

Iraida Kolcunová, Juraj Kurimský, Ján Zbojovský

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

Modelovanie korónových výbojov

Abstrakt. Korónové výboje vznikajú na ostrých vyčnievajúcich častiach elektródy nachádzajúcej sa v plynnom alebo kvapalnom prostredí. Sú to miesta so zníženou elektrickou pevnosťou, kde vplyvom vysokej intenzity elektrického poľa v izolačnom prostredí dochádza k ionizácii prostredia a k vzniku korónových výbojov. V článku sa zameriavame na modelovanie korónových výbojov využitím hrotových elektród s rôznym zakončením. Rozvoj výbojovej aktivity bol zaznamenaný pomocou prístroja na meranie čiastkových výbojov MDP 600. Na získaných fázových rozloženiach boli skúmané tri oblasti rozvoja korónových výbojov v závislosti na napätí a tvaru ukončenia koronujúcej elektródy.

Abstract. Corona discharges occur on the sharp parts of an electrode located in a gaseous or liquid insulating material. These are places with reduced electrical strength where due to the high intensity of the electric field in the insulating system, corona discharges occur. In this article, we focus on the modelling of corona discharges using tip electrodes with different tip shapes. The development of discharge activity was recorded using a device for measuring partial discharges MDP 600. On the obtained phase distributions, three areas of development of corona discharges depending on the voltage and the shape of the end of the corona electrode were investigated.

Kľúčové slová: korónové výboje, hrotové elektródy, meranie čiastkových výbojov, fázové rozloženia

Keywords: corona discharges, tip electrode, measuring of partial discharges, phase resolved analysis

Úvod

Na izolačný systém pôsobia rôzne negatívne vplyvy, ktoré degradujú izoláciu a znižujú tak spoľahlivosť a životnosť elektroenergetického zariadenia. Jedným z takýchto vplyvov sú čiastkové výboje. V miestach so zníženou elektrickou pevnosťou vplyvom vysokej intenzity elektrického poľa v izolácii vznikajú čiastkové výboje. Tieto výboje predstavujú preraz plynných dutiniek, lokálny preraz malých objemov pevných alebo kvapalných dielektrík, miestny preraz po povrchu pevného dielektrika [1]. Vznik čiastkových výbojov závisí od konfigurácie elektrického poľa vo vysokonapäťovom zariadení a od elektrofyzikálnych vlastností (zároveň aj elektrickej pevnosti) použitej izolácie.

Čiastkové výboje sú často sprevádzané vyžarovaním zvuku, svetla, tepla a chemickými reakciami. Pri výrobe izolačného systému sa nedá vždy zabrániť vzniku nehomogenít v dielektriku. Ak sa táto nehomogenita nachádza medzi elektródami vysokého napätia, môže namáhanie elektrickým poľom v najslabšom mieste prekročiť pevnosť tohto miesta, čo vedie k elektrickému výboju v tomto mieste.

Zvyčajne, čiastkové výboje nevyvolávajú preraz celej izolácie, ale dochádza len k miestnemu poškodeniu dielektrika. Pri dlhodobom pôsobení čiastkových výbojov môže dôjsť k strate elektrickej pevnosti a následnému poškodeniu elektroizolačného systému. Ich postupná deštruktívna činnosť môže po nejakej dobe viesť až k totálnemu porušeniu izolačného systému a k havárii celého zariadenia [2].

Korónové čiastkové výboje

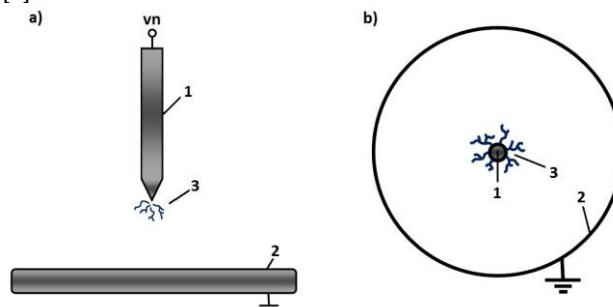
Korónou sa nazýva neúplný samostatný výboj vznikajúci na elektródach, keď je vzdialenosť medzi elektródami pomerne veľká a elektródy majú malý polomer zakrivenia. Potom je elektrické pole v medzielektródovom priestore veľmi nehomogénne: pri elektródach vzniká veľká intenzita poľa, zatiaľ čo v ostatnom priestore medzi elektródami intenzita poľa je pomerne malá. K takým poliám patrí aj pole okolo vodičov vonkajšieho vedenia.

