



PUBLIKÁCIA TECHNICKEJ UNIVERZITY V KOŠICIACH

# STARNUTIE ELEKTROIZOLAČNÝCH SYSTÉMOV

November 2006

Číslo 1/2006

ISSN 1337-0103

## Obsah

Karol Marton	
Diagnostika nn a vn zariadení v elektroenergetike z hľadiska teórie a praxe.....	3
Iraida Kolcunová	
Starnutie izolácie v dôsledku pôsobenia čiastkových výbojov.....	10
Roman Cimbala	
Dielektrické vlastnosti XLPE káblov.....	14
Jaroslav Petráš	
Metodika vyhodnocovania meraní akustickej emisie čiastkových výbojov.....	17
Jaroslav Džmura	
Nekonvenčný typ elektrického odlučovača na striedavé napätie.....	21
Miroslav Bánes, František Koval'	
Simulovanie porúch v XPE 22kV káblí.....	25
Dušan Medveď	
Rozpoznávanie a spracovanie kriviek v grafoch.....	28
Jozef Balogh, Juraj Kurimský, Karol Marton	
Rekognoskácia výbojovej činnosti v modelovej dutine umiestnenej v izolačnej kvapaline pri prevádzkových teplotách.....	32
Bystrík Dolník	
Data mining – vybrané techniky dolovania dát.....	35
Sekcia: Aktuálne problémy v elektroenergetike	
Jozef Rusnák	
Princípy dynamického modelovania veterných elektrární v programe EUROSTAG.....	41
Marián Mešter, Marek Hvizdoš	
Výpočet skratových pomerov v distribučných sieťach s decentralizovanými zdrojmi energie.....	45
Martin Kanálik, Peter Szathmáry	
Simulácia kompenzácie jalového a deformačného výkonu v sieťach s odberom v napäťových hladinách 6 kV a 0,4 kV.....	50
Michal Vargončík	
Ochrana pred stratou budenia generátora.....	56



Editor

Juraj Kurimský, Technická univerzita v Košiciach

Redakčná rada

Roman Cimbala, Technická univerzita v Košiciach

Bystrík Dolník, Technická univerzita v Košiciach

Karol Marton, Technická univerzita v Košiciach

Michal Kolcun, Technická univerzita v Košiciach

Iraida Kolcunová, Technická univerzita v Košiciach

Starnutie elektroizolačných systémov

Publikácia Technickej univerzity v Košiciach

(c) 2006 Technická univerzita v Košiciach

Karol Marton

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

## Diagnostika nn a vn zariadení v elektroenergetike z hľadiska teórie a praxe

**Abstrakt.** V príspevku sú popísané elektrofyzikálne fenomény vplyvajúce na vyhodnotenie výpovedeschopných veličín v diagnostike. Procesy počas degradácie izolačného systému sú podané na základe modelovania týchto procesov. Technická diagnostika je analyzovaná z hľadiska vedeckého poznania fenoménov, odohrávajúcich sa v kombinovanom prostredí elektrického a tepelného poľa, prípadne na rozhraní slabých a silných (ionizujúcich) elektrických polí. Je urobený rozbor diagnostických metód deštruktívnych a nedeštruktívnych a popisuje sa eliminácia rušivých signálov pri vyhodnotení výpovedeschopných veličín.

**Abstract.** The contribution describes an electrophysical phenomena that impact on evaluation of the diagnostic parameters. The explanation of the degradation processes is done from the process modeling point of view. The technical diagnostics is analyzed on the base of the scientific phenomena knowledges which act in electrical and thermal fields environment eventually in interface of the low and high power electric fields. The analysis of the destructive and non-destructive diagnostic methods is done and elimination of disturbances at evaluation process is described. (The Diagnostics of the Low and High Voltage devices in Power Engineering – The Theory and The Practice).

**Kľúčové slová:** diagnostika, izolačný systém, slabé a ionizujúce pole, model technickej izolácie.

**Keywords:** diagnostics, insulation system, low and ionizing field, technical insulation model.

### Úvod

Aj napriek tomu, že v mnohých príspevkoch a odborných článkoch boli prezentované pohľady vedeckých pracovníkov a vysokokvalifikovaných odborníkov z praxe a tieto sa opierali o skúsenosti v diagnostike nn a vn zariadení, považujeme za potrebné zhrnúť základné diagnostické ukazovatele a k nim uviesť príslušnú diagnostickú veličinu, ako ju chápeme z nášho zorného uhla. Zatriedenie ukazovateľov vyplynie z prírodného stavu elektrického stroja (zariadenia), ktorého izolačný systém je tvorený pevnou izoláciou, prípadne kombináciou kvapalnej a pevnej fáze. Všeobecným makroskopickým prejavom elektrofyzikálnych procesov, prípadne kombinácie elektromagnetických a mechanických dejov je zmena teploty stroja (vrátane magnetických obvodov). V tomto prípade diagnostickou veličinou je infražiarenie a teplota, čo sa dá zaznamenať termovíziou, infrapuškou, prípadne dotykovým teplomerom.

Stav izolácie, predovšetkým jej elektrické vlastnosti charakterizujúce izolačný odpor, činiteľ dielektrických strát, kapacita a význačné veličiny čiastkových výbojov, (pozri tiež Záliš [1], Karas [3] ako je hodnota zdanlivého a sumačného náboja, energia čiastkových výbojov a v neposlednom rade akustická Kováčik [15] v literatúre tiež uvádzaná ako ultrazvuková emisia. Výbojová aktivita je doprevádzaná lokálnym vyžarovaním elektromagnetického vlnenia, čím sa umožňuje miestna detekcia výbojovej činnosti (Marton) [13]. Veľmi častým doprovodným javom je tvorba ozónu v mieste degradácie, čo je možné zaradiť tiež do kategórie diagnostických veličín.

Rozhranie medzi nedeštruktívnymi a deštruktívnymi ukazovateľmi tvoria skúšky napäťové, ktoré sú reprezentované buď impulznými skúškami, jednosmernými, prípadne striedavými skúškami.

Nezanedbateľnými sa javia diagnostické veličiny, vychádzajúce z polarizačných javov predovšetkým v zložitých (vrstvených) izolačných systémoch, kde zaradíme absorbné, resorbčné javy, izotermickú relaxačnú analýzu, štúdium polarizačného spektra a na to naväzujúce krivky vybíjacie, prípadne regeneračné. Diagnostické ukazovatele ako aj veličiny popisuje Cimbala v [16].

Za veľmi potrebné považujeme zaoberať sa vlastnosťami izolačných olejov v kombinovaných systémoch. Tu registrujeme obsah plynu v oleji, pričom k diagnostickým veličinám patrí obsah týchto zložiek: CH<sub>4</sub> – metán, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> – etán, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> – etylén, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> – acetylén, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> – obsah propánu, H<sub>2</sub> – vodík, CO<sub>2</sub> – oxid uhličitý a CO – oxid uhoľnatý. Technické vlastnosti olejov posudzujeme podľa elektrickej pevnosti, obsahu vody, hustoty, kyslosti, relatívneho povrchového napätia: voda –olej, indexu lomu, popola, rozpustných kalov a nerozpustných kalov, alebo usadenín. Uvedme tiež neelektrické parametre, ktoré poslúžia na výber diagnostických veličín. Popredné miesto tu zastáva mechanické kmitanie, jeho efektívna hodnota, frekvenčné spektrum a z toho rezultujúce diagnostické veličiny, ako sú: výchylka kmitov, rýchlosť ich postupu, ich zrýchlenie, prípadne sa stretávame s kombináciou týchto troch uvedených veličín.

Dôležitým diagnostickým ukazovateľom je hluk a z toho vyplývajúca efektívna hodnota, spektrum, stav ložísk, netesnosť zariadení, chvenie, prípadne hluk vychádzajúci od magnetických obvodov a pod. Šírenie sa akustických signálov podmieňuje tlak vzduchu, počet a intenzita rázov a ultrazvuková emisia.

Aj napriek tomu, že sme poukázali na diagnostické veličiny pôvodu elektrofyzikálneho, považujeme za potrebné doplniť na záver túto úvahu elektrickými parametrami, ktoré sú merateľné a majú veľkú výpovedeschopnú vlastnosť. K nim patria tieto: efektívna alebo absolútna hodnota napätia a prúdu, priebeh prechodných javov, vyvolaných napätím alebo prúdom. Pri sledovaní transportných javov v izolačných systémoch ako aj v prvkoch nn alebo vn zariadení (napr. zvodice prepätí) sú vynikajúcou diagnostickou veličinou vyššie harmonické napätia a prúdu, resp. odozva na napäťovú vlnu v súradniciach x,y prípadne t.

Akkoľvek nové trendy v diagnostike vn a vvn prvkov a zariadení musia vychádzať zo základných fyzikálnych fenoménov odohrávajúcich sa v objeme izolačného systému. V uplynulom období sme tieto javy analyzovali, preto sme sa rozhodli poukázať na niektoré menej

frekventované metódy, prípadne postupy, ktoré vhodne doplnia doteraz známe poznatky.

### Elektrofyzikálne fenomény vplyvajúce na vyhodnotenie výpovedeschopných veličín v diagnostike

V závere deväťdesiatich rokov došlo vďaka PC technike, vývoju nových meracích metód a novým technológiám k explozívnomu nárastu možností, ktoré vedú k urýchleniu diagnostických postupov v praxi, ako aj k zavedeniu vyhodnotenia výsledkov v reálnom čase. Zároveň sa ukázalo, ktoré cesty sú reálne, ktoré sú schodné z hľadiska vedeckých prínosov pri analýze výpovedeschopných veličín a ktoré sú z hľadiska ekonomického účinné.

- Detailne analyzovať jednotlivé trendy nám neumožňuje predložený priestor. Pokúsme sa teda základné myšlienky zhrnúť do nasledovných celkov:
- K upresneniu, resp. precizovaniu cieľov diagnostiky patrí dokonalé poznanie štruktúry skúmaného izolačného systému z hľadiska elektrofizikálneho a fyzikálne – chemického. Vzťahuje sa to nielen na systémy na báze pevných materiálov, ale zvlášť na ich kombinácie s kvapalnými, pričom kvapalné izolanty budú ešte dlho zaujímať dôležité miesto vo funkcii izolačných systémov. Zvláštnu pozornosť si budú vyžadovať diagnostické metódy po zavedení kryogénnych materiálov (supravodiče a ich hospodárstvo) v kábloch, transformátoroch a elektrických strojoch.
- Elektrofizikálne a chemické štúdium aplikovaných izolačných materiálov samotných, ako aj zložitých z hľadiska energie ich vnútornej väzby v interakcii so silnými ionizujúcimi elektrickými poľami. Vývoj a výroba nových materiálov s ich vysokou stabilitou pri pôsobení polí nad  $10^7$  Vm<sup>-1</sup> aj v plynných izolačných systémoch (napr. H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>, a pod.)
- Zavedenie nových postupov a princípov v diagnostike, na čo následne musí naväzovať aj spracovanie a vyhodnotenie signálov z výpovedeschopných veličín. Keďže sa bude jednať o aplikáciu niekoľkých metód, potvrdzujúcich pri krížovom preverovaní systému opodstatnenosť výroku o jeho stupni degradácie, bude potrebné zdokonaľiť modelovanie diagnostifikovaných objektov (matematický a fyzikálny model viacdimenzionálny). To sa dá dokázať výlučne využitím PC techniky a s dokonalou spolupracou na báze súčasných a budúcich znalostí z PC techniky. V náväznosti na tieto možnosti si to vyžiada rozšíriť spektrum výpovedeschopných veličín napr. o sledovanie akustickej emisie vznikajúcej počas častkových výbojov, ďalej optických a chemických prejavov počas výbojovej činnosti a pod. Na túto skutočnosť naväzuje počítačová simulácia, pri ktorej sa však musia zohľadniť procedúry elektrotermického, vibračného, príp. klimatického namáhania. Diagnostické a profylaktické postupy budú jednoznačne orientované na nedeštruktívne metódy. Veľmi progresívnou sa javí metóda IRC analýza (analýza izotermických relaxačných prúdov) a metóda analýzy polarizačných javov predovšetkým v zložitých izolačných systémoch.
- Veľký počet meraní na vybraných zariadeniach pri dlhodobom sledovaní ich vlastností diagnostickými metódami si vyžaduje založenie katalógov z nameraných údajov a zavedenie dokonalého spracovania dát využitím známych štatistických metód s prechodom k miere pravdepodobnosti a skúmania pravdivosti údajov. Ponúka sa využitie neuronových sietí ako prostriedku pri analýze, spracovaní a

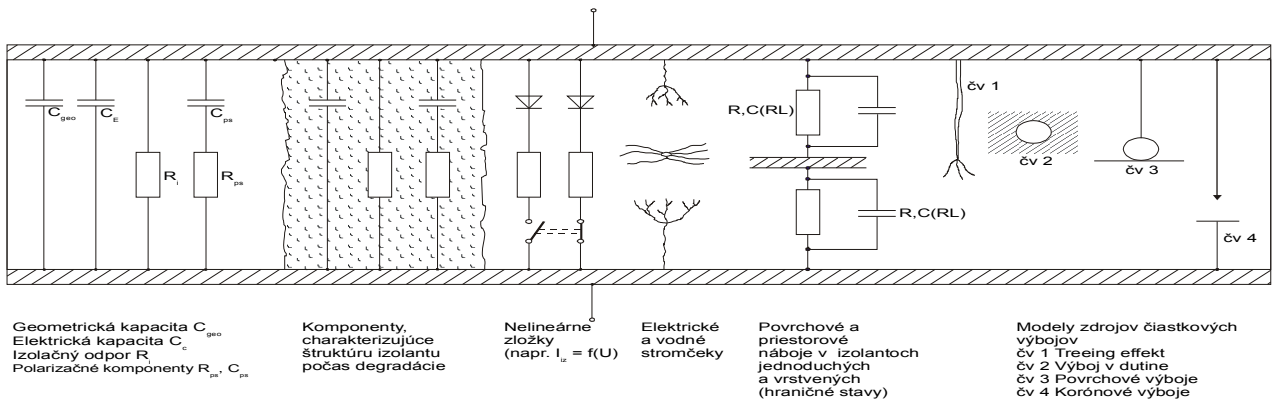
vyhodnotení dát, získaných pri aplikáciách metód založených na báze skúmania výskytu častkových výbojov v izolačných systémoch.

- Snaha po zvyšovaní citlivosti diagnostických metód často vedie k rozhodovaniu sa v zmysle správneho použitia senzorov. Tieto hrajú dôležitú rolu pri diagnostike on-line, čo sa zaviedlo na rozhraní tisícročia u všetkých finančne nákladných strojov a zariadení. Kvalita senzorov indukčných, kapacitných alebo akustických prípadne optických musí byť zosúladená s ich vysokou citlivosťou. Táto požiadavka súvisí aj s ich linearitou v rozsahu aplikovateľného využitia snímanej výpovedeschopnej veličiny. Zavedenie digitálnej filtrácie za účelom získania kvalitného užitočného signálu považujeme za prirodzenú požiadavku, ako aj snahu potlačiť hladinu šumu prípadne rušivých signálov najmä v okolí priemyselných objektov (rozvodne a pod.).
- Pri zvážení systémových aspektov technickej diagnostiky vývoj smeruje k zdokonaleniu nasadených metód s hraničnými, prípadne dosiahnuteľnými frekvenciami a časmi, prenesenými a spracovanými optoelektronickou cestou. Táto musí pri požiadavke na spoľahlivosť ako aj bezpečnosť práce viesť k efektívnosti merania, prípadne aj k redukcii dát.
- Nakoľko moderné spôsoby vyhodnocovania stavu izolačného systému a rozhodovanie o jeho ďalšej prevádzke je zložitá, nutné je preto používať pre túto činnosť skúsených expertov. Už aj v súčasnosti sa ukazujú ako najmodernejšie prostriedky pre vyhodnocovanie diagnostických meraní expertné systémy, pretože tieto systémy s prvkami umelej inteligencie využívajú pre vyhodnocovanie aj skúsenosti z predchádzajúcich meraní. Aj tejto aktivite je treba v budúcnosti venovať zvýšenú pozornosť [2].

### Elektrofyzikálne procesy počas degradácie izolačného systému – modelovanie procesov

Tieto procesy sme už popísali v predchádzajúcich prácach [8], [12]. Keďže sa v súčasnosti nedá pri sledovaní zmien predovšetkým elektrických vlastností izolačného systému zariadení vn a vvn vylúčiť interakcia prostredia, v ktorom objekt pracuje – so zmenami v štruktúre materiálu, prvotom úlohou je zamerať sa na zákonitý sled procesov. Tieto sú ovplyvnené degradačnými činiteľmi a vonkajšími faktormi, ktoré integrálne zahrňujeme pod pojem „rušenie“. To je však dôvod, prečo je potrebné eliminovať niektoré cudzie – parazitné signály od signálu užitočného – zodpovedajúceho snímanej, resp. získanej výpovedeschopnej veličiny.

V predchádzajúcich rokoch sa zmenil aj názor na klasický model izolantu, vystaveného elektrickému, tepelnému prípadne mechanickému namáhaniu [1]. Pri stavbe komplexného modelu musíme tento rozšíriť o nelineárne prvky, ktoré spôsobujú nelineárny priebeh prúdovo – napätovej charakteristiky. Pri vyhodnocovaní výpovedeschopných veličín lokálnu nelinearitu naša do objektu aj aktivita častkových výbojov a predovšetkým nerovnomerná distribúcia priestorových nábojov. Analýza jednotlivých procesov je modelovaná na obr. 1.



Obr. 1: Komplexný model izolačného systému počas jeho degradácie

**Výber výpovedeschopných veličín**

Výber výpovedeschopných veličín, ktoré využívame v technickej diagnostike vychádza v podstate z jednotlivých zložiek, ktoré technickú diagnostiku tvoria. V elektroenergetike aplikované prvky a zariadenia vysokonapäťovej techniky sú vo všeobecnosti podrobené skúškam nedeštruktívnym, ktoré sa dajú zostaviť do systému, ktorý prehľadne poukáže na interakciu medzi sledovanými veličinami.

Z pohľadu diagnostických postupov, prostredníctvom ktorých je možné dospieť k určitém informáciám, poukazujúcim napr. na vzťah medzi elektrickým namáhaním a dobou namáhania, dajú sa od seba odlišiť dielčie diagnostické kroky nasledovne:

- Diagnostika založená na elektrickom priereze poukazuje na výšku prierazného napätia  $U_p$  a na dobu do prierazu  $t(U_p)$  ako aj na fázový uhol, pri ktorom došlo k prierazu  $\varphi(U_p)$  pri striedavom napätí. Ide o metódu, poukazujúcu na štruktúru izolačného systému a na zmeny štruktúry počas náhodných skúšok. Prednosť tejto metódy spočíva na vysokom stupni výpovedeschopnosti vo vzťahu k elektrickej pevnosti skúšaného objektu.
- Pri znížení elektrického namáhania v porovnaní s diagnostickou metódou elektrického prierazu je veľmi často aplikovaná metóda čiastkových výbojov, ktorá sa využíva ako metóda majúca quasi deštruktívny charakter. Životnosť skúšaného objektu sa touto metódou málo obmedzuje, avšak podáva značný objem informácií o defektoch v izolácii a o vzniku výbojových kanálov.
- Charakteristické veličiny diagnostiky metódou čiastkových výbojov sú:
- $U_e$  – napätie, pri ktorom dochádza k nasadeniu čiastkových výbojov
- $I(\text{č.v.})$  – intenzita čiastkových výbojov, meraných ako zdanlivý náboj jednotlivých impulzov alebo ako sumačný náboj
- $\varphi(\text{č.v.})$  – fázové rozloženie výbojov pri aplikovanom napätí
- X,Y,Z, (č.v.) – poloha, resp. miesto zdroja č.v.

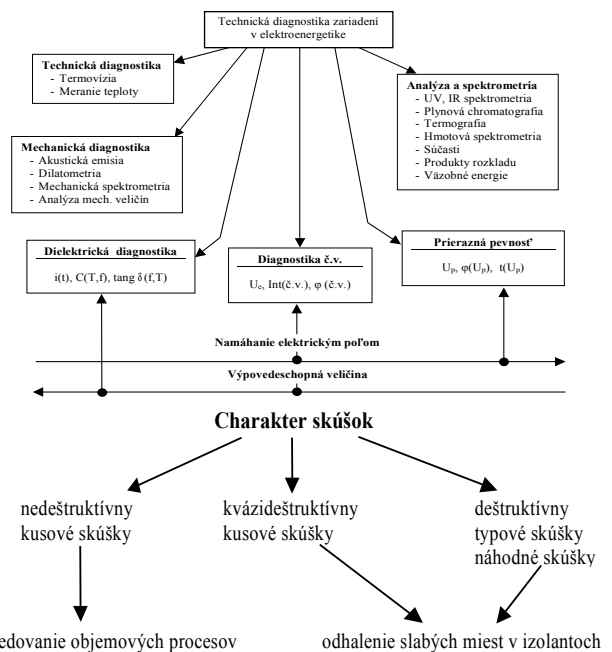
Ďalším znižovaním skúšobného napätia v porovnaní s predchádzajúcimi postupmi sa dostávame k dielektrickej diagnostike, ktorá nadobúda v ostatnom čase výrazné postavenie, nakoľko postihuje objemové elektrofyzikálne procesy v izolačných systémoch (izotermické relaxačné prúdy, priestorové náboje a pod.). Meraním takých dielektrických veličín, ako je zvodový prúd, absorpčné a resorpčné prúdy, kapacita, činiteľ dielektrických strát, ich závislosť od teploty, frekvencie, intenzity poľa doby zaťaženia, klimatických podmienok a pod., dostávame rozsiahly obraz poukazujúci na polarizačné javy a

priestorové javy v zložitých a jednoduchých izolačných systémoch.

Oddelenie techniky vysokých napätí patrí medzi tie pracoviská, ktoré sa progresívne zaoberali „odozvou“ izolačného systému na vnútorný napäťový signál o veľmi nízkej frekvencii v rozsahu  $f=(0,001\div 1)\text{Hz}$  [11]. Súčasný trend smeruje k frekvencii 0,1 Hz nielen pri dielektrických meraniach, ale aj pri meraní čiastkových výbojov. Je pozoruhodné, že merania prenosových charakteristík, ako výpovedeschopných závislostí pri diagnostifikovaní vn a vvn zariadení v širokom spektre frekvencií nadobúda na význame, najmä ak sa metóda uplatňuje v presne definovaných časových intervaloch. Takýmito skúškami sú podrobené zariadenia, nachádzajúce sa v rôznych sťažovaných klimatických podmienkach.

Rekapitulácia výpovedeschopných veličín je zhrnutá v nasledujúcom systémovom usporiadaní na obr. 2.

Druhá časť obr. 2 poukazuje na charakter a štruktúru skúšok: znižovanie hladiny skúšobného napätia vedie k nedeštruktívnym skúškam, pričom rovnako sa môže aplikovať napätie jednosmerné a striedavé, zatiaľ čo skúšobné napätie predpísané normou príslušnej krajiny vedie k deštrukcii skúmaného vvn prvku.



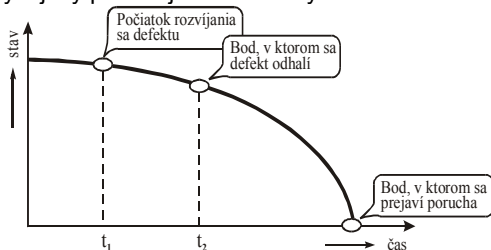
Obr. 2: Systémové usporiadanie diagnostických veličín a klasifikácia skúšok



### Technická diagnostika z hľadiska vedeckého poznania a praktickej aplikácie

Cieľom technickej diagnostiky je získať relevantné informácie o stave technických systémov. Z týchto informácií je potrebné odvodiť kritériá, resp. limitné hodnoty a na základe týchto údajov je možné upraviť, prípadne zmeniť existujúci stav. Pod pojmom technická diagnostika, ktorá je v podstate vedou o poznaní stavu elektroenergetických zariadení budeme rozumieť stanovenie a klasifikáciu príznakov z výpovedeschopných veličín, ktoré poukazujú na zmenu komponentov počas využívania zariadenia. Pre tento účel je treba urobiť taký výber diagnostických metód, ktoré disponujú vysokou výpovedeschopnosťou, vhodnou pre rozhodovací proces [6].

Frekvencia sledovania, príp. pozorovania prevádzkových elektroenergetických zariadení súvisí s tou skutočnosťou, že väčšina defektov v izolačnom systéme nevystupuje spontánne, možno však niektoré z nich zavčas odhaliť. Tento vývojový proces je znázornený na obr. 3.



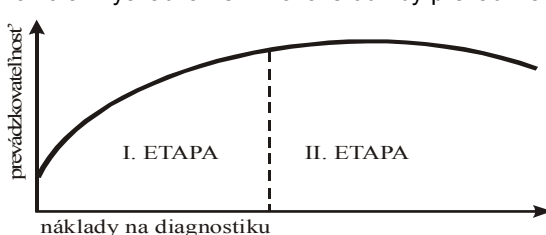
Obr. 3: Rozvíjanie sa defektu v závislosti od času (D-P interval)

Typický časový rozvoj defektu v zariadení je vyznačený D-P intervalom. Tento poukazuje na to, kedy defekt vznikol ( $t_1$ ), ako sa rozvíja do bodu D ( $t_2$ ), kedy sa môže odhaliť. V prípade, že sa zavčas neodhalí a nie sú prostriedky na zachytenie defektu, dochádza k jeho rozšíreniu čo značne urýchľuje degradačný proces (pozri  $ds/dt$ ) čím dochádza v bode P k poruche. Tento D-P interval určuje pre určitý typ poruchy frekvenciu, s akou sa musí sledovanie stavu izolácie realizovať. Interval medzi jednotlivými skúškami musí byť značne kratší ako je D-P interval, aby sa defekt zavčas spozoroval, ešte pred vznikom poruchy.

Zachytenie zmien v izolácii nie je ešte postačujúce na to, aby sa mohlo hovoriť o ďalšej použiteľnosti vn zariadenia. Okrem určenia intervalu sledovaných veličín sa musí realizovať spoľahlivá diagnostika izolačného systému, ktorá spočíva na troch dôležitých faktoroch:

- hospodárnosť (ekonomické aspekty)
- bezpečnosť prevádzky
- použiteľnosť stroja v prevádzke.

Diagnostika je teda súčasťou údržby, ktorá podľa noriem zahŕňa opatrenia za účelom zachovania menovitých hodnôt elektroenergetického zariadenia. Nominálny (predpísaný) stav nie je identický s počiatočným stavom, nakoľko ak vychádzame z filozofie údržby prevádzkovateľa,



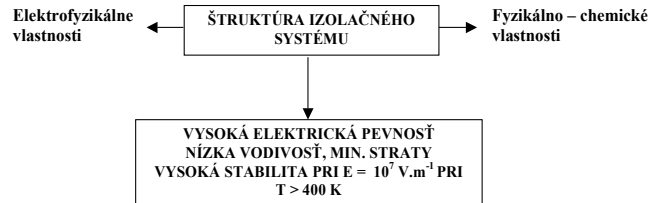
Obr. 4: Náklady vynaložené na diagnostiku a prevádzkovateľnosť zariadenia

vlastnosti systému sa menia v dôsledku jeho starnutia. Táto skutočnosť vysvetľuje aj stav, ku ktorému dochádza vtedy, ak sa so zvyšujúcimi nákladmi vynaloženými na diagnostiku dostávame do štádia, kedy sa už prevádzkovateľnosť zariadenia nezvyšuje, čo znázorňuje obr. 4.

### Faktory ovplyvňujúce diagnostiku

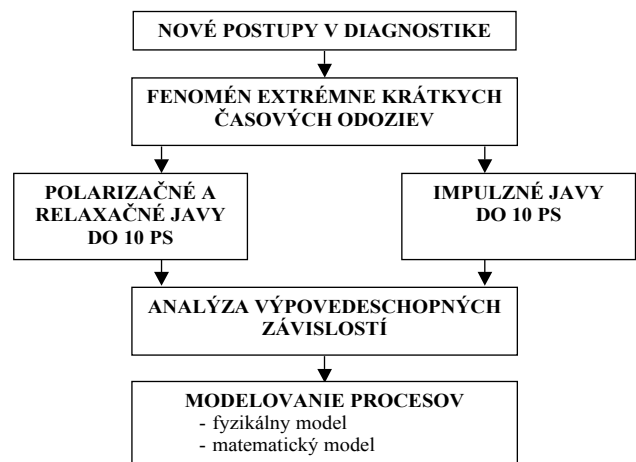
- Zvážiac vyššie uvedené aspekty a ich gradáciu, je možné zostaviť základné otázky technickej diagnostiky s ohľadom na merateľné veličiny, charakteristické pre diagnostiku do takéhoto súboru:
- Ktoré ciele diagnostiky sa musia sledovať?
- S ktorou diagnostickou technikou možno ciele diagnostiky dosiahnuť?
- Ktorá diagnostická technika poskytuje čo najviac informácií?
- Ktoré diagnostické resp. výpovedeschopné veličiny sa môžu počas diagnostifikovania určiť?
- Aká súvislosť existuje medzi diagnostickými veličinami a fyzikálnou, prípadne chemickou a technickou štruktúrou diagnostifikovaného objektu?
- Ktoré diagnostické kritérium ako hraničiaci bod určuje doporučenia na intervenciu do skúmaného – resp. sledovaného zariadenia?

Z týchto otázok vyplýva, že sa jedná o dynamický proces. Preto zavádzame dynamické systémy, pomocou ktorých je možné definovať prechody od jedného stavu ku druhému pri plnej exploatácii systému. Podstatný dôraz pritom kladieme na štruktúru izolačného systému s ohľadom na jeho štruktúru a využiteľnosť, čo sa dá sledovať z obr. 5.

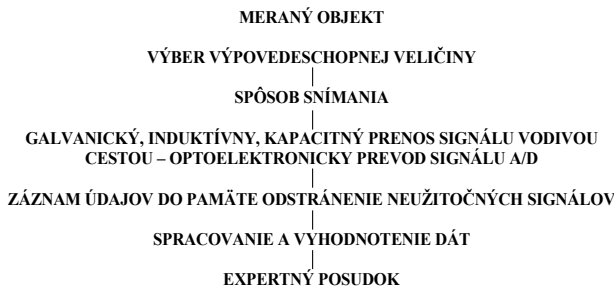


Obr. 5: Požiadavky na izolačný systém

Na základe týchto úvah sa dá zostaviť postupnosť, ktorá registruje orientáciu v diagnostických krokoch. Ukazuje sa, že sa uplatňuje hranica časových odoziev v oblasti nano a pikosekundovej, čo súčasne posúva hranicu frekvenčnú do oblasti optickej.

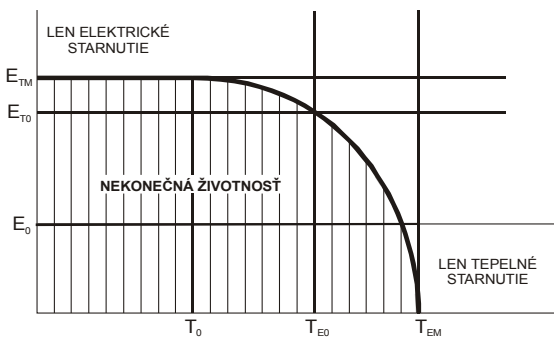


Obr. 6: Časové hranice pri diagnostifikovaní izolačných systémov



Obr. 7: Postup pri vyhodnotení nameraných výsledkov  
 Za dôležité považujeme dôkladné poznanie pozorovaného, prípadne skúmaného objektu. Potom je možné zostaviť systémové členenie jednotlivých postupov, ktoré smerujú k vypracovaniu expertného posudku. Jednotlivé kroky sú prevedené schématicky na obr. 7.

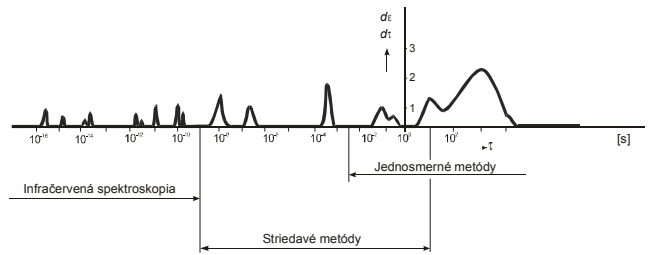
Skúmaním kombinovaného elektro-tepelného namáhania, v závislosti na čase sa dá ohraničiť životnosť izolačného systému. Pribeh  $E(T)$  z teoretického hľadiska poukazuje na hraničné oblasti, v ktorých prevláda iba jeden typ namáhania, čo vedie k domnienke, že pri nízkych teplotách starnutie v izolačnom systéme spôsobuje iba elektrické namáhanie, pričom v oblasti pod  $E_0$  dochádza v oblasti  $T_{E0} - T_{EM}$  iba k tepelnému starnutiu. V ideálnom stave, limitovanom,  $E_{T0}$  a  $T_{E0}$  by mala byť definovaná životnosť neohraničená (obr. 8).



Obr. 8: Kombinované elektrotepelné namáhanie

Pri výbere metód sme v diagnostike viazaní aj frekvenciou, aplikovanou na izoláciu vn alebo vvn zariadenia. S ohľadom na dielektrické vlastnosti systémov definujeme tri oblasti, v ktorých sa môžu uplatniť dostupné meracie metódy, vybavené príslušnou technikou. Rozdelenie oblastí je urobené na základe rozloženia polarizačného spektra podľa modelu  $d\epsilon/d\tau = f(\tau)$ . Ide o tieto oblasti (obr. 9):

- infračervenej spektroskopie ( $10^{-16} - 10^{-9}$ )s
- striedavých meracích metód ( $10^{-9} - 10^1$ )s
- jednosmerných metód ( $5 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^4$ )s

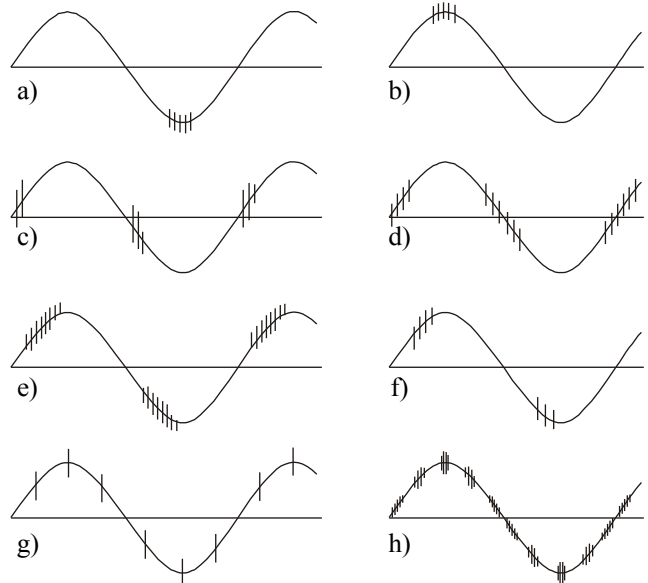


Obr. 9: Závislosť  $\frac{d\epsilon}{d\tau}$  od doby  $\tau$  – polarizačné spektrum

Zavádzaním PC techniky sa posunula hranica umožňujúca sledovať zmeny vo vnútri izolačného systému vplyvom degradačných činiteľov. Tým sa ale zvýšila aj citlivosť meracích systémov, čo bezprostredne umožnilo prienik rušivých signálov. Týmto otázkam sa budeme venovať na inom mieste.

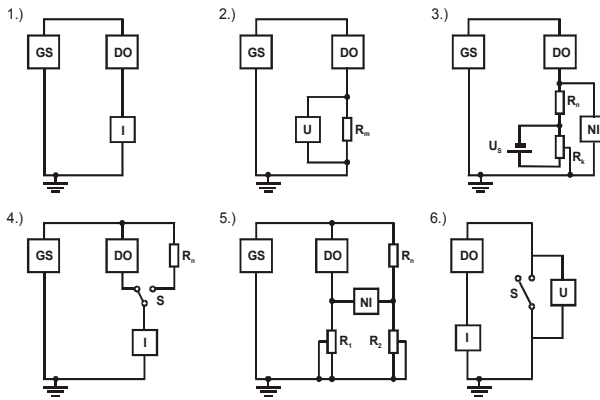
**Eliminácia rušivých signálov pri vyhodnotení výpovedeschopných veličín**

Vychádzajúc zo skúseností, získaných počas diagnostifikovaní rôznych zariadení vn a vvn v elektroenergetike metódou off-line, prípadne on-line dospievame k tomu, že závažnú úlohu hrá čistota získaného signálu. Zvyšovaním citlivosti snímacích prvkov a vysokokvalitným spracovaním signálu elektronickou cestou v širokom spektre frekvencií, môžeme dokázať, že v signále, napr. pri meraní čiastkových výbojov existuje aj pri  $f=50\text{Hz}$  minimálne osem typov rušenia (obr. 10).



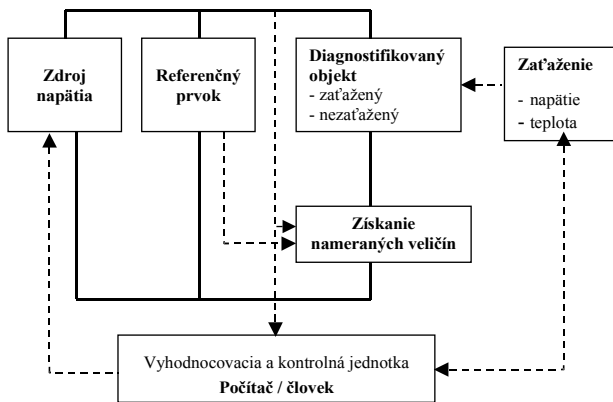
Obr. 10: (a) korónový výboj na vn elektróde; (b) korónový výboj na uzemnenej elektróde; (c) neuzemnený objekt; (d) rušenie spôsobené nedokonalým kontaktom; (e) čiastkové výboje v prostredí olej-papier alebo v plynom vyplnených dutinách; (f) povrchové výboje (olej); (g) interferencie spôsobené tyristorovými pulzarmi; (h) interferencie od namodulovaného periodického signálu

V prípade snímania a spracovania signálov pri diagnostike jednosmerným napätím vonkajšie elektrofyzikálne, prípadne magnetické rušenia môžu značne ovplyvniť namerané výsledky a sťažiť ich vyhodnotenie. Na obr. 11 uvedieme šesť možných zapojení, ktoré sa aplikujú pri meraní malých prúdov, z nich dve zapojenia sú na báze napäťovej kompenzácie, prípadne je využitý Wheatstonov mostík.

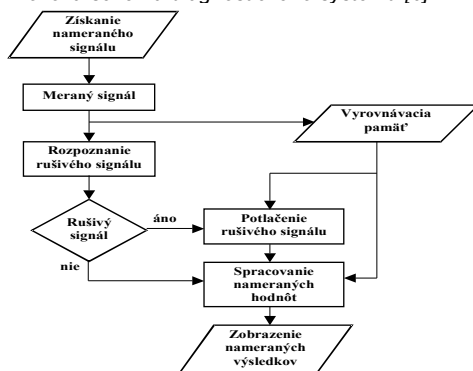


br. 11 1- priame meranie prúdu; 2 - meranie napätia na odpore  $R_m$ ; 3 - kompenzačné zapojenie; 4 - substitučný spôsob merania; 5 - porovnávací spôsob (Wheatston); 6 - meranie vybiacích kriviek a regeneračného napätia na izolačnom systéme; DO - diagnostikovaný objekt; GS - j.s. zdroj napätia

Všeobecný pohľad na spracovanie nameraného signálu daného voľbou výpovedeschopnej veličiny aplikovaním zdroja jednosmerného alebo striedavého napätia je na obr. 12. Prírodzene, že prístroj na získanie nameranej veličiny musí byť prispôbený použitému zdroju napätia. Referenčným prvkom je odporový, prípadne kapacitný normál. Vysoké požiadavky sa kladú na prístrojovú meraciu techniku, ktorá môže byť tvorená: citlivým meračom prúdu, napätia (s vysokým vstupným odporom – elektromerom), mostíkmi a pod. Zdroje napätia majú byť vysoko stabilné, pri striedavom napätí sa vyžaduje čisté sínusové napätie bez obsahu vyšších harmonických.



Obr. 12: Blokova schéma diagnostického systému [6]



Obr. 13: Eliminácia rušivého signálu

Namáhanie skúmaného izolačného systému tepelným a elektrickým poľom, prípadne mechanickými účinkami je riadené počítačom. Práve tak aj jednotka na vyhodnotenie nameraných výsledkov je koncentrovaná na PC techniku. Jednoduché spracovanie nameraného signálu je znázornené na obr. 13. Diagram bol vyvinutý pre spracovanie signálov z merania čiastkových výbojov.

### Charakteristika nedeštruktívnych metód

Na posúdenie spoľahlivosti a zvyškovej životnosti niektorých izolačných systémov boli donedávna k dispozícii len deštruktívne metódy – napätové skúšky. Vynárala sa preto potreba nedeštruktívnych metód diagnostiky starnutia na spoľahlivé stanovenie stavu izolácie systémov. Nedeštruktívnou sa rozumie metóda, ktorá dokumentuje celkový stav izolácie bez toho, aby počas skúšky zaťažovala izolačný systém vysokým skúšobným napätím. Moderné diagnostické zariadenie má podať prevádzkovateľovi informáciu o celkovom stave zariadenia. Pomáha dať fundovanú odpoveď na otázku, či sa oplatí odstrániť poruchu, alebo či je efektívnejšie izolačný systém alebo celé zariadenie vymeniť.

V súčasnosti nie je k dispozícii univerzálna metóda, ktorá by samotná, bez pomoci iných, dokázala určiť stav izolačného systému. Preto je potrebné definovať súbor metód komplexne analyzujúci stav zariadenia. Ich výber závisí na type zariadenia a na požiadavkách prevádzkovateľa. Uvedme súbor nedeštruktívnych metód:

#### Striedavé metódy

- Meranie čiastkových výbojov s číslicovým záznamom
- Meranie stratového činiteľa a kapacity
- Meranie akustickej emisie

#### Jednosmerné metódy

- Izotermická analýza absorpčných a resorpčných prúdov – IRC analýza
- Meranie izolačného odporu
- Meranie závislosti izolačného odporu na dobe priloženia meracieho napätia

### Záver

V prvej časti predkladaného príspevku sme poukázali na spätosť vývoja a existencie diagnostických metód aplikovaných na sledovanie spoľahlivosti, stability a životnosti nn a vn zariadení. Na podporu tohoto trendu je treba uviesť, že táto myšlienka ovplyvnila aj vývoj snímania užitočných signálov skúmaných výpovedeschopných veličín od metódy off-line k metóde on-line, pričom požiadavkou je, spracovať a získať výsledky v reálnom čase. Súčasný výskum a vývoj pri nasadení výpočtovej techniky vedie k tomu, aby bolo možné poruchu, prípadne vznik defektného miesta v elektroenergetických prvkoch a zariadeniach kontinuálne sledovať a pri indikácii havarijného stavu objekt odpojiť od napätovej sústavy. K tomuto bude viesť cesta prostredníctvom rýchlych elektronických ochrán, reagujúcich v časových intervaloch nižších, než je doba potrebná na vývoj kanálu elektrického prierazu. Perspektíva je teda v kontinuálnej diagnostike.

