodaný z prevádzky. Na povrch izolátora boli aplikované elektródy, ktoré boli usporiadané takým spôsobom, aby efektívna plocha tvoriaca kapacitný systém bola minimálna. Účelom tejto úpravy bolo minimalizovať kapacitnú zložku celkovej impedancie v náhradných modeloch dielektrika a umožniť analýzu jeho reálnej zložky, na ktorú má zásadný vplyv povrchová vodivosť.

Impedančné náhradné modely dielektrika je možné definovať v dvoch modifikáciách:

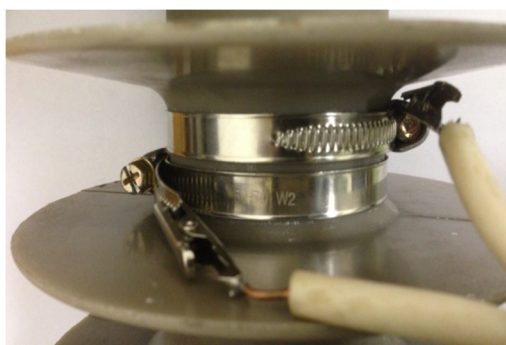
- sériové zapojenie kapacity a odporu,
- paralelné zapojenie kapacity a odporu.

Uvedené modely sú zobrazené na obr.4.



Obr.4. Sériový a) a paralelný b) model dielektrika.  $R_s$ ,  $R_p$  sú rezistancie náhradného modelu,  $X$  je príslušná reaktancia kapacitnej zložky modelu.

Elektrodový systém bol realizovaný kovovými sponami s pozinkovanou úpravou povrchu. Vzďialenosť elektrod bola 1,5 mm s cieľom dosiahnuť maximálnu kapacitu a minimálny povrchový odpor, ktorý by pri danom testovacom napätí vyvolal maximálne možnú úroveň prúdu. Systém je zobrazený na obr.5

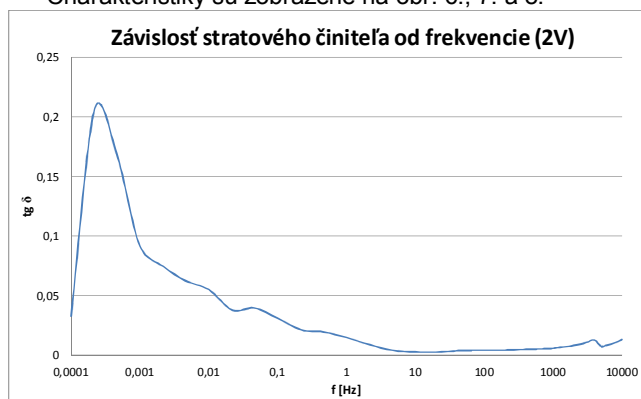


Obr.5. Testovaný vonkajší izolátor s navrhnutým elektrodovým systémom

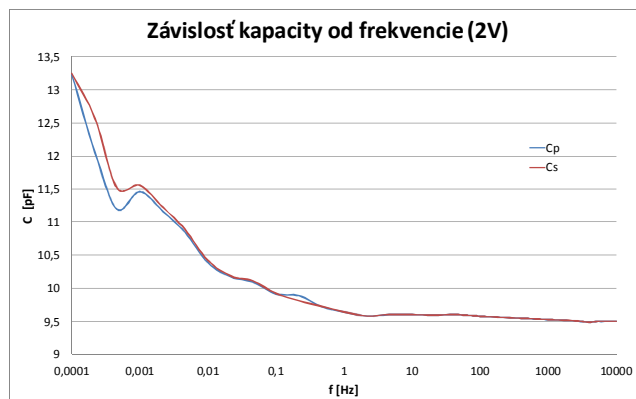
Prístrojom IDAX 300 boli odmerané parametre náhradných modelov dielektrika pre jeho sériové a paralelné usporiadanie. Boli získané charakteristiky pri testovacom napätí 2V vo frekvenčnom rozsahu 0,1 mHz až 10 kHz pre:

- činiteľ dielektrických strát,
- kapacitu pre sériové zapojenie náhradného modelu
- kapacitu pre paralelné zapojenie náhradného modelu
- odpor pre sériové zapojenie náhradného modelu
- odpor pre paralelné zapojenie náhradného modelu