Ak postupne zvyšujeme napätie, dosiahne intenzita poľa pri elektródach takú hodnotu, ktorá je postačujúca k nárazovej ionizácii. Tak sa vytvoria podmienky pre vznik neúplného

výboja, ktorý sa obmedzuje iba na tenkú vrstvu vzduchu, priliehajúceho k elektródam [3].

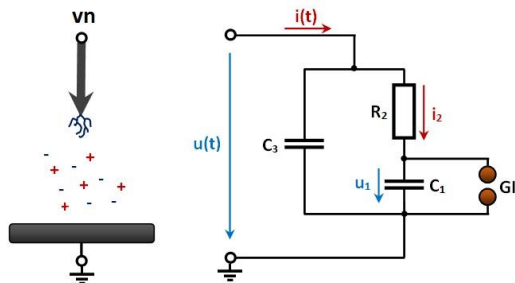
Korónové výboje vznikajú v plynnom prostredí v okolí elektród s malým polomerom zakrivenia. Tieto ostré výčnelky predstavujú v elektrickom poli veľkú nehomogenitu. Výbojová činnosť nastáva v okamihu, keď intenzita elektrického poľa dosiahne kritickú hodnotu, ktorá je potrebná na vznik koróny. Pre korónový výboj je charakteristická akustická (šum, praskot) a optická emisia (modré svetielkovanie a UV aktivita). Tento čiastkový výboj predstavuje prúd elektricky nabitých častíc. Vynásobením tohto elektrického prúdu príslušnou hodnotou napätia sa získajú činné straty, ktoré sa rozptýlia do okolia. Tieto straty vznikajú na vodičoch vonkajšieho elektrického vedenia. Okamžitá hodnota týchto strát je veľmi malá, no za určitú dlhšiu dobu straty korónou nemôžeme zanedbať [4,5].

Typickým elektródovým usporiadaním korónových výbojov v laboratórnych podmienkach je hrot-doska (Obr. 1a) a koncentrické usporiadanie cylindrických (valcových) elektród (Obr. 1b), kedy polomer vnútornej elektródy je oveľa menší ako vonkajšej elektródy. Hrot-doska predstavuje vznik korónových výbojov na ostrých výčnelkoch elektród. Koncentrické usporiadanie cylindrických (valcových) elektród predstavuje výbojovú aktivitu na vodičoch vonkajšieho VN resp. VVN vedenia. Na obrázku 1 sú číslami 1 a 2 označené elektródy a číslom 3 znázorňuje oblasť výbojovej aktivity [1].



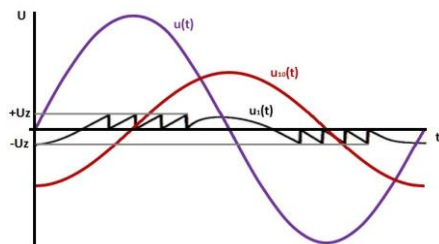
Obr. 1 Elektródové usporiadanie pre modelovanie korónových výbojov [1]

Náhradná schéma elektródového usporiadania hrot - doska je zobrazená na Obr. 2. Kapacita C_1 v tejto schéme reprezentuje kapacitu plynného prostredia, C_3 je paralelná kapacita elektródového usporiadania a R_2 predstavuje vodivosť elektrického náboja v danom plyne. Výbojová aktivita vzniká v momente, keď intenzita elektrického poľa dosiahne kritickú hodnotu E_z (resp. $\pm U_z$). Zvyšovaním napätia sa častkové výboje vyskytujú častejšie, až nakoniec dôjde k preskoku. Funkciu preskoku v náhradnej schéme reprezentuje guľové iskríštie GI [1].