Príspevok vznikol na základe výskumu VEGA č. 1/3142/06

### Literatúra

- [1] Záliš, K.: Problematika měření částečných výbojů on-line; Zborník Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení, DIAGO 2001, VŠB TU Ostrava, IMEKO-ČR, str.142-148
- [2] Záliš, K.: Using of Expert Systems in Electrodiagnostics of Large Electrical Machines; Acta Polytechnica, Vol. 40, No. 3/2000, str. 67-75
- [3] Karas, J.: Vyhodnocovací systém pro měření částečných výbojů; Zborník TD 2000 -Diagon 99, VUT Brno, str. 107-113
- [4] Kindl, J.: Kalibrace a kalibrátory pro měření č.v.; Zborník TD 2000 -Diagon 99, VUT Brno, str. 114-119



- [5] Christian, J.: Probleme und Grenzen des Einsatzes der Übertragungsfunktion im Monitoring an Transformatoren, Symposium HAEFELY, Stuttgart 1998, str. 1/19-17/19
- [6] Porzel, R., Neudert, E., Sturm, M.: Diagnostik der Elektrischen Energietechnik, Expert Verlag, Renningen – Malsheim, 1996
- [7] Záliš, K.: Expertní systémy – efektivní nástroje koncového uživatele v elektroenergetice, Aktuální problémy elektroenergetiky a techniky vysokých napětí, FERROST Košice, 1998
- [8] Marton, K.: Diagnostika a profylaktika prvkov a zariadení vn a vvn, Elektroenergetika 98, str. 239-242, Stará Lesná 1998
- [9] Kolcunová, I.: Diagnostika vn a vvn zariadení metódou čiastkových výbojov, Habilitačná práca, FEI TU v Košiciach, 99 str. 1999
- [10] Proc. High Volt Colloquium '99, BTU Cottbus, 1999
- [11] Marton, K.; Cimbala, R.; Mikulík P.: 34. Diagnostische Methode der Isoliertesysteme Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Hochschule Ilmenau, 1989, Vortragsreihe Technische Diagnose von elektrischen Isoliertesystemen
- [12] Marton, K.: Elektrofyzikálne hranice diagnostiky vn a vvn zariadení, Aktuálne problémy elektroenergetiky a TVN, str. 51-56, FERROST Košice 2000
- [13] Marton, K.: Strommodell einer Defektstelle in den Isolationen 43. Internat. Wiss. Kolloquium, Band 4 TU Ilmenau 1998, str. 281-286
- [14] Záliš, K.: Expert systems for the Evaluation of the State of the High Voltage Transformer, Proc. 2nd I.C.D.I. Stará Lesná 2000, str. 209-214
- [15] Kováčik, J.: Ultrasonic discharge location in transformers, Proc. 2nd I.C.D.I. Stará Lesná 2000, str. 165-170
- [16] Cimbala, R.: Habilitačná práca, FEI TU v Košiciach, 1998, 84 str.

---

**Autor:** prof. Ing. Karol Marton, DrSc., Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Mäsiarska 74, 042 00 Košice, karol.marton@tuke.sk

Iraida Kolcunová

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

## Starnutie izolácie v dôsledku pôsobenia častkových výbojov

**Abstrakt.** Jednou zo základných príčin starnutia izolácie je pôsobenie elektrického poľa vytvoreného vysokým napätím, ktoré spôsobuje vznik výbojov v dutinách izolácie a vznik a rozvoj elektrických stromčekov. Článok sa zaoberá problematikou vzniku elektrických stromčekov v pevných izolantoch a popisom dejov, ktoré predchádzajú vzniku stromčekov počas tzv. inkubačnej doby.

**Abstract.** One of the basic factor of the insulation ageing is electrical field influence. Strong electrical field is the cause of discharge activity in the cavities of the insulation and the growth of electrical trees. This article deals with the problems of inception and growth of electrical trees in solid dielectrics. Process in insulating materials before the inception of electrical trees are written in this article. (Contribution for SES2006 Seminar – Insulation ageing activate by partial discharges.).

**Kľúčové slová:** VN izolácia, častkové výboje, elektrický stromček, degradácia izolácie.

**Keywords:** HV insulation, partial discharges, electrical trees, insulating degradation.

### Úvod

V miestach so zníženou elektrickou pevnosťou vplyvom vysokej intenzity elektrického poľa v izolácii vznikajú častkové výboje. Tieto výboje predstavujú preraz plyných dutiniek, lokálny preraz malých objemov pevných alebo kvapalných dielektrík, miestny preraz po povrchu pevného dielektrika. Vznik častkových výbojov závisí od tvaru elektrického poľa vo vn zariadení a od elektrofyzikálnych vlastností (zároveň aj elektrickej pevnosti) použitej izolácie.

Definícia pojmu „častkový výboj“ podľa normy STN EN 60270 je:

**častkový výboj (č.v.) (partial discharge (PD)):** miestny (lokálny) elektrický výboj, ktorý len čiastočne premostňuje izoláciu medzi vodičmi a ktorý môže ale nemusí vzniknúť v okolí vodiča.

Častkové 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 častkové výboje nevyvolávajú preraz celej izolácie, ale dochádza len k miestnemu poškodeniu dielektrika. Pri dlhodobom pôsobení častkových 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. Preto sa v súčasnej dobe kladie stále väčší dôraz na skúšky elektrických zariadení, ich cieľom je včas objaviť častkové výboje, stanoviť ich veľkosť a poprípade lokalizovať zdroj, čo býva zvlášť u veľkých a konštrukčne zložitých strojov značne ťažké.

### Základné procesy rozrušenia izolácie častkovými výbojmi

Súbor faktorov, vyvolávajúcich starnutie izolácie počas prevádzky je rôznorodý a zložitý, avšak vo väčšine prípadov jednou z príčin starnutia je lokálne elektrické pole vysokej intenzity. Podľa viacerých prác pri pôsobení elektrického poľa starnutie nastáva hlavne v dôsledku rozvoja častkových výbojov v izolácii.

Degradačný účinok častkových výbojov je výsledkom tepelného pôsobenia, bombardovania nabitými časticami (hlavne elektrónmi), pôsobenia chemicky aktívnych produktov, vznikajúcich počas rozvoja častkových výbojov a taktiež impulzných vln a vyžarovania [1].

Pôsobenie týchto faktorov vyvoláva eróziu (rozrušenie povrchu s prenosom materiálu), a tiež zmeny v štruktúre (deštrukcia, spájanie polymérnych reťazcov). Erózia môže byť podmienená nasledovnými príčinami:

- oxidáciu polymérov vysokoreaktívnymi radikálmi, vyskytujúcimi sa iba v oblasti pôsobenia výboja,
- reakciami mikroradikálov polyméru, vytvorených v dôsledku pôsobenia výbojov, s kyslíkom z plyného prostredia alebo inými aktívnymi látkami, vznikajúcimi pôsobením častkových výbojov,
- dopadom elektrónov a iónov na povrch izolačného materiálu pri výbojoch.

Inokedy sa erózia spája s procesmi ohrevu povrchu izolácie v miestach styku s kanálmi jednotlivých častkových výbojov a následného odparenia izolačného materiálu. Erózia a rozrušenie izolačného materiálu môže vzniknúť dôsledkom elektrónového bombardovania povrchu, pretože značná časť energie výboja sa prenáša elektrónmi. Postupom času vznikajú miestne prehĺbenia erózie, postupne sa rozvíjajú pravdepodobné smery intenzívneho rozrušenia materiálu, ktoré sa v rade prípadov môžu pretvárať v rozvetvené rozrušenia (dendrity). Pri častkových výbojoch malej intenzity hrá hlavnú úlohu v procese erózie reakcia oxidácie, ktorej rýchlosť pri voľnom prístupe kyslíka narastá 1,5-krát. Pri intenzívnych výbojoch je príčinou rozrušenia izolačného materiálu prednostne termodeštrukcia polymérov dôsledkom energie výboja.

Štruktúra izolačného materiálu sa mení pri priamom pôsobení výbojov na izoláciu (elektrónovo-iónové bombardovanie, ultrafialové žiarenie) a taktiež pri pôsobení plyných a iných produktov, vznikajúcich v dôsledku výboja (ozón, oxidy dusíka, atomárny kyslík, chlór, chlór vodík, soľ a iné kyseliny). Zmeny v štruktúre materiálu izolácie sa prejavujú v zmene infračervených spektrier, molekulovej hmotnosti, zväčšení tg  $\delta$ , zmene permitivity izolačného materiálu  $\epsilon$  a merného odporu  $\rho$ .

Pri častkových výbojoch v pevných a kvapalných izolačných materiáloch za neprítomnosti plyných dutiniek nadobúda osobitnú úlohu autoelektrónová emisia z povrchu elektródy pri jej zápornej polarite. Podobné procesy môžu

nastať i pri kladnej polarite elektródy, no v tomto prípade je vodivosť tvorená pravdepodobne dierovým mechanizmom. Pritom výstupná práca je menšia ako 3 eV v dôsledku zníženia potenciálovej bariéry na hranici látok, alebo v dôsledku hromadenia objemových nábojov, alebo dôsledkom pôsobenia zhluku elektrónov v kvapalnom alebo pevnom izolačnom materiáli. Zníženie potenciálovej bariéry vedie k tomu, že pri lokálnych intenzitách okolo  $5 \cdot 10^7 \text{ V/m}$  môže vzniknúť dostatočne výkonná emisia elektrónov [1].

Termoelektrónovú emisiu možno považovať za počiatok elektrónových procesov v kvapalných a pevných izolačných materiáloch, stanovujúcich ďalšie rozvítie častkových výbojov. Rozrušenie izolačného materiálu prebieha v dôsledku energie, nahromadenej elektrónmi v elektrickom poli a odovzdanej molekulám a atómom izolačného materiálu.

Energia častkových výbojov sa rozdeľuje na rozvoj nasledovných procesov:

- ohrev objemu plynu v dutinke a k nej priliehajúceho okolitého objemu pevného izolačného materiálu,
- vybudenie atómov plynu pri vzniku častkových výbojov a vyžarovanie, spojené s týmto procesom,
- ionizáciu atómov plynu,
- bombardovanie povrchu pevného dielektrika, pripadajúceho k oblasti rozvoja častkových výbojov alebo elektród (rozrušenie molekulárnych väzieb, eróziu, zmeny v štruktúre),
- rozšírenie kanálu výboja.

Pri častkových výbojoch v plynných dutinkách sa stráca okolo 30 % energie na rozšírenie kanálu výboja, do 25 % na vyžarovanie, 3-4 % na ionizáciu, 6-8 % na bombardovanie povrchu pevného dielektrika elektrónmi.

Rozrušenia, vznikajúce v pevných i kvapalných izolačných materiáloch pri neprítomnosti kyslíka, súvisia so vznikom vodíka alebo so vznikom iných plynov vodíkového pôvodu ako napr. metan, oxid uhlíka atď. Je možný vznik uhlíkatých zlúčenín, ktoré majú v rade prípadov značnú vodivosť - môžu to byť asfaltény, vytváranie uhlíkatých dendritov (povrchových dendritov, atď.). V chlórovaných izolačných materiáloch je možný vznik chlóru, chlór vodíka a ich derivátov.

Pri priereze pevných izolačných materiálov sa energia hlavne vynakladá na rozrušenie molekulárnych väzieb, ionizáciu atómov, vznikajúcich dôsledkom prerušenia väzieb, vznik plazmy. Pri skúmaní častkových výbojov sa berú do úvahy tie isté procesy, avšak v tomto prípade veľmi dôležitú úlohu majú aj spätné procesy, a to menovite - zjednotenie (spájanie) radikálov a vznik nových chemických zlúčenín. Napr. spolu s procesmi dehydrogenizácie, to znamená s procesmi odštiepenia vodíka, prebiehajú procesy hydrogenizácie, to znamená chemického zlúčenia vodíka s voľnými alebo nenasýtenými väzbami.

Ak v teórii prierezu pevných dielektrík sa skúmajú iba procesy rozrušenia, tak mechanizmus rozrušenia izolácie pôsobením častkových výbojov je zložitejší a musí zahrnúť vznik nových chemických zlúčenín, ktoré menia elektrickú i mechanickú pevnosť izolačného materiálu, menia jeho vodivosť a spôsobujú vytváranie vodivých dutiniek.

### Vznik a rozvoj elektrických stromčekov

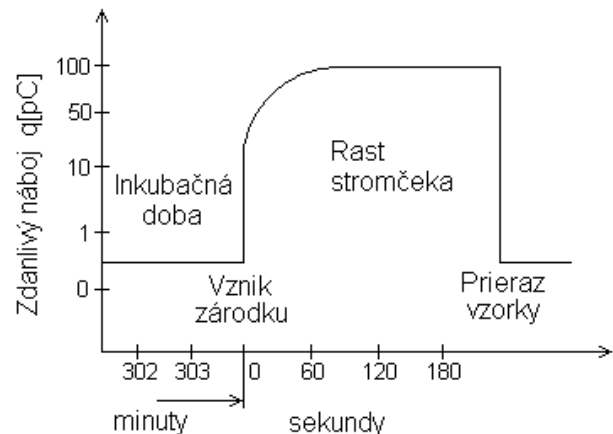
Prierezu izolácie často predchádza vznik a rozvoj útvaru, ktorý pripomína malý krík alebo stromček. Tento jav sa vyskytol pod vplyvom vhodne veľkého zaťaženia takmer vo všetkých organických izolačných materiáloch, ktoré boli pre tento účel testované. Výskum tohto problému v

posledných rokoch ukázal, že rast elektrických stromčekov môže byť podmienený lokálnym prehriatím a s tým spojenou tepelnou dekompozíciou, mechanickým poškodením v dôsledku kompresívnych síl vyvolaných elektrickým poľom, vznikom trhliniek, ktoré sú podmienené neustálymi polarizačnými zmenami napätia, prítomnosťou malých dutiniek alebo nehomogenít v izolácii [2].

Hoci je ťažké určiť, ktorá z týchto teórií je správna, injektovanie elektrónov z elektródy sa považuje v súčasnosti za hlavnú a najpravdepodobnejšiu príčinu vzniku priestorového náboja a s tým spojeného vzniku a rastu elektrických stromčekov. Presné merania s ihlovými elektródami v tuhých látkach ukázali, že dutinky nie sú nevyhnutné pre iniciáciu elektrických stromčekov.

Podľa Kučinského [1] je potrebný gradient  $10^{10} \text{ V/m}$  pre emisiu elektrónov z tuhej látky. Za tohto predpokladu pri zápornej polvine aplikovaného napätia sú z ostrých hrotov emitované elektróny do blízkeho okolitého izolantu v smere intenzity elektrického poľa. Niektoré môžu byť zachytené, niektoré môžu spôsobiť ionizáciu a zvyšok sa vráti na elektródu v nasledujúcom kladnom cykle za predpokladu, že sa ešte nachádzajú v poli s dostatočnými silovými účinkami. Ionizačná energia pre uhlíkovodík je menšia ako 10 eV, prúd spôsobený injektážou elektrónov rádovo  $10^{-12} \text{ A}$ , alebo výboj približne o hodnote 0,02 pC [2].

Za jednu periódu sa pri sieťovej frekvencii (20 ms) injektuje viac ako 6 miliónov elektrónov za sekundu, preto je opodstatnený predpoklad, že sa nejaká ionizácia musí objaviť. Experimenty so zväzkami vysokoenergetických elektrónov injektovaných do uhlíkovodíkov ukázali, že disociácia sa môže vyskytnúť a jej produkty sa javia ako plyny, hlavne vodík spolu s niektorými nízkomolekulárnymi uhlíkovodíkmi. Z toho vyplýva, že po dostatočnej absorpcii energie bude izolant obsahovať dutinku, v ktorej sa môžu objaviť častkové výboje a podmieňovať ďalší rozvoj kanála. Ak je do iniciačnej dutinky umožnený prístup vzduchu, rast stromčeka môže byť podporovaný elektrickými a elektrochemickými (oxidačnými) procesmi.



Obr. 1 Časový priebeh zmeny zdaniľového náboja

Väčšina výskumných pracovníkov modeluje podmienky vzniku elektrických stromčekových útvarov zavedením ostrých ihiel do skúmanej izolácie. Veľmi vysoké napätové namáhanie, spojené so vznikom častkových výbojov na hrote ihly spôsobuje tvorbu stromčekovitého útvaru. Typické metódy pre štúdium mechanizmu vzniku a rozvoja výbojových kanálov sú: vizuálne sledovanie meranej vzorky, pripojenej na vysoké napätie, meranie úrovne častkových výbojov, meranie času do prierezu vzorky a mikroskopické skúmanie vzorky po výbojových procesoch. Typický priebeh úrovne častkových výbojov, ktoré sa

rozvinú na hrote ihly zavedenej do polyetylénovej izolácie je naznačený na obrázku 1.

V druhom úseku sa úroveň čiastkových výbojov zvyšuje. Prudké nasadenie výbojov odpovedá času, pri ktorom sa začína šírenie prvého výbojového kanála. Tento časový úsek predstavuje rast stromčeka. Tieto dva časové úseky označíme nasledovne:

$t_z$  - čas zrodu stromčekovitého útvaru,

$t_r$  - čas rastu stromčeka od momentu zrodu do prerazu izolácie.

Potom čas do plného prerazu izolácie, t.j. čas, keď stromčekovitý útvar preklenie obidve elektródy  $t_p$ , pozostáva z času zrodu a času rastu stromčeka:

$$t_p = t_z + t_r$$

Čas zrodu môžeme zapísať v tvare [3]:

$$t_z = \tau_0 \cdot \exp \frac{W_0 - \gamma \cdot \sqrt{P_m}}{2kT}$$

kde  $W_0$  - energia väzby

$\gamma$  - koeficient štruktúry materiálu

$k$  - Boltzmannova konštanta

$T$  - absolútna teplota

$\tau_0$  - doba, úmerná frekvencii kmitov atómov v molekule

$P_m$  - mechanické namáhanie

Z daného vzorca vidíme, že čas zrodu stromčekov klesá so stúpajúcou teplotou a zväčšovaním mechanického namáhania vo vzorke. Pri zabudovaní ihly do vzorky izolácia v okolí ihly je mechanicky namáhaná. Bolo zistené, že mechanické namáhanie v polyetyléne znižuje jeho odolnosť proti tvorbe elektrických stromčekov. V súvislosti so štúdiom odolnosti zalievacích živíc proti tvorbe stromčekov bolo pozorované, že napätie, pri ktorom vznikajú stromčeky, závisí okrem iného aj od doby vytvrdzovania.

K porušeniu väzieb v izolante dochádza v dôsledku fluktuácie tepelnej energie. Mechanické namáhanie materiálu sťažuje rekombináciu rozrušených väzieb a v konečnom dôsledku vedie k deštrukcii materiálu.

Zákonitosti určujúce čas rastu stromčeka  $t_r$ , sa odlišujú od zákonitostí zrodu stromčeka. Rýchlosť rastu je priamoúmerná strednej intenzite elektrického poľa v priestore medzi elektródami a tiež v značnej miere závisí od náhodného rozloženia defektných miest, nachádzajúcich sa v štruktúre materiálu. Bola pozorovaná závislosť rozvoja stromčekov od tvaru aplikovaného napätia na vzorku. Stromčeky vznikajúce pri vyšších napätiach majú v niektorých prípadoch tvar veľmi odlišný od stromčekov, vytvorených pri nižšom napätí. Kým pri nižšom napätí z hrotu vybieha len niekoľko kanálikov (alebo iba jeden), ktoré sa až ďalej rozvetvujú (tree-like), pri vyššom napätí z hrotu vybieha väčšie množstvo kanálikov (bush-like). Ak kanáliky posudzujeme ako predĺženie hrotu, polia v okolí týchto jednotlivých "hrotov" sa superponujú. Táto superpozícia v prípade hustého vyskytu kanálikov vedie k určitému zmierneniu nehomogenity a v dôsledku toho k pomalšiemu rastu stromčeka.

### Fyzikálny rozbor vzniku a rozvoja elektrických stromčekov

Elektrický stromček je dráha, vytvorená elektricky v tuhých dielektrikách, takých ako polyetylén, epoxid, silikón, polymetylmetakrylát a iné. Pozostáva z dutých kanálov v

tvare stromčeka, vytvorených pomocou opakovaného čiastkového prerazu dielektrika, objavujúceho sa lokálne v oblastiach veľmi silného elektrického poľa. Stromček môže byť definovaný ako proces rastu takýchto dutých kanálov. Iniciácia stromčeka si vyžaduje po aplikácii striedavého napätia určitý charakteristický čas. Ten bol nazvaný inkubačnou dobou stromčeka, ktorá zvyčajne klesá pri narastajúcom aplikovanom napätí.

Počas inkubačnej doby nie je možné registrovať ani čiastkové výboje, ani vizuálne zmeny pri mikroskopickom pozorovaní v mieste najväčšieho namáhania vzorky elektrickým poľom. Po tejto inkubačnej dobe dochádza k iniciácii elektrického stromčeka a je možné kvantitatívne meraním dokázať existenciu čiastkových výbojov. Pri pôsobení intenzity elektrického poľa počas inkubačnej doby dochádza ku kumulatívnym procesom, ktoré predchádzajú a zároveň pripravujú iniciáciu stromčeka.

Sú možné dva hlavné druhy procesov. Prvý je ten, že injektované nosiče nábojov sú zachytené blízko hrotu ihly v usporiadaní hrot-doska a vytvárajú priestorový náboj, čím zosilňujú pole. Tento priestorový náboj môže snáď vysvetliť skutočnosť, že iniciácia stromčeka je odštartovaná prvým kladným impulzom čiastkového výboja. Druhý je proces oxidácie a tvorby mikrodier, iniciovaný napadnutím reťazcov polyméru injektovanými nábojovými nosičmi o vysokej energii [4].

Výmena náboja sa uskutočňuje medzi elektródou a izolantom. Výmena sa môže uskutočniť priamo medzi nimi alebo prostredníctvom plynnej fázy, ktorej existencia sa niekedy predpokladá. Preto fázové rozhranie je jedným z najdôležitejších činiteľov, ktoré podmieňujú vznik stromčekov.

Je niekoľko činiteľov, ovplyvňujúcich výmenu náboja medzi dvomi materiálmi, na ktoré pôsobí vysoká intenzita elektrického poľa. Najdôležitejšie sa zdajú byť:

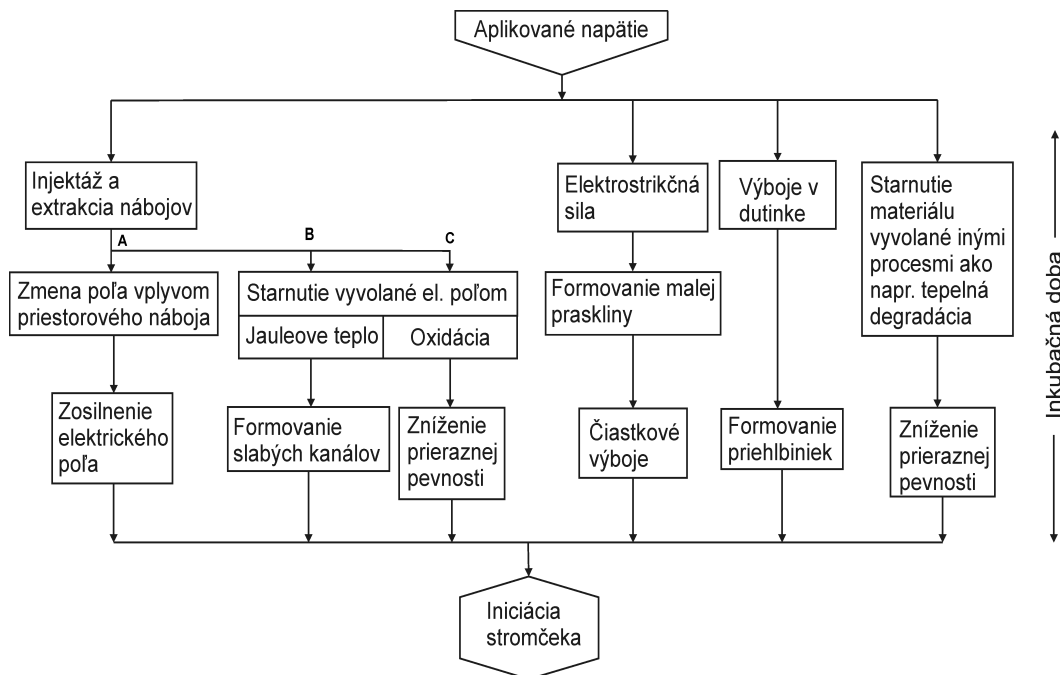
- výstupná práca kovu elektródy,
- možná existencia plynov medzi dvomi materiálmi.

Elektróny, ktoré sú emitované z elektródy a extrahované späť, majú možnosť nadobudnúť dostatočnú energiu, aby mohli atakovať polymérne reťazce, iniciovať chemickú reakciu, prípadne spôsobiť degradáciu polyméru. Degradácia môže viesť k utvoreniu veľmi úzkeho kanála. Ak sa kanál dostatočne zväčší natoľko, že môžu začať výboje v plyne, stromček začne rásť.

Stojí za povšimnutie, že v dielektriku sa stromček nevytvára počas prvej štvrtiny cyklu aplikovaného napätia, ale po niekoľkých tisícokach cyklov. Vznik stromčeka, vytvoreného jedným impulzným napätím je vylúčený. Charakter opakovaných kladných a záporných cyklov striedavého napätia musí byť kumulatívny. Procesy, odohrávajúce sa v dielektriku počas inkubačnej doby, môžu byť klasifikované nasledovne [4]:

- extrahovanie nábojov,
- elektrostričná sila,
- výboj v dutinke,
- tepelné starnutie.

Proces injektovania a extrahovania nábojov sa vzťahuje k zníženiu pevnosti dielektrika opakovaným prenosom náboja medzi dvomi materiálmi. Striedavým napätím sú niektoré elektróny emitované resp. injektované do izolantu počas zápornej polarizácie elektródy na veľmi krátku vzdialenosť. Potom sú extrahované naspäť na hrot počas pozitívnej polarizácie a znovu emitované v nasledujúcom cykle. Pri každom cykle niektoré elektróny získajú dostatočnú energiu na to, aby spôsobili určitú dekompozíciu polyméru, znížili jeho molekulovú hmotnosť, za čím nasleduje tvorba



Obr. 2 Znáročenie procesov odohrávajúcich sa v dielektriku počas inkubačnej doby

plynu. Výsledkom je vznik malej mikrodutinky, postačujúcej na vyvolanie výbojov v plyne. Tento proces môže byť rozdelený do troch podprocesov A, B, a C, ako je to znázornené na obrázku 2.

Podproces A sa vzťahuje na zmenu rozloženia náboja. Podprocesy B a C sa vzťahujú na starnutie, zapríčinené aplikáciou elektrického poľa. Lokálna zmena elektrickej vodivosti polyetylénu môže spôsobiť lokálne Jouleovo ohrevanie a vytvorí mikro kanáliky. V prípade podprocesu C polymérne reťazce sú zoxidované a súčasne vytvárajú mikroskopické dutiny v základnom materiáli polyméru. Ak je zdroj kyslíka postačujúci, zložky polyméru sú vystavené oxidácii a štiepeniu reťazca pri relatívne nízkom elektrickom namáhaní. Keď je nedostatok kyslíka, tento proces vytvára skupinu mikroductín (vo veľkom objeme frakcií) pri relatívne vysokom elektrickom namáhaní.

Proces pôsobenia elektrostrieknej sily bol pozorovaný v izolačnom systéme takom ako epoxidová živica so zaliatou ihlovou elektródou. Tento proces zahŕňa tvorbu mikromedzier medzi elektródou a dielektrikom pôsobením opakovaného elektrostriekného namáhania, vedúceho k počiatku čiastkového výboja.

Proces výbojov v dutinke sa vzťahuje k erózii vnútorného povrchu dutiny čiastkovými výbojmi. Tento jav je zaujímavý z toho hľadiska, že v dielektrikách prebieha najprv tvorba priehlbieniny na povrchu dutinky a potom nasleduje iniciácia stromčeka, ak špička priehlbieniny je veľmi elektricky namáhaná. Je to proces, ktorému predchádzajú čiastkové výboje v dutinke.

Procesy starnutia materiálu, vyvolané inými degradačnými procesmi, sa odohrávajú počas dlhého časového intervalu. Napríklad môže to byť tepelné starnutie, prebiehajúce niekoľko rokov.

### Záver

Vzniku elektrického stromčeka predchádza takzvaná inkubačná doba. Je to čas, ktorý uplynie medzi aplikovaním napätia a zrodom elektrického stromčeka. Táto doba môže trvať od niekoľkých minút po niekoľko rokov, v závislosti od veľkosti pripojeného napätia a druhu izolačného materiálu.

Po tejto etape nasleduje etapa rastu elektrického stromčeka, ktorá sa končí elektrickým prerazom. Zo skúsenosti a z literatúry vyplýva, že doba rastu elektrického stromčeka je oveľa kratšia ako inkubačná doba. Preto rast elektrického stromčeka môžeme považovať za predprerazný stav izolácie.

### Literatúra

- 1) Kučinskij, G. S.: Častičnyje razriady v vysokovoltnyh konstrukciach, 1979, Energia Leningrad
- 2) Bahder G., Dakin W., Lawson H.: Analysis of Treeing Type Breakdown, CIGRE 1978
- 3) Griač J.: Vplyv vnútorného mechanického napätia na tvorbu elektrických stromčekov v PE, III. vedecká konferencia EF VŠT, Košice 1984
- 4) Tanaka T.: Charge Transfer and Tree Initiation in Polyethylene Subjected to AC Voltage Stress, IEEE Trans. on Elect. Insul. Vol. 27, No 3, June 1992, str. 424-430

Táto práca vznikla za podpory Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA č. 1/3142/06 a Projektu pre podporu vedy a výskumu č. APVV-20-006005.

**Autor:** Irida Kolcunová, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: iraida.kolcunova@tuke.sk



Roman Cimbala

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

## Dielektrické vlastnosti XLPE káblov

**Abstrakt.** Pre diagnostiku káblových súborov sa používajú okrem iných aj metódy založené na aplikovaní jednosmerného a striedavého napätia. Príspevok sa zaoberá sledovaním dielektrických vlastností XLPE káblov. Pomocou polarizačného spektra popísaného konštantou zostarnutia je analyzovaný priebeh diagnostických veličín, akými sú kapacita a činiteľ dielektrických strát. Veličiny boli merané pre dve vzorky káblov.

**Abstract.** For diagnostic purposes there are several methods based on direct and alternate voltage application. Paper deals with observing of dielectric quantities of XPLE cables. Changes of polarization spectra with ageing constant, capacity and dissipation factor are used to spectrum change description. (Contribution for SES2006 Seminar – Dielectric Properties of XLPE Cables).

**Kľúčové slová:** diagnostika, izolačný systém, XLPE kábel, dielektrické vlastnosti, tepelná závislosť.

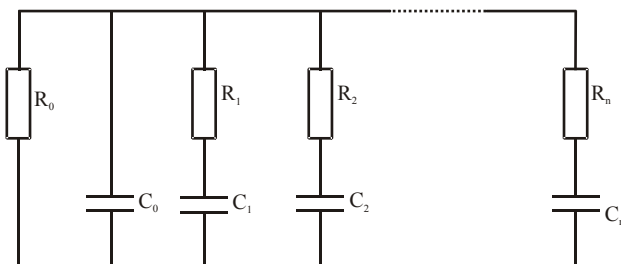
**Keywords:** diagnostics, insulation system, XLPE cable, dielectric properties, thermal dependence.

### Úvod

Kvalita dielektrík a ich elektrické charakteristiky nie sú určené len vlastnosťami, ktoré nadobudli len v procese výroby. Sú závislé aj od celého radu činiteľov, ktoré pôsobia počas prevádzky. Tieto ich ovplyvňujú vratnými, alebo nevratnými zmenami, podľa toho, či po minúti faktora vplyvu sa obnovia pôvodné vlastnosti, alebo nie. Nevratné zmeny nazývame tiež starnutím.

### Teoretický rozbor náhradnej schémy dielektrika

Izolačný systém je možné nahradiť jeho ekvivalentným modelom pozostávajúcich zo sústavy odporov a kondenzátorov. Tento model, popisujúci správanie sa systému v časovej, resp. frekvenčnej oblasti, má elektrofyzikálny základ a je možná jeho fyzikálna aplikácia. Najčastejšie používanou schémou je Maxwellov model dielektrika. Jeho výhoda spočíva v tom, že vystihuje relaxačné procesy v celom objeme dielektrika.



Obr. 14 Maxwellov model dielektrika

V náhradnom modeli  $C_0$  predstavuje geometrickú kapacitu systému a  $R_0$  jednosmerný izolačný odpor. Sériové vetvy kapacít a odporov  $R_i$ ,  $C_i$  charakterizujú jednotlivé typy polarizácií prebiehajúcich v dielektriku určené časovou konštantou  $\tau_i = R_i C_i$ .

### Popis experimentu merania dielektrických vlastností XLPE káblov

Z diagnostických meraní sa na zisťovanie stavu skúmaných káblov použilo pre výpočet konštanty zostarnutia meranie priebehu nabíjacieho (absorpcného) prúdu a pomocou scheringovho mostíka sa merala kapacita  $C$  [pF] a stratový činiteľ  $\text{tg}\delta$ . Pomocou teplovzdušnej sušičky

sa počas merania menila teplota kábla od 20°C do 100°C s krokom 10°C.

Pre diagnostické meranie bola použitá vzorka a.) prevádzkovo zostarnutého, zničeného kábla a vzorka b.) prevádzkovo neznámeho technického stavu kábla. Jednalo sa o silový kábel s hliníkovým jadrom a izoláciou zo zosieťovaného polyetylénu (XLPE, resp. XPE). Výrobcom kábla b) je KABLO Bratislava

- vzorka a.) 22 kV - CKEKVCEY 1 x 300/25
- vzorka b.) 22 kV - AXEKCEY 1 x 240/25

Vzorky kábla mali dĺžku 1m. Ochranný plášť kábla a polovodivá vrstva boli odstránené (20 cm na oboch koncoch) a tienenia vyvedené, čím bol kábel pripravený na meranie. Boli sledované nasledovné dielektrické vlastnosti:

### Polarizačné spektrum

Bol vykonaný výpočet amplitúd prúdov  $I_{mi}$  a časov stabilizácie  $\tau_i$ . Vstupom pre výpočet týchto konštant boli namerané závislosti nabíjacieho prúdu. Pri výpočte sa vychádzalo z rovnice (17), ktorá celkový nabíjací prúd popisuje ako superpozíciu nabíjajúcich prúdov zodpovedajúcich jednotlivým polarizačným procesom prebiehajúcich v dielektriku.

$$i_t(t) = \frac{U_0}{R_0} + \sum_{i=1}^n I_{mi} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

(1)

kde :  $i_t(t)$  – časový priebeh nabíjacieho prúdu,  $U_0$  – priložené jednosmerné napätie,  $R_0$  – izolačný odpor,  $I_{mi}$  – maximálna výchylka  $i$ -teho elementárneho Debyeovho prúdu,  $\tau_i$  – relaxačná časová konštanta  $i$ -eho elementárneho Debyeovho prúdu

Z nameraných závislostí nabíjajúcich prúdov boli vypočítané konštanty elementárnych prúdov a časov stabilizácie pre sedem polarizačných procesov. Z ďalšieho vyhodnocovania však boli vylúčené tie časti rozvoja amplitúd a časov stabilizácie, ktoré obsahovali hodnoty menšie alebo rovné 0 alebo väčšie ako 107, čo znamenalo, že pri analyzovaní sme nakoniec vychádzali z hodnôt  $I_{mi}$  a  $\tau_i$  pre 1 až 3 polarizačné procesy. Pre  $n = 3$  polarizačných procesov je možné vypočítať konštantu zostarnutia  $A$ , ktorá je dôležitým parametrom pre zhodnotenie zostarnutia izolácie .

$$A = \frac{1 + \frac{\text{Im}_2 \cdot \tau_2}{\text{Im}_1 \cdot \tau_1} \left( 1 - e^{-\frac{\tau_3}{\tau_2}} \right) + \frac{\text{Im}_3 \cdot \tau_3}{\text{Im}_1 \cdot \tau_1} \left( 1 - \frac{1}{e} \right)}{1 + \frac{\text{Im}_2 \cdot \tau_2}{\text{Im}_1 \cdot \tau_1} \left( 1 - \frac{1}{e} \right) + \frac{\text{Im}_3 \cdot \tau_3}{\text{Im}_1 \cdot \tau_1} \left( 1 - e^{-\frac{\tau_2}{\tau_3}} \right)}$$

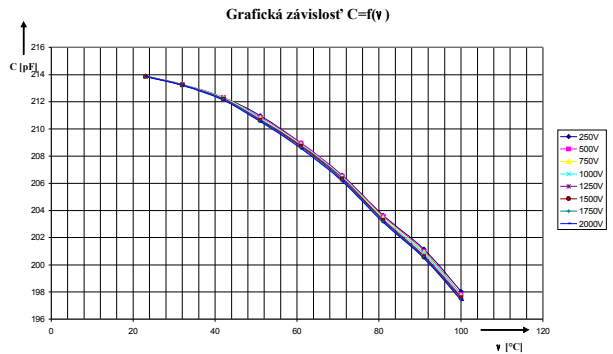
(2)

**Meranie kapacity C a stratového činiteľa tgδ**

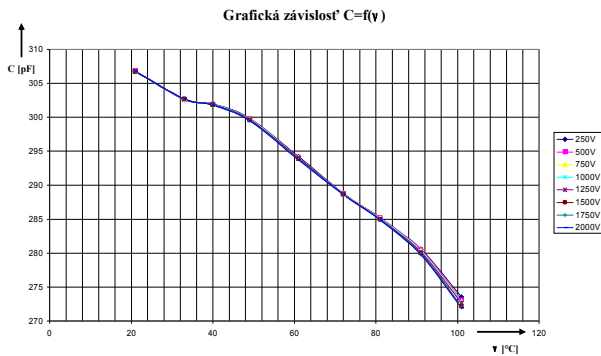
Scheringov mostík použijeme na meranie kapacity testovanej vzorky kábla C [pF] a stratového činiteľa tgδ. Pomocou teplovzdušnej sušičky pred každým meraním vzorky kábla sme simulovali teplotu prostredia od 20°C do 100°C s krokom 10°C. Pri jednotlivých teplotách sme odmerali hodnoty kapacity C a stratového činiteľa tgδ pri napätí od 250V do 2kV s krokom 250V.

**Analýza nameraných výsledkov**

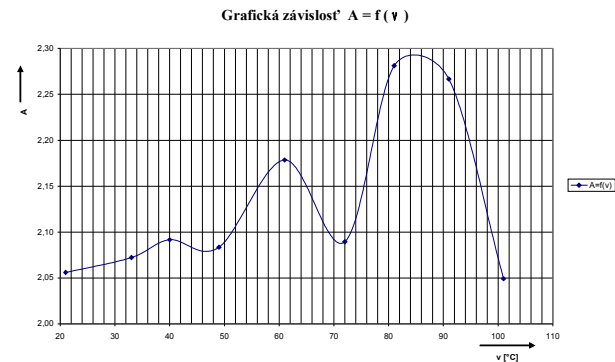
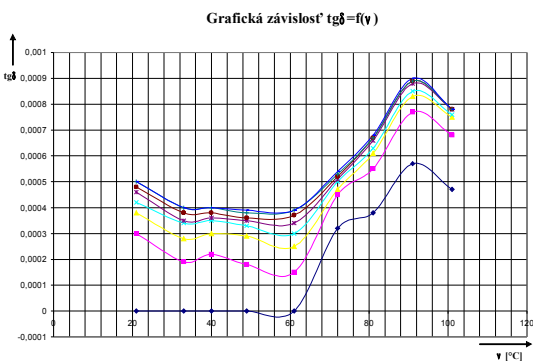
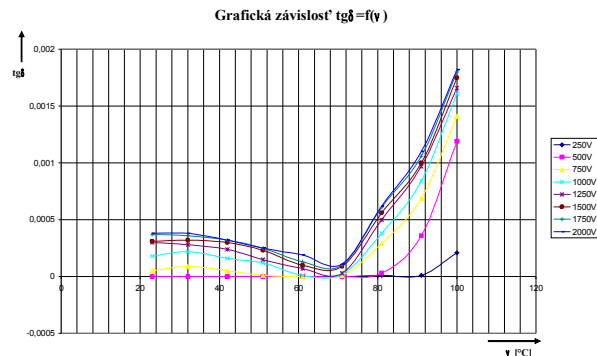
Grafy hodnôt kapacity C a stratového činiteľa tgδ meraných vzoriek káblov a.) a b.) pomocou scheringovho mostíka sú na obr. 1-4 [2].



br. 3 Grafická závislosť C = f (v) kábla b.)

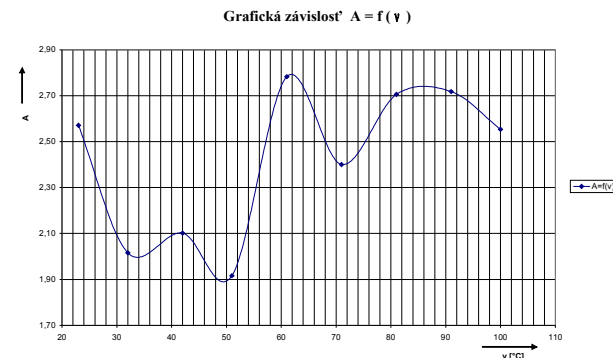


Obr. 115 Grafická závislosť C = f (v) kábla a.) kábla a.)