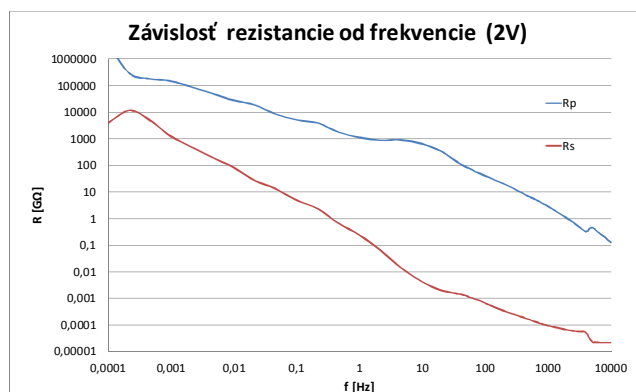
Charakteristiky sú zobrazené na obr. 6., 7. a 8.



Obr.6. Závislosť činiteľa dielektrických strát od frekvencie



Obr.7. Závislosť kapacity sériového a paralelného modelu od frekvencie



Obr.8. Závislosť odporu sériového a paralelného modelu od frekvencie

### Diskusia

Z fyzikálneho princípu náhradného modelu dielektrika vyplýva, že činiteľ dielektrických strát je pre sériové aj paralelné zapojenie rovnaký.

Z nameraných údajov vyplýva, že rozdiely v hodnotách kapacít sú pre oba modely v celom frekvenčnom pásme minimálne a sú na úrovni, ktorá môže byť vyvolaná nepresnosťou merania v dôsledku veľmi malých hodnôt kapacít, ktoré sú porovnateľné s parazitnými. To sa prejavuje hlavne v oblastiach veľmi nízkych frekvencií.

Hodnoty odporu pre sériový a paralelný náhradný model dielektrika vykazujú značné rozdiely v celom frekvenčnom pásme a so stúpajúcou frekvenciou sa tento rozdiel zvyšuje.

Je potrebné si uvedomiť, že reaktancia  $X$  v oboch náhradných modeloch dielektrika je frekvenčne závislá, platí:

$$X = \frac{1}{\omega C} \quad (1)$$

Zmena kapacity, tak ako je zobrazená na obr. 7 pri frekvenciách vyšších než 1 Hz neovplyvňuje reaktanciu  $X$ . Jej zmena je daná len zvyšujúcou sa frekvenciou.

Odpor pri paralelnom modeli dielektrika je priamo závislý aj od povrchového odporu. Keďže bola dokázaná jeho závislosť na frekvencii, je potrebné si uvedomiť, v akom rozsahu je meraná jeho hodnota pri aplikovaní meracieho napätia od DC po rádovo kHz. Nižší odpor znamená väčší pretekajúci prúd po povrchu. Vyššie hodnoty prúdu sú menšou mierou ovplyvňované okolitým rušením.

## Záver

Bolo poukázané na vplyv frekvencie testovacieho napätia na hodnoty činiteľa dielektrických strát a hodnoty kapacit a odporov pre sériový a paralelný model dielektrika. Bolo zistené, že hodnoty odporov sériového a paralelného náhradného modelu sú vo vyššej miere závislé od frekvencie testovacieho napätia a zároveň sú 100 až 10 000 násobne rozdielne. Ich rozdiel narastá so zvyšujúcou sa frekvenciou.

Výskumné práce, ktoré budú vykonané v budúcnosti, budú orientované na vyšetrovanie vzťahu medzi povrchovým odporom meraným odporúčanou metodikou a odporom náhradného modelu dielektrika s cieľom detegovať optimálnu frekvenciu a napäťovú hladinu testovacieho signálu.

## Pod'akovanie

Práca bola podporená grantami Slovenskej Akadémie Vied a Ministerstvom Školstva v rámci projektov VEGA č. 1/0311/15, a 2/0141/16.