Obr. 2 Náhradná schéma výbojovej činnosti vo vzduchu [1]

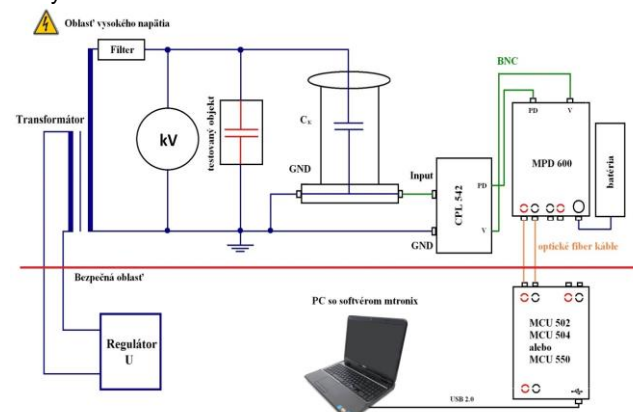
Na obrázku Obr. 3 sú zobrazené priebehy napájacieho napätia $u(t)$, fiktívneho napätia $u_{10}(t)$ a napätia $u_1(t)$. Fiktívne napätie je napätie na kapacite C_1 v prípade, že by nedošlo k vzniku častkového výboja. Napätie $u_1(t)$ je napätie na kapacite C_1 pri existencii častkových výbojov. Korónový výboj vzniká v okamihu, keď okamžitá hodnota napätia na kapacite C_1 dosiahne limitnú hodnotu $+U_z$ resp. $-U_z$. Fiktívne napätie $u_{10}(t)$ predbieha napätie zdroja o 90° . Je to v dôsledku prítomnosti odporu R_2 , ktorý vytvorí úbytok napätia Δu_{R2} .



Obr. 3 Časový priebeh korónových výbojov v plynnom prostredí [1]

Zostavenie pracoviska na meranie výbojovej činnosti

Výbojová činnosť sa merala pomocou priamej metodiky podľa normy IEC 60270. Schéma zapojenia meracieho pracoviska je znázornená na obrázku 4. Na začiatku merania jednotlivých typov častkových výbojov sa vykonala kalibrácia skúšaného objektu. Záznam výbojovej činnosti sa uskutočňoval pomocou meracieho systému MPD 600 od firmy Omicron.



Obr. 4 Schéma zapojenia podľa [8]



Obr. 5 Elektródový systém hrot – doska [8]

Na modelovanie korónových výbojov sa použil elektródový systém hrot–doska, ktorý je znázornený na obrázku 5. Korónové výboje tu vznikajú v okolí ostrého hrotu. Skúmali sa tri typy medených hrotov (ostrý, oblý a zrezaný) s priemerom 5 mm (Obr. 6). Na hrotovú elektródu bolo privedené vysoké napätie a dosková elektróda sa uzemnila. Tento elektródový systém (skúmaný objekt C_x) sa zapojil podľa schémy zapojenia (Obr. 4). Meranie sa uskutočňovalo pri konštantnej vzdialenosti medzi elektródami 4 cm.