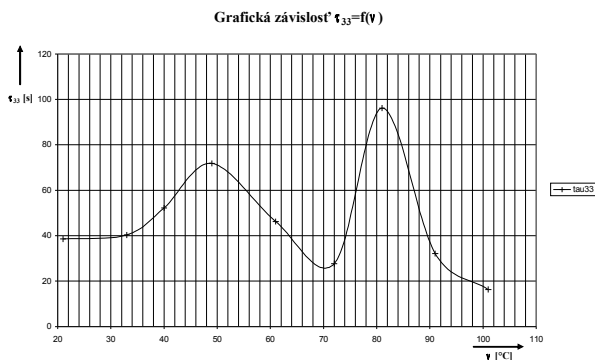
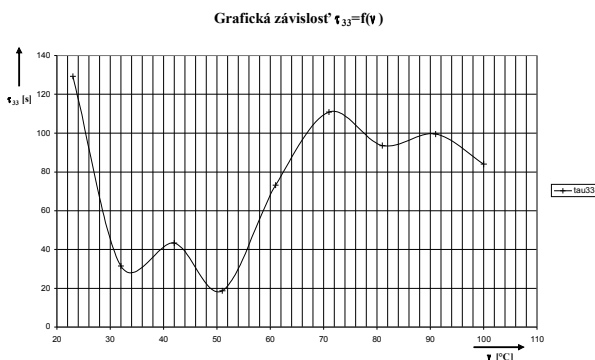
Obr. 4 Grafická závislosť tgδ = f (v) kábla b.)

Obr. 5 Grafická závislosť konštanty zostarnutia kábla a.)



Obr. 6 Grafická závislosť konštanty zostarnutia kábla b.)

Grafická interpretácia konštant elementárnych prúdov  $I_{mi}$  a časov  $\tau_i$  stabilizácie pre 3. polarizačný proces káblov a.) a b) je na obrázkoch 7 a 8

Obr. 7 Grafická závislosť  $\tau_{33}=f(\nu)$  pre 3. polarizačný proces kábla a.)Obr. 8 Grafická závislosť  $\tau_{33}=f(\nu)$  pre 3. polarizačný proces kábla b.)

### Záver

Rozsah práce nemohol obsiahnuť väčší počet meraných vzoriek pre súbor získaných údajov a tým pádom podať komplexnejší pohľad na tepelnú závislosť sledovaných dielektrických vlastností izolačného systému.

Bolo zistené, že tepelné závislosti kapacity, činiteľa dielektrických strát ale hlavne konštanty zostarnutia popisujúcej zmenu polarizačného spektra nemajú pre XLPE káble priebeh monotónneho charakteru.

Časové konštanty stabilizácie  $\tau_i$  a elementárne prúdy  $I_{mi}$  nevieme jednoznačne určiť, či daný priebeh v závislosti od teploty monotónne narastá alebo klesá. Z toho dôvodu nevieme jednoznačne dané konštanty použiť na odlišenie nameraných vzoriek a teda spoľahlivo určiť stav izolačného materiálu. Je nutné aplikovať metódu, ktorá skúma ich vlastností ako celok a nato je vhodná neurónová sieť. Tá dokáže rozpoznávať na základe vstupu definované výstupy.

### Literatúra

- [1] Beigert, M.: Mikrodielektrometrische zerstorungsfreie Alterungsdiagnostik von PE – und VPE – isolierten Mittelspannungskabeln, Essen 1995
- [2] Semančík P.: Transportné javy v dielektrikách, diplomová práca KEE FEI TU Košice, Košice 2006

Tento článok bol vypracovaný s podporou grantov VEGA, číslo projektu 1/3142/06 a APVaV -20-006005

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

Jaroslav Petráš

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

## Metodika vyhodnocovania meraní akustickej emisie čiastkových výbojov

**Abstrakt.** Článok sa zaoberá akustickou emisiou čiastkových výbojov, jej charakteristikou a možným využitím v rámci diagnostických metód vysokonapäťových elektroenergetických zariadení. Zároveň sú popísané možné spôsoby vyhodnotenia nameraných impulzov akustickej emisie čiastkových výbojov.

**Abstract.** The paper deals with the acoustic emission of partial discharges, its characteristics and its possible exploitation in the framework of high voltage electric power device diagnostic methods. Possible methods are also described when evaluating measured pulses of acoustic emission of partial discharges. (Contribution for SES2006 Seminar – Evaluation methods of partial discharge acoustic emission measurement).

**Kľúčové slová:** čiastkové výboje, akustická emisia.

**Keywords:** partial discharges, acoustic emission.

### Úvod

Jednou z metód diagnostiky elektro-energetických zariadení je metóda akustickej lokalizácie čiastkových výbojov (ČV), ktorá využíva akustickú emisiu čiastkových výbojov a patrí do súboru diagnostických metód pre izolačné systémy elektrických strojov [1]. Princíp tejto metódy spočíva v tom, že čiastkové výboje sú zdrojom akustických signálov, tzn. pri čiastkových výbojoch sa časť elektrickej energie mení na mechanickú energiu. Týmto sa miesto v dielektriku, kde dochádza k čiastkovým výbojom stáva zdrojom mechanického vlnenia. Charakter zdroja vlnenia je taký, že frekvenčné spektrum vlnenia spadá do pásma akustických vln. To znamená, že je možné ho detekovať akustickými snímačmi a následne signál previesť na elektrický signál pre ďalšie spracovanie. V [2] je uvedená základná schéma tohto princípu merania ČV.

### Využitie akustickej metódy lokalizácie čiastkových výbojov

Výpovedeschopnosť tejto metódy detekcie a lokalizácie čiastkových výbojov je daná hlavne tým, ako je signál interpretovaný, t.j. ktoré parametre signálu je potrebné extrahovať. V prípade akustickej emisie čiastkových výbojov ide o impulzový náhodný proces, ktorý je realizovaný časovou postupnosťou náhodných impulzov, pričom náhodný charakter vykazujú tieto parametre procesu: tvar jednotlivého impulzu, amplitúda, doba trvania impulzu, doba nábehu, okamih výskytu impulzu (fáza). Výber vhodných parametrov pre charakteristiku závisí najmä na štatistickej povahe signálu:

pri dlhšom trvaní signálu akustickej emisie (AE) s viacerými energetickými impulzmi je vhodné zvoliť štatistické veličiny časového priebehu signálu

v prípade ojedinelých impulzov je možné skúmať časový priebeh samotného impulzu a extrahovať parametre ako: doba nábehu impulzu, špičková amplitúda, doba doznievania, celkové trvanie impulzu pri určitej definovanej hladine priebehu, tvar obálky impulzu a ďalšie parametre charakterizujúce impulz. Osobitne je potrebné skúmať frekvenčnú charakteristiku signálu a výkonové spektrum.

Pri lokalizácii č.v., tzn. pri určovaní súradníc zdroja č.v. v trojrozmernom priestore, kde je premietnutý obraz elektrického zariadenia, na ktorom bolo meranie vykonávané je potrebné zobrať do úvahy AE signál z viacerých snímačov zároveň.

Pomerne rozpracovanou metódou lokalizácie č.v je práve lokalizácia pomocou akustickej emisie. Používajú sa najmenej tri snímače vhodne v priestore rozmiestnené. Každý zo snímačov zosníma AE signál, ale s rôznym oneskorením oproti referenčnému času. Zo známych geometrických rozmerov elektrického zariadenia, známych polôh jednotlivých snímačov a časov oneskorení je možné vypočítať polohu zdroja signálu AE. Metóda je v súčasnosti využívaná v existujúcich expertných systémoch od rôznych výrobcov s viacerými vstupnými kanálmi, pomocou ktorých je možné za vhodných podmienok relatívne presne lokalizovať zdroj č.v.

Nie vždy sú však geometrické rozmery alebo vnútorná konštrukcia diagnostikovaného zariadenia k dispozícii. Súhrn parametrov vhodne extrahovaných zo zosnímaných akustických signálov ale dáva celkový obraz nielen o zdroji čiastkových výbojov a o jeho umiestnení, ale aj o prostredí, v ktorom sa signál AE šíril a o prenosovej funkcii akusticko-elektrického meniča. Nie triviálnou úlohou je analýza celkového súhrnu parametrov signálu AE a jeho rozklad na parciálne parametre, ktoré by charakterizovali osobitne vplyv typu zdroja (povrchový, kĺzavý, korónový výboj, výboj v dutine, č.v. v pevnom dielektriku a iné), vplyv charakteru prostredia (homogénne alebo nehomogénne, skupenstvo prostredia, počet, rozmiestnenie a odrazivosť prekážok v homogénnom prostredí, charakter a veľkosť tlmenia v prostredí a pod.) a vplyv prenosovej funkcie akustického snímača (amplitúdová frekvenčná charakteristika).

### Získavanie parametrov akustickej emisie čiastkových výbojov

Zosnímaný signál akustickej emisie zdroja čiastkových výbojov obsahuje často akustický aj elektrický šum. Tento šum generovaný okolím je na signál impulzu č.v. superponovaný a najmä pri akustickom šume je veľmi obtiažne, ba niekedy až nemožné ho eliminovať. Čiastočným riešením môže byť použitie úzkopásmovej sondy, ale v prípade, že nie je možné vyhnúť sa použitiu širokopásmovej sondy, v užitočnom signále sa uplatňuje celá škála rušivých signálov.

Pri meraní súčasnými meracími systémami máme pri sledovaní akustickej emisie čiastkových výbojov ako náhodného impulzového procesu k dispozícii celý časový rad signálov – impulzov č.v. Jednou z prvých úloh pri

získavaní parametrov charakterizujúcich akustický kanál je detekcia pravidielnosti v časovom rade. Ide o vytvorenie algoritmu pre extrakciu „šablóny“ impulzu, ktorý merá daná sonda za konštantných okolností. Táto šablóna by charakterizovala celý rad impulzov - triedu signálov zosnímaných za konštantných podmienok merania. V ďalšom je načrtnutý postup, ako získať túto šablónu impulzu signálu akustickej emisie č.v. [3]:

-prvý krok by mal byť filtrácia signálu, napr. pásmovým filtrom, ktorého hraničné frekvencie určíme podľa priemerného výkonového spektra triedy signálov pre odfiltrovanie elektrického a akustického šumu,

-množina signálov danej triedy je však amplitúdovo rôznorodá a nie je časovo zarovnaná. Amplitúdové rozdiely možno vyrovnať pomocou normalizácie impulzov. Nech:

$$(1) \quad h_{m,i}(k), k=1,2,\dots,N_m; i=1,2,\dots,L$$

je  $i$ -tý filtrovaný a amplitúdovo normalizovaný signál triedy

$$m, m=1,2,\dots,M$$

kde  $M$  je počet tried signálov,  $N_m$  je počet nameraných vzoriek a  $L$  je počet signálov v triede (predpokladajme, že je rovnaký v každej triede signálov).

-bez časového zarovnania by odhadnutá šablóna bola časovo „rozmazaná“. V prípade impulzov budeme časovo zarovnávať na ich čelo. Zarovnávanie aplikujeme pri spriemerovaní impulzov a spočíva v rozdelení množiny signálov (s počtom signálov  $2^n$ , kde  $n$  je celé kladné číslo) na páry signálov, pre ktoré zistíme koreláciu a zarovnáme ich podľa indexu vzorky maximálnej korelácie. Takto časovo zarovnané impulzy spriemerujeme a výsledok použijeme pre vytvorenie nového páru (spolu  $2^{n/2}$ ), na ktorý aplikujeme rovnaký zarovnávací postup. Po  $n$ -tom zopakovaní kroku získame časovo zarovnaný spriemerovaný časový priebeh impulzu – šablónu impulzu reprezentujúcu celú triedu signálov.

Ak teda predpokladáme, že  $L$  je celočíselná mocnina 2, potom priemer  $L$  signálov počítame:

$$(2) \quad \bar{h}_{m,L}(k), m = 1,2,\dots,M$$

$$(3) \quad \bar{h}_{m,L}(k) = (1/2)[\bar{h}_{m;1 \rightarrow (L/2)}(k) + \bar{h}_{m;(L/2)+1 \rightarrow L}(k)]$$

kde

$$(4) \quad \bar{h}_{m;1 \rightarrow (L/2)}(k) = [1/(L/2)] \sum_{i=1}^{L/2} h_{m,i}(k), k = 1,2,\dots,N_m$$

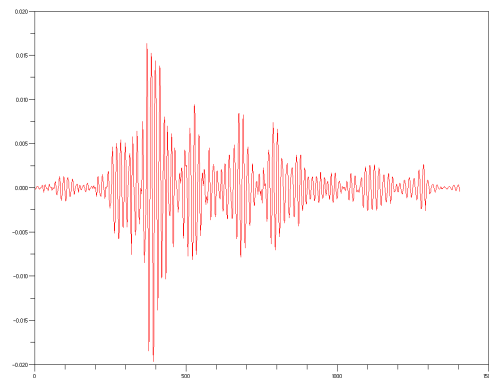
je priemer prvej polovice  $L$  signálov a

$$(5) \quad \bar{h}_{m;(L/2)+1 \rightarrow L}(k) = [1/(L/2)] \sum_{i=(L/2)+1}^L h_{m,i}(k), k = 1,2,\dots,N_m$$

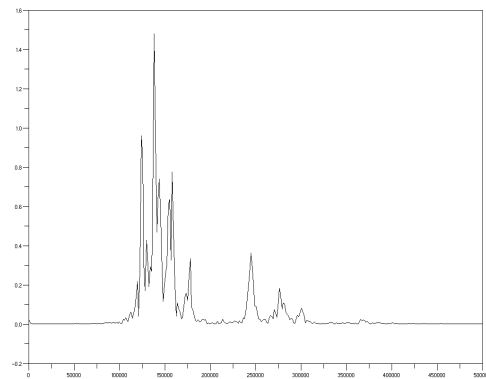
je priemer druhej polovice  $L$  signálov. Ďalším rozdelením množiny dosiahneme úroveň, keď podmnožiny už obsahujú iba jeden signál, a nie je možné ich ďalej deliť. Táto úroveň je pre uvedený postup inicializačná.

## Výsledky meraní

Na obr. 1 - 10 sú znázornené príklady vypočítaných šablón impulzov č.v. spolu s vypočítanou amplitúdovou frekvenčnou charakteristikou šablón impulzov. Všetky merania boli vykonané v laboratóriu Katedry elektroenergetiky FEI TU Košice, pričom čiastkové výboje boli simulované pomocou bleskoistky ponorenej do kovovej vaničky s transformátorovým olejom, na stene ktorej boli umiestnené piezoelektrické sondy. Merania boli vykonané pri rôznych podmienkach: rôzne umiestnenie bleskoistky vzhľadom na steny vaničky, s a bez prídavnej bariéry medzi bleskoistkou a stenami vaničky. Zároveň boli zosnímané signály generované kalibračnou ceruzkou a šum generovaný pomocou brúsneho papiera.

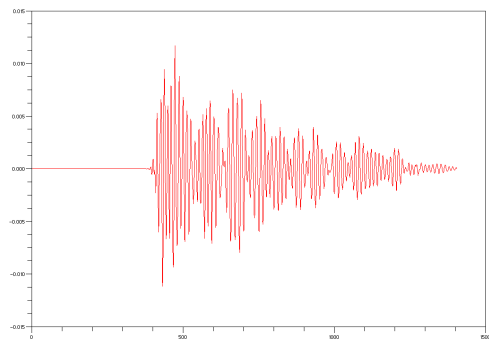


Obr.1. Šablóna signálu akustickej emisie - meracia zostava s bleskoistkou bez prídavnej bariéry



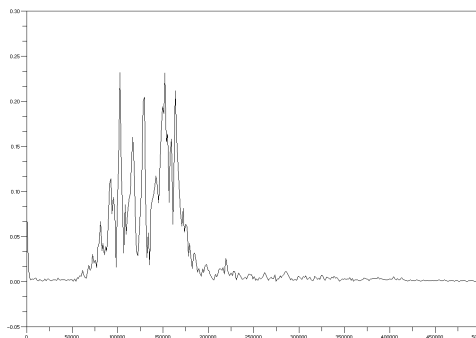
Obr.2. AFCH šablóny signálu akustickej emisie - meracia zostava s bleskoistkou bez prídavnej bariéry



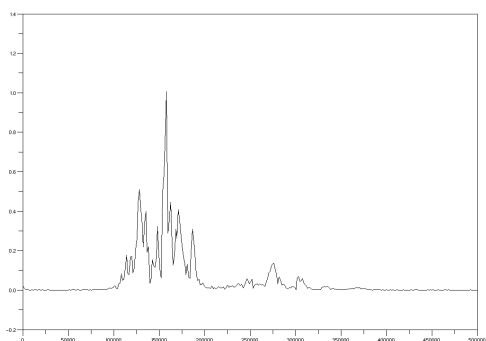


Obr.3. Šablóna signálu akustickej emisie - meracia zostava s bleskoistkou s prídavnou bariérou valcového tvaru

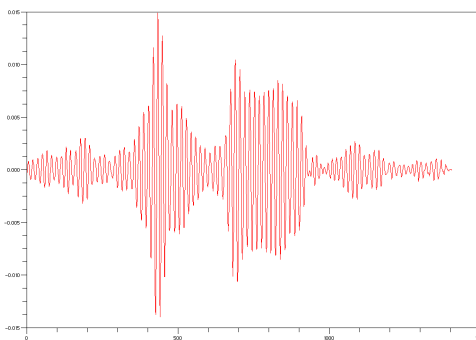
amplitúdy frekvenčných zložiek od 100 kHz do 200 kHz s podružnou oblasťou vyšších amplitúd od 250 kHz do 350 kHz) a impulzov iného pôvodu (šum – nie je výrazné ohraničenie frekvencií pod 100 kHz a nad 200 kHz;)



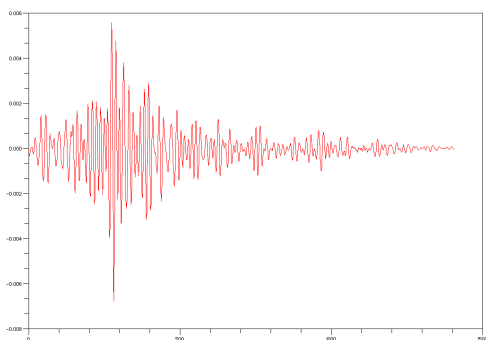
Obr.6. AFCH šablóny signálu akustickej emisie - meracia zostava bez signálu z bleskoistky s umelo generovaným šumom



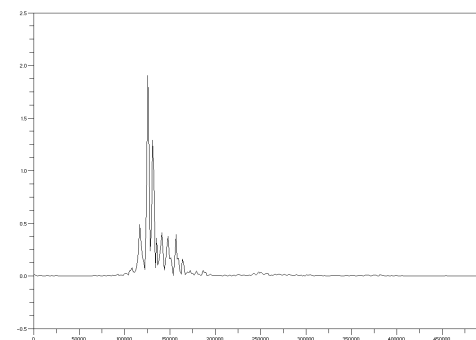
Obr.4. AFCH šablóny signálu akustickej emisie - meracia zostava s bleskoistkou s prídavnou bariérou valcového tvaru



Obr.7. Šablóna signálu akustickej emisie - meracia zostava so signálom z bleskoistky spolu s umelo generovaným šumom

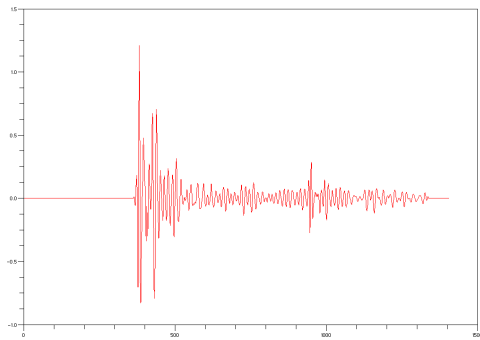


Obr.5. Šablóna signálu akustickej emisie - meracia zostava bez signálu z bleskoistky s umelo generovaným šumom

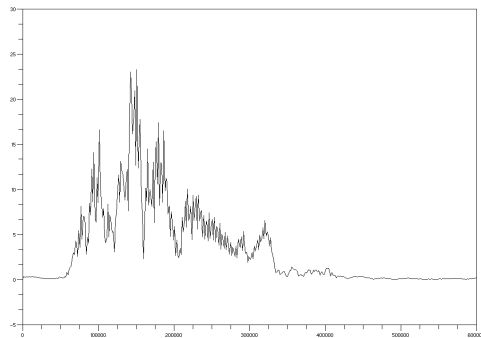


Obr.8. Šablóna signálu akustickej emisie - meracia zostava so signálom z bleskoistky spolu s umelo generovaným šumom

Signály zosnímané akusto-elektrickými meničmi umiestnenými na stenách kovovej vaničky boli detekované ako možné signály akustickej emisie čiastkových výbojov a následne zaznamenané pomocou viacanálového expertného systému. Pri analýze boli pre jednotlivé zostavy merania a kanály vytvorené podľa vyššie opísaného postupu šablóny impulzov pre dané podmienky a vypočítané ich amplitúdové frekvenčné charakteristiky. Prvé výsledky napr. ukazujú rozdiely medzi amplitúdovou frekvenčnou charakteristikou impulzov čiastkových výbojov (vyššie



Obr.9. Šablóna signálu akustickej emisie - meracia zostava so signálom z kalibračnej ceruzky



Obr.10. Šablóna signálu akustickej emisie - meracia zostava so signálom z kalibračnej ceruzky

### Záver

Z uvedených príkladov je zrejmé, že už rozpoznanie šumového signálu, signálu kalibračnej ceruzky alebo signálu akustickej emisie čiastkových výbojov iba na základe známeho časového priebehu impulzov nie je jednoduchá úloha. Možnosťami riešenia môžu byť vytvorenie šablóny impulzov čiastkových výbojov a jej analýza v časovej a frekvenčnej doméne alebo číselná charakteristika náhodného impulzového procesu (stredná hodnota, rozptyl, korelačná funkcia, výkonové spektrum).

### Literatúra

- [1] Kolcunová I., Kršňák I., Cimbala R.: Diagnostické meranie izolačného systému elektrických strojov, časopis Elektrotechnika v praxi, ročník 13, číslo 5-6/2003, str. 62-65 ISSN 0862-9730
- [2] Kolcunová, I. - Petráš, J.: Poruchy transformátorov a ich lokalizácia. In: Nové smery v diagnostike a opravách elektrických strojov a zariadení: Zborník prednášok 4. medzinárodnej vedeckej a odbornej konferencie: Žilina, Malá Lučivná, 24.-26.Máj 2006. Žilina: Žilinská univerzita, 2006. s. 109-112. ISBN 80-8070-545-3
- [3] Vaidyanathan R. et al.: Parametric and non-parametric signal analysis for mapping air flow from ear canal to tongue movement, International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2004, Montreal
- [4] Skubis J.: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych, Opole (1998)
- [5] Prchal J.: Signály a soustavy, SNTL, Praha 1987

*Tento článok bol vypracovaný na základe podpory VEGA, číslo projektu 1/3142/2006 a podpory APVV, číslo projektu APVV-20-006005.*

**Autor:** Jaroslav Petráš, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jaroslav.petras@tuke.sk

Jaroslav Džmura

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

## Nekonvenčný typ elektrického odlučovača na striedavé napätie

**Abstrakt.** Tento príspevok sa zaoberá odlučovaním pevných prímies z prúdiacich plynov s využitím nekonvenčného elektrického odlučovača s bariérou napájaného striedavým vysokým napätím pre rôzne tvary korónujúcich elektród. V závere príspevku sú zhodnotené percentuálne odlučovosti pre jednotlivé typy korónujúcich elektród pri odlučovaní rôznych druhov pevných častíc.

**Abstract.** The paper deals with possibility of charging and transporting macroscopic particles in alternating electric field. The model of electric precipitator with dielectric collecting electrode supplied by alternating high voltage was constructed and tested with a lot of experiments. The precipitation efficiency of this model for three specimens of dust with electric resistivity in range of 100–106  $\Omega \cdot m$  was tested. The possibility to use of the electrode systems with barrier in service is shown in this paper. (**Unconventional type of electrical dust precipitator**).

**Kľúčové slová:** nekonvenčný typ odlučovača, odlučovač napájaný striedavým napätím, odlučovanie pevných častíc.

**Keywords:** unconventional type of precipitator, precipitator supplied by AC voltage, separating of dust particles.

### Úvod

V súčasnej dobe existuje niekoľko typov odlučovačov, no najčastejšie sa používajú vysokonapäťové elektrické odlučovače napájané jednosmerným napätím, pretože sú schopné zabezpečiť vysoké vyčistenie prúdiaceho plynu. Vysokonapäťový odlučovač napájaný jednosmerným napätím najlepšie pracuje, ak merný odpor pevnej prímies je v určitom rozmedzí. V prípade, že elektrofyzikálne vlastnosti odlučovaného média nevyhovujú podmienkam odlučovacích procesov pri jednosmernom napájaní, je nutné hľadať iné technologické postupy. Jedným z nich sa javí odlučovanie pri striedavom napätí.

### Dôvody aplikácie striedavého napätia

Elektrický odlučovač napájaný jednosmerným napätím najlepšie pracuje, ak merný odpor prímies je v rozsahu  $10^2$  až  $10^{10} \Omega \cdot m$  [2]. Ak merný odpor prímies je väčší, je veľká pravdepodobnosť, že v odlučovači vznikne spätná koróna, ktorá zníži účinnosť odlučovania a spôsobuje výboje v medzielektródovom priestore [4]. Na druhej strane, ak merný odpor prímies je menší, častice pri dosiahnutí zbernej elektródy sa rýchlo vybijú a sú znovu strhávané prúdiacim plynom. V takýchto prípadoch je najvhodnejšie použiť na napájanie elektrického odlučovača striedavé napätie. To bolo hlavným dôvodom, prečo sa začalo uvažovať o jeho využití.

Elektrický odlučovač napájaný striedavým napätím potrebuje pre správnu funkciu bariéru v medzielektródovom priestore, ktorá okrem iného zamedzí vzniku spätnej koróny a pri odlučovaní prášku s nízkym merným odporom zabezpečí, že sa tento pri usadení sa na zbernej elektróde okamžite nevybije a nie je znovu strhávaný prúdiacim plynom. Takže striedavé napätie je vhodné na odlučovanie prímies s veľmi vysokým aj s nízkym merným odporom.

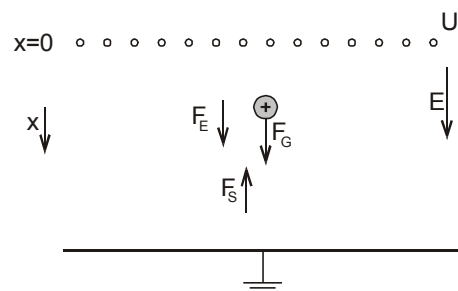
### Teoretická analýza dynamiky častíc makroskopickej veľkosti

Podnet k riešeniu pohybových rovníc (dráha, rýchlosť príp. zrýchlenie) vyšiel z technológie nanášania častíc guľovitého tvaru, prípadne tvaru rotačného elipsoidu, resp. krátkych vlákn [6], [8].

Pri riešení pohybovej rovnice sa vychádza z reálnych podmienok, aké sa vyskytujú pri technológii nanášania častíc za predpokladu, že častice získajú náboj [6]:

- korónovým nabíjaním,
- kontaktným nabíjaním.

Zjednodušené usporiadanie zariadenia je na obr. 1.



Obr.1. Usporiadanie experimentálneho zariadenia na nanášanie častíc

Ak budeme uvažovať transportnú oblasť, v ktorej elektrické pole je kvázihomogénne, môžeme rovnicu silových účinkov na časticu vyjadriť podľa rovnice:

$$F = F_E + F_G - F_S \quad (1)$$

kde  $F$  – celková sila pôsobiaca na časticu  
 $F_E$  – sila od elektrického poľa  
 $F_G$  – gravitačná sila  
 $F_S$  – Stockesova sila

Porovnaním týchto síl dominantnú úlohu má sila od elektrického poľa [6]. Z bilancie silových účinkov po dosadení za jednotlivé sily, po zintegrovaní a úprave dostaneme konečný vzťah pre dráhu makroskopickej častice v jednosmernom elektrickom poli v tvare

$$x(t) = \frac{m}{6\pi\eta r} \left[ v_0 \left( 1 - e^{-\frac{6\pi\eta r}{m}t} \right) + \frac{QE + mg}{6\pi\eta r} \left( e^{-\frac{6\pi\eta r}{m}t} + \frac{6\pi\eta r}{m}t - 1 \right) \right] \quad (2)$$

Zderivovaním rovnice 2 podľa času dostaneme vzťah pre rýchlosť makroskopickej častice v jednosmernom elektrickom poli:

$$v(t) = v_0 e^{-\frac{6\pi\eta r}{m}t} + \frac{QE + mg}{6\pi\eta r} \left( 1 - e^{-\frac{6\pi\eta r}{m}t} \right) \quad (3)$$

Pri riešení pohybových rovníc častice v striedavom elektrickom poli vychádzame z rovnakej bilancie rovnováhy silových účinkov, pričom uvažujeme striedavé elektrické

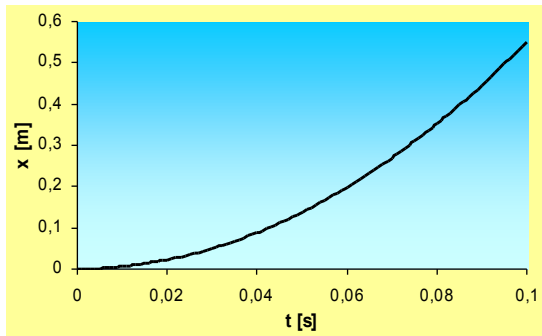
pole sínusového priebehu s frekvenciou 50 Hz. Rovnakým postupom ako pri jednosmernom poli dostávame rovnicu pre dráhu častice v striedavom elektrickom poli v tvare:

$$x(t) = \frac{g}{A^2}(e^{-At} + At - 1) + \frac{v_0}{A}(1 - e^{-At}) + \frac{K}{A\omega} \left[ \cos\psi - \frac{1}{A^2 + \omega^2} \cdot (\omega^2 e^{-At} \cos\psi - A\omega e^{-At} \sin\psi + A\omega \sin(\omega t + \psi) + A^2 \cos(\omega t + \psi)) \right] \quad (4)$$

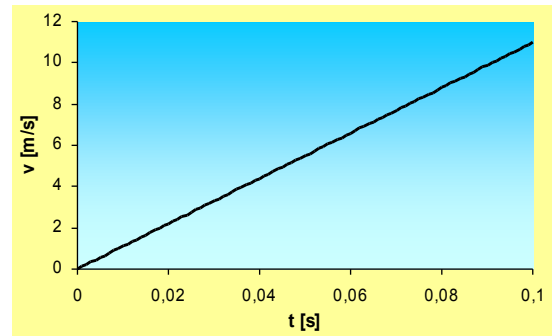
a pre rýchlosť:

$$v(t) = \frac{g}{A}(1 - e^{-At}) + v_0 e^{-At} + \frac{K\omega}{A^2 + \omega^2} \cdot \left[ \frac{e^{-At}}{\omega}(\omega \cos\psi - A \sin\psi) - \frac{1}{\omega}(\omega \cos(\omega t + \psi) - A \sin(\omega t + \psi)) \right] \quad (5)$$

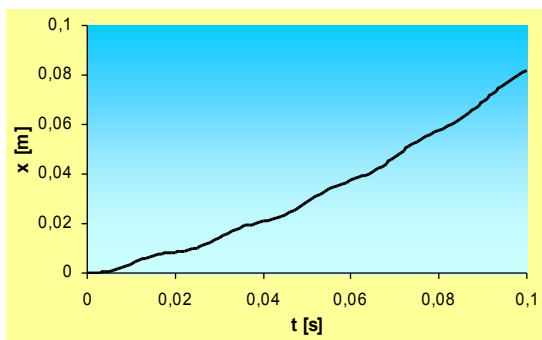
Grafické závislosti rýchlosti a dráhy častice pri jednosmernom a striedavom napätí sú zobrazené na obr. 2 až obr. 5.



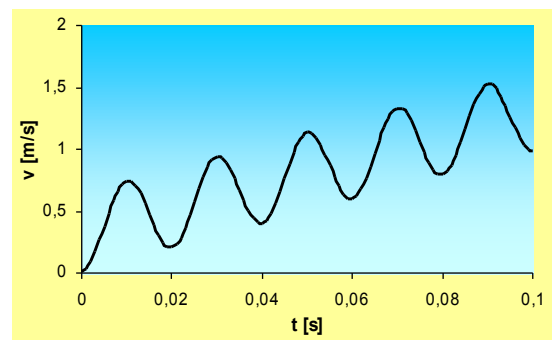
Obr.2. Priebeh dráhy častice v závislosti na čase pri jednosmernom napätí



Obr.3. Priebeh rýchlosti častice v závislosti na čase pri jednosmernom napätí



Obr.4. Priebeh dráhy častice v závislosti na čase pri striedavom napätí



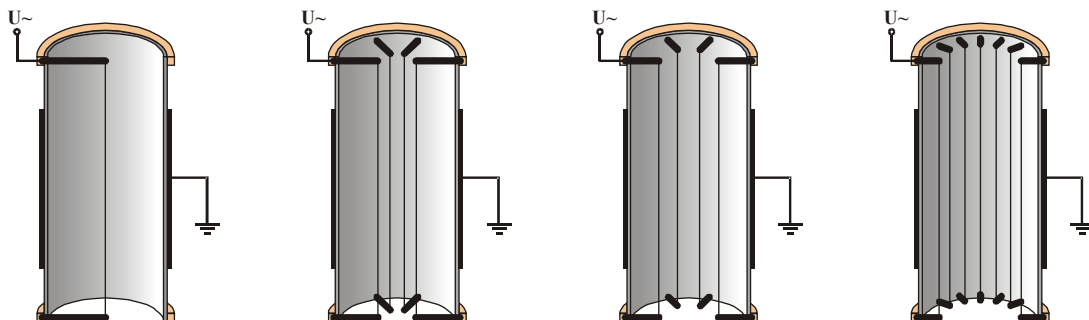
Obr.5. Priebeh rýchlosti častice v závislosti na čase pri striedavom napätí

### Odlučovač s líniovými korónujúcimi elektródami

Makroskopické častice rozptýlené v oblasti korónujúcej elektródy, na ktorú je pripojené striedavé vysoké napätie sa podľa predpokladu nenabíjajú. Z tohto dôvodu je potrebné vytvoriť elektrofyzikálne podmienky na vznik monopolárnych elektrických nábojov v priestore vyústenia

dávkovača. Jednou z možností je využitie fyzikálneho javu na rozhraní kov – dielektrikum – plynné prostredie.

Pre experimenty bol zhotovený kaskádový koaxiálny odlučovač pozostávajúci zo štyroch sekcií (viď obr. 6). Ich základ tvorí PVC rúra, ktorá tvorí súčasne zbernú elektródu. Na nej je zvonku nalepená tenká hliníková fólia a tá tvorí uzemnenú elektródu.



Obr.6. Geometrické usporiadanie jednotlivých sekcií kaskádového rúrkového odlučovača na striedavé napätie

Vnútri rúrky je upevnený tenký medený vodič, ktorý tvorí ionizačnú elektródu. Každá sekcia kaskády obsahuje iný

počet korónujúcich elektród a sú umiestnené v inej vzdialenosti od zbernej elektródy. Funkciou ionizačnej

elektrody je vytvorenie silne nehomogénneho elektrického poľa. Takéto pole je možné vytvoriť elektródami s veľmi malým polomerom zakrivenia. Pri kladnej polarite korónujúcej elektródy dochádza pri odovzdávaní kinetickej energie v dôsledku bombardovania hrotu elektrónmi ku vzniku nových elektrónov, prípadne fotónov, ktoré spôsobujú ďalšiu ionizáciu. Pri zápornej polarite je to analogické s tým rozdielom, že od záporného hrotu emitované lavíny sa presúvajú do stále homogénnejšieho poľa, v dôsledku čoho klesá ich pohyblivosť a ionizačná schopnosť.

V striedavých odlučovacích procesoch pri použití kovovej korónujúcej elektródy sa vo funkcii zbernej elektródy používa izolačná bariéra. Aby bola odlučivosť čo najväčšia je potrebné voliť izolačné materiály s čo najväčším merným odporom a permitivitou. Voľba materiálu závisí však aj od iných, neelektrických veličín ako je napr. teplota prúdiacich spalín, dostatočná mechanická pevnosť (oklepávanie) a iné. Izolačná bariéra nesmie pod vplyvom teploty meniť svoje mechanické ani dielektrické vlastnosti.

Na zistenie odlučivosti modelov striedavých odlučovačov boli použité tri druhy práškov o hodnotách merného odporu 3  $\Omega$ .m, 4 k $\Omega$ .m a 4,8 M $\Omega$ .m. Pri modeli odlučovača, ktorého dĺžka bola 30 cm boli dosiahnuté priemerné hodnoty odlučovosti pri všetkých druhoch prášku v rozmedzí 60 % až 97 %.

Tabuľka 1. Priemerné hodnoty odlučivosti jednotlivých sekcií kaskádového rúrkového odlučovača napájaného striedavým napätím

	Odlučivosť [%]			
	1. sekcia	2. sekcia	3. sekcia	4. sekcia
Prášok s $\rho_e = 3 \Omega$ .m	83,16	70,72	73,94	62,02
Prášok s $\rho_e = 4 \text{ k}\Omega$ .m	96,82	81,72	83,7	72,12
Prášok s $\rho_e = 4,8 \text{ M}\Omega$ .m	93,45	93,56	97,82	95,14

Z nameraných výsledkov je možné konštatovať, že odlučovanie pevných prímies z prúdiaceho plynu pri striedavom napätí je porovnateľné s odlučovaním pri jednosmernom napätí a za určitých podmienok dosahuje dokonca lepšie hodnoty odlučivosti.

#### Odlučovač so špirálovitou korónujúcou elektródou

Ako korónujúca elektróda boli použité koncentricky usporiadané vodiče v tvare špirály s rozdielnym stúpaním



Obr.8. Korónový výboj v okolí špirálovitej elektródy ak nosná elektróda je kovová

skrutkovice (2,5; 4; 7 cm), čím sa dosiahlo zvýšenie dĺžky korónujúceho vodiča z pôvodných 29 cm pri líniiovom vodiči až na hodnotu 118 cm pri špirále so stúpaním 2,5 cm za predpokladu zvýšenia korónového prúdu využívaného vo výbojovom priestore v procese nabíjania častíc makroskopickej veľkosti.

Pri rešpektovaní teploty dymových plynov, 20 – 200°C je dôležité sa zamerať na riešenie nosiča korónujúceho vlákna, pričom pre vyššie teploty nad 100°C bol navrhnutý celokovový nosič špirálového tvaru s kovovými rozperkami, zatiaľ čo pre teploty nižšie boli zvolené plastové nosiče.

Pokiaľ pri kovovom (Cu) profilovanom vodiči, ako nosnej elektródy bolo bezprostredne vyriešené rozloženie celkového náboja na jeho povrchu, použitím plastových nosičov vznikol problém rozloženia parazitného náboja po jeho povrchu (PVC) tiež ako aj po povrchu nosičov korónujúcej elektródy, ktoré boli taktiež z plastu. Nepriaznivý efekt parazitných povrchových nábojov, bol čiastočne eliminovaný polovodivým náterom na povrchu PVC tyče. Tento náter bol vodivo spojený s korónujúcou elektródou. Ako sa v ďalšej časti ukázalo, tieto úpravy mali podstatný vplyv na priebeh prúdovo-napätových charakteristík skúmaného vnútorného odlučovača.

Nakoľko popisované usporiadanie má slúžiť na elimináciu častíc makroskopickej veľkosti, o vysokej elektrickej vodivosti, predkladané usporiadanie bude možné umiestniť priamo do prostredia (prívodu dymových plynov) s možnosťou ich výmen (obr. 7).



Obr.7. Umiestnenie špirálovitej korónujúcej elektródy.



Obr.9. Korónový výboj v okolí špirálovitej elektródy ak nosná elektróda je z izolantu



V priebehu optimalizácie bol z elektrofyzikálneho hľadiska skúmaný aj vplyv izolačnej mikrovrstvy na povrchu korónujúcej elektródy, voči korónujúcej elektróde z čistého medeného vodiča o priemere (0,2 mm). Z elektrofyzikálneho hľadiska aj toto rozhodnutie sa ukázalo správnym a prispelo k riešeniu mechaniky výbojových činnosti v medzelektródovom priestore. Ako výpovede-schopné veličiny v tomto prípade boli zvolené hodnoty prúdov a napätia a ich charakteristiky, snímané za rovnakých klimatických podmienok ( $T=19^{\circ}\text{C}$ ,  $p=101,3\text{kPa}$ ).

Do experimentu boli zaradené tieto typy odlučovačov: líniový s lakovanou medenou elektródou, líniový s čistou medenou elektródou, koncentricky uložená skrutkovica so stúpaním 2,5 cm s lakovanou a čistou elektródou, skrutkovica so stúpaním 4 cm s lakovanou a čistou elektródou, skrutkovica so stúpaním 7 cm s lakovanou a čistou elektródou a elektróda s celokovovým nosníkom korónujúcej elektródy

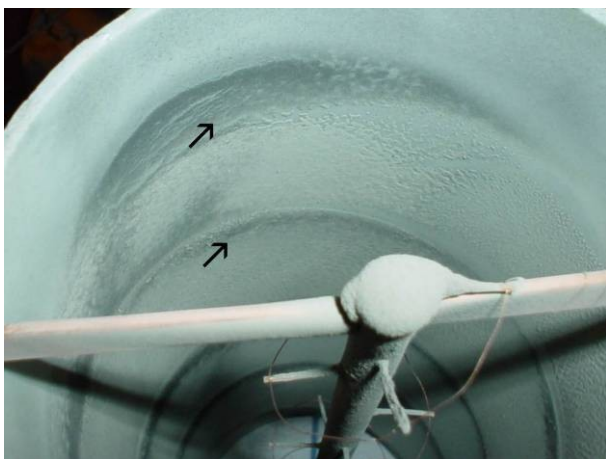
Ako odlučované médium boli zvolené popolčky z EVO Vojany o týchto parametroch (tab. 2):

Tabuľka 2. Parametre použitých vzoriek

Vzorka	Merný elektrický odpor
1.	3 $\Omega\cdot\text{m}$
2.	800 $\Omega\cdot\text{m}$
3.	13 $\Omega\cdot\text{m}$

Získané výsledky odľučivosti jednotlivých vzoriek pri ich odľučovaní aplikovaním deviatich rôznych elektródových systémov sú uvedené v tab. 3. Ako sa dalo očakávať najlepšie výsledky sa dosiahli pri vzorke č. 2 o mernom elektrickom odpore 800  $\Omega\cdot\text{m}$ . Z nameraných údajov taktiež vyplýva, že okrem hodnoty mernej vodivosti do procesu odľučovania vstupujú aj elektrofyzikálne vlastnosti práškov, medzi ktoré je možné zaradiť merný elektrický odpor, relatívnu permitivitu a mernú hmotnosť. O tomto svedčí aj štúdiom  $I-t$  charakteristík, ktoré sú nositeľmi výpovede-schopných parametrov poukazujúcich napríklad na tvar zrna, veľkosť prípadne mernú hmotnosť.