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

## Literatúra

- [1] J. Kim, M. Chaudhury, and M. Owen, "Hydrophobicity loss and recovery of silicone HV insulation", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 6, pp. 695-702, 1999.
- [2] S. Wang, X. Liang, Z. Cheng, X. Wang, Z. Li, Y. Zhou, Y. Yin, L. Wang, and Z. Guan., "Hydrophobicity changing of silicone rubber insulators in service", CIGRÉ session, 2002.
- [3] S. H. Kim, E. A. Cherney, and R. Hackam, "The loss and recovery of hydrophobicity of RTV silicone rubber insulator coatings", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 5, pp. 1491-1500, 1990.
- [4] T. Tokoro and R. Hackam, "Loss and recovery of hydrophobicity and surface energy of HTV silicone rubber", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 8, pp. 1088-1097, 2001.
- [5] T. Kikuchi, S. Nishimura, and M. Nagao, "Survey on the use of nonceramic composite insulators", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 6, pp. 548-556, 1999.
- [6] J. Mackevich and S. Minesh, "Polymer outdoor insulating materials. Part I: Comparison of porcelain and polymer electrical insulation", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 13, No. 3, pp. 5-12, 1997.
- [7] C. Spellman, H. Young, A. Haddad, A. Rowlands, and R. Waters, "Survey of polymeric insulator ageing factors", 11th Int'l. Sympos. High Voltage Engineering, (Conf. Publ. No. 467), Vol. 4, pp. 160-163, 1999.
- [8] J. P. Reynders, I. R. Jandrell, and S. M. Reynders, "Review of aging and recovery of silicone rubber insulation for outdoor use", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 6, pp. 620-631, 1999.
- [9] T. Tokoro, Y. Katayama, M. Kosaki, and R. Hackam, "Aging and recovery of HTV silicone and EPDM rubbers due to continuous wetting", Int'l. Sympos. Electr. Insulating Materials (ISEIM), pp. 51-54, 2001.
- [10] R. Sundararajan, A. Mohammed, N. Chaipanit, and T. Karcher, "Inservice aging and degradation of 345 kV EPDM transmission line insulators in a coastal environment", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 11, pp. 348-361, 2004.
- [11] R. S. Gorur, G. G. Karady, a. Jagota, M. Shah, and a. M. Yates, "Aging in silicone rubber used for outdoor insulation", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 7, pp. 525-538, 1992.
- [12] I. Ramirez, S. Jayaram, and E. A. Cherney, "Aging evaluation of silicone rubber nanocomposites", IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), pp. 270-273, 2009.
- [13] A. Naderian Jahromi, E. A. Cherney, S. H. Jayaram, and E. C. Simon, "Aging characteristics of RTV silicone rubber insulator coatings", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, pp. 444-451, 2008.
- [14] S. Rowland, Y. Xiong, J. Robertson, and S. Hoffmann, "Aging of silicone rubber composite insulators on 400 kV transmission lines", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 14, pp. 130-136, 2007.
- [15] T. Yanming, "Approaches to aging of composite insulators", Int'l. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 5-8, 2000.
- [16] Y. Xu, Y. He, F. Zeng, and R. Zhang, "Aging in EPDM used for outdoor insulation", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 6, pp. 60-65, 1999.
- [17] T. Tanaka, "Aging of polymeric and composite insulating materials. Aspects of interfacial performance in aging", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 9, pp. 704-716, 2002.
- [18] D. Birtwhistle, G. Cash, G. A. George, and D. Hinde, "New Techniques for Estimating the Condition of High Voltage Polymeric Insulators", Proceedings of the 1st World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM), Paper No. 169. pp. 949-956, 2006.
- [19] S. M. Gubanski, A. Dornfalk, J. Andersson, and H. Hillborg, "Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 14, pp. 1065-1080, 2007.
- [20] P. D. Blackmore, G. A. Cash, G. A. George, and D. Birtwhistle, "New condition monitoring techniques for composite insulators", J. Electrical and Electronics Eng., Australia, Vol. 18, No. 2, pp. 91-99, 1998.
- [21] S. Bahadoorsingh and S. Rowland, "A Framework Linking Knowledge of Insulation Aging to Asset Management", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 24, No. 3, pp. 38-46, 2008.
- [22] S. M. Rowland and S. Bahadoorsingh, "A Framework Linking Insulation Ageing and Power Network Asset Management", IEEE Int'l. Sympos. Electr. Insul., (ISEI), pp. 732-736, 2008.
- [23] A. Tzimas, E. Da Silva, S. M. Rowland, B. Boumeid, M. Queen, M. Michel, Asset Management Frameworks for Outdoor Composite Insulators' IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, Issue 6, pp. 2044-2054, 2012.S.
- [24] A. Tzimas and S. M. Rowland, "Risk Estimation of Ageing Outdoor Composite Insulators with Markov Models", IET Trans. Generation, Transmission and Distribution, pp. 1-8, doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0858, 2012.

**Autori:** 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)

Lukáš Kruželák, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [lukas.kruzelak@tuke.sk](mailto:lukas.kruzelak@tuke.sk)

Samuel Bucko, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [samuel.bucko@tuke.sk](mailto:samuel.bucko@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)