Obr.6 Hrotové elektródy pre modelovanie korónových výbojov

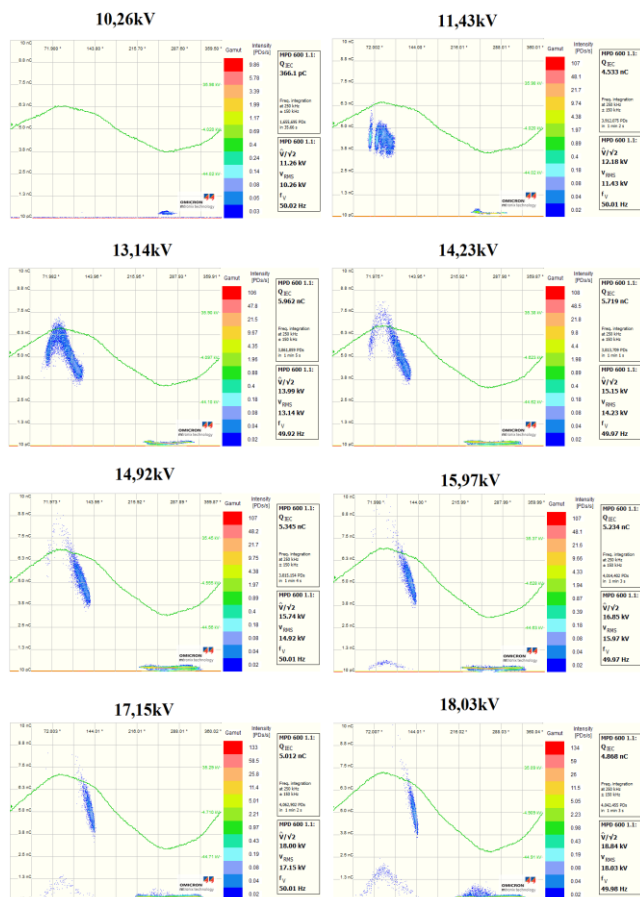
Postup pri meraní

Pri skúmaní korónových výbojov sa prístroje zapoja podľa schémy (Obr. 6), nasadí sa ostrý hrot a vykoná sa kalibrácia. Po ukončení kalibrácie sa regulátorom postupne zvyšuje napätie až nastane prvá výbojová činnosť. Zapiše sa hodnota kritického napätia a vytvorí sa 1-minútový záznam. Následne sa napätie zvyšuje s krokom 1 kV a pri každom kroku sa opäť vykoná záznam výbojovej činnosti s dĺžkou 1 min. Napätie sa zvyšuje do hodnoty, pri ktorej ešte nedochádza k preskoku medzi elektródami. Hodnota preskových napätí bola zistená pred začatím merania korónových výbojov. Následne sa použije oblý medený hrot a meranie sa zopakuje rovnako ako v prípade ostrého hrotu. Nakoniec sa použije zrezaný hrot a výsledky sa vyhodnotia.

Vyhodnotenie skúmania korónových výbojov

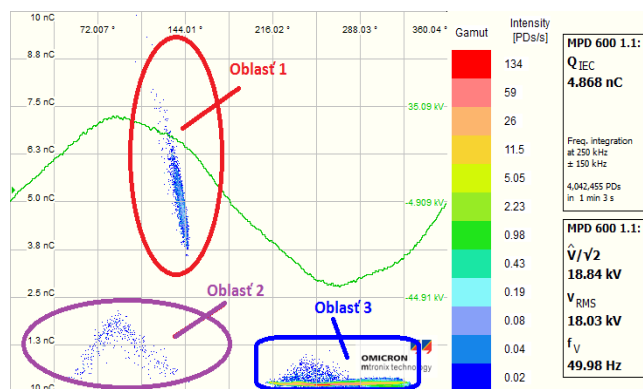
Po kalibrácii sa stanovil kalibračný faktor v programe mtronix software for MPD and MI na hodnotu 5,363. Následne sa namerané záznamy vyhodnotili do formy tabuliek, grafov a PRPD diagramov, z ktorých sa vytvoril obrázok znázorňujúci rozvoj výbojovej aktivity v závislosti od napätia. Takýto záznam je znázornený pre ostrý medený hrot na obr. 7, kde je poukázané na rozvoj výbojovej činnosti v závislosti od napätia. Počiatočné častkové výboje sa začali pri napätí 10,26 kV, pričom sa zaznamenali výboje v zápornej polperióde s priemerným zdanlivým nábojom 266,41 pC. Následne sa začali objavovať častkové výboje v kladnej polperióde so zdanlivým nábojom

v priemere 4,53 nC. Ďalším zvyšovaním napätia až do 13,14 kV narastala výbojová činnosť v kladnej polperióde. Od tohto bodu začala výbojová aktivita v kladnej polperióde klesať so zvyšovaním napätia. Zaznamenal sa anomálny jav, ktorý nazval pán profesor Marton negatívna diferenciálna vodivosť [7]. Od napätia 15,97 kV sa začali objavovať nové výboje v kladnej polperióde s priemerným nábojom 424,8 pC. S ďalším zvyšovaním napätia sa zvyšuje priemerná hodnota zdanlivého náboja týchto výbojov až pri určitom napätí dôjde k preskoku. Pri tomto experimente sa nešlo do preskoku, kvôli zabezpečeniu meracieho systému pred poškodením.



Obr. 7 Rozvoj korónových výbojov na ostróm medenom hrote

Z vyššie uvedeného vyplýva, že korónové výboje vytvárajú v PRPD diagrame určité oblasti, ktoré sa následne na jednotlivých hrotoch skúmali. Prvú oblasť vytvorili čiastkové výboje s veľkou hodnotou nameraného priemerného zdanlivého náboja (q_{01}), ktoré sa objavovali v kladnej polperióde. Druhá oblasť vznikla v dôsledku výbojovej aktivity s menším priemerným zdanlivým nábojom (q_{02}) v kladnej polperióde. Do poslednej skúmanej oblasti patria výboje (s priemerným zdanlivým nábojom q_{03}), ktoré vznikli v zápornej polperióde sinusového napätia (Obr. 8).