K veľmi dôležitému pozorovaniu sa dospelo aj pri sledovaní rozloženia odlúčených častíc po obvode koaxiálneho odľučovača. Odlúčené častice „kopírovali“ tvar špirálovite uložených korónujúcich elektród, pričom sa objavili takzvané „mŕtve“ zóny, ku vzniku ktorých došlo v dôsledku interakcie častíc o rovnakej polarite navzájom sa ovplyvňujúcich ich elektrickým poľom (obr. 10).



Obr.10. Umiestnenie špirálovitej korónujúcej elektródy

Ukázalo sa, že pri vyšších napätiach dochádzalo aj ku kontrakcii elektrického poľa. S tým súvisela aj distribúcia prenášaných častíc. Nakoľko jemnozrné častice popolčeka

boli sústredené do osi špirálovitého rozloženia na povrchu sa usadzujúcich exhalátov, pričom častice hrubozrné, aj vzhľadom na vyššiu hodnotu zotrvačných síl sa usadzovali v okrajových častiach.

Tabuľka 3. Percentuálna odľučivosť pri jednotlivých typov elektród

Typ korónujúcej elektródy	Odľučivosť [%]		
	Vzorka č. 1	Vzorka č. 2	Vzorka č. 3
líniová lakovaná elektróda	77,689	97,641	75,422
líniová čistá elektróda	77,772	98,510	58,773
2,5 cm stúpanie lakovaný vodič	72,208	89,622	64,238
2,5 cm stúpanie čistý vodič	87,104	90,995	65,422
2,5 cm stúpanie celokovový nosník	56,701	90,165	63,923
4 cm stúpanie lakovaný vodič	75,208	93,072	61,055
4 cm stúpanie čistý vodič	71,304	96,940	59,284
7 cm stúpanie lakovaný vodič	71,390	89,939	56,241
7 cm stúpanie čistý vodič	72,200	94,317	58,791

Z toho vyplýva, že navrhovaným usporiadaním elektródového systému sa dajú dosiahnuť aj separačné účinky nekonvenčného odľučovača na striedavé vysoké napätie.

## Záver

Príspevok poukazuje na možnosť aplikácie striedavého napätia na odľučovanie častíc makroskopickej veľkosti v elektródovom systéme nekonvenčného usporiadania: korónujúca elektróda – dielektrická bariéra ako kolektor – elektróda na zemnom potenciáli. Tieto systémy využívajú fyzikálne fenomény z teórie vysokonapäťového poľa s bariérou. Na základe početných meraní a experimentov sa tento koaxiálny odľučovač popolčeka na striedavé vysoké napätie s líniovým aj nekonvenčným tvarom korónujúcej elektródy ukazuje ako jedna z možných alternatív odľučovania popolčeka s vysokou mernou vodivosťou. Výhodou týchto systémov oproti systémom napájaných jednosmerným napätím je hlavne v ekonomickej stránke vybavenosti a regulácie odľučovacieho procesu. Tento fakt by mohol byť dôležitým krokom k širšiemu využitiu tejto technológie v praxi.

## Literatúra

- [1] Moore, A. D.: Electrostatics and its Applications. John Wiley and Sons, New York 1973
- [2] Marton, K.: Príspevok k štúdiu mechanizmu nanášania práškov. Statická elektřina 78, DT České Budejovice 1978, str. 27–38
- [3] Parker, K. R.: Applied Electrostatic Precipitation. Blackie Academic & Professional, London 1997
- [4] Lloyd, D. A.: Electrostatic precipitator handbook. J W Arrowsmith Ltd., Bristol 1988
- [5] Böhme, J.: Elektrické odľučovače, SNTL Praha, 1977
- [6] Džmura, J.: Nabíjateľnosť a transport častíc makroskopickej veľkosti v silne nehomogénnom elektrickom poli. Dizertačná práca, TU FEI Košice 2002
- [7] Bernát, M.: Výskum a výučba flokácie pomocou matematického modelovania a počítačovej simulácie. Acta Fakulty humanitných a prírodných vied PU v Prešove, FHPV PU v Prešove 2002, Pp. 159 – 168
- [8] Bernát, M.: Stochastický model niektorých procesov vo flokáci. Acta Fakulty humanitných a prírodných vied PU v Prešove, FHPV PU v Prešove 2002, Pp. 169 – 172
- [9] Široký, P.: Rúrkový vysokonapäťový odľučovač popolčeka na striedavé napätie. Diplomová práca, TU FEI Košice 2003

Work on this paper was supported by grant VEGA No.4 – 1/3142/2006 and APVV-20-006005.

**Autor:** Jaroslav Džmura, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jaroslav.dzmura@tuke.sk

Miroslav Bánes, František Kovaľ

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

## Simulovanie porúch v XPE 22kV kábli

**Abstrakt.** Tento článok sa zaoberá elektrickým stromčekom a dutinkou v izolácii. Článok popisuje analýzu čiastkových výbojov v izolačných materiáloch. Popisuje vytváranie elektrického stromčeka a dutinky v XLPE kábli a následne ich porovnávanie.

**Abstract.** This article deals with electrical trees in insulation. The paper describes analysis of partial discharges in insulation materials. The paper describes electrical tree and cavity in XLPE cable and compare them.

**Kľúčové slová:** Elektrický stromček, čiastkový výboj, XPE kábel, výbojová činnosť.

**Keywords:** Electrical tree, partial discharge, XLPE cable, charge activity.

### Úvod

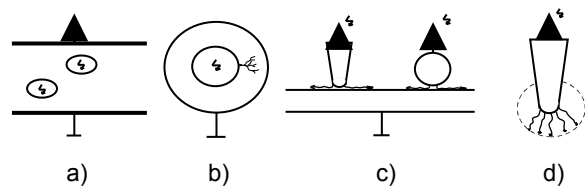
Elektroizolačné materiály sú súčasťou takmer každého elektrického zariadenia [1]. Z toho hľadiska je veľmi dôležité, aby sme poznali ich vlastnosti a parametre nielen bezprostredne po ich výrobe, ale vedeli ich vývoj odhadnúť aj do budúcnosti. Dôležitým problémom je aj určenie zvyškovej životnosti použitých izolačných materiálov a tým aj celého zariadenia. Hlavným dôvodom toho je, že prípadná porucha by mohla ohroziť prevádzku a bezpečnosť a tým spôsobiť škody na zariadení.

### Modelovanie porúch v XLPE káblovej izolácii

Príčina, vyvolávajúca vo väčšine prípadov preraz, bola nájdená vo výbojoch vo vnútri izolácie káblov, prípadne po povrchu. Okrem prerazu, ktorý je prakticky najdôležitejším dôsledkom pôsobenia výbojov, spôsobujú výboje zmenu chemických, elektrických (zmena vnútorného odporu,  $\tan \delta$ , permitivity), mechanických a iných vlastností. Zmeny elektrických a niektorých chemických vlastností bývajú nestále a do veľkej miery reverzibilné – ak výboje prestanú pôsobiť, zmeny začnú ustupovať. Izolant sa chová tak, ako keby pri pôsobení výbojov do neho vnikli látky zhoršujúce jeho elektrické vlastnosti, ktoré z neho opäť vypchávajú, keď výboje prestanú pôsobiť. Medzi zmenami rôznych vlastností a časom do prerazu sa zatiaľ nenašiel súvis, ktorý by umožňoval usudzovať zo zmeny niektorej vlastnosti, aké blízke alebo vzdialené je nebezpečenstvo prerazu.

Tieto výboje sme súhrnne označili, ako čiastkové výboje. Rozumieme pod tým taký neúplný samostatný výboj, ktorý nepremosť vysokonapäťovú a nízkonapäťovú elektródu a ktorý vzniká pod vplyvom kritickej intenzity elektrického poľa v plynnom dielektriku, prípadne v plynnom vyplnených dutinách pevných alebo kvapalných izolantov [4].

Čiastkové výboje je možné rozdeliť na dve základné skupiny. Prvú skupinu tvoria vnútorné výboje, ku ktorým patria výboje v dutinách pevných a kvapalných dielektrík (obrázok 1a) a špeciálny druh vnútorných výbojov tvoria elektrické stromčeky (obrázok 1b). Do druhej skupiny patria povrchové výboje, vznikajúce na rozhraní dvoch rôznych izolantov (obrázok 1c), a korónové výboje v plyne (obrázok 1d) [4].

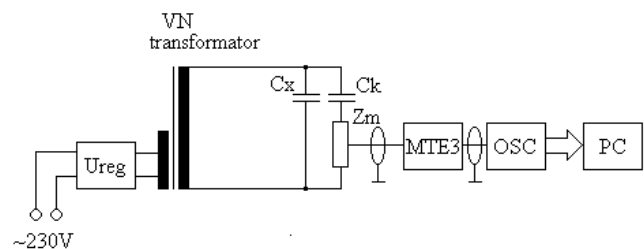


Obrázok 1: Čiastkové výboje

My sme sa zamerali na vytvorenie porúch, ktoré popisuje prvá skupina čiže, vytvorenie dutinky a vytvorenie elektrického stromčeka (vpichnutím ihly do izolácie).

### Meranie stavu izolácie na XPE kábli

Ako skúšaný objekt merania sme si zvolili 22 kV kábel s izoláciou zo zosieteného polyetylénu (XPE). Nainštalovali sme na tento kábel koncovky typu KSJR, a namodelovali sme do kábla poruchy. Dutinku sme vytvorili tak, že do izolácie sme vrtákom vytvorili jamku s priemerom 9 mm a hĺbkou 1,5 mm. A na modelovanie elektrického stromčeka sme do izolácie vpichli ihlu s dĺžkou 2 mm a priemerom 50  $\mu\text{m}$ . Zapojili sme merací obvod podľa schémy na obrázku 2.



Obrázok 2: Schéma zapojenia

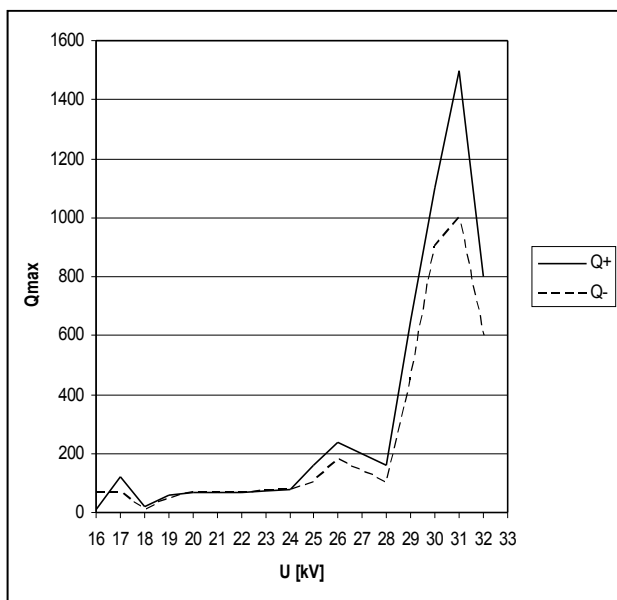
Pri meraní kábla sme postupovali tak, že najprv sme si zapojili merací obvod, ktorý sme napájali striedavým napätím 230V. Napätie sme zvyšovali cez regulátor napätia a vysokonapäťový transformátor postupne od počiatku vzniku výbojov v jednotlivých vzorkách. Prúdový impulz čiastkových výbojov bol spracovaný cez väzobný kondenzátor  $C_x$ , meraciu impedanciu  $Z_m$  a zosilňovač čiastkových výbojov MTE-3 na napäťový signál. Na MTE-3 bol pripojený osciloskop, ktorý zaznamenával signály čiastkových výbojov a následne posielal do počítača, kde boli vhodným programom spracované a vyhodnotené.

Osciloskop, Lite runner, LP 142, 100 MHz, 500 MS/s, pracuje aj ako rýchly analógovo-digitálny prevodník.

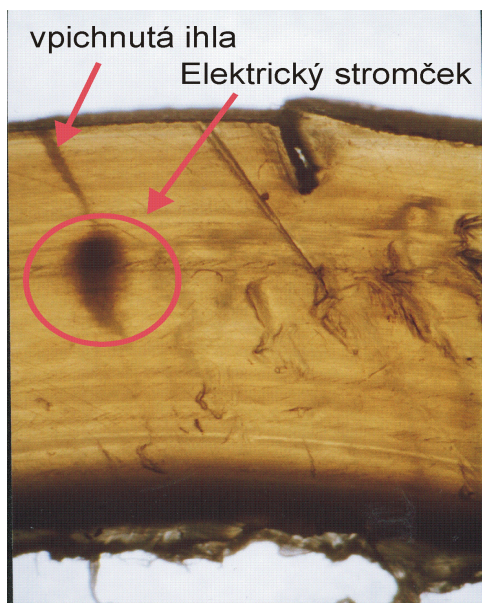
### - Porucha č.1.

Do izolácie vzorky bola vpichnutá ihla. Ako je vidieť z obrázku 3 počiatočné napätie vzniku čiastkových výbojov bolo 16kV. Od 16kV až do 22kV bola výbojová činnosť v kľude a po zvýšení napätia na 23kV náboj začal narastať. Od 28kV až do 31kV náboj narástol až na hodnotu v kladnej polvlne na 1500pC a v zápornej polvlne na hodnotu na 1000pC. Po prekročení napätia 31kV mali hodnoty  $Q_{max}$  opäť klesajúcu tendenciu. Fázové rozloženie náboja sa výrazne zmenilo a to rozšírením doľava asi o  $40^\circ$ .

Po rozrezaní kábla a preskúmaní poruchy pod mikroskopom sme zistili, že v okolí hrotu ihly vznikol hustý elektrický stromček obrázok 4. Tento elektrický stromček sa nazýva bush – like. Rast stromčeka mohol mať vplyv na určité zhomogenizovanie poľa v okolí hrotu ihly a následný pokles výbojovej činnosti.



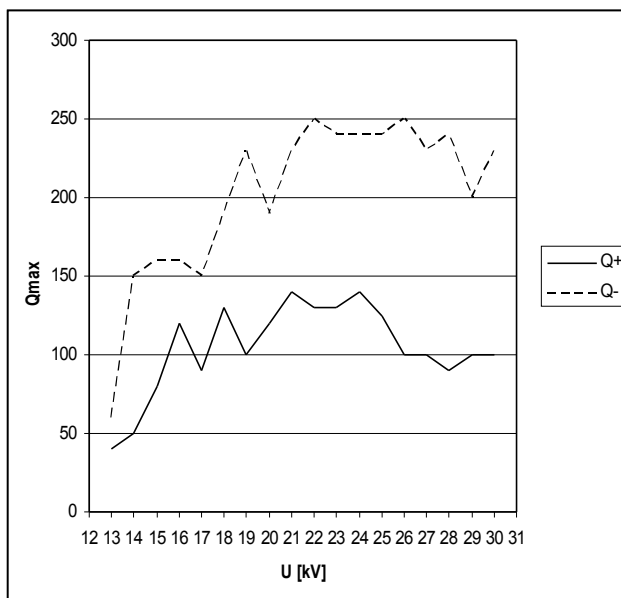
Obrázok 3: Závislosť  $Q_{max}$  na  $U$  pri raste stromčeka



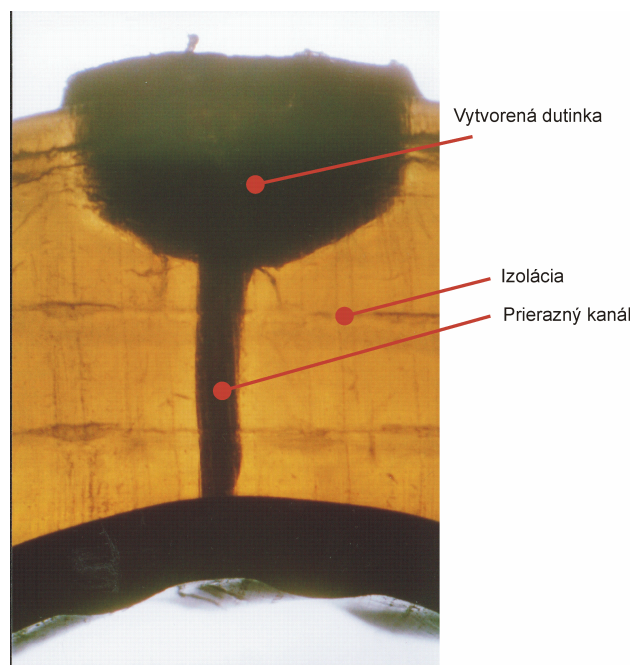
Obrázok 4: Fotografia elektrického stromčeka

### - Porucha č.2

Do izolácie vzorky bola vytvorená dutinka. Začiatok výbojovej činnosti bol zaznamenaný pri napätí 13 kV. So zvyšujúcim napätím sa zvyšovala aj početnosť výbojov. Fázové rozloženie, tak ako aj v poruche číslo 1 sa rozširovalo doľava. Ak porovnáваме grafy na obrázkoch 3 a 5, tak si môžeme všimnúť rozdiely medzi narastaním maximálneho náboja voči napätiu. Pri napätí 30kV došlo k prerazu vzorky. Po rozrezaní a preskúmaní vzorky sme videli veľký kanál, ktorý vychádzal z dutinky a tak premostil vysokonapäťovú s nízkonapäťovou elektródou (obrázok 6).



Obrázok 5: Závislosť  $Q_{max}$  na  $U$  pri dutinke



Obrázok 6: Fotografia dutinky

V tabuľke 1 sa nachádza porovnanie nasimulovanej poruchy 1 a poruchy 2. Rozloženie čiastkových výbojov vo fáze je zobrazené v tabuľke 1 ako F.R.

Tabuľka 1. Porovnanie poruchy 1 a poruchy 2

U <sub>poč</sub>		Porucha č.1		Porucha č.2	
		Vpichnutá ihla		Dutinka	
		+	-	+	-
13kV	Q <sub>max</sub>	-	-	40	60
	F.R.	-	-	40°-60°	210°-260°
16kV	Q <sub>max</sub>	10	70	125	160
	F.R.	40°-75°	210°-250°	10°-70°	210°-260°
18kV	Q <sub>max</sub>	20	10	140	190
	F.R.	45°-95°	40°-75°	0°-70°	195°-260°
20kV	Q <sub>max</sub>	70	70	120	210
	F.R.	40°-75°	210°-275°	350°-70°	180°-255°
25kV	Q <sub>max</sub>	160	100	135	243
	F.R.	25°-80°	180°-260°	345°-70°	170°-260°
28kV	Q <sub>max</sub>	160	100	90	240
	F.R.	40°-75°	40°-75°	345°-75°	170°-260°
30kV	Q <sub>max</sub>	1100	900	100	240
	F.R.	0°-75°	180°-270°	340°-75°	165°-260°
32kV	Q <sub>max</sub>	600	600	-	-
	F.R.	0°-60°	180°-250°	-	-

### Záver

Získané výsledky nám môžu pomôcť pri vyhodnocovaní neznámych porúch v prevádzkových podmienkach. Je nutné podotknúť, že prítomnosť čiastkových výbojov s veľkou amplitúdou nemusí nevyhnutne viesť k prerazu izolácie a naopak vyradenie kábla z prevádzky môže niekedy spôsobiť zdanlivo nevýznamné výboje. Z tohto hľadiska je potrebné a výhodné vykonávať pravidelné merania izolácie elektrických zariadení. Týmto spôsobom vieme posúdiť stupeň degradácie celého systému a včas reagovať na prípadné nežiaduce zmeny. Tu sa vytvára

priestor na vývoj a zdokonaľovanie nových metód na princípe on-line monitoringu.

Charakteristické veličiny čiastkových výbojov patria medzi veličiny, ktoré nám vedľa veľa napovedať o stave daného zariadenia. Medzi zariadenia pri ktorých je nutné poznať stav izolácie patria aj vysokonapäťové káble s izoláciou zo zosieteného polyetylénu

### Literatúra

- [1] Cimbala R., Kolcunová I., Kršňák I.: Diagnostika izolačného stavu vn točivých strojov, Bulletin Asociácie technických diagnostikov, 2001
- [2] Kolcunová, I., Kurimský, J.: Čiastkové výboje v izolačnom systéme XPE káblov. In Zborník 16. medzinárodnej konferencie, DISEE 2006. STU v Bratislave, 12.-14. 9. 2006, 92-95, Častá – Pila, ISBN 80-227-2470-X
- [3] Záliš, K.: Using Expert Systems in Evaluation of High Voltage Insulation. In "Proceedings Of the BASYS'98 – 3rd IEEE/IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing. Praha, srpen 1998, s. 147-156
- [4] Kolcunová, I., Výskum predpriazneného stavu vysokonapäťovej izolácie metódou čiastkových výbojov, 1993, Košice

Táto práca vznikla za podpory vedeckej grantovej agentúry ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA č. 1/3142/06 a v rámci projektu APVV-20-006005.

**Autori:** Ing. Miroslav Banes, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [miroslav.banes@tuke.sk](mailto:miroslav.banes@tuke.sk)

Ing. František Koval, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [frantisek.koval@tuke.sk](mailto:frantisek.koval@tuke.sk)



Dušan Medveď

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

## Rozpoznávanie a spracovanie kriviek v grafoch

**Abstrakt.** Tento príspevok sa zaoberá rozpoznávaním kriviek v obrázku. Porovnávajú sa rôzne metódy, ich výhody a nevýhody a následné využitie pre ďalšie spracovanie.

**Abstract.** This article deals with the recognition of curves in image. There are compared various methods, their benefits and disadvantages and the consequent utilization for next processing.

**Kľúčové slová:** spracovanie obrázkov, Sobelova metóda, Prewittova metóda, Robertsova metóda

**Keywords:** image processing, Sobel method, Prewitt method, Roberts method

### Úvod

Množstvo informácií, ktoré dokážeme nepretržite spracovať výpočtovou technikou je obmedzené kapacitou výpočtového systému, ako aj rýchlosťou vyhodnotenia dát. Ako spôsob urýchlenia tohto procesu sa často krát volia rôzne zjednodušenia pri zachovaní dostatočnej presnosti a kvality spracovávaného objektu. Podobne to platí aj pri vykonávaní operácií s obrázkami, v ktorých potrebujeme zistiť krivky alebo niektoré významné hrany.

### Príprava obrázkov pred spracovaním

Pred aplikovaním príslušnej metódy na detekciu hrán na jednotlivé obrázky, napr. s grafom, upraví a je nutné vykonať niekoľko dôležitých úkonov, ktoré urýchlia, zjednodušia, prípadne uľahčia samotný proces spracovania obrázkov.

- Znížiť rozlíšenie obrázka na čo najnižšiu možnú mieru pri zachovaní dostatočnej kvality obrazu. Výpočtový program vytvorí maticu zloženú z  $m \times n$  prvkov (kde  $m$  je šírka,  $n$  výška obrazu v pixeloch) a prípadné 2-násobné zväčšenie obrázku spôsobí 4-násobné zväčšenie veľkosti matice, teda kapacita uloženia matice rastie geometrickým radom.
- Redukovať farebnú škálu zobrazenia na odtiene šedi, napr. 256 stupňov šedej škály.
- Zvoliť správnu metódu rozpoznania hrán a kriviek v obrázku.
- Vyhodnotiť výsledok rozpoznania. V prípade chybného vyhodnotenia kriviek v grafe opakovať krok 3 využitím inej metódy.

### Metódy rozpoznávania hrán v obrázkoch

Pre redukovanie množstva informácií obsiahnutých v obrázku využívame metódu rozpoznania hrán. Hrany je možné zistiť niektorou z množstva rozličných techník vhodných pre tento typ rozpoznávania. Jedna z najjednoduchších je metóda využitím Laplaceovho filtra, alebo kombinácie vertikálneho a horizontálneho Sobelovho filtra. Avšak, pred samotnou realizáciou je potrebné brať do úvahy rôzne obmedzenia a osobitosti jednotlivého filtra [1], [6]:

- Šum
- Detaily
- Výpočtový čas

Využitie väčšieho filtra znamená menšiu citlivosť na šum, stratu jemnejších detailov a dlhší výpočtový čas.

Využitie menšieho filtra znamená väčší šum v obrázku, ale viac detailov a rýchlejší výpočtový čas.

Pred procesom rozpoznania hrán je možné aplikovať rôzne metódy redukovania šumu finálneho obrázka (redukovaním jemných detailov, ale ponechaním hrubších hrán), ako napríklad Gaussov filter.

### Sobelova metóda

Sobelova metóda hľadá hrany využitím Sobelovej aproximácie k derivácii. Hrany sú v tých bodoch, kde gradient obrázka je maximálny [7].

Táto metóda je založená na 1-dimenzionalnej analýze. Teória môže byť prevedená aj do 2-dimenzionalnej formy. Sobelov operátor stanovuje 2-D priestorový gradient na obrázku. Obyčajne je použitý pre vyhľadanie veľkosti približne absolútneho gradientu v každom bode vo vstupnom šedom obrázku. Sobelov detektor hrán využíva 2 konvulčné masky veľkosti  $3 \times 3$ . Jedna určuje gradient v smere osi  $x$  (stĺpce) a ďalšia určuje gradient v smere osi  $y$  (riadky). Konvulčná maska je zvyčajne oveľa menšia ako aktuálny obrázok. Tak ako obrázok, maska je posúvaná skrz obrázok, spracúvajúc štvorec pixelov v obrázku.

Sobelove masky sú:

-1	0	+1
-2	0	+2
-1	0	+1

$G_x$

+1	+2	+1
0	0	0
-1	-2	-1

$G_y$

Veľkosť gradientu sa vypočíta podľa vzťahu:

$$(1) \quad |G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Približnú veľkosť možno vypočítať ako súčet veľkostí:

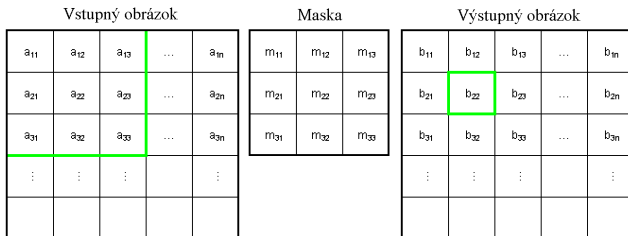
$$(2) \quad |G| = |G_x| + |G_y|$$

### Vysvetlenie Sobelovho filtra

Maska je posúvaná skrz plochu vstupného obrázka, kde sa zmení daná hodnota pixela. Potom sa premiestni o jeden pixel vpravo a pokračuje doprava pokým nedosiahne koniec riadka. Potom začína na začiatku ďalšieho riadka. Príklad nižšie (obrázok 1) ukazuje masku, ktorá sa posúva skrz hornú ľavú časť vstupného obrázka, a je na obrázku označená zeleným obrysom. Vzťah (3) ukazuje ako by bol



vyrátaný príslušný pixel vo výstupnom obrázku. Stred masky je umiestnený cez pixel, s ktorým manipulujeme. Hodnoty  $I$  a  $J$  (riadky, stĺpce) sú použité pre posun riadkového smerníka, teda je možné vynásobiť, napr. pixel  $a_{22}$  príslušnou hodnotou masky  $m_{22}$ . Je dôležité poznamenať, že pixelely v prvých a posledných riadkoch, tak ako v prvých a posledných stĺpcoch nie je možné spracovať maskou  $3 \times 3$ . Je to preto, lebo umiestnením stredy masky cez pixel v prvom riadku sa maska dostáva mimo hranice obrázka.



Obr.1 Spracovanie obrázka využitím Sobelovho filtra

$$(3) \quad b_{22} = (a_{11} \cdot m_{11}) + (a_{12} \cdot m_{12}) + (a_{13} \cdot m_{13}) + (a_{21} \cdot m_{21}) + (a_{22} \cdot m_{22}) + (a_{23} \cdot m_{23}) + (a_{31} \cdot m_{31}) + (a_{32} \cdot m_{32}) + (a_{33} \cdot m_{33})$$

Maska  $G_x$  vyznačuje hrany v horizontálnom smere a maska  $G_y$  vo vertikálnom smere. Po získaní oboch veľkostí sa vypočíta výsledný výstup hrán v oboch smeroch.

**Laplaceova metóda**

Laplacián  $5 \times 5$  využíva konvolučnú masku pre aproximovanie druhej derivácie. Pri Sobelovej metóde sa aproximoval gradient. A podobne, namiesto dvoch Sobelových masiek  $3 \times 3$ , jedna v pre smer  $x$ , druhá  $y$ , Laplaceova metóda využíva jednu masku  $5 \times 5$  pre druhú deriváciu v oboch smeroch  $x$  a  $y$  [9]. Pretože tieto masky sú priblížením miery druhej derivácie na obrázku, sú veľmi citlivé na šum. Laplaceova maska má nasledujúci tvar:

-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	24	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1

**Vysvetlenie Laplaceovho filtra**

Algoritmus Laplaceovho filtra pracuje rovnakým spôsobom ako Sobelov, okrem malého zjednodušenia, kde využíva len jednu masku namiesto dvoch.

**Prewittova metóda**

Prewittova metóda rozpoznania hrán v obrázku spočíva v algoritme, kde vyšší stupeň šedej farby znamená hranu medzi dvomi objektami. Prewittov rozpoznávací filter počíta strednú kvadratickú hodnotu vzorky  $3 \times 3$  prvkov [7], [8]. Tento algoritmus patrí medzi najpopulárnejšie  $3 \times 3$  prvkové filtre hrán.

Prewittov filter rozpoznávania hrán využíva dve  $3 \times 3$  masky pre výpočet hodnoty gradientu.

-1	0	+1
-1	0	+1
-1	0	+1

+1	+1	+1
0	0	0
-1	-1	-1

X Y

Ak uvažujeme obrázok a vezmeme si jeho časť s  $3 \times 3$  prvkami  $a_1$  až  $a_9$

$a_1$	$a_2$	$a_3$
$a_4$	$a_5$	$a_6$
$a_7$	$a_8$	$a_9$

potom výpočet bude nasledujúci

$$(4) \quad X = -1 \cdot a_1 + 1 \cdot a_3 - 1 \cdot a_4 + 1 \cdot a_6 - 1 \cdot a_7 + 1 \cdot a_9$$

$$(5) \quad Y = 1 \cdot a_1 + 1 \cdot a_2 + 1 \cdot a_3 - 1 \cdot a_7 - 1 \cdot a_8 - 1 \cdot a_9$$

$$(6) \quad \text{Prewittov gradient} = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

Filtrované sú všetky pixely. Aby sme mohli odfiltrovať aj pixely blízko okraja obrázka, krajné hodnoty pixelov sa skopírujú a tak dostaneme potrebné údaje.

**Robertsova metóda**

Je jednou z najnovších metód v počítačovom „videní“ obrázkov. Robertsov krížový operátor slúži na výpočet súčtu štvorcov diferencií medzi diagonálne susediacimi pixelami [5]. Dosiahne sa to konvolúciou obrázka s dvomi maskami  $2 \times 2$ .

+1	0
0	-1

$G_x$

0	+1
-1	0

$G_y$

Tieto masky je možné aplikovať oddelene na vstupný obrázok, aby sme získali oddelené merania gradientu v každom smere ( $G_x$  a  $G_y$ ). Môže sa to kombinovať súčasne pri hľadaní absolútnej veľkosti gradientu v každom bode a orientácii gradientu. Veľkosť gradientu je daná vzťahom:

$$(7) \quad |G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

hoci, väčšinou sa približná veľkosť vypočíta ako:

$$(8) \quad |G| = |G_x| + |G_y|$$

čo urýchli výpočet.

Uhol orientácie hrany je daný rastom priestorového gradientu (relatívne k orientácii siete pixelov) a vypočíta sa nasledovne:

$$(9) \quad \theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) - \frac{3\pi}{4}$$

V tomto prípade orientácia 0 znamená smer maximálneho kontrastu od čiernej k bielej a prebieha na obrázku zľava doprava a ďalšie uhly sú počítané v smere hodinových ručičiek.

Poznámka: Častokrát, absolútna veľkosť je len výsledkom autorových skúseností – dva komponenty gradientu je vhodné vypočítať a pridať do jednej vrstvy vstupného obrázka využitím pseudo-konvolučného operátora (masky):

$P_1$	$P_2$
$P_3$	$P_4$

Využitím tejto masky bude približná veľkosť daná ako:

$$(10) \quad |G| = |P_1 - P_4| + |P_2 - P_3|$$

Hlavný dôvod použitia Robertsovho krížového operátora je veľmi rýchly výpočet. Potrebne sú len štyri vstupné pixely, s ktorými sa vypočítajú výstupné pixely a pre výpočet sa využíva len sčítanie a odčítanie. Navyše nie sú tu žiadne nastavovacie parametre. Naopak, jeho hlavnou nevýhodou je využitie veľmi malej masky a teda vysoká citlivosť na šum. Často sa slabé odozvy na skutočnú hranu ani nezaznamenajú pokiaľ nie sú veľmi výrazné. Tieto nedostatky je možné odstrániť použitím Sobelovej metódy.

### Cannyho metóda zisťovania hrán

Cannyho operátor bol navrhnutý ako optimálny snímač výskytu hrán v obrázku. Podľa určitých kritérií – existujú rôzne iné metódy rozpoznávania hrán, ktoré sú optimálne podľa ďalších jemne odlišných kritérií. Vo vstupnom obrázku v odtieňoch šedej sa vyhľadajú nespojitosti v intenzite farby (čierna / biela) a vytvorí sa výstupný obrázok, kde sa zaznačia tieto nespojitosti [2], [3].

### Vysvetlenie Cannyho metódy

Cannyho operátor pracuje vo viacstupňovom procese. Najprv sa obrázok vyhladí Gaussovou konvolúciou (filtrom). Potom sa aplikuje jednoduchý 2-D operátor derivácie (niečo podobné ako pri Robertsovom krížovom filtri) na zvýraznenie oblastí obrázka s vysokými prvými priestorovými deriváciami. Obrisy spôsobia vznik hrán vo veľkosti gradientu obrázka. Algoritmus potom „sleduje“ pozdĺž vrchola týchto hrán a nastaví nulu všetkých pixelov, ktoré nie sú na vrchole hrany tak, že dá tenkú čiaru na výstupe - proces známy ako „utlmenie bez-maxima“. Sledovací proces ukazuje hysteréziu riadenú dvomi hranicami:  $T_1$  a  $T_2$ , kde  $T_1 > T_2$ . Sledovanie hranice môže začínať len v bode na hrane väčšej ako  $T_1$ . Sledovanie potom pokračuje von v oboch smeroch z toho bodu pokiaľ výška hrany nepadne pod  $T_2$ . Táto hysterézia pomáha zvýšiť také hmlisté obrisy, ktoré sú roztrieštené na viacero obrysových fragmentov.

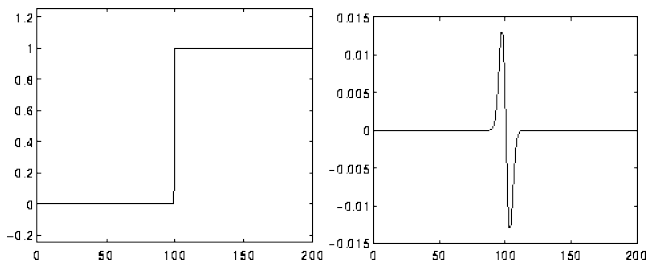
### Filter prechodu nulou

Filter snímania prechodu nulou hľadá miesta v obrázku pri Laplaceovej metóde, kde Laplacián prechádza nulou, t.j. body, kde Laplacián mení znamienko. Tieto body často vytvárajú obrisy v obrázku, t.j. body, kde sa intenzita obrázka rýchlo mení, ale tiež často sa vyskytujú v miestach, ktoré nie je ľahké ohodnotiť ako hranu. Preto tento filter snímania prechodu nulou je možné nazvať skôr ako určitý druh snímača čít obrázka a nie snímač hrán v obrázku. Prechody nulou vždy ležia na uzavretých krivkách, a tak výstup zo snímača prechodu nulou je obyčajne binárny obrázok s jedno-pixelovými čiarami, ktoré znázorňujú body prechodu nulou [7]:.

Na začiatku, pri práci s filtrom prechodu nulou využijeme obrázok, ktorý bol odfiltrovaný Laplaciánom Gaussovho filtra. Prechody nulou, ktoré dostaneme sú silne ovplyvnené veľkosťou parametrov Gaussovho operátora, použitých pri vyhladzovaní obrázka. Čím väčšie vyhladenie obrázka použijeme, tým nájdeme menej obrysov prechodu nulou a teda obrázok je výhodnejšie v prípravnej fáze zväčšiť.

### Vysvetlenie filtra prechodu nulou

Podstata filtra prechodu nulou spočíva vo využití Laplaciánu Gaussovho filtra. Teda, ako už bolo skôr spomenuté, obrisy v obrázku vytvárajú prechody nulou na výstupe Laplaciánu Gaussovho filtra. Napríklad, nasledujúci obrázok nám ukazuje ako zareaguje filter pri nájdení hrany v obrázku:



Obr. 2 Odozva 1-D Laplace-Gaussovho filtra na zmenu obrusu

Obrázok na ľavej strane znázorňuje 1-D obrázok, 200 pixelov široký, obsahujúci hranu. Obrázok na pravej strane znázorňuje odozvu 1-D Laplace-Gaussovho filtra s Gaussovou odchýlkou 3 pixely.

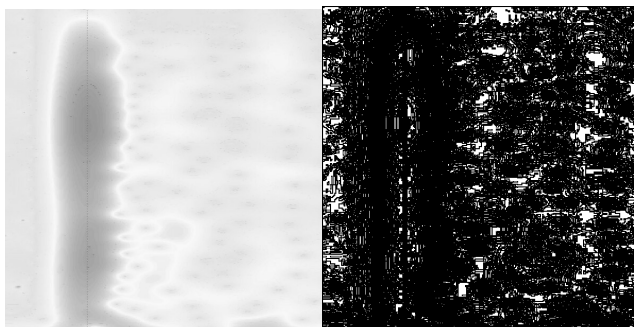
Najjednoduchší spôsob ako zistiť prechody nulou je zjednodušiť prevedenie šedej obrázku na binárny obrázok, kde hranice medzi svetlými a tmavými oblasťami predstavujú body prechodu nulou. Tieto hranice je potom možné ľahko zistiť a označiť pri jednom prechode, napr. pomocou morfológického operátora. Napríklad, pre vyhľadanie všetkých hraničných bodov, jednoducho označíme každý svetlý bod, ktorý má aspoň jedného tmavého suseda.

Problém pri tejto metóde je, že musíme dozerat' na odklon od miesta hrany (prechodu nulou) buď k svetlejšej strane alebo k tmavšej strane hrany, závisiac od toho, či sa hľadajú hrany svetlých oblastí alebo tmavých oblastí.

Lepšia metóda je, ak uvažujeme body na oboch stranách prahovej hranice a vyberieme jednu s najnižšou absolútnou veľkosťou Laplaciánu, ktorá sa predpokladá, že bude najbližšie k prechodu nulou.

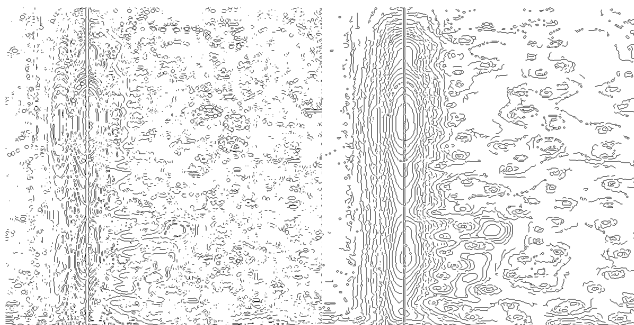
Oveľa presnejšia metóda je uskutočniť nejakú interpoláciu na určenie miesta prechodu nulou pri presnosti sub-pixla.

### Výstupné obrázky po aplikovaní jednotlivých filtrov



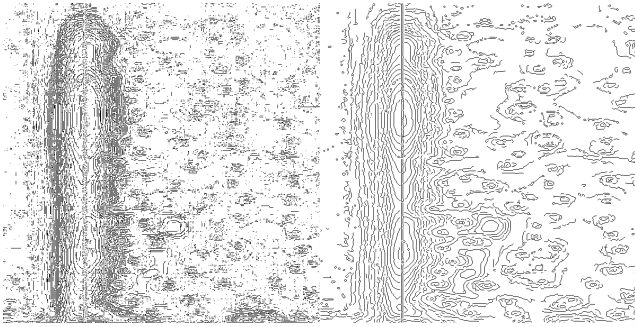
Obr. 3 Pôvodný obrázok

Obr. 4 Sobelov filter



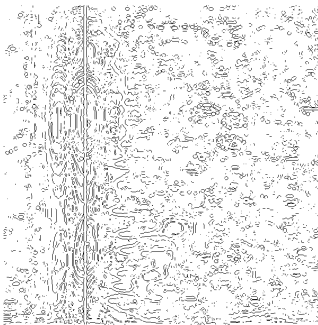
Obr. 5 Laplaceov filter

Obr. 6 Prewittov filter



Obr. 7 Robertsov filter

Obr. 8 Cannyho filter



Obr. 9 Filter prechodu nulou

### Porovnanie jednotlivých filtrov

V tomto príspevku boli popísané niektoré metódy pre rozpoznanie a filtrovanie obrázkov s ohľadom na detekciu dôležitých bodov [4]. Tieto body ležali na rozmedzí dvoch kontrastných oblastí a tým tvorili súčasť nejakej krivky prípadne črty obrázku. Podľa kriviek, ktoré daný filter previedol zo vstupného obrázku na výstupný, je ďalej možné určiť intenzitu a teda i smer toku šírenia danej veličiny v obrázku. Podľa porovnaných metód (filtrov) v tomto príspevku je pre ďalšie spracovanie obrázkov z

rôznych simulácií alebo termovízných meraní výhodné použiť Cannyho filter, prípadne Robertsov filter. Tieto filtre je možné vhodne upraviť nastavením parametrov citlivosti na hranu, čím docielime lepšiu kvalitu výstupného obrázku pre ďalšie použitie napríklad pri triedení grafov do určitých kategórií využitím neuronových sietí.

### Literatúra

- [1] Kovesi, P.: MATLAB and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing. [online] Dostupné na: < <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/Research/MatlabFns/> > Crawley, Western Australia
- [2] Rohit Singh, Mitul Saha: Canny Edge Detector. [online] Dostupné na: < <http://ai.stanford.edu/~mitul/cs223b/canny.m> > Stanford, 2002
- [3] F. J. Canny. A computational approach to edge detection. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., 8(6):679-698, 1986.
- [4] The MathWorks, Inc.: The Image Processing Toolbox. [online] Dostupné na: < <http://www.mathworks.ch/access/helpdesk/help/toolbox/images/> > . The MathWorks, Inc., 2006
- [5] Daniels, A.: Problem Set No. 2. [online] Dostupné na: < [http://www-static.cc.gatech.edu/classes/cs7321\\_98\\_winter/participants/daniels/ps2/](http://www-static.cc.gatech.edu/classes/cs7321_98_winter/participants/daniels/ps2/) > . Computer Vision Page. 1998
- [6] Green, B.: Edge Detection Tutorial. [online] Dostupné na: < <http://www.pages.drexel.edu/~weg22/edge.html> > . Drexel University. Philadelphia. 2002
- [7] Fisher, R., Perkins, S., Walker, A., Wolfart, E.: Feature Detectors. [online] Dostupné na: < <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/featops.htm> > . The Hypermedia Image Processing Reference. 2003
- [8] FPFE -- Prewitt Edge Filter (3x3). [online] Dostupné na: < <http://www.pcigeomatics.com/cgi-bin/pchlp/FPFE> > . PCI Geomatics. Canada.
- [9] Reza Hassanpour: Gradient Based Edge Detection. [online] Dostupné na: < <http://ari.cankaya.edu.tr/~reza/ImLab4.htm> > . Çankaya University. 2003

*Táto práca vznikla za podpory Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu APVV-20-006005*

**Autor:** Dušan Medved', Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: Dusan.Medved@tuke.sk

Jozef Balogh, Juraj Kurimský, Karol Marton

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

## Rekognoskácia výbojovej činnosti v modelovej dutine umiestnenej v izolačnej kvapaline pri prevádzkových teplotách

**Abstrakt.** V príspevku sa poukazuje na modelovanie čiastkových výbojov napäťovým a prúdovým modelom v kvapalnom prostredí pri prevádzkových teplotách, pričom sa analyzuje aj ich elektro-fyzikálna podstata. Príspevok popisuje sledovaný vplyv teploty na nasadenie výboja pri iniciačnom napätí  $U_i$ . Súčasne sme sledovali odozvu prúdového impulzu na napäťovú relaxáciu v pozitívnej a negatívnej polvine skúšobného napätia 50Hz s poukázaním na fázové rozloženie početnosti  $n$  a zdanlivého naboja  $q$ .

**Abstract.** The paper deals with the partial discharge activity in modeled cavity placed in insulation liquid at temperatures above 20°C. The influence of temperature on the beginning of discharge activity at initialization voltage  $U_i$  was observed. Simultaneously the response of current pulse to voltage relaxation in positive and negative half-wave of test voltage with frequency of 50Hz was observed and we pointed out the phase distribution of  $n$  count of discharge peaks and apparent charge  $q$ . (**Recognition of discharge process in cavity model placed in isolation liquid at operation temperatures**).

**Kľúčové slová:** čiastkový výboj, fázové rozloženie.

**Keywords:** partial discharge, phase distribution.

### Úvod

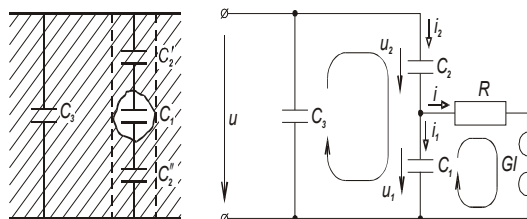
V diagnostike izolačných systémov sa v súčasnosti stále vo väčšej miere aplikujú metódy nedeštruktívne, medzi ktoré patrí metóda sledovania vývoja a existencie čiastkových výbojov v defektných miestach zložitého izolačného systému. Aktivita čiastkových výbojov v defektných miestach izolačného systému bola zvyčajne študovaná pri izbovej teplote. V prevádzke však izolačný systém v pevnej fáze, prípadne v kombinácii kvapalným médium – papier, bavlna je namáhané aj tepelnou energiou, pričom hranica tepelného zaťaženia je daná teplotnou triedou izolačného systému. Je prirodzené, že aj v plynom vyplnenej dutine alebo kanáliku sú teplotné, prípadne tlakové pomery prispôbené okolitému prostrediu. V literatúre je popísaný celý rad experimentov na modeloch s pevným dielektrikom. Menej prác sa venuje kvapalným izolantom (napr. olej – papier, bavlna). Z tohoto dôvodu poukážeme v predkladanej práci na jeden z možných spôsobov snímania výpovedeschopných veličín čiastkových výbojov induktívnou metódou pri zvýšených teplotách. Vychádzajúc z teórie prúdového modelu defektného miesta (Marton [3]) v dielektriku aplikovali sme tento model a porovnali sme ho s Böningovým modelom, ktorý je upravený tak, aby bolo možné pri extrémne malých vzdialenostiach iskrišťa, modelujúceho výbojovú dráhu meniť teplotu plynného prostredia medzi elektródami.

### Teoretická interpretácia napäťového a prúdového modelu

Autori Gemant a Philipoff, Heller a Veverka, Kranz, Böning, Wlodek a Marton [1], [4] vytvorili modely dutín resp. defektných miest v izolácii. Modelovanie viedlo spravidla k analýze napäťových, nábojových a výkonových (energetických) pomerov v dutinách dielektrika. Po zavedení nekonvenčných metód na detekciu čiastkových výbojov, založených na snímaní elektrickej (E), prípadne magnetickej (H) zložky elektromagnetického vlnenia sa ukázalo (ako to v ďalšej časti dokážeme), že absolútne hodnoty amplitúd týchto veličín (E a H) sú priamo úmerné amplitúde prúdu, tečúceho žiaričom, prípadne defektným miestom. Tento fyzikálny jav nás vedie k postaveniu prúdového modelu defektného miesta. K vóli jednoduchosti

vychádzame z jednej plynom vyplnenej dutiny v izolácii, napr. v tvare rotačného elipsoidu. V tejto dutine pri prekročení kritickej hodnoty intenzity elektrického poľa vzniká výboj, ktorý navonok reprezentuje mikrožiarič elektromagnetického vlnenia.

Pôvodný napäťový model (obr.1) riešený pre element izolácie o celkovej kapacite  $C$  zaviedol Gemant a Philipoff. Títo autori elektrické pomery riešili na základe Kirchhoffových zákonov, čo viedlo k vyjadreniu matematického tvaru prúdového impulzu počas výboja.



a) element kapacity s defektom

b) náhradný model

Obr. 1 Náhradný model dielektrika pri jednoduchom usporiadaní

Diferenciálna rovnica pre prúd  $i$  popisujúca dej na obr. 1 bude:

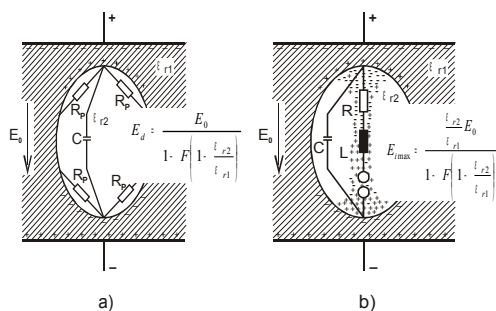
$$\frac{di}{dt} + \frac{C_2 + C_3}{R(C_1C_2 + C_1C_3 + C_2C_3)} \cdot i = 0 \quad \text{alebo} \quad \frac{di}{dt} + Ki = 0$$

Riešime ju pomocou operátorového počtu a transformáciou

$$F(p) = p \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt \quad \text{získame výsledný vzťah: } i = i_0 e^{-Kt}.$$

Amplitúdu prúdového impulzu  $i_0$  získame z podmienky, kde  $t=0$ , takže. Pribeh impulzu v tejto forme nepoukazuje na procesy, ktoré sa odohrávajú v čase, odpovedajúcom čelu vlny. Z toho dôvodu sme navrhli riešiť prípad priamo v dutine, kde sme zaviedli mikroindukčnosť  $L$ , ktorá odpovedá indukčnosti výbojovej dráhy po nasadení čiastkového výboja.





Obr. 2 a) pomery pred nasadením výboja, kedy je v dutine  $E_d$ , kde F-faktor tvaru. b) po vzniku výboja, kedy je maximálna intenzita poľa vo vrchole rotačného elipsoidu

V plynom vyplnenej dutine je po priložení napätia na elektródy intenzita elektrického poľa  $E_d$ . Objem dutiny predstavuje mikrokapacitný útvar o hodnote  $C_d$ . Po prekročení intenzity poľa v dutine z hodnoty  $E_d$  na  $E_{krit}$  ( $E_{krit} > E_d$ ) dochádza k „zapáleniu“ výboja, pričom výbojovým kanálom o odpore R a indukčnosti L tečie prúd  $i$ . Pre model na obr. 2 po vzniku na fiktívnom guľovom iskrišti G napíšeme diferenciálnu rovnicu [1] ak  $R_p = \infty$ :

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = 0$$

Všeobecný tvar riešenia rovnice za predpokladu, že korene charakteristickej rovnice  $\alpha_1 \neq \alpha_2$  bude nasledovný:

$$i(t) = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 e^{\alpha_2 t} \equiv i(t) = I_0 \left( e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right)$$

Pri matematicko-fyzikálnej analýze vzniku a priebehu čiastkového výboja vychádzame z počiatočných podmienok, ktoré sú rovnaké pre jednotlivé prípady:

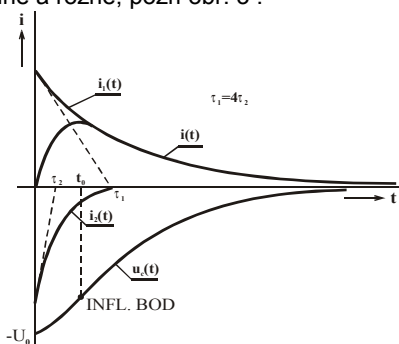
$i(0) = 0$ , čo znamená, že pred vznikom čiastkového výboja netečie prúd dutinou,  
 $u_c = -U_0$ , čo svedčí o tom, že pred výbojom je na kapacite  $C_d$  napätie  $U_0$ .

Ďalšia matematická podmienka  $i'(0)$  sa určí za predpokladu, že  $t = 0$ :

$$L \left( \frac{di}{dt} \right)_{t=0} + Ri(0) + u_0(0) = 0$$

Po úprave:  $L \cdot i'(0) - U_0 = 0$ , takže dostávame pre:

$i'(0) = \frac{U_0}{L}$ . Výskumom bolo dokázané, že priebeh prúdového impulzu má charakter aperiodickej funkcie. Tomu zodpovedá riešenie základnej rovnice, ak sú korene  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  reálne a rôzne, pozri obr. 3.



Obr. 3 Aperiodický priebeh impulzu čiastkového výboja získaného z prúdového modelu

$$t_m = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \ln \frac{\tau_1}{\tau_2}$$

Rovnako je možné určiť aj priebehy napätí na pasívnych prvkoch náhradného modelu

**Výboje v plynom vyplnených defektných miestach a malom objeme**

Pomery elektrofyzikálneho charakteru, ktoré sa nastavia v defektnom mieste vyplnenom plynom budeme sledovať na základe zákonitostí, ktoré poznáme z teórie vzniku elektrických lavín. Predkladaný prehľad bude komplexný nakoľko zohľadní existujúce činitele ovplyvňujúce ionizačné procesy po prekročení kritickej intenzity elektrického poľa v defektnom mieste. Sledované javy podrobíme analýze za predpokladu, že plynom vyplnená dutina má tvar rotačného elipsoidu. Nech vzdialenosť protifaľných stien je  $s$  a intenzita elektrického poľa vo vnútri dutiny [3] obr. 2 je

$$E_d = \frac{E_0}{1 - F \left( 1 - \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} \right)}$$

kde F – faktor tvaru,  $\epsilon_{r1}$  – permitivita plynu v dutine,  $\epsilon_{r2}$  – permitivita izolácie,  $E_0$  – intenzita elektrického poľa v homogénnej časti izolantu.

Matematicky sa reprodukcia elektricky nabitých častíc – elektrónov dá vyjadriť aj rozložením prvkov vyjadrujúcich kritérium samostatnosti výboja do radu, ak vzťahom:

$$e^{\alpha s} (1 + M + M^2 + M^3 + \dots + M^{z-1}) = \frac{e^{\alpha s}}{1 - M}$$

Prudký nárast prúdovej hustoty pri tvorbe vyšších generácií častíc vyznačených odchýlkou od lineárneho priebehu je dôkazom vplyvu sekundárnych činiteľov s majoritným zastúpením fotoionizácie. Práve tu sa výrazne ukazuje vzájomná súvislosť medzi tlakom plynného prostredia, v ktorom prebieha výboj a medzi vzdialenosťou „fiktívnych“ elektród tvorených protifaľnými stenami defektného miesta s vysokou plošnou hustotou elektrických nábojov.

Dôležité je poznamenať, že v praxi sa nevyskytujú ideálne geometrické útvary (guľa, valec a pod.). Z toho dôvodu pri hľadaní súvislosti medzi tlakom a teplotou, prípadne ionizačným činiteľom  $\alpha$  nemôžeme v plnom rozsahu aplikovať Paschenov zákon [5], [6], ale je potrebné rešpektovať takzvaný redukovaný Paschenov zákon v tvare:

$$U_i = f \left( p \cdot d, \frac{r}{d} \right)$$

pričom  $r$  – polomer elektród;  $d$  – ich vzdialenosť.

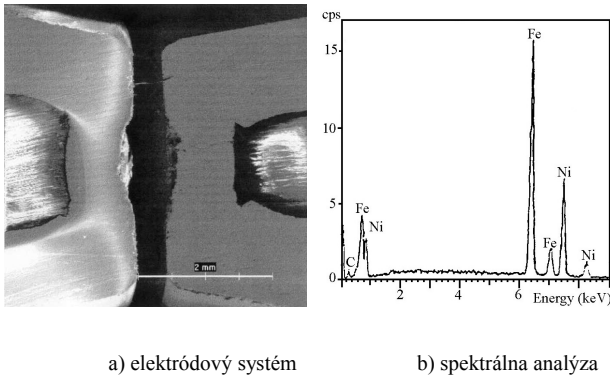
**Meranie aktivity čiastkových výbojov pri vyšších teplotách (experiment)**

Bol vyvinutý model čiastkových výbojov, ktorého teoretické zdôvodnenie bolo uvedené v práci [1] a [3]. Zvýšená pozornosť bola venovaná uloženiu elektródového systému iskrišťa. Detailný záber zhotovený elektrónovým mikroskopom z časti elektródového systému je znázornený na obr. 4a. Za účelom poznania materiálu elektród, predovšetkým z hľadiska chovania sa modelovej dutiny do teploty 80°C bola urobená aj spektrálna analýza materiálu obr. 4b.

Materiál elektród je tvorený zliatinou Fe-Ni o teplotnej zaťažnosti 10·10<sup>-6</sup> 1/°C. Keramické puzdro je vyrobené z korundu (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) o rozťažnosti 5·10<sup>-6</sup> 1/°C.

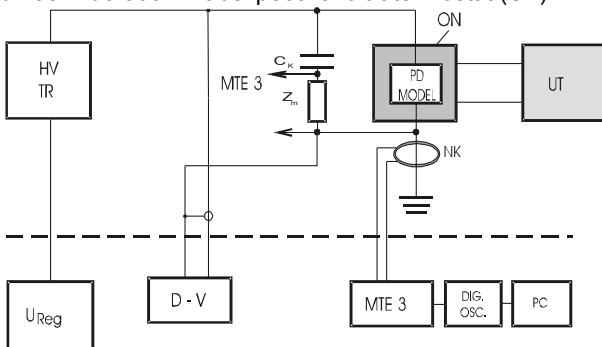
Za predpokladu, že  $\tau_1$  a  $\tau_2$  sú kladné, avšak  $\tau_1 > \tau_2$ , bude zložka zanikať pomalšie než zložka. Čas, kedy  $t = t_m$  dostaneme z podmienky  $di/dt = 0$ , pričom  $I_0 \neq 0$ :





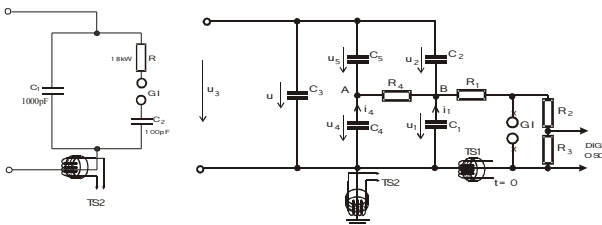
Obr.4 Detailný pohľad na usporiadanie elektród

Prúdový resp. napäťový model bol umiestnený v zariadení, ktoré je znázornené na obr. 5. Stablnú teplotu s reguláciou od 293 K do 360 K zabezpečoval ultratermostat (UT).



Obr. 5 Experimentálna báza

Aplikované modely čiastkových výbojov sú zobrazené na obr. 6 a obr. 7



Obr. 6 Prúdový model

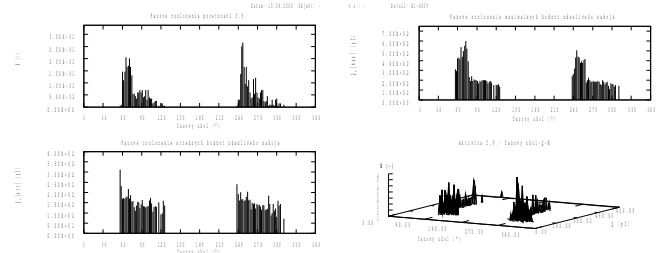
Obr. 7 Napäťový model

Experiment bol orientovaný na snímanie výpovedeschopných veličín čiastkových výbojov, menovite početnosť  $n$ , maximálna hodnota zdanlivého náboja  $q_{max}$ , stredná hodnota zdanlivého náboja  $q_{str}$ , sumačný náboj  $Q$ . Tieto veličiny boli snímané buď galvanickou metódou, prípadne metódou induktívnou, pričom boli aplikované tri typy snímačov (nanokryštalické feromagnetikum, PY, ako aj toroidné jadro s magnetickými vlastnosťami anorganického skla a cievka bez feromagnetického jadra).

Vyhrievanie defektného miesta vo forme hermeticky uzavretej dutiny sa realizovalo ultratermostatom (UT) od 293 K do 360 K. Tento interval teplôt bol zvolený predovšetkým preto, lebo sa predpokladá aplikácia týchto výsledkov vzhľadom na výskum výbojovej činnosti v transformátorovom oleji. Aktivita čiastkových výbojov bola registrovaná meračom čiastkových výbojov typu MTE3 s prepojením na digitálny osciloskop a PC techniku. Požadované veličiny boli štatisticky vyhodnotené (pozri obr. 8).

Podľa očakávania sa zvyšovaním teploty plynného média v medzelektrodovom priestore zväčšovala hodnota  $U_i$  do

teploty 323 – 333 K. Táto tendencia korešpondovala aj so zvýšenou početnosťou výbojov  $n+$ ,  $n-$ . Zvlášť výrazne sa tu prejavil polaritný efekt. Ako z odvodenej rovnice vyplýva, zvýšená teplota prostredia posúva hodnotu strednej voľnej dráhy častíc a v súlade s tým sa upravuje aj tlak plynu v uzavretom objeme V.



Obr. 8 Fázové rozloženie výbojovej činnosti pri teplote 293 K

V predkladanej práci bude ako výpovedeschopná veličina prezentovaná početnosť výbojov v kladnej a zápornej polarite príslušnej periódy. Polaritný efekt sa zvlášť výrazne prejavil v prípade nízkonapäťových výbojov so zahrotenými elektródami, ako aj pri iskriškách S (SIEMENS). Iskriška C (CERBERUS) vykazovali opačný charakter kvantít a amplitúdy veličiny  $n$ . Fázové rozloženie poukázalo aj na zmenu väzby spektra výbojov v závislosti od fázového uhla. Odporúčame preto sledovať kontrakciu spektra v závislosti od typu výbojky a od teploty umelo vytvorenej dutiny a sledovať výpovedeschopné médium, ako aj pri jeho ochladzovaní.

### Záver

V predloženom príspevku bola z viacerých hľadísk analyzovaná aktivita čiastkových výbojov v umelo vytvorenej dutine v pevnej izolácii pri prevádzkovej teplote do 360K. Experimenty dokázali súlad s teoretickými predpokladmi, čo možno zhrnúť nasledovne:

- Vysoká stabilita výbojov
- Aplikovateľnosť pri teplotách do 360K
- Vysoká citlivosť napäťových a prúdových modelov
- Snímanie signálov toroidnými sondami a galvanicky
- Privedenie výpovedeschopných veličín do počítača

### Literatúra

- Boening, A: Luftgehalt und Luftspalt Verteilung geschichteter Dielektrika, Archiv für Elektrotechnik, No 1, 1963
- Marton, K. et al.: Laboratórne praktikum, EF VŠT Košice, 1973
- Marton, K.: Current Model of Defect Place in Insulation Systems, 43<sup>rd</sup> International Scientific Colloquium'98, TU Ilmenau, Proc. Pp 281–286, TU Ilmenau 1998
- Kranz, H.G.: Hochspannungstechnik, Skriptum Fachbereich Elektrotechnik, BUGH Wuppertal, 1993
- Veverka, A.: Technika vysokých napätí, SNTL Praha 1978
- Balogh, J.: Linear and Toroidal Inductive Sensors and Their Application in Power Engineering, Doktorandská dizertačná práca, Košice 2001

Tento článok bol vypracovaný na základe podpory APVV, číslo projektu APVV-20-006005 a VEGA1/3142/06.

**Autori:** Jozef Balogh, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [jozef.balogh@tuke.sk](mailto:jozef.balogh@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)  
 Karol Marton, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [karol.marton@tuke.sk](mailto:karol.marton@tuke.sk)

Bystrík Dolník

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

## Data mining – vybrané techniky dolovania dát

**Abstrakt.** V príspevku sa pojednáva o vybraných technikách dolovania dát, ktoré môžu byť použité na analýzu, klasifikáciu a skúmanie nameraných dát z experimentov na izolačných systémoch. V oblasti výskumu starnutia elektroizolačných systémov aplikovaním výpočtovej techniky došlo k veľkému kumulovaniu záznamov z experimentov v databázach. Na vysvetlenie niektorých fyzikálnych javov, ktoré pôsobia v procese starnutia je potrebná technika dolovania dát.

**Abstract.** In this article some techniques of data mining for analysis, classification and discovering of measured data from experiments on insulating systems are discussed. In the research of insulating systems using of PC techniques very large cumulation of records from experiments in databases originated. For interpretation of some physical phenomena during ageing process a data mining techniques are needed. (**Contribution for SES2006 Seminar – Data Mining – Overview of Data Mining Techniques**).

**Kľúčové slová:** dolovanie dát, získavanie znalostí, databáza.

**Keywords:** data mining, knowledge discovery, database.

### Úvod

Nahromadením veľkého množstva dát, ktoré sú uložené v databázach, zvyšujú sa aj nároky na ich spracovanie. Toto veľké množstvo dát ďaleko presahuje schopnosti človeka na to, aby ich vybral, zredukoval a analyzoval bez použitia automatických techník analýzy. Aplikovaním týchto techník na zdanlivo nesúvisiace dáta nám získané výsledky poskytujú dôležité informácie ako aj nové znalosti. Skutočnosť, že dáta môžu obsahovať cenné informácie slúžiace na podporu pri rozhodovaní, ovplyvnil vývoj nových technológií zameraných na podporu rozhodovania.

Techniky dolovania dát sú výsledkom dlhého výskumu a vývoja. Za počiatok techniky dolovania dát možno považovať obdobie, keď sa do počítačov zapísali prvé obchodné údaje, neskôr sa zlepšoval prístup k týmto údajom a vytvárali sa technológie, ktoré umožňovali používateľom prezerat' údaje v reálnom čase. Dolovanie dát ponúka nie len retrospektívny prístup a prezeranie údajov, ale ponúka aj prospektívne a proaktívne údaje.

Na technikách, ktoré sú základom dolovania dát nie je nič nové, ani potreba podpory rozhodovania nie je žiadnou novinkou. Nové je spojenie pomerne dobre spracovaných nástrojov týchto techník – v čase keď je užívateľská komunita pripravená oceniť ich význam – a nájdenie spôsobu, ako tieto technológie aplikovať na reálne existujúce problémy [1, 2].

### Dolovanie dát

Dolovanie dát (Data Mining – DM) je pomenovanie používané odborníkmi zaoberajúcimi sa štatistikou, analýzou databáz a často aj obchodnými spoločnosťami. Dolovanie dát možno považovať za prostriedok na podporu rozhodovania. Technika dolovania dát je už pomerne známa, novinkou je spojenie relatívne dobre spracovaných nástrojov týchto techník.

V súvislosti s pojmom dolovanie dát často sa používajú dva výrazy: dolovanie dát, objavovanie znalostí v databáze resp. skratka KDD (Knowledge Discovery in Databases). Rôzne zdroje vysvetľujú tieto pojmy odlišne.

Pomerne zrozumiteľne je dolovanie dát definované v [2, 3] kde sa uvádza, že dolovanie dát je proces extrahovania platných dopredu neznámych, zrozumiteľných a využiteľných informácií z rozsiahlych databáz a ich využitie pri závažných obchodných rozhodnutiach.

Trochu iný pohľad uvádza, že objavovanie znalostí v databáze sa často nazýva aj dolovanie dát a definuje, že jeho cieľom je objavovanie užitočných informácií z veľkých súborov dát. Ďalej sa uvádza, že KDD je interaktívny a iteratívny proces s niekoľkými krokmi, pričom dolovanie dát je jeden z nich. Pojmy KDD a dolovanie dát sú často nevhodne použité, takže sú potom nesprávne chápané ako ekvivalentné.

Ak máme k dispozícii rozsiahle a kvalitné databázy, dolovanie dát môže vytvoriť nové možnosti tým, že sprostredkúva:

- automatické predpovedanie trendov a správania sa. Dolovanie dát automatizuje vyhľadávanie prediktívnych informácií vo veľkých databázach. Otázky, ktoré vyžadovali náročnú analýzu, môžu byť zodpovedané priamo z údajov, pričom čas odozvy je veľmi krátky;
- automatické nachádzanie známych vzorov v jednom kroku. Príkladom nájdenia vzorov je napríklad identifikácia anomálií, ktoré môžu reprezentovať rôzne chyby v údajoch alebo detekcia podvodných transakcií pomocou kreditných kariet.

V tejto fáze procesu teda ešte nehovoríme o znalostiach. Tieto vznikajú až vhodným výberom z vygenerovaných vzorov a ich aplikovaním v kontexte riešenej úlohy [4].

### Techniky dolovania dát

Najpoužívanejšie techniky dolovania dát, ktoré sa používajú na vysoko výkonných počítačoch možno triediť nasledovne:

- 1) Neurónové siete  
Nelineárne prediktívne modely, ktoré sa učia tréningom a majú podobnú štruktúru ako biologické neurónové siete.
- 2) Rozhodovacie stromy  
Stromové štruktúry, ktoré reprezentujú rozhodnutia vychádzajúce pravidlá na klasifikáciu údajov (CART, CHAID).
- 3) Genetické algoritmy  
Optimalizačné techniky založené na princípoch evolúcie, pričom využívajú genetické procesy ako kríženie, mutácia a prirodzený výber.
- 4) Metóda najbližšieho suseda  
Táto technika triedi záznamy podľa ich podobnosti.

- 5) Indukcia pravidiel  
Extrakcia užitočných (ak–tak) pravidiel z údajov, založená na štatistickej podobnosti.

Princíp dolovania dát spočíva v tom, že na získavanie odpovedí sa využíva technika modelovania, pričom sa vytvorí model známej situácie (kde poznáme odpoveď) a ten sa potom aplikuje na neznámu situáciu. Počítače majú teda zapísané veľké množstvo údajov o rôznych situáciách, kde je známe riešenie. Potom tieto údaje spracuje softvér dolovania dát a vyvodí charakteristiky údajov, ktoré by mali byť na vstupe. Keď je model vytvorený, môže byť použitý na podobné situácie, kde riešenie nepoznáme.

Iný pohľad na triedenie techník dolovania dát je uvedený v [5]. Autor ich triedi na klasické techniky a na nové techniky.

Medzi klasické techniky patria:

- štatistika,
- metóda najbližšieho suseda a
- klasifikácia a zhlukovanie (klastre).

Medzi nové techniky patria:

1. rozhodovacie stromy,
2. neurónové siete a
3. indukcia pravidiel.

### Klasické techniky

Klasické techniky boli používané skôr, ako vznikla myšlienka dolovania dát v databázach.

Štatistické metódy – sú založené na spracovaní údajov a umožňujú vyhľadávať vzory a vytvárať prediktívne modely. Preto je dôležité vedieť, ako pracujú. Tak ako pre techniky dolovania dát, aj pre štatistické metódy je dôležité mať jasné údaje, presne definovaný cieľ, atď. Tiež sa používajú na riešenie typovo rovnakých problémov (predikcia, hľadanie vzorov). Hlavný rozdiel od techník dolovania dát spočíva v tom, že dolovanie dát je použiteľnejšie a prijateľnejšie pre málo skúsených používateľov.

Štatistické metódy umožňujú dať odpoveď na otázky typu:

- Aké vzory sa nachádzajú v databáze?
- Aká je pravdepodobnosť, že jav nastane?
- Aké vzory sú významné?
- ako najefektívnejšie zosumarizovať údaje, aby dávali prehľad o tom, čo obsahuje databáza?

Využívajú sa napríklad histogramy, ktoré zobrazia sumarizáciu údajov pomocou početnosti. Ďalšou metódou je lineárna regresia, ktorou sa vytvára analytické riešenie (funkcia) na základe dostupných údajov.

Metóda najbližšieho suseda – táto metóda je považovaná pre svoju jednoduchosť za základnú metódu, založenú na kritériu minimálnej vzdialenosti vektorov. V praxi sa väčšinou používa ako referenčná metóda, na ktorej sa overuje kvalita prípravy dát pre ich rozpoznanie. Často sa využíva pre porovnanie výsledkov zo sofistikovanejších metód ako sú neurónové siete, strojové učenie sa. Je podobná ako klastrovanie a jej princíp spočíva v tom, že na predikciu hodnoty v jednom zázname je potrebné nájsť záznamy s podobnými hodnotami v predošlej databáze a použiť hodnotu „najbližšieho“ záznamu, alebo inými slovami povedané: klasifikátory z tejto skupiny sú založené na princípe učenia sa na základe analógie [6].

Spravidla sa predpokladá, že tréningové príklady (množina  $O$ ) sú popísané  $n$  numerickými atribútmi, a teda predstavujú vlastne body v  $n$ -rozmernom priestore príkladov. Ak príde nový príklad  $q$  s ešte neznámou hodnotou cieľového atribútu (triedy), klasifikátor na princípe  $k$ -najbližších susedov hľadá v priestore príkladov takých  $k$  tréningových príkladov, ktoré sú k novému príkladu najbližšie. Pritom vzdialenosť príkladov môže byť definovaná napr. ako

euklidovská vzdialenosť dvoch bodov  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  a  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ , t. j.

$$d(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

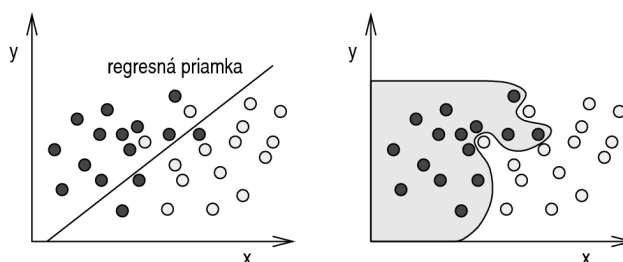
Neznámy príklad je potom klasifikovaný do tej triedy, ktorá sa najčastejšie vyskytuje medzi  $k$  jemu najbližšími tréningovými príkladmi. Z uvedeného vyplýva, že tento typ klasifikátorov nekonštruuje žiaden klasifikačný model, t. j. odpadá vlastne prvá fáza klasifikácie – konštrukcia modelu. Ku klasifikácii tu dochádza až v momente, keď je potrebné klasifikovať nejaký nový, dovtedy neznámy príklad. Takéto klasifikátory založené na inštanciách (instance-based), resp. sa hovorí o „lenivom učení“ (lazy learners). Nevýhodou takýchto prístupov je skutočnosť, že potrebujú dlhší čas na klasifikáciu, keďže celá činnosť začína až v momente príchodu nového príkladu a spravidla je potrebné prehľadávať veľkú časť priestoru tréningových príkladov. Tu sa zvyknú používať rôzne efektívne indexovacie techniky, aby bolo možné v tréningovom priestore rýchle nájsť najbližších susedov klasifikovaného príkladu.

Jednotlivé varianty klasifikátorov na princípe  $k$ -najbližších susedov sa môžu líšiť v tom, akým spôsobom vyberajú najbližších susedov, koľko ich vyberú pre klasifikáciu nového príkladu. Voľba parametra  $k$  má významný vplyv na kvalitu výsledného klasifikátora na princípe  $k$ -najbližších susedov.

Príliš malé  $k$  vedie k prílišnej citlivosti na príklady, ktoré predstavujú šumy. Príliš veľké  $k$  zase zvyšuje riziko prekročenia hraníc zhlukov príkladov reprezentujúcich určitú triedu a zahrnutie mnohých príkladov z inej triedy. Stredná hodnota  $k$  preto vo všeobecnosti poskytuje najlepšie výsledky klasifikácie. Vo väčšine prípadov platí pre hodnotu najlepšieho  $k$ :  $1 \ll k < 10$  [7].

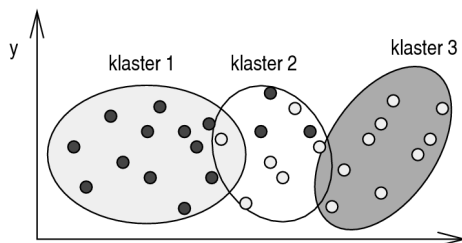
Klasifikácia a zhlukovanie (klastrovanie) – je najstarší a najviac rozšírený prístup k dolovaniu dát počas procesu získavania znalostí. Je to metóda, pomocou ktorej sa záznamy dávajú do skupín na základe určitých podobností, pričom cieľom je zväčša vytvorenie (objavenie) modelu dát, ktorý bude slúžiť na predikciu ďalších údajov. Z matematického hľadiska je klasifikácia v podstate učenie sa funkcie, ktorá mapuje položky dát do jednej z preddefinovaných tried.

Okrem lineárnych metód možno na klasifikáciu vzorov do tried použiť aj nelineárne metódy, ktoré vznikajú spájaním nelineárnych kombinácií jednoduchých funkcií na základe vstupných dát, pozri obrázok 1. Typickým príkladom takýchto metód sú viacvrstvové neurónové siete, spline metódy, cieľové regresné metódy, prípadne použitie genetických algoritmov [8].



Obr. 1 Ukážka klasifikačných hraníc: lineárnou regresiou (vľavo) a nelineárnym klasifikátorom (vpravo)

- Medzi ďalšie spôsoby klasifikácie dát patrí Bayesová klasifikácia, ktorá využíva model dát vyjadrený pomocou acyklického orientovaného grafu – tzv. Bayesovej siete. Tieto siete je vhodné použiť vtedy, keď neistota spojená z určitým výstupom môže byť vyjadrená formou pravdepodobnosti. Bayesovský prístup sa dá s výhodou použiť v diagnostických systémoch a taktiež iné spôsoby rozpoznávania vzorov (napríklad skryté Markovovské reťazce) môžu byť modelované pomocou tejto techniky.
- Zhhlukovanie objektov nepatrí medzi metódy klasifikácie dát do tried, ale je to technika strojového učenia bez učiteľa, ktorej cieľom je práve vytvorenie určitých tried (zhlukov) údajov na základe ich podobnosti. Ide o snahu identifikovať konečnú množinu kategórií, ktoré popisujú všetky uložené dáta. Kategórie môžu byť vzájomne sa vylučujúce, alebo môžu byť vyjadrené zložitejšou reprezentáciou, ako sú hierarchické, prípadne prekrývajúce sa kategórie, pozri obrázok 2.



Obr. 2 Ukážka vytvorenia zhlukov dát

Existujú štyri rôzne spôsoby (algoritmy), ako pristupovať k riešeniu problému klastrovania:

- klastrovanie segmentáciou – pre aplikovanie tohoto algoritmu sa vyžaduje stanovenie presného počtu klastrov, ktoré majú byť skúmané;
- mriežkové klastrovanie – v tomto prípade je priestor databázy rozdelený na sieť buniek umiestnených do mriežky;
- hierarchické klastrovanie – táto metóda vytvára hierarchickú štruktúru celej databázy;
- klastrovanie na základe hustoty – táto skupina algoritmov prehľadáva databázu a zoskupuje husto spojené body.

Klastrovanie sa najviac využíva v oblasti rozpoznávania obrazov.

Tieto algoritmy sa môžu používať na analyzovanie satelitných snímok povrchu zeme, astronomické snímky alebo na spracovanie snímok v medicíne [9].

### Nové techniky

Nové techniky patria medzi najpoužívanejšie. Môžu sa využiť na nájdenie nových informácií vo veľkých databázach ako aj na vytváranie prediktívnych modelov.

Rozhodovacie stromy – predstavujú prediktívne modely, ktoré sa dajú zobrazit' ako strom. Každá vetva predstavuje klasifikačnú otázku a listy stromu sú klasifikované časti množiny dát. Dnes sa používajú v mnohých systémoch. Jedným z prvých bol systém EPAM (Elementary Perceiver and Memorizer).

Tento systém bol považovaný za kognitívno-simulačný model učenia pojmov človekom. Ďalší model CLS (Hunt at al., 1966), používa pri generovaní rozhodovacieho stromu heuristický prístup (Look ahead Method).

Rozhodovacie stromy umožňujú prezentáciu množiny pravidiel, ktoré vedú k presnej hodnote alebo k zatriedeniu do skupiny. Koreňovým uzlom stromu je rozhodovací uzol, ktorý definuje otázku alebo test, ktorý sa má vyhodnotiť. Možné odpovede na túto otázku rozdeľujú strom na vetvy. Počet možných odpovedí zodpovedá počtu vytvorených vetiev. Počet vytvorených vetiev testovacieho uzla je závislý na použitom algoritme.

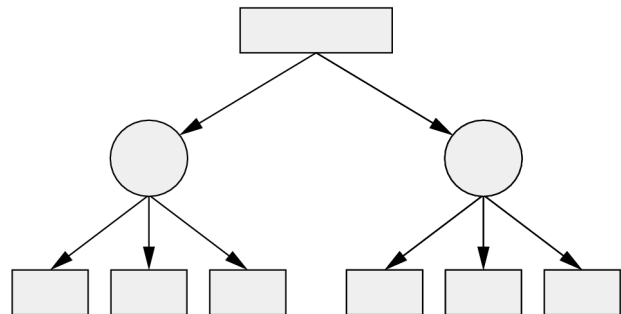
Napríklad algoritmus s názvom CART generuje stromy, ktorých uzly majú len dve možné vetvy na nižšej úrovni. Takýto strom sa nazýva binárny. Každá vetva stromu vedie buď k ďalšiemu rozhodovaciemu uzlu alebo k listovému uzlu, ktorý je posledný na aktuálnej ceste cez strom. Každý rozhodovací uzol vyhodnocuje údaje zo vstupu, ktoré sú definované pre riešenie daného problému.

Modely s rozhodovacími stromami sú pri dolovaní dát používané najčastejšie pre prieskum údajov a prispôsobovanie stromu a jeho pravidiel na základe týchto údajov. Tieto stromy sú potom použité pre získavanie potrebných predpovedí a odhadov.

Pre tvorbu rozhodovacích stromov sa používa niekoľko algoritmov, napríklad CHAID (Chi-squared Automatic Interaction Detection), CART (Classification and Regression Trees), Quest a C5.0.

Rozhodovacie stromy, ktoré sa používajú na predikciu kategorických premenných (zaradenie do konkrétnej kategórie) nazývajú sa klasifikačné stromy. Zatriedujú inštancie na vstupe do skupín, kategórií alebo tried.

Rozhodovacie stromy používané na predikciu spojitých premenných sa nazývajú regresné stromy.



Obr. 3 Príklad jednoduchého rozhodovacieho stromu

S rastúcim množstvom uzlov vytvorených pri dolovaní údajov sa rozhodovacie stromy, tak isto ako aj neurónové siete, môžu veľmi rýchlo rozrastať. Takéto stromy sú tiež ťažko pochopiteľné, ale na rozdiel od neurónových sietí, je každá cesta stromom zrozumiteľná. To znamená, že rozhodovací strom vie veľmi jednoducho zdôvodniť svoje predpovede. Rozhodovacie stromy sa vytvárajú veľmi rýchlo spomínanými algoritmi a dajú sa preto použiť pre spracovanie veľkého množstva údajov [10–12].

V oblasti objavovania znalostí je algoritmus C4.5 v súčasnosti najčastejšie používaný pri generovaní rozhodovacích stromov. Je to neinkrementálny algoritmus, budujúci strom zhora nadol. Ide o vylepšený a doplnený algoritmus ID3, ktorý spomenieme neskôr. Algoritmus C4.5 rozlišuje dva typy atribútov: nominálne a reálne. Používa pomenovanie diskrétno (nominálne) a spojitý (reálne) atribúty. Tento algoritmus vytvára perfektný rozhodovací strom za predpokladu neprotirečivosti tréningových príkladov. Existencia protirečivých príkladov môže signalizovať nedostatočné množstvo atribútov, a teda nie dosť precízny popis príkladov v údajovej časti.

Okrem spomínaného algoritmu C4.5 existujú ešte aj iné algoritmy ako napríklad algoritmus ID3 (Iterative



Dichotomizer 3), ktorý je najznámejším algoritmom generujúcim rozhodovací strom metódou zhora nadol. Bol vyvinutý Rossom Quinlainom v 1979 v doméne znalostí šachistu o hraní šachových koncoviek. Ukončovacie kritérium tohto algoritmu je, že každý podpriestor obsahuje iba príklady jednej triedy. Ak je množina atribútov dostatočná, možno uvedeným postupom zostrojiť rozhodovacie stromy, korektné klasifikujúce tréningové príklady. Hovoríme, že rozhodovací strom generovaný algoritmom je:

- perfektný, keď správne klasifikuje všetky tréningové príklady,
- rozmerovo optimálny resp. minimálny, keď je rozhodovacia procedúra čo najjednoduchšia, s čo najmenším počtom testov hodnôt atribútov.