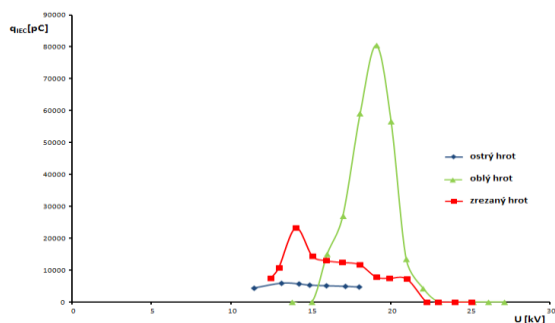
Obr. 8 Skúmané oblasti PRPD diagramu pri meraní korónových výbojov[8]

Na zistenie výbojovej aktivity sa v softvéri mtronix používalo zobrazenie GATE, v ktorom je možné skryť vybrané oblasti a urobiť záznam výbojovej činnosti zvyšnej časti. Takto sa vytvoril report pre priemernú hodnotu zdanlivého náboja danej zvyšnej časti. Konkrétne údaje pre skúmané hroty sú znázornené v tabuľke 1.

Tabuľka 1 Priemerné hodnoty zdanlivého náboja čiastkových výbojov pre skúmané oblasti

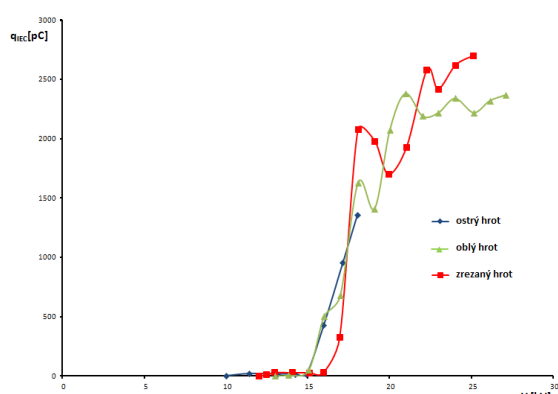
Ostrý	U[kV]	11,43	13,14	14,92	15,97	17,15
	q_{01} [pC]	4530	5910	5360	5180	5010
q_{02} [pC]	17,95	15,08	14,54	424,8	956,7	
q_{03} [pC]	266,41	245,49	248,44	251,92	235,38	
Obľý	U[kV]	13,8	16,01	19,09	20,02	20,97
	q_{01} [pC]	0	15000	80410	56600	13430
	q_{02} [pC]	7,08	505,71	1410	2070	2380
	q_{03} [pC]	244,32	889,53	1280	1210	1100
Zrezaný	U[kV]	12,48	12,98	15,09	15,94	16,94
	q_{01} [pC]	7500	10710	14470	13020	12430
	q_{02} [pC]	10,32	30,64	28,99	29,62	325,34
	q_{03} [pC]	189,92	438,72	467,79	490,53	442,64

Prvá sledovaná oblasť je znázornená na grafickej závislosti (Obr. 9). Z uvedeného vyplýva, že s postupným zvyšovaním napätia sa zo začiatku priemerná hodnota zdanlivého náboja zvyšuje, ale pri určitom bode sa s následným zvyšovaním napätia výbojová aktivita znižuje. Táto anomália sa nazýva negatívna diferenciálna vodivosť, ktorá bola zaznamenaná pri striedavom napätí aj v práci [7] pomocou UV kamery. Z vyššie uvedeného je zjavné, že čiastkové výboje v tejto oblasti priamo súvisia s negatívnou diferenciálnou vodivosťou.



Obr. 9 Výbojová aktivita v oblasti č.1

Druhá sledovaná oblasť pre skúmané typy hrotových elektród je na obrázku 10. Na tejto grafickej závislosti je možné vidieť, že tieto výboje vznikajú pri vyššom napätí ako je počítateľné napätie. Po objavení prvých výbojov sa s ďalším zvyšovaním napätia zväčšuje aj priemerná hodnota zdanlivého náboja nameranej výbojovej aktivity.