Algoritmus ID3 pre výber testovacieho atribútu využíva Shannonovu teóriu informácie (Shannon-Weaver, 1949), ktorá na meranie množstva informácie používa entropiu. Claude Shannon objavil informačnú teóriu, ktorá spôsobila revolúciu v oblasti komunikácie a taktiež prispela k úspechu učenia pomocou rozhodovacích stromov. Ak správy  $x_1, x_2, \dots, x_n$  sú možné s pravdepodobnosťami  $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)$  a tieto vytvárajú úplný súbor pravdepodobností, teda:

$$\sum_{j=1}^N p(x_j) = 1,$$

potom entropiu, resp. neurčitost' daného súboru správ možno vyjadriť nasledovne:

$$H = - \sum_{j=1}^N p(x_j) \log_2 p(x_j).$$

Tento vzťah je známy ako Shannonova entropia. Čím je entropia súboru správ vyššia, tým menej určitý je obsah budúcej správy a tým väčšie množstvo informácie získame, keď správu prijmeme. Rozhodovací strom môže byť považovaný za zdroj informácie, ktorá pre nejaký konkrétny príklad formuje správu o klasifikácii daného príkladu do nejakej triedy. Keď niektorý uzol stromu obsahuje iba príklady tej istej triedy, entropia v tomto uzle je nulová, pretože klasifikačné rozhodnutie pre príklady prislúchajúce tomuto uzlu je pevne dané. (Teda pravdepodobnosť jednej triedy je 1 a ostatných nulová). Z toho vyplýva, že entropia v listových uzloch je nulová, zatiaľ čo v koreňovom uzle a medziľahých uzloch má nenulovú hodnotu. Pre vygenerovanie minimálneho rozhodovacieho stromu by entropia mala čo najrýchlejšie klesnúť na nulovú hodnotu. Algoritmus ID3 používa heuristiku, ktorá usiluje o čo najvyšší pokles entropie lokálne v každom kroku.

Nech uzol  $S$ , obsahuje  $n_1$  príkladov klasifikovaných do triedy  $T_1$ , a  $n_2$  príkladov zaradených do triedy  $T_2$ . Potom pravdepodobnosť, že nejaký príklad prislúchajúci uzlu  $S$ , rozhodovacieho stromu bude klasifikovaný do triedy  $T_1$  alebo  $T_2$  je

$$\frac{n_1}{n_1+n_2} \quad \text{resp.} \quad \frac{n_2}{n_1+n_2}.$$

Teda entropia v danom uzle  $S$ , presnejšie povedané entropia súboru tréningových príkladov prislúchajúcich uzlu  $S$ , bude určená nasledovne:

$$H(S) = - \sum_{j=1}^2 \frac{n_j}{n_1+n_2} \log_2 \frac{n_j}{n_1+n_2}.$$

Predpokladajme, že je možné v uzle  $S$  použiť atribút  $A$  s hodnotami  $a_1$  a  $a_2$  pre rozdelenie príkladov z uzla  $S$  do dvoch disjunktných podmnožín  $S_1$  a  $S_2$ . Ak v uzle  $S$  má  $m_1$  príkladov hodnotu atribútu  $A$  rovnú  $a_1$  a  $m_2$  príkladov má hodnotu  $a_2$ , potom celková entropia v uzle  $S$  s použitím atribútu  $A$  sa určí ako:

$$H(S,A) = - \sum_{j=1}^2 \frac{m_j}{m_1+m_2} H(S_j).$$

Informácia získaná použitím atribútu  $A$  v uzle  $S$  je označovaná ako informačný zisk a počíta sa nasledovne:

$$I(A) = H(S) - H(S,A).$$

Stratégiou algoritmu ID3 je čo najrýchlejší pokles entropie na nulu a tak generovanie minimálneho rozhodovacieho stromu. Algoritmus ID3 je možné jednoducho rozšíriť aj na prípad, keď príklady budú klasifikované do viacerých tried a keď atribúty môžu nadobúdať viac ako dve hodnoty.

Pomerne známy je aj algoritmus ID5 (Inductive Dichotomizer 5 Recursive), ktorý predstavuje inkrementálnu modifikáciu algoritmu ID3. Využíva sa v prípadoch, keď nie všetky tréningové príklady sú k dispozícii naraz, ale stávajú sa známymi postupne (odoberanie z reálneho procesu v určitých časových okamihoch). Ide o riešenie učiacej úlohy typu on-line. Niekedy nie je možné čakať, až budú známe všetky tréningové príklady a teda je potrebné generovať rozhodovací strom na základe tých príkladov, ktoré už sú známe. Po príchode ďalších tréningových príkladov je možné už vygenerovaný rozhodovací strom aktualizovať. Pre túto úlohu je samozrejme možné použiť aj niektorý neinkrementálny algoritmus, napr. ID3.

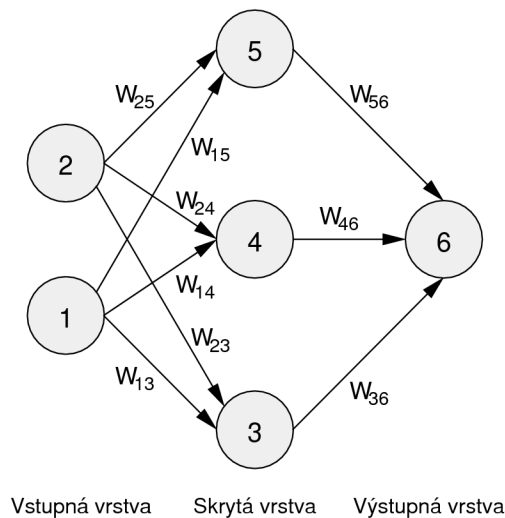
Ďalším zaujímavým algoritmom tejto skupiny je algoritmus C4.5. Ide vlastne o vylepšený a doplnený algoritmus ID3. Algoritmus C4.5 rozlišuje dva typy atribútov: nominálne a reálne. Používa pomenovanie diskretné (nominálne) a spojité (reálne) atribúty. Ak je potrebné používať iné typy atribútov, je potrebné ich vhodne pretransformovať na jeden z týchto atribútov. Je to neinkrementálny algoritmus, budujúci strom zhora nadol. Tento algoritmus vytvára perfektný rozhodovací strom za predpokladu neprotirečivosti tréningových príkladov, podobne ako algoritmus ID3. Existencia protirečivých príkladov môže signalizovať nedostatočné množstvo atribútov, a teda nie dost' precízny popis príkladov v údajovej časti.

Neurónové siete – sú založené na biologických systémoch (činnosť mozgu), ktoré detekujú vzory, dokážu predpovedať a učiť sa. Najväčšou výhodou neurónových sietí je, že umožňujú tvorbu veľmi presných prediktívnych modelov, ktoré môžu byť aplikované na veľké množstvo rôznych problémov. Tieto modely sú však veľmi ťažké na pochopenie. Neurónové siete sa využívajú aj pri klastrovaní, analýze anomálií a extrakcii vlastností.

Neurónová sieť (obrázok 4) začína vstupnou vrstvou v ktorej každý uzol predstavuje predikátovú (vstupnú) premennú. Uzly z tejto vrstvy sú spojené s uzlami zo skrytej vrstvy. Každý uzol zo vstupnej vrstvy je spojený s každým uzlom zo skrytej vrstvy. Uzly zo strednej vrstvy môžu byť spojené s uzlami z ďalšej strednej vrstvy alebo môžu byť spojené s výstupnou vrstvou. Výstupná vrstva sa skladá z jednej alebo viacerých výstupných premenných.



Okrem uzlov na vstupnej vrstve, každý uzol má niekoľko vstupov. Tieto vstupy sú vynásobené váhou prepojenia  $W_{xy}$  a následne sčítané. Na výslednú hodnotu sa aplikuje aktivačná funkcia pričom výsledná hodnota sa považuje za výstupnú hodnotu uzla. Táto sa pošle na vstup uzlom v ďalšej vrstve. Aktivačné funkcie sú definované pri tvorbe takejto siete. Problémom je stanovenie váh jednotlivých prepojení medzi uzlami. Sú stanovené tréningovými metódami, ktorých je niekoľko. Neurónová sieť je definovaná rozdelením uzlov na jednotlivé vrstvy, ich prepojením a zadaním alebo



Obr. 4 Príklad neurónovej siete

stanovením jednotlivých parametrov. Medzi parametre patria váhy prepojení a aktivačné funkcie. S rastúcim množstvom parametrov však zrozumiteľnosť a prehľadnosť siete klesá. Napriek tomu správne vytvorená neurónová sieť dá sa použiť pre tvorbu veľmi presných prediktívnych modelov, ktoré môžu byť aplikované na množstvo rôznych problémov. Neurónové siete taktiež dokážu detekovať vzory a majú schopnosť učiť sa a tým vylepšovať svoje vlastnosti. Indukcia pravidiel – je v oblasti dolovania dát najpoužívanejšou. Je založená na systematickom vyhľadávaní vzorov a určovaní ich sily a pravdepodobnosti ich výskytu v budúcnosti. Takto sa nájdu vzájomné súvislosti medzi údajmi. Systémy indukcie pravidiel sú vysoko automatizované a môžu byť využívané aj na predikciu.

Mechanizmus odvodzovania pravidiel nevynucuje rozdeľovanie na každej úrovni a vyhodnocuje súčasne aj nasledujúce údaje, je možné, že nájde iné a často lepšie vzory pre členenie. Nevýhodou je, že vygenerované pravidlá nemusia pokryť všetky možné hodnoty (situácie). Taktiež sa môže stať, že pravidlá budú v rozpore pri predikcii. Vtedy je potrebné zvoliť správne pravidlo. Výber pravidla pri takýchto konfliktoch je možné vykonať napríklad výberom pravidla s najväčšou významnosťou, pričom tieto významnosti sú stanovené pri tvorbe pravidiel [10].

#### Firmy zaoberajúce sa problematikou dolovania dát

SAS Institute – spoločnosť má vyše dvadsaťročné skúsenosti v oblasti vývoja softvéru na dodávanie informácií (Information Delivery). Firma ponúka ucelený rad nástrojov pre tvorbu a riadenie dátových skladov, analýzy, modelovanie a prezentáciu dát. Produkty podporujú prostredia AIX, HP-UX, Solaris, Windows 95/NT.

Enterprise Miner – umožňuje vytvárať prediktívne modely (k dispozícii sú regresie, neurónové siete, a rozhodovacie stromy), analýzu zhukov, asociáciu i sekvenciu, bez hlbokých teoretických znalostí. Je ľahko integrovateľný s dátovým skladom, ponúka flexibilné sady rôznych techník a grafické výstupy zamerané na obchodných používateľov. Skúsenosti SAS-u s realizáciou projektov na dolovanie dát sú zhrnuté do metodológie Data Mining Project Methodology.

Silicon Graphics – SGI Mineset – vyznačuje sa silnými vizualizačnými nástrojmi pre komplexné dátové sady. Ponúka pokročilú 4D vizualizáciu – 3D grafy môžu sa meniť podľa dvoch ďalších premenných dimenzií. Podporuje prácu v prostrediach Unix a Windows NT, podporu prístupu k dátam v databázach Oracle, Informix a Sybase a jednoduchú integrovateľnosť do prostredia intranetu. Zmeny zaznamenali i analytické metódy, kde môžeme nájsť napr. zhukovú analýzu, regresné a rozhodovacie stromy, rozhodovacie tabuľky alebo analýzy evidencie.

IBM – Intelligent Miner poskytuje rôzne techniky, ktoré sú integrované do jedného modelu. Ponúka najlepší klastering. Pracuje v prostredí AIX, MVS, OS/400, OS/2 a Windows NT/95 [13].

#### Niektoré aplikácie techník dolovania dát

Technika dolovania dát sa používa v niekoľkých oblastiach, napr:

- Marketing – ide najčastejšie o analýzu dát v databázach o zákazníkoch, napr. segmentácia trhu, t. j. identifikácia rôznych skupín zákazníkov (to umožňuje presnejšie zamerať určitú marketingovú kampaň, alebo vhodne nastaviť ponuku predajcov a pod.), alebo predpovedanie budúceho správania sa zákazníkov (napr. identifikácia zákazníkov, ktorí sú náchylní zmeniť svojho predajcu).
- Reklama a elektronický obchod – Niektoré firmy ponúkajú pre svojich zákazníkov služby na internete zadarmo. Zákazníci dostanú pre túto službu svoj osobný účet, cez ktorý realizujú prístup na internet. Účet umožňuje firme vytvoriť si veľmi presný profil používateľa na základe čoho potom prispôbuje reklamy, ktoré sa používateľovi zjavujú na obrazovke. Konkrétnym príkladom je AltaVista FreeAccess, ponúkajúci zákazníkovi prístup na internet zadarmo, ak sa registruje a zadá svoje osobné údaje. Každý jeho/jej prístup na internet je potom sledovaný. Pomocou techník objavovania znalostí je správanie sa zákazníkov na internete analyzované. Výstupy takejto analýzy sú na jednej strane zaujímavé pre firmy, ktoré chcú ponúkať svoje produkty cez AltaVista a môžu takto spoznať svojich potenciálnych zákazníkov a na druhej strane možno tieto znalosti využiť na to, aby sa zákazníkovi neprezentovali všetky reklamy, ale iba tie, ktoré pravdepodobne zodpovedajú zákazníkovej potrebám. Iným príkladom je denník New York Times, ktorý ponúka prístup cez internet (www) zadarmo. Opäť sa ale musí používateľ takejto služby registrovať a zadať osobné údaje ako e-mail, vek, pohlavie, príjem a poštové smerovacie číslo. Za pomoci týchto údajov a informácií o pohybe na www je možné robiť predpovede, nakoľko je pravdepodobné že dotýčaný si kúpi nejaký výrobok, alebo asociácie medzi tým, čo používatelia kupujú a aké články v denníku čítajú. Amazon.com využíva informácie o poštovom smerovacom čísle a emailovej adrese na vytváranie tzv. nákupných skupín (t. j. skupiny podobných zákazníkov ako napr. mesto Los Angeles, alebo Harvardská univerzita a pod.). Členom takejto skupiny

potom posielala ponuky typických produktov, ktoré sa v danej skupine často kupujú.

- Odhaľovanie podvodov – napr. pri bankových prevodoch, alebo operáciách s kreditnými kartami, ale aj pri telefonátoch v mobilných sieťach, je jednou z najvýznamnejších aplikácií objavovania znalostí. Len v Spojených štátoch napríklad ročne stoja „klonované podvody“ pri telefonátoch v mobilných sieťach tamajších operátorov a zákazníkov niekoľko sto miliónov dolárov! NYNEX napríklad vyvinul systém na rozpoznávanie podvodov pri mobilných telefonátoch. Tento systém si vytvára pre každého zákazníka profil jeho typického správania pri telefonovaní a pri významnej odchýlke od tohto správania generuje alarm. Tento systém využíva techniky objavovania znalostí ako sú generovanie pravidiel a neurónové siete.
- Astronómia – pomocou teleskopov sa získava obrovské množstvo najrôznejších dát, ktoré nie je možné manuálne spracovať. Napr. v rámci projektu Palomar Observatory Sky Survey sa získali 3 TB obrazových dát obsahujúcich približne 2 miliardy astronomicky relevantných objektov. Systém SKYCAT najskôr vykonáva segmentáciu obrazov a určí pre každý nájdený objekt 40 rôznych atribútov. Tieto objekty sa potom za pomoci rozhodovacieho stromu automaticky klasifikujú do skupín (napr. rôzne typy hviezd, resp. galaxií), čo je základom pre ďalšiu (manuálnu) astronomickú analýzu. Systém SKYCAT je na jednej strane omnoho rýchlejší ako manuálna.
- Environmentálne a dopravné inžinierstvo.
- Bioinformatika – oblasti návrhu liekov a funkčnej analýze genómu.
- Farmaceutický priemysel – rozhodovanie o tom, ktoré lieky sú najviac účinné, ktoré lieky majú najväčší obdoby a pod.
- WebMining – dolovanie údajov z internetu.
- Zdravotníctvo – určovanie diagnózy pacienta.
- Plánovanie – predpovedanie udalostí v časových radoch.
- Spracovanie vedeckých dát – napr. spracovanie údajov získaných v procese počítania častíc v laboratóriu zrýchlených častíc vo Švajčiarsku, spracovanie dát získaných počas pozorovania aktivity oceánu v Arktíde a pod.
- Spracovanie obrazových záznamov – niektoré záznamy obrazu zo zabezpečovacích systémov (kamier), ktoré sú uložené na videopáskach sú už staré. Avšak potreba archivácie týchto údajov v digitálnom formáte, vyžaduje obnovovanie niektorých porušených častí záznamu.

### Záver

Doba v ktorej žijeme (začiatok 21. storočia) sa často nazýva ako informačný vek. Veľké množstvo dát získaných z vedeckých projektov, satelitných snímkov, obchodných transakcií a pod., ukladajú sa do databáz. Sám človek nie je schopný bez pomoci výpočtovej techniky získať prehľad o každom zázname. Platí to aj o oblasti meracích metód v technike vysokých napätí ako aj o oblasti výskumu starnutia elektroizolačných systémov. Totiž aj v týchto odboroch aplikovaním výpočtovej techniky došlo (a stále dochádza) k obrovskej kumulácii záznamov z experimentov v databázach.

Testovanie rôznych izolačných materiálov metódou urýchleného starnutia pomocou výpočtovej techniky je spojené s kumuláciou dát, nakoľko sa jedná o dlhodobé metódy testovania. Na vysvetlenie fyzikálnych procesov, ktorých môže byť niekoľko, pôsobiacich v procese starnutia

elektroizolačného materiálu, je potrebná technika dolovania dát.

Kľúčovým krokom procesu objavovania znalostí v databázach, v ktorých sú zaznamenané dáta z experimentov, je dolovanie v dátach. To znamená, že na získanie platných vzorov aplikujú sa metódy umelej inteligencie. Výsledkom aplikácie algoritmov dolovania dát je množina vzorov, ktoré je potrebné analyzovať a z ktorých je nevyhnutné vybrať tie, ktoré reprezentujú skutočne nové a potenciálne užitočné znalosti vedúce k riešeniu cieľovej úlohy. Ich forma závisí na type zvolenej úlohy dolovania dát, ako aj na vybranom algoritme dolovania dát.

V procese objavovania znalostí a aplikovania algoritmov dolovania dát je veľmi dôležitá vzájomná spolupráca expertov, ktorí sa zaoberajú analýzou trendov starnutia izolačných systémov ako aj spolupráca expertov zaoberajúcich sa meracími metódami a experimentami v technike vysokých napätí a v diagnostike elektrických zariadení.

### Literatúra

- [1] An Overview of Data Mining Techniques. [online]. [cit. 13. 11. 2006]. Dostupné z: <<http://www.theartling.com/text/dmtechniques/dmtechniques.htm>>.
- [2] Chen, M. S., Han, J., Yu, P. S.: Data Mining: An Overview from a Database Perspective. In IEEE TRANSACTIONS ON KNOWLEDGE AND DATA ENGINEERING, Dec. 1996, Vol. 8, No. 6, pp. 866–883
- [3] Andrassyová, E.: Genetický algoritmus ako technika dolovania dát. Pisomná práca k dizertačnej skúške na FEI TU v Košiciach. Školiteľ: Doc. Ing. Július Csontó, CSc. Košice, Apríl 1999 35 strán In IEEE TRANSACTIONS ON KNOWLEDGE AND DATA ENGINEERING, Dec. 1996, Vol. 8, No. 6, pp. 866–883
- [4] Proces objavovania znalostí z databáz, popis jeho základných krokov. [online]. [cit. 18. 10. 2006]. Dostupné z: <<http://neuron.tuke.sk/~zvada/statnice/II/08/index.html>>.
- [5] Lehocký, M. Príspevok ZS – Techniky dolovania dát. [online]. c2004, [cit. 24. 10. 2006]. Dostupné z: <[http://www2.fiit.stuba.sk/~kapustik/ZS/Clanky0405/lehocky/dm\\_fir\\_st.html](http://www2.fiit.stuba.sk/~kapustik/ZS/Clanky0405/lehocky/dm_fir_st.html)>.
- [6] Hinka, M. Príspevok ZS – Objavovanie znalostí v databázach a dolovanie údajov. [online]. c2005, [cit. 09. 11. 2006]. Dostupné z: <<http://www.fiit.stuba.sk/~kapustik/ZS/Clanky0506/hinka/index.html>>
- [7] Balcak, T. Otázka II/09. [online]. c 2003, [cit. 10. 11. 2006]. Dostupné z: <<http://neuron.tuke.sk/~zvada/statnice/II/09/index.html>>
- [8] Mareták, J. Objavovanie znalostí v databázach – Ján Mareták. [online]. [cit. 09. 11. 2006]. Dostupné z: <<http://www.fiit.stuba.sk/~kapustik/ZS/Clanky0405/maretak/KDD.htm>>
- [9] Rossi, M.: Data Mining: Searching Knowledge in Data Warehouses. [online]. [cit. 09. 11. 2006]. Dostupné z: <<http://www.humandimension.com/foros/marcello.doc>>
- [10] Nagy, P. ZS príspevok: Vybrané techniky dolovania údajov – Peter Nagy. [online]. c2005, [cit. 25. 10. 2006]. Dostupné z: <<http://www.fiit.stuba.sk/~kapustik/ZS/Clanky0506/nagy/index.html>>.
- [11] Mlynarovič, V. Príspevok ZS – Indukcia rozhodovacích stromov. [online]. c2005, [cit. 26. 10. 2006]. Dostupné z: <<http://www2.fiit.stuba.sk/~kapustik/ZS/Clanky0506/mlynarovic/index.html>>.
- [12] Clark, P.: Machine Learning: Techniques and Recent Developments. [online]. c1990, [cit. 26. 10. 2006]. Dostupné z: <<http://www.cs.utexas.edu/users/pclark/papers/techniques.pdf>>.
- [13] Šurin, P., Štofaňák, S.: Objektové databázy. Datamining. [online]. c2000, [cit. 09. 11. 2006]. strana 20. Dostupné z: <<http://www.stofanak.sk/download/projekty/datamining.pdf>>

Tento článok bol vypracovaný na základe podpory APVV, číslo projektu APVV-20-006005 a VEGA 1/3142/06.

**Autori:** Bystrík Dolník, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Másiarska 74, 042 00 Košice, E-mail: Bystrik.Dolnik@tuke.sk

Jozef Rusnák

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

## Princípy dynamického modelovania veterných elektrární v programe EUROSTAG

**Abstrakt.** Článok prezentuje možnosti modelovania veterných elektrární v programe EUROSTAG. Na modelovom príklade opisuje spôsob modelovania prechodných dejov v elektrizačnej sústave s veternou elektrárnou s dvojito napájaným asynchrónnym generátorom.

**Abstract.** Paper presents possibilities of wind power plants modelling in software EUROSTAG. The possibility of transient phenomena modelling in electric power system with wind power plant with double fed induction generator is described in the model example in the paper. (**Principles of wind power plants dynamic modeling in software EUROSTAG**).

**Kľúčové slová:** modelovanie, EUROSTAG, elektrizačná sústava, veterná elektrárňa.

**Keywords:** modelling, EUROSTAG, electric power system, wind power plant.

### Úvod

Programový balík EUROSTAG umožňuje modelovať a vizualizovať správanie sa elektrizačnej sústavy od okamihu vzniku poruchy v sústave až do návratu sústavy do rovnovážneho stavu (využíva koncepciu, resp. model tzv. generalizovanej stability). Model generalizovanej stability pokrýva rozsah frekvencie od 0,001 Hz do 10 Hz. Siahá od rotorových prechodných javov po pomalé tepelné javy kotlov alebo centralizovaných riadiacich jednotiek [1].

Typické príklady využitia programu EUROSTAG sú: zisťovanie kritického času vypnutia poruchy; vyšetrovanie udržania sústavy v synchronizme, po vzniku rôznych typov porúch; plánovanie automatického odľahčovania záťaže; kontingenčná analýza pri neobvyklých prevádzkových podmienkach; skúmanie správania sa sústavy počas poruchy alebo v extrémnych podmienkach (napätový kolaps, strata synchronizmu, resynchronizácia a pod.); dynamická stabilita strojov, regulátorov, prenosového systému v okolí prevádzkového stavu sústavy; návrh a ladenie lokálnych riadiacich systémov (regulátorov rýchlosti, regulátorov napätia, regulátorov transformátorových odbočiek, ...); návrh, koordinácia a nastavenie systému chránenia elektrární a prenosových sietí; návrh centralizovaných systémov riadenia a centralizovaných systémov chránenia; možnosti štúdia rôznych technológií; analýza správania sa priemyselných systémov. [2]

### Modelovanie veterných elektrární

Program EUROSTAG umožňuje modelovať nasledovné typy veterných elektrární:

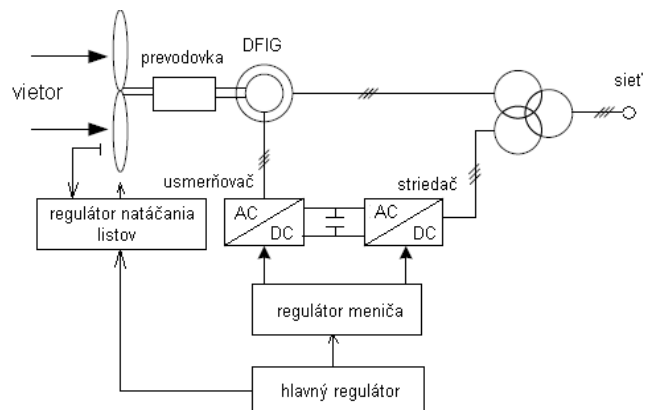
- Veterná elektrárňa s dvojito napájaným asynchrónnym generátorom (DFIG – Double Fed Induction Generator).
- Veterná elektrárňa s reguláciou natáčania lopatiek s asynchrónnym generátorom.
- Veterná elektrárňa bez možnosti natáčania lopatiek turbíny s asynchrónnym generátorom.
- Veterná elektrárňa s premenlivými otáčkami s viacpólovým synchronným generátorom.

### Model veternej elektrárne s dvojito napájaným asynchrónnym generátorom (DFIG – Double Fed Induction generator)

Obrázok 1 reprezentuje všeobecnú riadiacu schému veternej elektrárne s DFIG.

Model veternej elektrárne pozostáva z nasledovných častí:

- model DFIG a modely meničov,
- aerodynamický model vrtule,



- model riadenia veternej turbíny.

Obr. 1 – Všeobecná riadiaca schéma veternej elektrárne s DFIG

Model DFIG a modely meničov:

Dvojito napájaný asynchrónny generátor je asynchrónny generátor, ktorého rotorové vinutie je napájané z frekvenčného meniča, ktorý umožňuje regulovať rýchlosť rotora a jalový výkon dodávaný do siete. Otáčky rotora sa môžu pri tomto type generátora meniť až o 30 % voči synchronným otáčkam a prispôbovať sa tak charakteristike veternej turbíny, a tým zvýšiť produkovaný činný výkon dodávaný do siete (podľa [3] približne o 5 %).

Správanie sa stroja v prípade krátkodobého poklesu napätia alebo skratov závisí od konštrukcie. Najdokonalejšie implementácie používajú rýchle odpojenie v prípade veľkých napätových poklesov napätia.

Aerodynamický model vrtule:

Mechanický výkon získaný z vetra závisí od rýchlosti vetra podľa vzťahu:

$$(1) \quad P = \frac{1}{2} \cdot C_P(\lambda, \beta) \cdot \rho_V \cdot S_{rotor} \cdot v^3,$$

kde:  $\rho_V$  je hustota vetra [ $\text{kg/m}^3$ ],  $C_P$  je účinnosť turbíny,  $\lambda$  je činiteľ rýchlobežnosti (pomer obvodovej rýchlosti lopatiek ku

rýchlosti vetra točiacim rotor ( $\omega_{rotor} \cdot \frac{R_{lopatky}}{v_{vietor}}$ ),  $\beta$  je uhol

natočenia lopatiek turbíny [st.] a  $S_{rotor}$  je plocha pokrývajúca rotor [m<sup>2</sup>].

Koeficient udávajúci účinnosť turbíny (je funkciou činiteľa rýchlobežnosti a uhla natočenia lopatiek) závisí od aerodynamických zákonov a môže byť odlišný pre rôzne typy turbín.

Veterná turbína má určité optimálne pásmo, pri ktorom dosahuje najväčšiu účinnosť, preto je možnosť premenných otáčok rotora dôležitá pre dosiahnutie tejto optimálnej účinnosti. [4]

Model riadenia veternej turbíny:

Riadiace funkcie veternej turbíny plnia: hlavný regulátor, regulátor natáčania listov turbíny a regulátor meniča.

Hlavný regulátor riadi celkovo regulačné funkcie, pričom ďalšie dva regulátory sú podriadenými jednotkami. Cieľom je určiť optimálne hodnoty rýchlosti turbíny a uhla natočenia listov turbíny pre danú rýchlosť vetra za účelom maximalizovať produkovaný elektrický výkon.

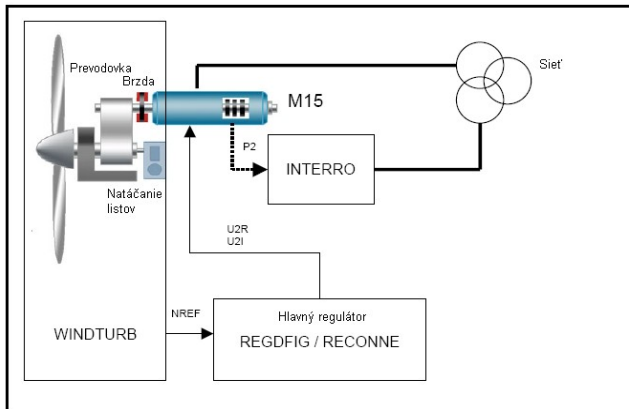
Rozlišujú sa dva hlavné prevádzkové stavy:

- Keď je rýchlosť vetra pod istou predpísanou hodnotou. Reguluje sa rýchlosť turbíny za cieľom maximalizovať dodávaný výkon.
- Keď je rýchlosť vetra nad určitou predpísanou hodnotou. Reguluje sa uhol natočenia listov obmedzujúc tak produkovaný výkon na menovitú hodnotu.

#### **Model veternej elektrárne s DFIG v programe EUROSTAG**

Štruktúra a prepojenia medzi makroblokmi dynamického modelu veternej elektrárne s DFIG v programe EUROSTAG je zobrazená na obrázku 2.





Obr. 2 – Prepojenia medzi makroblokmi modelu v programe EUROSTAG [2]

Model veternej elektrárne v programe EUROSTAG pozostáva z modelu DFIG (asynchrónny generátor s napájaním rotora cez krúžky, označovaný v programe „M15“), z modelu injektora prúdov a z tzv. makroblokov WINDTURB, RECONNE, REGDFIG a INTERRO.

- Makroblok WINDTURB modeluje veternú turbínu. Počíta mechanický moment (CM) a optimálnu referenčnú rýchlosť rotora (NREF) na základe užívateľom zadanej rýchlosti vetra a aktuálnej rýchlosti rotora (OMEGA).
- Makroblok REGDFIG reguluje napätia rotora ( $U_{2R}$  a  $U_{2I}$ ) a počíta činný výkon rotora ( $P_2$ ) na základe referenčnej rýchlosti rotora (NREF) a aktuálnej rýchlosti rotora.
- Makroblok INTERRO reguluje frekvenčný menič, ktorý je modelovaný injektorom prúdov. Vstupom do makrobloku je hodnota činného výkonu generovaná rotorom ( $P_2$ ) a výstupom je reálna a imaginárna zložka injektovaného prúdu do siete ( $I_R$  a  $I_I$ ).
- V prípade poklesu napätia spôsobenom napr. skratom je statorová ochrana schopná okamžite odpojiť stator od siete a v prípade vrátenia funkcií do normálu ho znovu pripojiť. Počas doby odpojenia statora sú funkcie modelu asynchrónneho generátora riadené makroblokem RECONNE.

#### Príklad použitia modelu

Príklad uvedený v tejto kapitole bol prevzatý z [2]. Jednopolová schéma zapojenia modelovaného príkladu je na obrázku 3. Okrem uvedených parametrov sú jednotlivé prvky sústavy definované aj ďalšími parametrami

potrebnými k modelovaniu prechodných javov v sústave. Uvedené sú v [2].

Priebehy vybraných veličín sú uvedené na obrázkoch 4a, 4b, 4c, 5a, 5b a 5c, 6, 7, 8.

WT\_STAT reprezentuje 10 veterných turbín s DFIG s celkovým výkonom 20 MVA a napätím 0,69 kV pripojených do uzla NST. WT\_GSC reprezentuje model injektora s výkonom 6 MVA. Zaťaženie NLOAD reprezentuje distribučnú sústavu a uvažuje aj so znižovacími transformátormi, stratami v napájacích vedeniach a s určitým podielom motorov v sústave.

Podľa kódexov prenosových sústav musia veternej elektrárne spĺňať isté požiadavky. Napr. nesmú byť odpojené od siete pri poklesoch napätia istých veľkostí a dĺžok trvania. V niektorých prípadoch je odpojenie veternej elektrárne počas poklesov napätia povolené, pričom musia byť znovu pripojené hneď ako dôjde k obnoveniu napätia. Program EUROSTAG umožňuje simulovať odpojenie a znovu pripojenie veternej elektrárne v prípade výskytu určitých stavov v sústave.

Aktivačný signál spôsobujúci odpojenie statora generátora od siete je generovaný, ak napätie na jeho svorkách klesne pod jednu z troch hraníc na dlhšie ako zadanú dobu, alebo keď hodnota výstupného prúdu je väčšia ako daná hranica. Program umožňuje odpojenie veternej elektrárne aj v prípade, ak jedna z premenných modelovaných makroblokov prekročí určitú hranicu počas zadanej doby.

Prednastavené hodnoty pre odpojenie statora od siete sú:

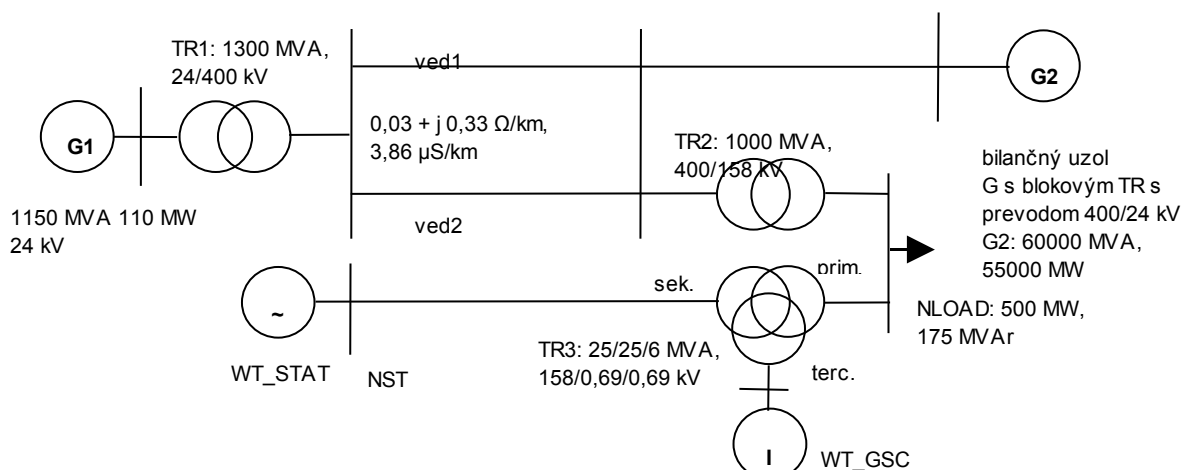
- svorkové napätie pod: 0,75 p.u. po dobu najmenej 0,08 s., 0,85 p.u. po dobu najmenej 0,4 s. a 0,9 p.u. po dobu najmenej 60 s,
- výstupný prúd nad: 2 p.u. po dobu najmenej 0,3 s.

Pripojenie statora k sieti nastane, ak pozorovaná premenná je väčšia ako zadaná hranica. Program umožňuje modelovať dva prípady:

- rýchle pripojenie podľa kritéria svorkového napätia,
- pomalé pripojenie podľa kritéria rýchlosti rotora.

V prvom prípade je monitorovanou premennou napätie statora a prednastavenou hranicou je 0,9 p.u. (napätie v uzle do ktorého je pripojený stator veternej elektrárne).

V druhom prípade je monitorovanou premennou rýchlosť rotora a k pripojeniu dôjde v prípade, ak je hodnota rýchlosti rotora v určitom definovanom intervale. Pomalé pripojenie privádza rotor do synchronných otáčok a oprávňuje pripojenie statora aj keď napätie v sieti nie je ešte obnovené. V modelovanom príklade sa uvažuje s pomalým pripojením veternej elektrárne do siete.

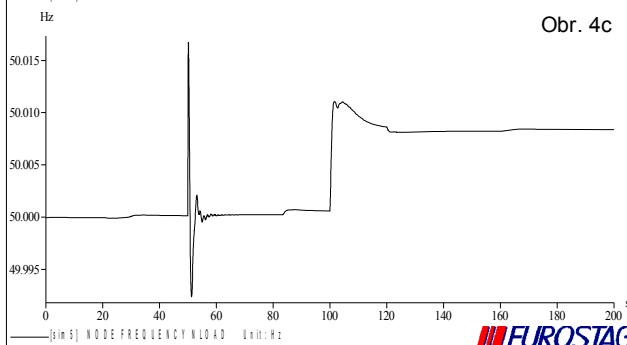
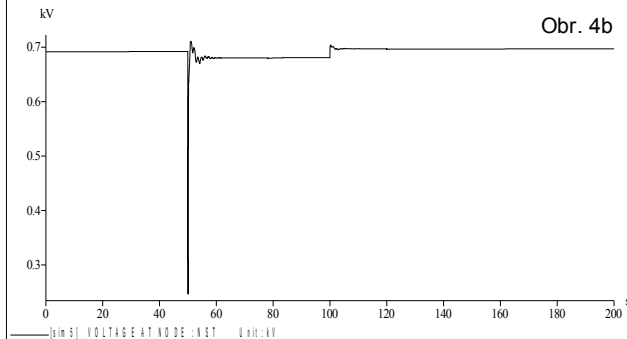
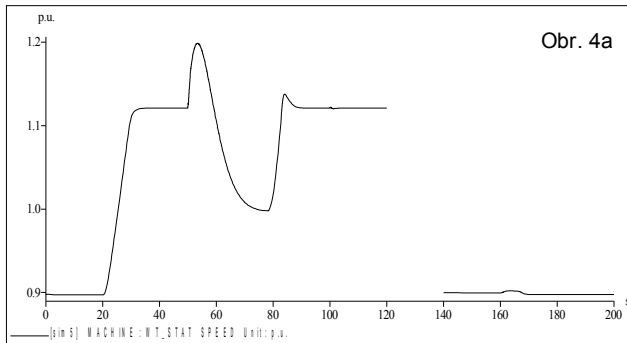




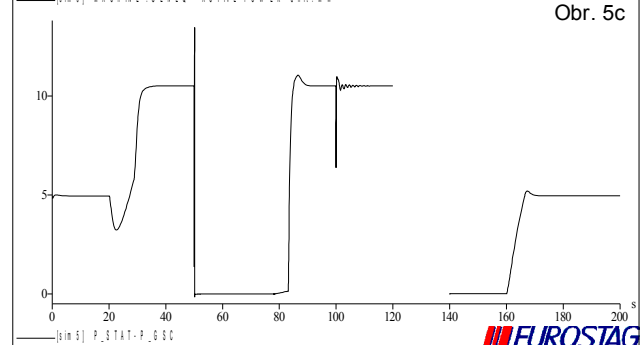
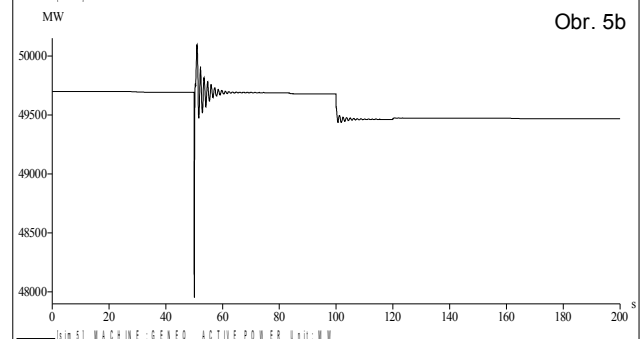
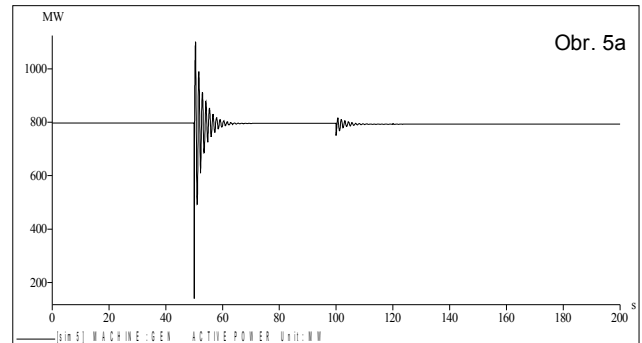
Obr. 3 – Jednopolová schéma modelovaného príkladu

Tabuľka 1. Modelované udalosti

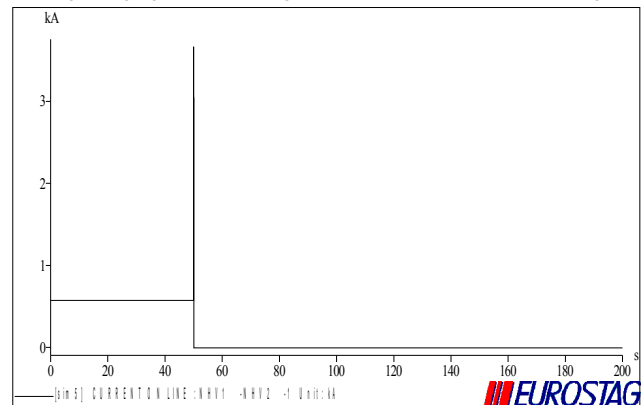
čas [s]	udalosť	čas [s]	udalosť
0	Začiatok simulácie.	120	Odstavenie veternej elektrárne.
20 – 30	Postupné zvýšenie rýchlosti vetra zo 7 m/s na 9 m/s.	140	Spustenie veternej elektrárne.
50	Skrat v polovičke vedenia „ved1“.	160	Umožnenie veternej elektrárni generovať výkon do siete.
100	Zníženie zaťaženia NLOAD o 50 %.	200	Zastavenie simulácie.



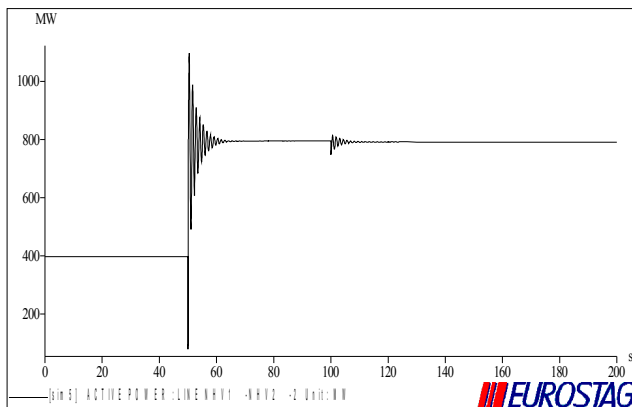
Obr. 4a – uhlová rýchlosť WT\_STAT, Obr. 4b – napätie v uzle NST, Obr. 4c – frekvencia v uzle NLOAD



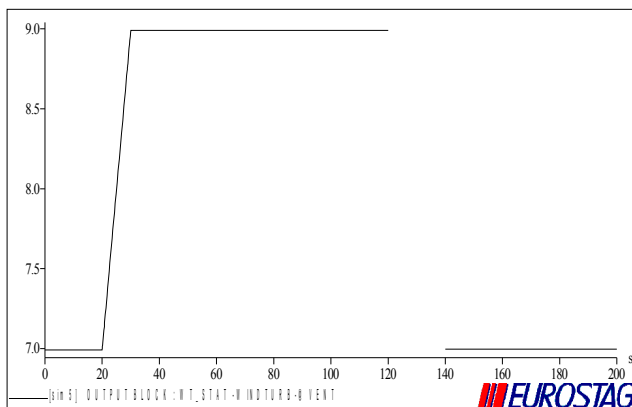
Obr. 5a – činný výkon G1, Obr. 5b – činný výkon G2, Obr. 5c – celkový činný výkon dodávaný veternou elektrárnou do sústavy



Obr. 6 – prúd na vedení „ved1“



Obr. 7 – činný výkon na vedení „ved2“



Obr. 8 – rýchlosť vetra

Po spustení simulácie nastanú v sústave nasledovné procesy:

- 20 s: zvýšenie rýchlosti vetra o 2 m/s,
- 30 s: dosiahnutie rýchlosti vetra 9 m/s,
- 50 s: vznik kovového skratu v strede vedenia „ved1“,
- 50 s: registrácia skratu dištančnými ochranami (automatiky A15) na vedení „ved1“,
- 50,08 s: registrácia poruchy statorovou ochranou generátora DFIG (napätie na svorkách statora kleslo pod určitú hranicu) (automatika A21)
- 50,1 s: pôsobenie dištančných ochrán a odpojenie vedenia (izolovanie poruchy),
- 50,18 s: pôsobenie automatiky statorovej ochrany generátora DFIG a odpojenie statorového vinutia od siete (izolovanie poruchy),
- 77,9893 s: registrácia naplnenia kritéria na znovupripojenie statora DFIG k sieti automatikou statorovej ochrany (A21) (rýchlosť rotora turbíny sa dostala do preddefinovaného intervalu),
- 78,0393 s: znovupripojenie statora DFIG k sieti,
- 100 s: zníženie zaťaženia NLOAD o 50 %,
- 120 s: odstavenie veternej elektrárne,
- 140 s: spustenie veterných turbín,
- 160 s: umožnenie veternej elektrárni generovať výkon do siete.

### Model veternej elektrárne s reguláciou natáčania lopatiek s asynchrónnym generátorom

Tento typ veternej elektrárne pozostáva z turbíny s konštantnou rýchlosťou spojenou cez prevodovku s asynchrónnym generátorom. Veterná turbína je modelovaná makroblokom IMPITCH, ktorý reprezentuje premenu energie vetra na mechanický moment. Makroblok počíta mechanický moment na základe užívateľom zadanej rýchlosti vetra a aktuálnej rýchlosti rotora, a tak ako WINDTURB v predchádzajúcom prípade umožňuje regulovať pozíciu natočenia lopatiek turbíny. Makroblok musí byť prepojený v programe s asynchrónnym generátorom.

### Model veternej elektrárne bez možnosti regulácie natáčania lopatiek turbíny s asynchrónnym generátorom

Jedná sa o obdobný model veternej turbíny ako je uvedený v predchádzajúcom prípade. Modelovaný je makroblokom IMSTALL. V tomto prípade už nie je umožnená regulácia natáčania lopatiek turbíny.

### Model veternej elektrárne s premenlivými otáčkami s viacpólovým synchronným generátorom

Tento model reprezentuje viacpólový synchronný generátor (multi-pole synchronous generator – MSPG) budovaný permanentnými magnetmi. MSPG je priamo poháňaný (bez prevodovky) a pripojený k sieti cez jednosmernú spojku. Generátor s permanentnými magnetmi prevádzkuje pri premenlivej rýchlosti od 10.5 do 24.5 rpm (ot./min.), v závislosti od rýchlosti vetra. V podmienkach vysokých rýchlostí vetra je energia získavaná z vetra obmedzovaná natáčaním rotorových lopatiek.

### Odkazy na literatúru

- [1] Mešter, M. – Chladný, V.: Analýza elektrizačnej sústavy pomocou programu Eurostag In: EE - Odborný časopis pre elektrotechniku a energetiku, roč. 11, mimoriadne číslo, október 2005. Bratislava: Spolok absolventov a priateľov FEI STU (EF SVŠT) v Bratislave, 2005, s. 92-94. ISSN 1335-2547
- [2] Tractebel and Electricité de France: Eurostag – Tutorial, October 2002.
- [3] Akhmatov, V.: Analysis of Dynamic behaviour of Electric Power System with Large Amount of Wind Power: PhD Thesis. Technical University of Denmark, April 2003. 270 s.
- [4] Máslo, K.: Modelování větrných elektráren pro výpočty dynamické stability. In: Zborník z odborného semináru Obnoviteľné zdroje a jejich začleňování do DS. Praha: EGU Praha Engineering, a.s., 2004.

*This work was supported by Scientific Grant Agency of the Ministry of Education of Slovak Republic and the Slovak Academy of Sciences under the project VEGA No. 1/3141/06 and by Research and Development Support Agency under the contract No. APVT-20-026902.*

**Autor:** Jozef Rusnák, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jozef.rusnak@tuke.sk

Marián Mešter, Marek Hvizdoš

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

## Výpočet skratových pomerov v distribučných sieťach s decentralizovanými zdrojmi energie

**Abstrakt.** Článok sa zaoberá výpočtom skratových pomerov v rozvodných sieťach s príspevkom od decentralizovaných zdrojov elektriny podľa normy IEC 60909. Metóda je na ilustráciu použitá pri skúmaní sústavy vysokého napätia s rôznymi decentralizovanými zdrojmi.

**Abstract.** Paper deals with the calculation of the fault level contribution of distributed generation according to IEC Standard 60909. To illustrate its application, the methodology is applied to study medium voltage network with a variety of distributed generation resources.. (Contribution for SES2006 Seminar – Calculation of the fault level contribution of distributed generation to distribution network).

**Kľúčové slová:** skratový prúd, IEC 60909, korekčný súčiniteľ, decentralizovaná výroba

**Keywords:** short-circuit current, IEC 60909, correction factor, distributed generation

### Úvod

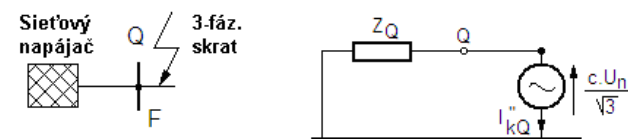
V distribučných sieťach je kvôli dimenzovaniu potrebné poznať maximálny poruchový prúd. Decentralizované zdroje elektriny sú pripájané prevažne do distribučnej siete  $nn$  alebo  $vn$ , a preto priamo prispievajú k celkovému poruchovému prúdu v tejto sieťi. Z tohto dôvodu základnou požiadavkou na povolenie pripojenia decentralizovaných zdrojov je zabezpečiť, aby výsledná hodnota poruchového prúdu bola vždy nižšia ako hodnota prúdu použitá pri dimenzovaní siete.

### Metodika normy IEC 60909

Medzinárodná norma IEC 60909 [1] určuje základné postupy pri výpočte poruchových prúdov v trojfázových striedavých sústavách s menovitou frekvenciou 50 Hz alebo 60 Hz. Výsledný skratový prúd je súčtom súmernej striedavej zložky a exponenciálne klesajúcej aperiodickej zložky. Norma rozlišuje medzi elektricky blízkymi a vzdialenými skratmi. Uvedená metodika obsahuje taktiež príspevok striedavých motorov.

Na skratové výpočty sa z numerických metód v súčasnosti využívajú dve metódy: metóda superpozície a metóda používajúca ekvivalentný napäťový zdroj v mieste skratu. Superpozičná metóda dáva skratový prúd len vo vzťahu k jednému predpokladanému stavu záťaže siete. Preto nemusí nutne viesť k maximálnemu skratovému prúdu v sieťi. Na prekonanie tohto problému bola vyvinutá metóda ekvivalentného napäťového zdroja [2].

Výpočtová metóda použitá v norme IEC 60909 určuje skratové prúdy v mieste poruchy (F) pomocou ekvivalentného napäťového zdroja:  $c \cdot U_n / \sqrt{3}$ . Tento zdroj je určený napätím ideálneho zdroja umiestneného v mieste skratu v súslednej sústave, pričom žiadne iné zdroje nie sú uvažované. Všetky prvky v sústave sú nahradené ekvivalentnou skratovou impedanciou (Obr. 1).



Obr. 1 Metóda ekvivalentného napäťového zdroja

Pri výpočte maximálneho skratového prúdu je napäťový súčiniteľ  $c$  rovný  $c_{\max}$  pre všetky napäťové hladiny (Tab. 1). Podľa Obr. 1, v prípade symetrického skratu, je začiatkový súmerný rázový skratový prúd určený:

$$(1) \quad I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_Q}$$

kde:  $Z_Q$  – veľkosť ekvivalentnej skratovej impedancie.

Tab. 1 Napäťový súčiniteľ  $c$

Menovité napätie $U_n$	Napäťový súčiniteľ $c$ pre výpočet	
	maximálnych skratových prúdov $c_{\max}$	minimálnych skratových prúdov $c_{\min}$
Nízke napätie 100 V až 1000 V (IEC 60038, Tab. I)	1,05 1,10	0,95
Vysoké napätie 1 kV až 35 kV (IEC 60038, Tab. III)	1,10	1,00
Veľmi vysoké napätie nad 35 kV (IEC 60038, Tab. IV)		

### Výpočet skratových pomerov

V distribučnej sieťi sú najvyššie skratové prúdy na prípojnicach elektrických staníc kvôli veľkému príspevku vonkajšej siete [3]. Ak je do siete pripojený decentralizovaný výrobný blok (bloky), výsledný poruchový prúd bude súčtom maximálnych prúdov:

- od vonkajšej siete,
- od rôznych typov generátorov,
- od veľkých motorov pripojených do rozvodnej siete.

### Príspevok nadradenej sústavy

Príspevok nadradenej sústavy je podľa IEC 60909:

$$(2) \quad I_k'' = \frac{c_{\max} U_n}{\sqrt{3} (Z_{Qt} + Z_{KT})} = \frac{c_{\max} U_n}{\sqrt{3} (Z_Q / t_r^2 + K_T Z_{TLV})}$$

kde:  $Z_Q$  – impedancia vonkajšej siete v mieste pripojenia Q,  $Z_T$  – impedancia transformátora,  $K_T$  – korekčný súčiniteľ pre transformátor.

Pre impedancie sieťového napájača a transformátora je možné písať:

$$(3) \quad Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}''}$$

$$(4) \quad Z_T = \frac{u_{kr} U_{rT}^2}{100 S_{rT}}$$

$$(5) \quad R_T = \frac{u_{Rr} U_{rT}^2}{100 S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2}$$

$$(6) \quad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

kde:  $I_{kQ}''$  – začiatkový súmerný rázový skratový prúd v bode pripojenia napájača Q,  $u_{kr}$  – menovité napätie nakrátko transformátora,  $u_{Rr}$  – činná zložka napätia nakrátko,  $P_{krT}$  – menovité straty nakrátko, typický je pomer  $R_Q / X_Q = 0,1$ .

Pre korekčný súčiniteľ transformátora platí:

$$(7) \quad K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T}$$

**Príspevok decentralizovaných výrobných jednotiek**

Z týchto typov zdrojov sú do distribučnej siete vysokého napätia najčastejšie pripájané veterné turbíny a malé vodné elektrárne. Decentralizované zdroje iného typu (napr. palivové články, fotovoltaické články, malé kogeneračné jednotky, mikroturbíny, atď.) sú väčšinou pripájané do siete nízkeho napätia.

Výpočet príspevku decentralizovaných zdrojov elektriny norma IEC 60909 nezahŕňa. Pojednáva len o indukčných motoroch a taktiež hodnoty parametrov synchronných generátorov podľa [4] sú použiteľné iba pre klasické jednotky veľkých výkonov [3].

Skratový prúd pre konvenčné synchronné generátory je daný:

$$(8) \quad I_k'' = \frac{c_{\max} U_n}{\sqrt{3}(Z_G + Z_T + Z_L + Z_R)}$$

kde: uvedené sú impedancie pre generátor (G), transformátor (T), vedenie (L), reaktor (R).

a) Impedancia pre generátor pripojený priamo do sústavy (spolu s korekčným súčiniteľom):

$$(9) \quad Z_G = R_G + jX_d''$$

$$(10) \quad K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}$$

kde:  $X_d''$  – rázová reaktancia synchronného stroja,  $R_G = 0,15 \cdot X_d''$ ,  $K_G$  – korekčný súčiniteľ pre generátor priamo pripojený do siete.

b) Synchronný generátor pripojený do siete cez blokový transformátor:

Tab. 2 Parametre elektrických zariadení v danej sieti

Sieťový napájač (Network Feeder)	$U_{nQ} = 110 \text{ kV}$ , $S_{kQ}'' = 2500 \text{ MVA}$ , $R_Q / X_Q = 0,1$
----------------------------------	---

$$(11) \quad Z_S = t_r^2 \cdot Z_G + Z_{THV}$$

$$(12) \quad K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG}(1 + p_G)} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \cdot (1 \pm p_T) \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}$$

kde:  $K_{SO}$  – korekčný súčiniteľ pre generátor pripojený do siete cez blokový transformátor.

c) Impedancia asynchronného generátora pripojeného priamo do siete:

$$(13) \quad Z_G = \frac{1}{I_{LR}/I_{rG}} \cdot \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}I_{rG}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rG}} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}$$

kde:  $R_G = 0,1 \cdot X_G$ , typický je pomer  $I_{LR} / I_{rG} = 8$ .

d) Pre generátor pripojený do siete cez výkonový elektronický menič:

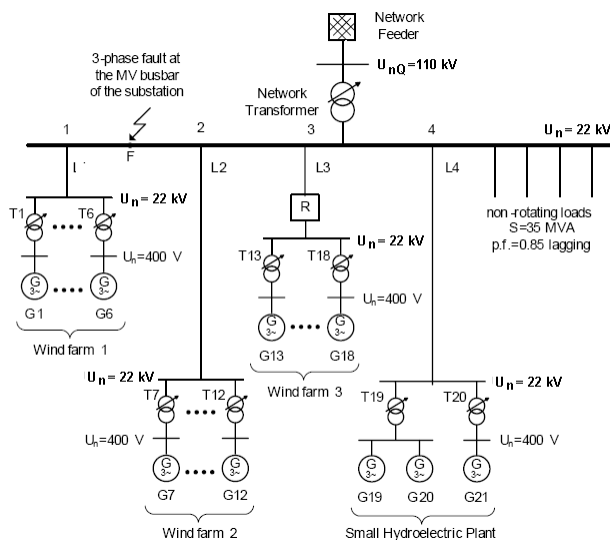
$$(14) \quad I_k'' = k \cdot I_{rG} = c \cdot t \quad (\text{pre čas } \Delta t)$$

kde:  $\Delta t$  – maximálne trvanie prispievania (kým nie je zdroj odpojený vlastnou ochranou).

Špeciálny typ generátora pre veterné turbíny je dvojmo napájaný indukčný generátor (DFIG). Pre tento prípad môžeme použiť pomer  $I_{LR} / I_{rG} = 8$  a pre impedanciu generátora budeme uvažovať  $R_G = 0,1 \cdot X_G$  [3].

**Prípadová štúdia**

Na ilustráciu výpočtu skratového prúdu zahŕňajúceho decentralizované zdroje energie je uvedený prípad na Obr. 2. Štyri decentralizované výrobné s celkovým výkonom cca 17 MW sú pripojené na rozvodňu vysokého napätia. Tri veterné farmy majú po šesť rovnakých veterných turbín a jedna malá vodná elektráreň má tri rovnaké turbíny. Parametre sú uvedené v Tab. 2.



Obr. 2 Distribučná sieť vysokého napätia



<b>Sieťový transformátor</b> (Network Transformer)	$S_{rT} = 63 \text{ MVA}$ , $u_{kr} = 17,5\%$ , $\Delta P_{kT} = 360 \text{ kW}$ , $t_r = 110/23 \text{ kV}$
<b>Veterná farma 1</b> (Wind Farm 1)	6 x 600 kW (G1-G6)
generátor	synchrónny s meničom: $P_{rG} = 600 \text{ kW}$ , $U_{rG} = 400 \text{ V}$ , $I_{rG} = 866 \text{ A}$
transformátor	T1-T6: $S_{rT} = 630 \text{ kVA}$ , $u_{kr} = 6\%$ , $u_{kRr} = 1,2\%$ , $t_r = 22/0,4 \text{ kV}$
vedenie L1	vonkajšie vedenie (22 kV): $l = 10 \text{ km}$ , $R_L = 0,215 \Omega / \text{km}$ , $X_L = 0,334 \Omega / \text{km}$ káblové vedenie: $l = 0,5 \text{ km}$ , $R_L = 0,162 \Omega / \text{km}$ , $X_L = 0,115 \Omega / \text{km}$
<b>Veterná farma 2</b> (Wind Farm 2)	6 x 600 kW (G7-G12)
generátor	DFIG: $P_{rG} = 660 \text{ kW}$ , $U_{rG} = 400 \text{ V}$ , $I_{rG} = 950 \text{ A}$
transformátor	T7-T12: $S_{rT} = 700 \text{ kVA}$ , $u_{kr} = 6\%$ , $u_{kRr} = 1,2\%$ , $t_r = 22/0,4 \text{ kV}$
vedenie L2	vonkajšie vedenie (22 kV): $l = 10 \text{ km}$ , $R_L = 0,215 \Omega / \text{km}$ , $X_L = 0,334 \Omega / \text{km}$ káblové vedenie: $l = 0,5 \text{ km}$ , $R_L = 0,162 \Omega / \text{km}$ , $X_L = 0,115 \Omega / \text{km}$
<b>Veterná farma 3</b> (Wind Farm 3)	6 x 850 kW (G13-G18)
generátor	asynchrónny: $P_{rG} = 850 \text{ kW}$ , $U_{rG} = 400 \text{ V}$ , $I_{rG} = 1225 \text{ A}$ , $I_{LR} = 5,5 \text{ kA}$
transformátor	T13-T18: $S_{rT} = 1000 \text{ kVA}$ , $u_{kr} = 6\%$ , $u_{kRr} = 1,1\%$ , $t_r = 22/0,4 \text{ kV}$
reaktor	$S_{rR} = 5 \text{ MVA}$ , $U_{rR} = 22 \text{ kV}$ , $u_{kr} = 14\%$
vedenie L3	vonkajšie vedenie (22 kV): $l = 10 \text{ km}$ , $R_L = 0,215 \Omega / \text{km}$ , $X_L = 0,334 \Omega / \text{km}$ káblové vedenie: $l = 1 \text{ km}$ , $R_L = 0,162 \Omega / \text{km}$ , $X_L = 0,115 \Omega / \text{km}$
<b>Malá vodná elektráreň</b> (Small Hydroel. Plant)	3 x 1500 kW (G19-G21)
generátor	synchrónny: $S_{rG} = 1650 \text{ kW}$ , $U_{rG} = 400 \text{ V}$ , $x_d'' = 0,18 \text{ p.u.}$ , $\cos\varphi = 0,9$
transformátor	T19: $S_{rT} = 4 \text{ MVA}$ , $u_{kr} = 6\%$ , $u_{kRr} = 1\%$ , $t_r = 22/0,4 \text{ kV}$ T20: $S_{rT} = 2,5 \text{ MVA}$ , $u_{kr} = 6\%$ , $u_{kRr} = 1\%$ , $t_r = 22/0,4 \text{ kV}$
vedenie L4	vonkajšie vedenie (22 kV): $l = 7,5 \text{ km}$ , $R_L = 0,215 \Omega / \text{km}$ , $X_L = 0,334 \Omega / \text{km}$

V Tab. 3 sú uvedené výsledky výpočtov skratových pomerov pre trojfázový skrat na prípojnici v rozvodni vn.

Tab. 3 Výpočet skratových pomerov

Sieťový napájač	$Z_Q = 5,3240 \Omega \Rightarrow$ $\Rightarrow \mathbf{Z}_{Qt} = \mathbf{Z}_Q / t^2 = 0,0232 + j0,2316 \Omega$
Sieťový transformátor	$\mathbf{Z}_T = 0,048 + j1,468 \Omega$ , $K_T = 0,9457 \Rightarrow \mathbf{Z}_{Tt} = 0,0454 + j1,3890 \Omega$
Príspevok z vonkajšej siete:	$I_{k3}'' = 8,6114 \text{ kA} \Rightarrow$ $\Rightarrow S_{k3}'' = 328,1384 \text{ MVA}$
<b>Veterná farma č.1</b>	
generátor	synchronný s meničom: $I_{ki}'' = 1,5 \cdot I_{rG} = 1,4250 \text{ kA}$
Príspevok veternej farmy č.1:	$I_{k3}'' = 6 \cdot (I_{ki}'' / t_r) = 0,1417 \text{ kA} \Rightarrow$ $\Rightarrow S_{k3}'' = 5,3998 \text{ MVA}$
<b>Veterná farma č.2</b>	
generátor	DFIG: $Z_Q = 0,0304 \Omega \Rightarrow \mathbf{Z}_{Qt} = 9,1464 + j91,4641 \Omega$
transformátor	$\mathbf{Z}_T = 8,2971 + j40,6475 \Omega$ , $K_T = 1,0094 \Rightarrow \mathbf{Z}_{Tt} = 8,3751 + j41,0295 \Omega$
vedenie L2	$\mathbf{Z}_L = \sum_i R_i l_i + \sum_i X_i l_i =$ $= \mathbf{Z}_{L2} = 2,2310 + j3,3975 \Omega$
Príspevok veternej farmy č.2:	$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} U_n}{\sqrt{3}(\mathbf{Z}_{Gt} / 6 + \mathbf{Z}_T / 6 + \mathbf{Z}_{L2})} =$ $= 0,5300 \text{ kA} \Rightarrow S_{k3}'' = 20,1943 \text{ MVA}$
<b>Veterná farma č.3</b>	
generátor	asynchronný: $Z_G = 0,0420 \Omega \Rightarrow \Rightarrow \mathbf{Z}_{Gt} = \mathbf{Z}_G \cdot t_r^2 = 1,2639 + j126,3900 \Omega$
transformátor	$\mathbf{Z}_T = 5,3240 + j28,5478 \Omega$ , $K_T = 1,0093 \Rightarrow \mathbf{Z}_T = 5,3734 + j28,8128 \Omega$
reaktor	$Z_R = X_R = 13,5520 \Omega$
vedenie L3	$Z_{L3} = 2,3120 + j3,4550 \Omega$
Príspevok veternej farmy č.3:	$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} U_n}{\sqrt{3}(\mathbf{Z}_{Gt} / 6 + \mathbf{Z}_T / 6 + \mathbf{Z}_R + \mathbf{Z}_{L2})} =$ $= 0,3193 \text{ kA} \Rightarrow S_{k3}'' = 12,1654 \text{ MVA}$
<b>Malá vodná elektrárň</b>	
generátor	synchronný: $R_G = R_G / X_d'' \cdot x_d'' (U_{rG}^2 / S_{rG}) = 0,0026 \Omega \Rightarrow \mathbf{Z}_G = 0,0026 + j0,0175 \Omega$
transformátor	$\mathbf{Z}_{T19(\text{HV})} = 1,2100 + j7,1585 \Omega$ , $\mathbf{Z}_{T20(\text{HV})} = 1,6000 + j9,4657 \Omega$ $K_{T19} = 1,0092, K_G = 1,0415, K_{SO} = 1,0415$
$Z_1 = Z_{G19} \parallel Z_{G20} + Z_{T19}$ $Z_2 = Z_{G21} + Z_{T20}$	$\mathbf{Z}_1 = \frac{K_G \mathbf{Z}_G}{2} \cdot t_r^2 + K_{T19} \mathbf{Z}_{T19} = 5,3453 + j34,7188 \Omega$ , $\mathbf{Z}_2 = K_{SO} (\mathbf{Z}_G \cdot t_r^2 + \mathbf{Z}_{T20}) = 9,9147 + j64,8475 \Omega$
vedenie L4	$Z_{L4} = 1,6125 + j2,5050 \Omega$
Príspevok malej vodnej elektrárne	$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} U_n}{\sqrt{3}(\mathbf{Z}_1 \parallel \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_4)} =$ $= 0,5404 \text{ kA} \Rightarrow S_{k3}'' = 20,5905 \text{ MVA}$

**Záver**

Pomocou výpočtov boli dosiahnuté nasledujúce výsledky:

- 6) Skratové pomery:
  - skratový výkon od nadradenej sústavy je 328,14 MVA,
  - skratový výkon od decentraliz. zdrojov je 52,95 MVA,
  - celkový skratový výkon: 381,09 MVA.
- 7) Veterná farma č.2 prispieva približne 4-krát vyšším skratovým prúdom ako farma č.1 kvôli rozdielnej technológii generátorov.
- 8) Reaktor na výstupe veternej farmy č.3 obmedzuje príspevok k celkovému skratovému prúdu. Ak by reaktor nebol prítomný, prúd by sa zvýšil o 45 % (0,4625 kA).
- 9) Veterná farma č.3 prispieva ku skratovému prúdu vďaka reaktoru menej ako farma č.2, aj keď má vyšší výkon
- 10) Skratové pomery u takejto distribučnej sústavy by nemali presiahnuť 350 MVA. Pripojenie väčšieho množstva decentralizovaných výrobní (v tomto prípade 17 MW) by však spôsobilo zvýšenie skratových prúdov nad prípustnú hodnotu.
- 11) Z hľadiska skratových pomerov distribučné siete nie sú pripravené na možnosť pripojenia veľkého množstva decentralizovaných výrobní.

**Literatúra**

- [1] STN EN 60909-0: Skratové prúdy v trojfázových striedavých sústavách: Výpočet prúdov. Slovenský ústav technickej normalizácie, 2003.
- [2] Mešter M.: Výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách. ABB Elektro, Bratislava, 2005. ISBN 80-89057-10-1
- [3] Boutsika, Th., Papathanassiou, S., Drossos, N.: Calculation of the fault level contribution of distributed generation according to IEC Standard 60909. CIGRE Symposium: Power Systems with Dispersed Generation, Athens, 2005.
- [4] CEI IEC TR 60909: Short-circuit currents in the three-phase a.c. systems – Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents. Slovenský ústav technickej normalizácie, 2003.

*Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja prostredníctvom finančnej podpory č. APVT-20-026902 a Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied prostredníctvom finančnej podpory VEGA č. 1/1061/04 a VEGA č. 1/3141/06.*

**Autori:** Marián Mešter, Marek Hvizdoš, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice,  
E-mail: marian.mester@tuke.sk, marek.hvizdos@tuke.sk

Martin Kanálik, Peter Szathmáry

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

## Simulácia kompenzácie jalového a deformačného výkonu v sieťach s odberom v napäťových hladinách 6 kV a 0,4 kV

**Abstrakt.** V poslednom období v oblasti elektroenergetiky ako aj v príbuzných oblastiach čoraz častejšie hovorí o problémoch v súvislosti s kvalitou napätia a s ním spojenou spoľahlivosťou elektrických zariadení. Jedným z najväčších problémov je výskyt vyšších harmonických v dieťach obsahujúcich kompenzačné jednotky jalového výkonu. Tento článok popisuje činnosť zariadení pri výskyte vyšších harmonických, pričom uvedené závery boli získané pomocou simulácií v prostredí Simulink programu MATLAB.

**Abstract.** Problems of voltage quality and reliability are becoming very important at last time. One of the problems is higher harmonics occurrence in electrical in circuits with compensating equipment and with higher harmonics occurrence described in this paper. Results are obtained from simulations performed by Simulink of MATLAB. (Contribution for SES2006 Seminar – Simulation of reactive and distortion power compensation in circuits with 6 kV and 0.4 kV voltage level consumption).

**Kľúčové slová:** Vyššie harmonické, kompenzácia účinníka, THD, impedančno-frekvenčná charakteristika.

**Keywords:** Higher harmonics, power factor compensation, THD, impedance-frequency characteristic.

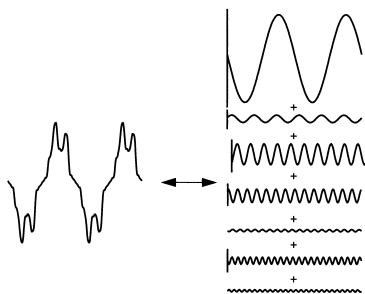
### Úvod

V dôsledku veľkého rozmachu používania výkonovej elektroniky v 70. rokoch 20. storočia a ďalších zariadení v elektrotechnickom priemysle, kladie sa čoraz väčší dôraz na úroveň kvality elektriny. Z tohto dôvodu sa hľadajú spôsoby ako čo najlepšie eliminovať alebo celkom odstrániť nežiaduce vplyvy v sieťach, kde dochádza k deformovaniu prúdových a napäťových priebehov. Jednou zo skupín, ktorá do veľkej miery ovplyvňuje úroveň kvality napätí, sú vyššie harmonické.

V obvodoch, v ktorých sa kompenzuje nevyhovujúca hodnota účinníka pripojením kondenzátora, môže dôjsť k neželanej rezonancii. Prevádzkové podmienky sa vplyvom výskytu vyšších harmonických v takomto prípade, môžu zhoršiť až niekoľko násobne. Nesprávnym nastavením kompenzácie je možné dôjsť až k deštrukcii inštalovaných zariadení a následne k ďalším problémom.

### Harmonické skreslenie

Harmonické skreslenie spôsobené nelineárnymi zariadeniami (ktorých odoberaný prúd nie je priamoúmerný napájaciemu napätiu) pripojenými do elektrizačnej sústavy. Na obrázku 1 je zobrazené rozloženie deformovanej vlny so zhodnými periódami na súčet čisto sinusových vln, ktorých frekvencie sú celočíselnými násobkami základnej frekvencie deformovanej vlny. Tieto celočíselné násobky sa nazývajú harmonické základnej frekvencie. Rozloženie deformovanej vlny na súčet sinusových vln je vykonávané pomocou Fourierovej analýzy. [1]



Obr.1. Rozklad deformovanej vlny na súčet sinusových vln

### Celkové harmonické skreslenie (THD)

Najviac používaným parametrom určujúcim zastúpenie vyšších harmonických v sieťach je koeficient celkového harmonického skreslenia – THD (Total Harmonic Distortion). Koeficient THD je pre meranú veličinu (napätie, prúd) určený nasledovným spôsobom: [1]

$$(1) \quad THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{\max}} M_h^2}}{M_1}$$

kde:  $M_h$  – efektívna hodnota  $h$ -tej harmonickej meranej veličiny,  $h$  – rád harmonickej.

### Činný, jalový a zdanlivý výkon

Zdanlivý výkon  $S$  je možné vyjadriť vzťahom (2) aj v prípade riešenia obvodu so sínusovými priebehmi napätí a prúdov ako aj pri riešení obvodu s nesínusovými priebehmi. Rozdiel v oboch prípadoch je ale vo vyjadrení efektívnych hodnôt napätí a prúdov: [1]

$$(2) \quad S = U_{ef} \times I_{ef}$$

Kde  $U_{ef}$  a  $I_{ef}$  sú efektívna hodnoty napätia a prúdu, pričom efektívne hodnoty prúdov a napätí deformovaných vln je možné získať z nasledovných vzťahov: [1]

$$(3) \quad U_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} U_h \right)^2}, \quad I_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} I_h \right)^2}$$

kde:  $U_h, I_h$  – amplitúda napätia a prúdu  $h$ -tej harmonickej.

Rovnica (4) popisuje vzťahy medzi zdanlivým výkonom  $S$ , činným výkonom  $P$ , jalovým výkonom  $Q$  a v prípade výskytu vyšších harmonických aj deformačným výkonom  $D$ .  $D$  reprezentuje všetky krížne násobky napätí a prúdov rozdielnych frekvencií. [2]

$$(4) \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$



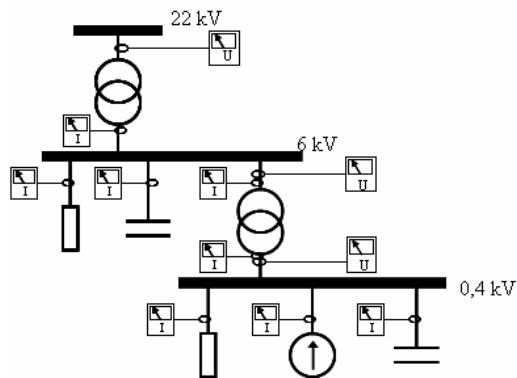
Keďže sa výskytom vyšších harmonických zmenili aj pomery v sieti je zmení sa pri výskyte vyšších harmonických aj hodnota skutočného účinníka podľa vzťahu: [2]

$$(5) \quad \lambda = PF = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$

Kde  $\lambda$  je skutočný účinník ( $PF$  – Power Factor).

### Návrh obvodu

Simulovaný obvod je trojfázovým modelom priemyselného podniku, ktorého zjednodušené zapojenie je zobrazené na obrázku 2. Tvorený je nadradenou 22 kV sieťou, transformátorom 22/6 kV, ktorý napája lineárnu záťaž a transformátor 6/0,4 kV. Na strane nízkeho napätia je zapojená lineárna záťaž a nelineárna záťaž, ktorá je zároveň zdrojom vyšších harmonických. Pri návrhu kompenzácie sa uvažovalo s dvomi miestami pripojenia kompenzačnej jednotky a to: do napäťovej hladiny 6 kV a 0,4 kV ako je zrejme z obrázka 2.



Obr.2. Zjednodušená schéma zapojenia simulovaného obvodu

Fakturačný bod merania bol určený na prípojnici 22 kV, úlohou preto bolo vykompenzovať celú sieť tak, aby boli v tomto bode splnené požiadavky dodávateľa elektriny konkrétne:  $\cos\varphi \geq 0,95$  a  $THD_U < 8\%$ . Pri návrhu kompenzácie bolo ale nutné brať do úvahy aj kvalitu elektriny vnútri podniku, preto boli na vstupy do všetkých zariadení umiestnené merania činného a jalového výkonu, účinníka ( $\cos\varphi$ ) a skutočného účinníka ( $PF$ ), časového priebehu prúdu, meranie  $THD_i$ , meranie efektívnej hodnoty celkového prúdu a meranie efektívnych hodnôt prúdov jednotlivých vyskytujúcich sa harmonických. Na prípojnicach 22 kV, 6 kV a 0,4 kV boli umiestnené merania efektívnej hodnoty napätia a  $THD_U$ .

### Parametre prvkov obvodu

Transformátor 22/6 kV s menovitým výkonom  $S_{T1} = 1$  MVA bol napájaný z nadradenej tvrdej siete so skratovým výkonom  $S_K = 70$  MVA. Transformátor 22/6 kV ďalej napájal lineárnu záťaž 6 kV s činným výkonom  $P = 200$  kW,  $\cos\varphi = 0,78$  a transformátor 6/0,4 kV s menovitým výkonom  $S_{T2} = 450$  kVA. Transformátor 6/0,4 kV napájal lineárnu záťaž 6 kV činným výkonom  $P = 50$  kW,  $\cos\varphi = 0,85$  a nelineárnu záťaž činným výkonom  $P = 140$  kW a  $\cos\varphi = 0,7$ , pričom táto nelineárna záťaž generovala vyššie harmonické uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1. Harmonické prúdy generované nelineárnou záťažou

Harm.	Amp. [%]	Harm.	Amp. [%]
5	5	17	3
7	3	19	2,1
11	3,2	23	2,5
13	2,8	25	2,5

### Spôsoby zapojenia kompenzácie

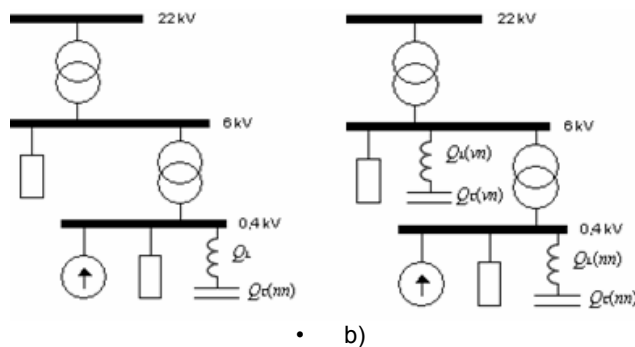
Prvým simulovaným stavom bolo zapojenie bez kompenzačnej jednotky, obrázok 2. V takomto prípade spotrebiče odoberajú zo siete veľké množstvo jalovej energie. Zhoršuje sa účinník v bode fakturačného merania (prípojnicia vn) a vzhľadom k tomu, že normou predpísaná hodnota  $\cos\varphi$  je minimálne 0,95, tak spotrebiteľ platí penále. Popri zhoršenom účinníku sa prejaví aj pokles napätia na prípojnici, čo spôsobí zníženie činného výkonu spotrebičov. Z pohľadu výskytu vyšších harmonických sa v sieti mierne zvýši oteplenie vodičov, čo udáva koeficient  $THD$ . Harmonické, ktoré generuje nelineárna záťaž, tečú najmä do nadradenej siete z dôvodu jej malej impedancie oproti lineárnej záťaži.

Nasledujúce simulácie boli vykonané s týmito spôsobmi kompenzácie, pričom zapojenie číslo 1 bolo zapojenie bez kompenzácie:

Zapojenie číslo 2: Zapojenie chránenej kompenzácie na prípojnicu , obrázok 3a, pričom výkon kondenzátora bol  $Q_C(nn) = 130$  kVAR a výkon tlmivky bol  $Q_L = 0,07Q_C(nn)$ .

Zapojenie číslo 3: Zapojenie chránenej kompenzácie na prípojnicu , obrázok 3a, pričom výkon kondenzátora bol  $Q_C(nn) = 230$  kVAR a výkon tlmivky bol  $Q_L = 0,07Q_C(nn)$

Zapojenie číslo 4: Zapojenie chránenej kompenzácie na prípojnicu , s výkonom kondenzátora  $Q_C(vn) = 100$  kVAR a výkonom tlmivky ( $vn$ ) =  $0,007Q_C(vn)$  a chránenej kompenzácie na prípojnicu  $nn$ , s výkonom kondenzátora  $Q_C(nn) = 130$  kVAR a výkonom tlmivky ( $nn$ ) =  $0,07Q_C(nn)$ , obrázok. 3b.



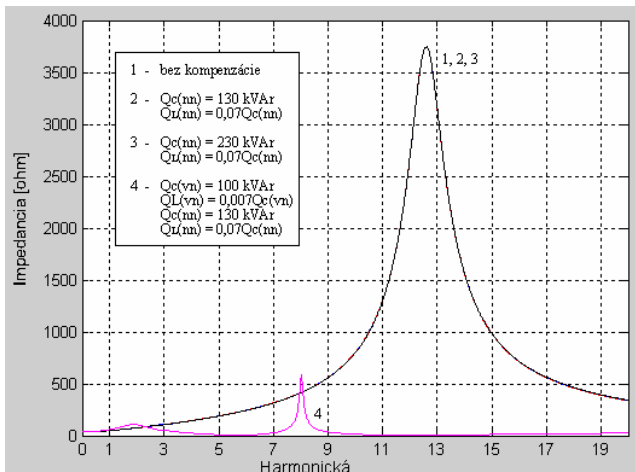
Obr.3. Spôsoby zapojenia kompenzačných jednotiek

### Namerané výsledky a ich analýza

Všetky namerané výsledky sú rozdelené podľa miesta, v ktorom sa uskutočnilo meranie. V prípade zapojenia bez kompenzácie je miest šesť, meranie za transformátorom 22/6 kV, meranie pri lineárnej záťaži 6 kV, meranie pred transformátorom 6/0,4 kV, meranie za transformátorom 6/0,4 kV, meranie pri lineárnej záťaži 0,4 kV a meranie pri nelineárnej záťaži. V prípade zapojenia chránenej kompenzácie na prípojnicu  $nn$  je miest merania sedem, pričom pribudlo meranie pri kompenzácii 0,4 kV. V prípade zapojenia kompenzačnej jednotky aj na prípojnicu  $vn$  a chránenej kompenzácie na prípojnicu  $nn$  je miest merania osem, pričom k meraniu pri kompenzácii 0,4 kV pribudlo meranie pri kompenzácii 6 kV.

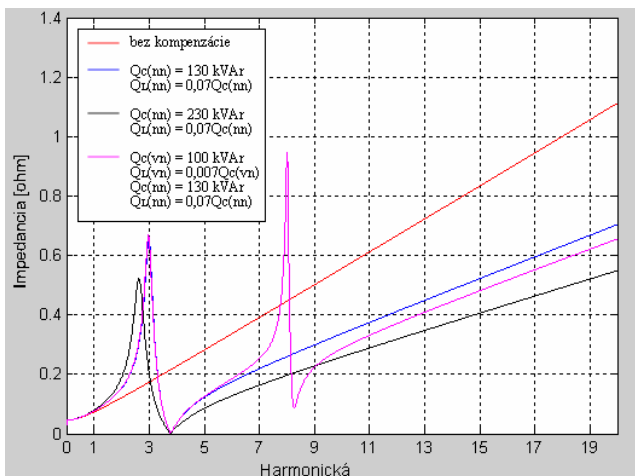
Obrázok 4 znázorňuje impedančno-frekvenčné charakteristiky z pohľadu prípojnice  $vn$ , so zapojením bez kompenzácie – zapojenie číslo 1, so zapojením číslo 2, so

zapojením číslo 3 a so zapojením číslo 4. Obrázok 5 znázorňuje impedančno-frekvenčné charakteristiky tých istých zapojení z pohľadu prípojnice *nn*.