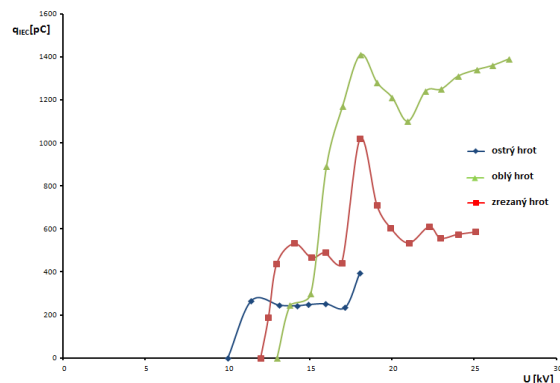


Obr. 10 Výbojová aktivita v oblasti č.2

Posledná sledovaná oblasť je znázornená na obrázku 11. Tieto čiastkové výboje vznikajú pri kritickej hodnote napätia, teda sú to počiatkové výboje. So zvyšovaním napätia výbojová aktivita narastá. Spočiatku je nárast výbojovej činnosti v závislosti od napätia prudký, no pri vyššom napätí sa priemerný zdanlivý náboj zvyšuje pomaly.

Záver

Predpokladáme, že prvá oblasť súvisí s prudkou ionizáciou vzduchu a vytvorením plazmy v priestore medzi elektródami. Vzduch sa správa ako bariéra a postupným zvyšovaním napätia vznikajú veľké výboje, ktoré ionizujú vzduch pri vysokonapäťovej hrotovej elektróde. Ďalším zvyšovaním napätia je vzduch stále viac zionizovaný a izolačná bariéra vzduchu sa znižuje. Čiže znižuje sa početnosť čiastkových výbojov aj ich priemerný zdanlivý náboj. To môže byť príčinou anomálneho javu, kde so zvyšovaním napätia klesá výbojová aktivita, až nakoniec pri určitom napätí tieto výboje úplne zaniknú. Od tohto bodu sa výbojová aktivita začína zvyšovať. V tejto časti sa uplatňuje druhá oblasť, keď už priestor medzi elektródami je zionizovaný a nastáva rozvoj strímrového výboja. S postupným zvyšovaním napätia sa výbojová činnosť v tejto oblasti zväčšuje až dochádza k preskoku. Fázové rozloženie tretej sledovanej oblasti (záporná polperióda) je vo všeobecnosti charakteristické pre korónové výboje. S postupným zvyšovaním napätia sa priemerná hodnota zdanlivého náboja mierne zvyšuje a taktiež sa zväčšuje fázové rozloženie v sledovanej oblasti.



Obr. 11 Výbojová aktivita v oblasti č.3

Meraním pomocou priamej metodiky sa potvrdil prítomný anomálny jav nazývaný negatívna diferenciálna vodivosť. Táto anomália sa objavila v sledovanej oblasti č.1.

Podakovanie

Túto prácu podporili MŠVVaŠ v rámci projektu VEGA 1/0340/18, 1/0435/19 a 2/0011/20, KEGA 008TUKE-4/2019 a Slovenská agentúra pre výskum a vývoj na základe zmlúvy č. APVV-18-0160 a APVV-15-0438.

Literatúra

- [1]. ZÁLIŠ, Karel: Částečné výboje v izolačných systémoch elektrických stroju. Praha: Academia, 2005. ISBN 80-200-1358-X.
- [2]. Marton, K.: Technika vysokých napätí. 1.vyd. Bratislava:Alfa, 1984.
- [3]. R. Piccin et al.: Partial Discharge Analysis of Gas Insulated Systems at High Voltage AC and DC IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 1; February 2015, pp. 218-228, DOI 10.1109/TDEI.2014.004711
- [4]. J.-S. Chang, P. A. Lawless and T. Yamamoto, "Corona Discharge Processes", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 19, No. 6, pp. 1152-1166, 1991.
- [5]. P. N. Mikropoulos and V. N. Zagkanas: Threshold Inception Conditions for Positive DC Corona IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 1; February 2015, DOI 10.1109/TDEI.2014.004641
- [6]. Wallace, V. – Holtzhausen, K.: High voltage engineering. Practice and theory. 1.vyd. Stellenbosch: University of Stellenbosch, ISBN 978-0-620-3767.
- [7]. Duda, P.: Meranie výbojovej činnosti vo vzduchu a po povrchu pevných dielektrík. Bakalárska práca. Košice 2014.
- [8]. Duda, P.: Modelovanie výbojovej aktivity v izolačnom systéme elektroenergetických zariadení. Diplomová práca. Košice, 2016.

Autori: Iraida Kolcunová, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: iraida.kolcunova@tuke.sk
Juraj Kurimský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jurau.kurimsky@tuke.sk
Ján Zbojovský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jan.zbojovsky@tuke.sk