Obr. 4. Impedančno-frekvenčné charakteristiky z pohľadu prípojnice *vn*

Z obrázka 4 je vidieť, že krivky 1, 2 a 3 majú takmer totožný priebeh. Tieto krivky charakterizujú zapojenia, pri ktorých sa na prípojnici *vn* nenachádza kompenzačné zariadenie. Ich spoločným ukazovateľom je paralelná rezonancia spôsobená kapacitou kábla 6 kV umiestneného medzi transformátorom 22/6 kV a prípojnicou *vn*, ktorá nastáva pri frekvencii  $f_r = 630$  Hz.



Obr. 5. Impedančno-frekvenčné charakteristiky z pohľadu prípojnice *nn*

V tabuľke 2 sú uvedené namerané hodnoty napätí simulovaných zapojení, označených číselne od 1 po 4, pričom  $U_{T1p}$  je efektívna hodnota fázového napätia na primárnej strane transformátora 22/6 kV v kilovoltoch,  $U_{T1s}$  je efektívna hodnota fázového napätia na sekundárnej strane transformátora 22/6 kV vo voltoch,  $U_{T2s}$  je efektívna hodnota fázového napätia na sekundárnej strane transformátora 6/0,4 kV vo voltoch,  $U_{T1s}(1.h)$  je efektívna hodnota napätia základnej harmonickej na sekundárnej strane transformátora 22/6 kV,  $U_{T2s}(1.h)$  je efektívna hodnota napätia základnej harmonickej na sekundárnej strane transformátora 6/0,4 kV,  $THD_{U_{T1p}}$  je koeficient Total Harmonic Distortion napätia na primárnej strane transformátora 22/6 kV v percentách,  $THD_{U_{T1s}}$  je koeficient Total Harmonic Distortion napätia na sekundárnej strane transformátora 22/6 kV v percentách a  $THD_{U_{T2s}}$  je koeficient

Total Harmonic Distortion napätia na sekundárnej strane transformátora 6/0,4 kV v percentách. Zaznamenané boli aj efektívne hodnoty napätia základnej harmonickej na primárnej strane transformátora 22/6 kV,  $U_{T1p}(1.h)$ , ktoré sa ani v jednom prípade významne nelíšili od napätia  $U_{T1p}$ , preto boli zanedbané a nie sú vo výsledkoch uvádzané.

Tabuľka 2. Namerané parametre napätia pri rôznych zapojeniach

	1	2	3	4
$U_{T1p}$ [kV]	12,63	12,65	12,67	12,67
$THD_{U_{T1p}}$ [%]	0,232	0,143	0,1749	0,0787
$U_{T1s}$ [V]	3347	3382	3411	3415
$U_{T1s}(1.h)$ [V]	3346	3382	3411	3415
$THD_{U_{T1s}}$ [%]	1,578	0,957	0,7292	0,5174
$U_{T6s}$ [V]	207,6	216,9	224,6	219
$U_{T2s}(1.h)$ [V]	207,1	216,7	224,5	218,8
$THD_{U_{T2s}}$ [%]	6,962	4,072	3,036	3,641

### Zapojenie číslo 1 – bez kompenzácie

Výsledná impedancia obvodu z pohľadu prípojnice *nn* sa skladá z prvkov s prevládajúcim induktívnym charakterom, závislosť impedancie od frekvencie je teda takmer lineárna, obrázok 5, zatiaľ čo závislosť výslednej impedancie z pohľadu prípojnice *vn* od frekvencie, je ovplyvnená kapacitou kábla 6 kV umiestneného medzi transformátorom 22/6 kV a prípojnicou *vn*. Vzniká paralelná rezonancia, ktorá nastáva pri frekvencii  $f_r = 630$  Hz.

Vplyvom zapojenia lineárnej záťaže s činným výkonom 200 kW a účinníkom 0,78 na prípojnicu *vn*, sa prejavil pokles napätia základnej harmonickej na prípojnici *vn* z nominálnej hodnoty na hodnotu 3346 V..

Napätie základnej harmonickej na sekundárnej strane transformátora 6/0,4 kV sa v dôsledku veľkého zaťaženia a zníženej hodnoty napätia na primárnej strane transformátora 6/0,4 kV, znížilo z nominálneho napätia na hodnotu 207,1 V. Vyššie harmonické svojim pôsobením zapríčinili deformáciu napätovovej vlny, čo vyjadruje aj koeficient  $THD_U$ , tabuľka 2. Normou dovoľená najvyššia prípustná hodnota je 8 %, najhoršia nameraná hodnota 6,962 % teda vyhovuje. Vplyv vyšších harmonických sa prejavil aj na efektívnej hodnote celkového deformovaného napätia na prípojnici *nn*, ktorá stúpila o 0,5 V vo všetkých fázach.

Tabuľka 3 obsahuje namerané hodnoty elektrických veličín na vstupoch jednotlivých zariadení, pričom  $T_s$  22/6 je meranie na sekundárnej strane transformátora 22/6 kV,  $LZ$  6 je meranie pri lineárnej záťaži 6 kV,  $T_p$  6/0,4 je meranie na primárnej strane transformátora 6/0,4 kV,  $T_s$  6/0,4 je meranie na sekundárnej strane transformátora 6/0,4 kV,  $LZ$  0,4 je meranie pri lineárnej záťaži 0,4 kV a  $NZ$  0,4 je meranie pri nelineárnej záťaži.

Súčasná norma neuvádza maximálnu dovolenú hranicu pre  $THD_i$ . Z nameraných hodnôt pri nelineárnej záťaži vyplýva, že táto je zdrojom vyšších harmonických. Hodnoty sú približne zhodné s nastavenými hodnotami. Koeficienty  $THD_i$  pri lineárnej záťaži a pri vývodoche z oboch transformátorov jednoznačne potvrdzujú, že vyššie harmonické tečú cestou menšej impedancie, čiže cez transformátory do nadradenej siete.

Pri lineárnej záťaži 6 kV a lineárnej záťaži 0,4 kV, bol zaznamenaný takmer čisto sínusový priebeh prúdu všetkých troch fáz. Najviac deformovaný je prúd nelineárnej záťaže, ktorého  $THD_i$  je 9,15 %. Mierne sa zvýšila celková efektívna hodnota oproti efektívnej hodnote 1. harmonickej prúdov tečúcich nelineárnou záťažou a transformátorom 6/0,4 kV, tabuľka 3.

Tabuľka 3. Namerané elektrické veličiny v jednotlivých vývodoch

	$T_s$ 22/6	$LZ$ 6	$T_p$	$T_s$	$LZ$ 0,4	$NZ$ 0,4

			6/0,4	6/0,4		
$P$ [kW]	104,6	62,21	42,4	39,57	13,41	26,16
$Q$ [kVAr]	89,07	49,91	39,16	34,99	8,31	26,68
$\cos\varphi$	0,7614	0,78	0,7346	0,749	0,85	0,7
$PF$	0,7614	0,78	0,7346	0,7492	0,85	0,7002
$THD_i$ [%]	2,473	0,179	6,129	6,198	0,9316	9,15
$I_c$ [A]	41,07	23,83	17,28	255,6	76,15	181,3
$I_{1h}$ [A]	41,07	23,83	17,25	255,1	76,15	180,5
$I_{5h}$ [A]	0,57	0,02	0,5	8,97	0,39	9,36
$I_{7h}$ [A]	0,34	0,014	0,36	5,37	0,24	5,61
$I_{11h}$ [A]	0,37	0,015	0,38	5,73	0,26	5,98
$I_{13h}$ [A]	0,33	0,013	0,34	5,01	0,23	5,24
$I_{17h}$ [A]	0,34	0,014	0,36	5,37	0,24	5,61
$I_{19h}$ [A]	0,24	0,01	0,25	3,75	0,17	3,23
$I_{23h}$ [A]	0,28	0,012	0,3	4,47	0,2	4,67
$I_{25h}$ [A]	0,28	0,012	0,3	4,47	0,2	4,67

Hodnoty činných a jalových výkonov odoberaných spotrebičmi boli namerané o jednotky kW menšie ako hodnoty v obvode nastavené, keďže hodnota napätia na prípojnici  $nn$  bola nižšia ako nominálna.

Celkový účinník ( $\cos\varphi$ ) základnej harmonickej na strane spotreby, teda na prípojnici  $vn$ , má hodnotu 0,7614. V tomto prípade sa výskyt vyšších harmonických na hodnote  $PF$  neprejavil, keďže je totožná s účinníkom. Namerané hodnoty účinníka pri lineárnych záťažach sú tiež totožné s vypočítanými a nastavenými hodnotami.

Hodnota  $\cos\varphi$  je však nevyhovujúca. Preto je potrebné kompenzovať nežiadúci odber jalového výkonu vhodným kompenzačným zariadením.

### Zapojenie číslo 2

Sledujme teda zmeny meraných veličín, ak pripojíme na prípojnicu  $nn$  chránenu kompenzáciu tvorenú kondenzátorom s výkonom  $Q_c(nn) = 130$  kVAr v sérii s tlmivkou s výkonom  $Q_L(nn) = 0,07Q_c(nn)$ .

$IF$  charakteristika z pohľadu prípojnice  $vn$  sa takmer nezmenila a jej priebeh je takmer totožný, ako v prípade zapojenia bez kompenzácie.  $IF$  charakteristika z pohľadu prípojnice  $nn$  poukazuje na sériovú rezonanciu, ktorá nastáva pri frekvencii  $f_r = 189$  Hz a tým je zabezpečené, že paralelná rezonancia nastáva v bezpečnej oblasti medzi 0 a 189 Hz.

Zapojením chránenej kompenzácie na prípojnicu  $nn$ , sa znížil jalový výkon odoberaný z nadradenej siete (22 kV), čo sa prejavilo zvýšením efektívnych hodnôt napätí vo všetkých troch bodoch merania, tabuľka 2. Znížená deformácia napätia vo všetkých troch bodoch merania, ktorú určuje zlepšenie všetkých koeficientov  $THD_u$ , sa prejavila aj na menších rozdieloch medzi efektívnymi hodnotami základnej harmonickej a celkovými efektívnymi hodnotami napätí, pričom rozdiel bol zaznamenaný iba na prípojnici  $nn$ , kde celková efektívna hodnota napätia vplyvom vyšších harmonických vzrástla o 0,2 V.

V tabuľke 4 sú uvedené namerané hodnoty elektrických veličín v jednotlivých bodoch merania, pričom pribudlo meranie pri kompenzácii 0,4 kV označené ako  $K 0,4$ . Hodnota účinníka na sekundárnej strane transformátora 6/0,4 kV poukazuje na vykompenzovanie jalového výkonu odoberaného záťažou na prípojnici  $nn$ .

V dôsledku zlepšenia napätových pomerov sa zvýšili aj hodnoty činných a jalových výkonov odoberaných spotrebičmi. Keďže sa z pohľadu prípojnice  $nn$  znížila impedancia pre vyskytujúce sa vyššie harmonické, obrázok 5, zmenšila sa úbytková napätí týchto harmonických, teda sa zmeš aj celková deformácia napätia na prípojnici  $nn$ . To spôsobí aj menšie deformácie prúdov tečúcich jednotlivými zariadeniami, na čo poukazujú aj nižšie hodnoty koeficientov  $THD_i$ , ako aj nižšie hodnoty prúdov vyšších harmonických tečúcich jednotlivými zariadeniami. Prejavil

sa však vplyv zvýšenej impedancie 11. harmonickej z pohľadu prípojnice  $vn$ , obrázok 4, čo je vidieť na zvýšených hodnotach prúdov 11. harmonickej v každom mieste merania.

Tabuľka 4. Namerané elektrické veličiny v jednotlivých vývodoch

	Ts 22/6	LZ 6	Tp 6/0,4	Ts 6/0,4	LZ 0,4	NZ 0,4	K 0,4
$P$ [kW]	108,7	63,53	45,17	43,32	14,68	28,65	0
$Q$ [kVAr]	56,74	50,17	5,77	2,834	9,095	29,22	-35,48
$\cos\varphi$	0,886	0,78	0,992	0,998	0,85	0,7	0
$PF$	0,886	0,78	0,992	0,998	0,85	0,700	0
$THD_i$ [%]	1,547	0,097	4,34	4,359	0,495	9,049	5,038
$I_c$ [A]	36,27	24,09	13,48	200,6	79,67	189,7	164
$I_{1h}$ [A]	36,26	24,09	13,47	200,4	79,67	188,9	163,7
$I_{5h}$ [A]	0,24	0,009	0,25	3,79	0,16	9,77	5,84
$I_{7h}$ [A]	0,19	0,008	0,2	2,94	0,13	5,81	2,74
$I_{11h}$ [A]	0,22	0,009	0,23	3,45	0,16	6,17	2,57
$I_{13h}$ [A]	0,2	0,008	0,21	3,01	0,14	5,39	2,2
$I_{17h}$ [A]	0,21	0,009	0,22	3,32	0,15	5,77	2,3
$I_{19h}$ [A]	0,15	0,006	0,16	2,33	0,11	4,04	1,6
$I_{23h}$ [A]	0,18	0,008	0,18	2,79	0,13	4,81	1,89
$I_{25h}$ [A]	0,18	0,008	0,18	2,79	0,13	4,81	1,89

Celkový účinník ( $\cos\varphi$ ) základnej harmonickej na strane spotreby, teda na prípojnici  $vn$ , má hodnotu 0,886, čo je síce zlepšenie, ale hodnota je stále nevyhovujúca. Ani v tomto prípade sa výskyt vyšších harmonických na hodnote  $PF$  neprejavil, keďže je totožná s účinníkom. Namerané hodnoty účinníka pri lineárnych záťažach sú tiež totožné s vypočítanými a nastavenými hodnotami.

Keďže hodnota  $\cos\varphi$  na prípojnici  $nn$  je vyhovujúca, ale hodnota  $\cos\varphi$  v bode fakturačného merania (prípojnicu  $vn$ ) vyhovujúca nie je, je preto potrebné vykompenzovať aj nežiadúci odber jalového výkonu lineárnej záťaže inštalovanej na prípojnici  $vn$ .

### Zapojenie číslo 3

Jednou z možností, ako vykompenzovať jalový výkon odoberaný z nadradenej siete lineárnou záťažou inštalovanou na prípojnici  $vn$ , je zvýšenie výkonu kompenzačného zariadenia inštalovaného na prípojnici  $nn$ .

Veľkosť jalového výkonu lineárnej záťaže 6 kV je  $Q_L = 160,456$  kVAr. Výkon kondenzátora z predchádzajúceho prípadu bol zvýšený o 100 kVAr, teda na hodnotu  $Q_c(nn) = 230$  kVAr, pričom sa zachoval pomer výkonu medzi tlmivkou a kondenzátorom, teda  $Q_L = 0,07Q_c(nn)$ .

$IF$  charakteristika z pohľadu prípojnice  $vn$  sa opäť takmer nezmenila a jej priebeh je takmer totožný, ako v prípade zapojenia bez kompenzácie.  $IF$  charakteristika z pohľadu prípojnice  $nn$ , má podobný priebeh ako pri zapojení chránenej kompenzácie na prípojnicu  $nn$  s parametrami  $Q_c(nn) = 130$  kVAr a  $Q_L = 0,07Q_c(nn)$ .

Zvýšením výkonu kompenzačnej jednotky sa výrazne znížil jalový výkon odoberaný z nadradenej siete (22 kV), čo sa prejavilo zvýšením efektívnych hodnôt napätí vo všetkých troch bodoch merania, tabuľka 2, ako aj zvýšením hodnoty účinníka v bode fakturačného merania na prijateľnú hodnotu 0,968, tabuľka 5. Znížená deformácia napätia vo všetkých troch bodoch merania, ktorú určuje zlepšenie všetkých koeficientov  $THD_u$ , sa na rozdieloch medzi efektívnymi hodnotami základnej harmonickej a celkovými efektívnymi hodnotami napätí, prejavila iba na napätí na prípojnici  $nn$ , kde celková efektívna hodnota napätia vplyvom vyšších harmonických vzrástla o zanedbateľných 0,1 V.

V tabuľke 5 sú uvedené namerané hodnoty elektrických veličín v jednotlivých bodoch merania. Zvýšenie



napäťových pomerov sa opäť prejavilo na zvýšení činných a jalových výkonov odoberaných spotrebičmi.

Tabuľka 5. Namerané elektrické veličiny v jednotlivých vývodoch

	Ts 22/6	LZ 6	Tp 6/0,4	Ts 6/0,4	LZ 0,4	NZ 0,4	K 0,4
$P$ [kW]	113,6	64,62	48,99	46,51	15,75	30,76	0
$Q$ [kVAR]	29,36	51,84	-22,49	-26,26	9,763	31,37	-67,39
$\cos\varphi$	0,968	0,78	0,909	0,871	0,85	0,7	0
PF	0,968	0,78	0,909	0,878	0,85	0,700	0
$THD_i$ [%]	1,226	0,114	2,78	2,78	0,353	8,821	3,55
$I_c$ [A]	34,41	24,29	15,81	238	82,55	196,5	300,4
$I_{1h}$ [A]	34,41	24,29	15,8	237,9	82,55	195,7	300,2
$I_{5h}$ [A]	0,17	0,007	0,17	2,62	0,11	9,86	7,14
$I_{7h}$ [A]	0,14	0,006	0,15	2,19	0,01	5,87	3,59
$I_{11h}$ [A]	0,17	0,007	0,18	2,64	0,12	6,23	3,47
$I_{13h}$ [A]	0,16	0,007	0,16	2,35	0,11	5,45	2,99
$I_{17h}$ [A]	0,16	0,007	0,17	2,57	0,12	5,83	3,14
$I_{19h}$ [A]	0,12	0,005	0,12	1,81	0,08	4,08	2,19
$I_{23h}$ [A]	0,14	0,007	0,14	2,16	0,1	4,85	2,6
$I_{25h}$ [A]	0,14	0,007	0,14	2,17	0,1	4,85	2,59

Keďže sa priebeh  $IF$  charakteristiky oproti predchádzajúcemu prípadu výrazne nezmenil, neprejavili sa ani výraznejšie zmeny nameraných hodnôt vyšších harmonických v jednotlivých vetvách. V porovnaní s predchádzajúcim prípadom sa však znížili koeficienty  $THD_i$ , ako aj efektívne hodnoty prúdov vyšších harmonických v jednotlivých vetvách.

Zvýšením výkonu kompenzačnej jednotky na prípojnici  $nn$ , potrebného pre vykompenzovanie jalového výkonu odoberaného lineárnou záťažou 6 kV, sa prejavilo tokom jalového výkonu od kompenzačnej jednotky na strane  $nn$ , cez transformátor 6/0,4 kV do lineárnej záťaže 6 kV, čomu nasvedčujú záporné hodnoty jalového výkonu namerané na primárnej a sekundárnej strane transformátora 6/0,4 kV. Týmto spôsobom sa však zvyšuje zdanlivý výkon zariadení, ktorými tento jalový výkon preteká. To môže spôsobiť napríklad preťaženie kábla 0,4 kV, medzi transformátorom 6/0,4 kV a prípojnou  $nn$  a následne zhoršenie jeho prevádzkových parametrov.

#### Zapojenie číslo 4

Druhou možnosťou, ako vykompenzovať jalový výkon odoberaný z nadradenej siete lineárnou záťažou inštalovanou na prípojnici  $vn$  je inštalovanie kompenzačného zariadenia do miesta spotreby tohto jalového výkonu, teda na prípojnici  $vn$ .

Keďže pri zapojeniach bez kompenzačného zariadenia na prípojnici  $vn$ ,  $IF$  charakteristika z pohľadu prípojnice  $vn$ , obrázok 4, poukazuje na paralelnú rezonanciu spôsobenú kapacitou kábla 6 kV, ktorá nastáva pri frekvencii 630 Hz, čo je blízko frekvencii 13. harmonickej, je potrebné navrhnúť vhodnú chránenú kompenzáciu na eliminovanie jej nepriaznivých účinkov.

Riešením môže byť napríklad zapojenie chránenej kompenzácie, pri ktorej bude výkon tlmičky 0,7 % výkonu kondenzátora. Pri zapojení kondenzátora s výkonom  $Q_c(vn) = 130$  kVAR a tlmičky s výkonom  $Q_t(vn) = 0,007Q_c(vn)$  do série, bola dosiahnutá sériová rezonancia pri frekvencii  $f_r = 597,6$  Hz,

Z  $IF$  charakteristiky z pohľadu prípojnice  $vn$ , obrázok 5, vidieť, že paralelná rezonancia sa posunula doľava, do oblasti 8. harmonickej, čo spôsobilo výrazne zníženie impedancie pre jednotlivé vyskytujúce sa vyššie harmonické. Z pohľadu prípojnice  $nn$ , sa v  $IF$  charakteristike sa toto zapojenie prejavilo paralelnou aj sériovou rezonanciou v oblasti 8. harmonickej, obrázok 5, čo

môžeme považovať za vyhovujúce, keďže sa 8. harmonická v sieti nevyskytuje.

Z tabuľky 2 vidieť zlepšenie efektívnej hodnoty základnej harmonickej napätia na prípojnici 6 kV, ktorá sa nelíši od efektívnej hodnoty celkového napätia, pričom hodnota napätia základnej harmonickej na prípojnici 0,4 kV poklesla na hodnotu 218,8 V. Vplyv vyšších harmonických sa na prípojnici  $nn$  prejavil zvýšením efektívnej hodnoty celkového napätia o zanedbateľných 0,2 V. Oproti predchádzajúcemu prípadu sa zlepšila hodnota koeficientu  $THD_u$  na prípojnici  $vn$ , zatiaľ čo na prípojnici  $nn$  sa mierne zhoršil.

Tabuľka 6. Namerané elektrické veličiny v jednotlivých vývodoch

	Ts 22/6	LZ 6	K 6	Tp 6/0,4	Ts 6/0,4	LZ 0,4	NZ 0,4	K 0,4
$P$ [kW]	110,9	64,79	0	46,07	44,19	14,97	29,22	0
$Q$ [kVAR]	25,71	51,98	-32,2	5,89	2,891	9,276	29,8	-36,2
$\cos\varphi$	0,974	0,78	0	0,9919	0,9979	0,85	0,7	0
PF	0,974	0,78	0	0,9919	0,9979	0,85	0,700	0
$THD_i$ [%]	1,857	0,106	6,482	4,468	4,486	0,466	8,976	4,993
$I_c$ [A]	33,33	24,32	9,44	13,61	202,6	80,46	191,5	165,6
$I_{1h}$ [A]	33,32	24,32	9,42	13,6	202,4	80,46	190,8	165,4
$I_{5h}$ [A]	0,32	0,01	0,01	0,24	3,57	0,17	9,76	6,04
$I_{7h}$ [A]	0,51	0,02	0,38	0,15	2,24	0,16	5,75	3,36
$I_{11h}$ [A]	0,04	0,002	0,3	0,26	3,95	0,13	6,21	2,13
$I_{13h}$ [A]	0,02	0,001	0,21	0,23	3,4	0,12	5,42	1,91
$I_{17h}$ [A]	0,06	0,002	0,18	0,24	3,61	0,13	5,8	2,06
$I_{19h}$ [A]	0,05	0,002	0,12	0,17	2,52	0,01	4,06	1,44
$I_{23h}$ [A]	0,06	0,003	0,13	0,2	3,01	0,11	4,83	1,71
$I_{25h}$ [A]	0,07	0,003	0,13	0,2	3,0	0,12	4,83	1,71

V tabuľke 6 sú uvedené namerané hodnoty elektrických veličín v jednotlivých bodoch merania, pričom pribudlo meranie pri kompenzácii 6 kV označené ako K 6.

Zníženie napätia na prípojnici  $nn$  sa prejavilo zníženými hodnotami činných a jalových výkonov transformátora 6/0,4 kV, nelineárnej záťaže a lineárnej záťaže 0,4 kV. Zvýšenie napätia na prípojnici  $vn$  sa prejavilo na zvýšení činného a jalového výkonu lineárnej záťaže 6 kV len zanedbateľne. Hoci sa v dôsledku zvýšenej impedancie 7. harmonickej z pohľadu prípojnice  $nn$ , obrázok 5, zvýšila efektívna hodnota 7. harmonickej prúdu tečúceho transformátorom 22/6 kV, zlepšili sa efektívne hodnoty prúdov od 11. harmonickej vyššie. Hodnoty koeficientov  $THD_i$  sa vplyvom zvýšenej impedancie 7. harmonickej zhoršili vo všetkých vetvách okrem lineárnej záťaže 6 kV. Celková deformácia vyššími harmonickými sa však neprejavila na rozdiely medzi hodnotou  $\cos\varphi$  a PF. Výsledná hodnota účinníka v bode fakturačného merania sa zvýšila na hodnotu 0,974 a zároveň sa odstránilo riziko preťaženia zariadení inštalovaných v trase prenosu jalového výkonu z kompenzačného zariadenia na strane  $nn$  do lineárnej záťaže na strane  $vn$ , čo zvyšuje zdanlivý výkon daných zariadení, ako to bolo v predchádzajúcom prípade.

#### Záver

Na základe dosiahnutých výsledkov v testoch je možné konštatovať, že najlepším riešením je použitie chránenej kompenzačnej jednotky, ktorá zlepšuje prevádzkové podmienky v sieti s vyskytujúcimi sa vyššími harmonickými. Účinok vyšších harmonických môže pri nesprávne zvolenej kondenzátorovej batérii spôsobiť nadmerné preťaženie zariadenia a tým skrátenie jeho životnosti. V praxi je preto potrebné poznať charakteristiky obvodov a inštalovaných elektrických zariadení. Meraním a simuláciou zistené skutočnosti je nutné aplikovať pri návrhu správneho kompenzačného zariadenia, čím je možné dosiahnuť



požadovanú kvalitu elektrickej energie a zároveň zvýšiť spoľahlivosť inštalovaných elektrických zariadení.

#### Literatúra

- [1] Dugan R. C., McGranaghan M. F., Santoso S., Beaty H. W.: Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, 2003, ISBN 0-07-138622-X
- [2] Szathmáry P.: Kvalita elektrickej energie. 1. vyd. Banská Bystrica : PRO, s.r.o., 2003. 122 s. ISBN 80-89057-04-7

*Táto práca vznikla za podpory vedeckej grantovej agentúry ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied v rámci*

*projektu VEGA č 1/1058/04 a za podpory Agentúry na podporu výskumu a vývoja prostredníctvom finančnej podpory č. APVT-20-026902.*

---

**Autori:** Ing. Martin Kanálik, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Mäsiarska 74, 040 01 Košice, E-mail: [martin.kanalik@tuke.sk](mailto:martin.kanalik@tuke.sk)

Ing. Peter Szathmáry, PhD, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Mäsiarska 74, 040 01 Košice, E-mail: [peter.szathmary@tuke.sk](mailto:peter.szathmary@tuke.sk)

Michal Vargončík

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

## Ochrana pred stratou budenia generátora

**Abstrakt.** Pre elektrizačnú sústavu je strata budenia generátora s veľkým jednotkovým výkonom veľmi nebezpečná. Zo stratou budenia dochádza ku veľkým poklesom napätia na svorkách generátora vplyvom odobraného reaktančného výkonu zo siete. Tento článok je zameraný na problémy nadväzujúce na stratu budenia synchronného generátora. Najprv pojednáva o podmienkach týkajúcich sa straty budenia a potom vyšetruje typy zariadení použitých za účelom chrániť aj systém aj generátor pred touto poruchou.

**Abstract.** For power system stability is loss of excitation generator with a great unit power very dangerous. With loss of excitation there is a big losses of voltage on staples of inflection generator with influence of removal reactance power from network. This paper is oriented on problems associated with the loss of excitation in a synchronous generator. First discuss the conditions that surround the loss of excitation, and then examine the types of devices that are used to protect both the system and the generator from this disturbance.

**Kľúčové slová:** strata budenia, synchronný generátor, synchronizmus, distančná ochrana.

**Keywords:** loss of excitation, synchronous generator, synchronism, distance relay.

### Úvod

V tomto článku sú rozoberané problémy vznikajúce pri strate budenia synchronného generátora. Najprv sú popísané okolnosti pri ktorých môže dôjsť k strate budenia a potom sú ukázané typy zariadení, ktoré sú používané na ochranu celej sústavy ako aj ochranu generátora pred poruchou.

### Asynchronný chod generátora

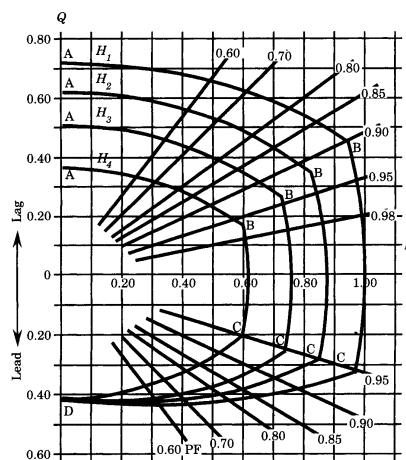
Počas bežnej prevádzky synchronného generátora, pole vytvorené rotorovými vynutiami uzatvorenými z otáčavou magneto-motorickou silou (mms) statorových vinutí a rotorom sa pohybuje synchronnou rýchlosťou prinajmenšom v stabilnom stave. Keď dôjde ku strate budenia, pole rotora náhle stratí svoju mms a rotor sa začína pohybovať mimo synchronizmu majúci stratu jeho silného magnetického spojenia zo statorovou mms. Počas tohto času je regulátor stále nastavený dodávať stanovené množstvo výkonu smerom ku generátoru, generátor bude zrýchľovať, indukujúci veľké klzné kmitočtové prúdy v rotore podľa potreby udržať výkonový výstup ako asynchronný generátor. V skutočnosti výkonová požiadavka bude redukovaná ako kĺzne zvýšenie spôsobené charakteristikami regulátora, zvýšenie statorového prúdu a možnosť znižovania koncového napätia, ale celkový výkon bude stále dosť veľký. Pokiaľ je ale narušené budenie, generátor začína absorbovať jalový výkon zo sústavy vo veľmi veľkých čiastkach, ktorý znižuje napätie. Toto by mohlo viesť k rozpadu napätia, ak je systém oslabený. Veľké zvýšenie jalového výkonu v kapacitnom účinníku vytvára veľké statorové prúdy, ktoré môžu dosiahnuť dvoj až štvornásobok nominálneho prúdu a rotor sa začne zahrievať.

Stupeň zahrievania rotora závisí na niekoľkých faktoroch vrátane zaťažovania generátora, podmienok spôsobujúcich stratu budenia a od toho, ako je pripojený do sústavy. Vo valcovitom rotore generátora, budú rotorové prúdy tiecť cez telo rotora a cez pole vinutia. Ak toto vinutie bolo skrátané alebo je pripojené cez vybijací odporník bude tiež tiecť cez rotorové kotúčové klíny. Tieto prúdy oscilujú v sklzových kmitočtoch a s veľkosťami, ktoré sú úmerné generovanému výkonu. Tieto veľké rotorové prúdy budú značne pôsobiť na vznik nebezpečných teplôt v rotore vo veľmi krátkom čase. Vo väčšine prípadoch, čas potrebný

pre tieto prúdy, ktorý dokáže spôsobiť vážne poškodenia je iba pár sekúnd ak generátor kompletne stratil budenie.

### Oblasti chránenia

Ako ochrana pred stratou budenia sa najčastejšie používa distančná ochrana typu "mho". Dôvod používania tohoto typu je vysvetlený nižšie. Generátorová prevádzka je obmedzená do oblasti roviny P – Q ako je ukázané na obr. 1.



Obr.1. Výkonové diagramy synchronného generátora v rovine P – Q.

Štyri lomené krivky ilustrované na obrázku znázorňujú schopnosti prevádzky generátora pri rôznych účinnícoch ako aj pri rozdielnych chladiacich podmienkach znázorených pre štyri rozdielne vodné tlaky označené  $H_1$  až  $H_4$ . Menovitý účinník je predpokladaný, že má hodnotu 0,90, oneskorenia a ďalšia krivka v bode B reprezentuje túto menovitú podmienku. Oblúk z bodu B do C sa zhoduje z volt ampérovými menovitými podmienkami generátora pre účinník blízko hodnoty jedna a pre rozdielne vodné tlaky. Limitná podmienka v tejto oblasti B – C je generátorový statorový prúd. Pretože účinník klesne pod menovitú hodnotu pri oneskorení, stroj generujúci prebytok jalového výkonu vyžaduje veľké budiace prúdy. Toto zodpovedá oblasti označenej A – B, a limitná podmienka v tejto oblasti je prehrievanie poľa počas veľkého budiaceho prúdu. V

oblasti kapacitného účinníka, reprezentovanej oblasťou označenou C – D, limitná podmienka je prehrievanie koncov jadra kotiev a krajná štruktúra statora. Toto prehrievanie je spôsobené výrivými prúdmi, ktoré sú vymedzené oblasťou kotvy, môže tiež byť vymedzené nestabilitou, pokiaľ väzba medzi rotorovým a statorovým poľom je oslabená keď pole budenia je malé. Limity sú občas ukázané ako priame čiary.

Obyčajne bude prevádzka generátora v rozsahu takom, ako je na obrázku znázornená oblasť B – C s účinníkom približujúcim sa jednotke. Pre túto oblasť môžeme napísať rovnicu limitných kružníc nasledovne

$$(1) \quad P^2 + Q^2 = h_i^2$$

kde:  $h$  – rádius kružníc oblúka pri nejakom vodnom tlaku,  $i$  – inex vodného tlaku.

Fázor prúdu generátora o danej napäťovej hladine môže byť vyjadrený podľa činného a jalového výkonu ako

$$(2) \quad I = \frac{P - jQ}{U^*}$$

Predelením fázora napätia  $U$  prúdom dostaneme komplexnú impedanciu, ktorú "vidíme" smerom z generátora do siete. Táto impedancia je daná vzťahom

$$(3) \quad Z = \frac{U^2(P + jQ)}{h_i^2}$$

Teraz hocikajký účinník môžeme popísať pomocou účinníka ohraničeného kružnicou v rovine P – Q nasledovným spôsobom

$$(4) \quad F_P = \cos\theta = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{P}{h_i}$$

$$F_Q = \sin\theta = \frac{Q}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{Q}{h_i}$$

alebo

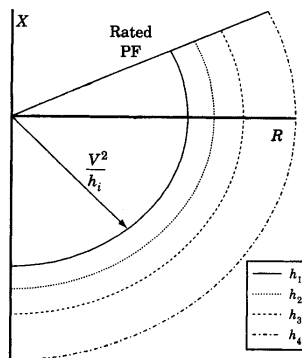
$$(5) \quad P = h_i \cos\theta$$

$$Q = h_i \sin\theta$$

Potom limitné kružnice v rovine P – Q môžu byť prevedené do limitných kružníc v rovine R – X a dosadením rovníc (5) do rovnice (3) dostaneme

$$(6) \quad Z = \frac{U^2}{h_i} (\cos\theta + j \sin\theta) = \frac{U^2}{h_i} e^{j\theta}$$

Táto rovnica reprezentuje súbor koncentrických kružníc v rovine Z so stredom v počiatku súradnicového systému ako je uvedené na obr. 2, s každou kružnicou prislúchajúcou jednotlivým vodným tlakom.



Obr.2. Statorový prúd limitovaný prevádzkovými kružnicami v rovine Z.

Za zmienku stojí ale, že kružnica v rovine Z odpovedajúca najvyššiemu vodnému tlaku je kružnica s najmenším uhlom. Tak, vyššie generátorové výstupy reprezentované v rovine P – Q bodmi vzdialenými od počiatku súradnicového systému, sú reprezentované v rovine R – X bližšie ku počiatku súr. syst. Poruchy sú reprezentované bodmi, ktoré sú veľmi blízko k počiatku roviny Z a porovnané s normálnym prevádzkovým stavom, pre ktoré sú prúdy omnoho nižšie ako pre poruchové stavy. Stále sú ohraničujúce podmienky kružnice v oboch rovinách.

Prevádzka generátora v normálnej prevádzke s indukčným účinníkom, budú zastúpené bodmi v prvom kvadrante roviny Z, ktoré sú dosť vzdialené od počiatku súr. syst., ale pohybujúcim sa bližšie ku počiatku súr. syst. Keď narastá záťaž. Prevádzka v štvrtom kvadrante roviny Z môže byť limitovaná nestabilitou.

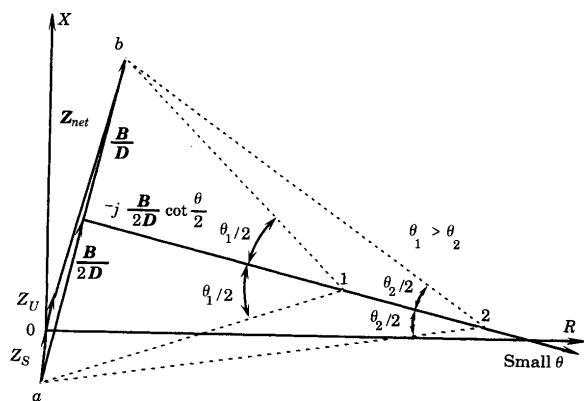
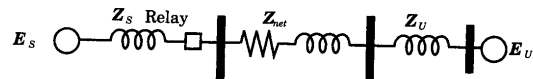
Ak mho ochrana je inštalovaná na konce statora generátora vidí do sústavy a vidí obrázok podobný obr. 2 v normálnom prevádzkovom stave. Ak dôjde ku strate budenia, prevádzkový bod v rovine Z sa začne pohybovať ako narastá kľznosť. Impedancia ochrany je počítaná podľa rovníc, kde je možné nájsť, že impedancia videná ochranou môže byť napísaná výrazmi z ABCD parametrov ako

$$(7) \quad Z_R = \frac{B/D}{1 - \frac{E_U}{DE_S}} - Z_S$$

Zjednodušením tejto rovnice vychádzajúc z predpokladu, že zdroje oboch napätí za a pred ochranou sú približne rovné. Potom je možné napísať

$$(8) \quad Z_R = \frac{B}{2D} \left( 1 - j \cot \frac{\theta}{2} \right) - Z_S$$

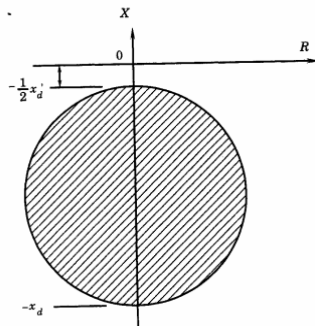
kde:  $\theta$  - uhol o ktorý  $E_s$  predbieha  $E_u$ ,  $B$  – celková impedancia sústavy medzi dvoma ekvivalentnými zdrojmi napätia ako je nakreslené na obr. 3.



Obr.3. Grafické znázornenie roviny Z do geometrického miesta  $Z_R$ .

Na obr. 3 je ochrana umiestnená v počiatku súr. syst. Za ochranou je ekvivalentná impedancia z generátora, ktorá sa mení z jeho synchronnej impedancie v stabilnom stave na impedanciu podriadenú nábehu poruchy. V priamom smere vidí ochrana impedanciu sústavy a vzdialený zdroj impedancie. Prevádzkový bod v rovine Z závisí na fázovom uhle medzi zdrojom impedancie, ktorý je daný pomocou  $\theta$ . Je to skonštruované prvým prekreslením priamky ab s

dĺžkou  $B/D$ . Podľa rovnice (8) geometrické miesto ležiace na priamke v pravom uhle k stredu priamky  $ab$  a vo vzdialenosti, ktorá závisí na uhle  $\theta$ . Obr. 3 znázorňuje dva možné prevádzkové body označené "1" and "2". Prvý bod zodpovedá veľkému uhlu  $\theta$  a druhý zodpovedá menšiemu uhlu.



Obr.4. Typická charakteristika ochrany pri strate budenia.

Prevádzkový bod sa pohybuje smerom doprava pozdĺž priamky a približuje sa nekonečnu a zároveň uhol  $\theta$  sa približuje k nule ktorý odpovedá stavu nezaťaženého generátora. Keď dôjde ku strate budenia, napätie za ochranou  $E_s$  sa blíži k nule a ochrana vidí impedanciu, ktorá odpovedá bodu  $a$  na obr. 3. Tento bod sa nachádza v treťom alebo vo štvrtom kvadrante vo vzdialenosti od počiatku a mení sa v závislosti na čase. Keď dojde k náhlemu úpadku budiaceho napätia tok sa spomalí a počas tejto periódy pomer  $E_s/E_u$  klesá a uhol rotora vzrastá. Poloha prevádzkového bodu v rovine  $Z$  sa mení z jeho počiatočného bodu ako je naznačené na obr. 3 a pohybuje sa doľava s narastajúcim uhlom. Ak vnútorné generátorové napätie môže klesnúť na nulu, celkový odpor

by bol presne  $-Z_s$ , ktorý je označený ako bod  $a$  na obrázku. Tento bod nieje nikdy dosiahnutý, pre indukčnosť ktorú poskytuje generátor s účinnou vnútornou elektro-motorickou silou (ems). Ak táto ems je konštantná, dáva konštantný pomer  $Z$  generátora do vzdialených vnútorných napätí a geometrické miesto bodov bude nasledovať kružniou cestu bodu  $a$  v smere hodinových ručičiek. Stojí za zmienku to, že impedancia videná z vývodov generátora sa presunie ku štvrtému kvadrantu a stratu budenia možno detekovať prvkom typu mho ktorý je zarovnaný podľa osi  $-X$ .

Typická charakteristika ochrany pri strate budenia je nakreslená na obr. 4.

Táto ochrana obsahuje mho jednotku s centrom v posunutej kružnici umiestnenej v zápornej časti osi  $X$ . Táto charakteristika bola označená ako nie presná podmienka straty synchronizmu ak je strata iba čiastočná, pokiaľ kružnica ochrany je zámerne ponechaná malá, ako možnosť vyvarovať sa chybným vypnutiam. Iná charakteristika ochrany pri strate budenia môže byť navrhnutá tak, že bude celá navrhnutá na chránenie, ale obsahuje vypínaciu zónu s tvarom iným než je kružnica [2].

#### Literatúra

- [1] Anderson, P. M.: Power system protection, IEEE Press Book, New York 1999. ISBN 0-7803-3427-2
- [2] Blackburn, J. L., Ed., Applied Protective Relaying, Westinghouse Electric Corporation, 1976.

*Táto práca vznikla za podpory vedeckej grantovej agentúry ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu APVT-20-026902.*

**Autor:** Michal Vargončík, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: michal.vargoncik@tuke.sk