

Dušan Medveď

Analýza vplyvu nečistôt na elektrických kontaktoch

Tento príspevok sa zaoberá matematickým modelovaním a simuláciou distribúcie teplotného poľa priameho silnoprúdového elektrického kontaktu pri pôsobení uvažovaného prúdu 3000 A. Silnoprúdové elektrické kontakty patria medzi prvky, ktorými je veľký počet elektrických zariadení pripojený. Hrajú dôležitú úlohu najmä v prenosovej a distribučnej sústave, kde musia odolávať nepriaznivým poveternostným podmienkam, ktoré majú výrazný vplyv na ich degradáciu. Preto je potrebné detekovať akékoľvek zvýšenie teploty elektrického kontaktu, aby sa zaistil účinný a spoľahlivý prenos energie. Na účely tohto príspevku bola realizovaná simulácia teplotného poľa v priamom elektrickom kontakte v ANSYS a boli prediskutované výsledky.

Kľúčové slová: vysokoprúdový elektrický kontakt; ANSYS; teplotné pole

This paper deals with mathematical modeling and simulation of the temperature field distribution of a direct high-current electrical contact under the action of the considered current 3000 A. High-current electrical contacts are among the elements to which a large number of electrical devices are connected. They play an important role especially in the transmission and distribution system, where they have to withstand adverse weather conditions that have a significant impact on their degradation. Therefore, it is necessary to detect any increase in the temperature of the electrical contact to ensure efficient and reliable energy transfer. For the purposes of this paper, a simulation of the temperature field in direct electrical contact in ANSYS was performed and the results were discussed. **(Investigation on electrical contacts impurities for increasing the energy transmission efficiency)**

Keywords: high current electrical contact; ANSYS; temperature field

I. ÚVOD

Elektrický kontakt je bodom kontaktu dvoch predmetov, ktorými prechádza elektrický prúd, pričom jeden z predmetov je väčšinou pohyblivý a druhý pevný [1]. Spojenie kontaktov však neprebíha po celom ich povrchu, ale iba v niekoľkých malých oblastiach, takže prechod prúdu je obmedzený a prejavuje sa ako prechodový odpor kontaktov [2].

Elektrické kontakty hrajú zdanlivo jednoduchú, ale dôležitú úlohu v elektrických systémoch. Poskytujú rozhranie medzi segmentmi obvodov, ktoré umožňujú segmentom pripojiť sa a odpojiť podľa potreby. Aj keď sa to na prvý pohľad môže zdať jednoduché, konštrukcia tohto typu spojenia (elektrický kontakt) vyžaduje starostlivé plánovanie a zväzanie všetkých možných nepriaznivých vplyvov [3]. Nesprávna konštrukcia môže mať za následok nadmerné zafarbenie, opotrebovanie zvaru, mechanické poškodenie alebo korozívne opotrebovanie, čo môže mať za následok nesprávne pripojenie [4–5]. Kontakty musia byť navrhnuté tak, aby sa minimalizoval výskyt týchto poruchových režimov, a to všetko pri zachovaní nízkeho kontaktného odporu, minimálneho elektrického šumu a spoľahlivej schopnosti pripojenia a odpojenia.

Väčšina kontaktov sa pri vypínaní opáli pôsobením elektrických oblúkov, ktoré vzniknú na kontaktoch pri prerušení elektrického obvodu [6–8]. Elektrické kontakty sú najporuchovejšími časťami zariadení a obvodov, preto sa na ich výrobu používa špeciálny materiál. Existujú stovky rôznych kontaktných materiálov, ktoré sa úspešne používajú v mnohých rôznych aplikáciách [9–11].

II. VLASTNOSTI ELEKTROTECHNICKÝCH MATERIÁLOV PRE ELEKTRICKÉ KONTAKTY

Pre najlepšiu funkciu zariadení je potrebné zaistiť čo najmenší kontaktný odpor medzi kontaktmi. To závisí od kontaktnej sily

kontaktov, typu spojenia kontaktov a cudzích vrstiev. Odolnosť kontaktov je daná vzorcom [11]:

$$R_k = k \cdot F^{-n} [\Omega] \quad (1)$$

kde k je typ použitého materiálu a vplyv cudzích vrstiev, F je lisovacia sila a n je typ kontaktu. Lisovaciú silu zabezpečujú rôzne mechanizmy, pružiny alebo konštrukčné usporiadanie kontaktov (S-kontakt, nožový kontakt a pod.).

Zníženie kontaktného odporu začína výberom správneho materiálu elektrického kontaktu, pravidelnou kontrolou, výmenou opotrebovaných kontaktov, čistením a údržbou skorodovaných elektrických kontaktov. Operátori musia pravidelne čistiť elektrické kontakty, aby sa znížil ich kontaktný odpor a zaistila sa dobrá prevádzková bezpečnosť a výkon [12].

Elektrotechnické materiály sa vyskytujú v rôznych prevádzkových podmienkach. S rozvojom technológie sa zvyšujú aj požiadavky na zložitosť týchto podmienok. Preto až doteraz nemusia byť dostatočné vlastnosti elektrotechnického materiálu vhodné v náročných podmienkach. Vlastnosti takýchto materiálov je potrebné upraviť alebo materiál nahradiť [13]. Kompenzácia spojená s vývojom úplne nového materiálu nie je jednoduchá a je nákladná. Jednoduchším a efektívnejším spôsobom je upraviť vlastnosti daného materiálu tak, aby vyhovoval požadovaným podmienkam. Zámerná úprava vlastností materiálov sa nazýva riadenie vlastností. Existujú dva spôsoby riadenia vlastností materiálov, a to riadenie vlastností zmenou štruktúry a riadenie vlastností zmenou zloženia [10].

A) Prehriatie prúdovej dráhy elektrického kontaktu

Prehriatie prúdovej cesty je dôležitým parametrom, ktorý je potrebné v elektrickom zariadení starostlivo monitorovať. Tento parameter úzko súvisí s prevádzkovým stavom, spoľahlivosťou, bezpečnosťou a životnosťou elektrického zariadenia [14]. Pri navrhovaní a prevádzke viacerých zariadení je tento parameter

obmedzujúcim faktorom. Teploty vyššie ako prevádzkové teploty vedú k zhoršeniu izolácie vodiča, čo zase spôsobuje poruchové stavy.

Základnými faktormi pre zahrievanie prúdovej cesty sú prúdové zaťaženie a elektrický odpor vodiča, z ktorého oteplenie pochádza. Medzi ďalšie parametre patrí stupeň a spôsob chladenia vodiča, kde existuje niekoľko spôsobov prenosu tepla. Menej dôležitými parametrami sú prevádzkové podmienky, okolitá teplota, kvalita kontaktov, rýchlosť, smer vetra a zahrievanie spôsobené slnečným žiarením alebo tepelná vodivosť vodičov a izolačných materiálov [15]. Okrem toho môže dôjsť k prehriatiu počas niektorých fyzikálnych udalostí, ako je skinefekt alebo vplyv blízkosti vodičov, ktoré ovplyvňujú celkový odpor vodiča.

Prechod elektrického prúdu vodičom spôsobuje straty, ktoré sa prejavujú prehriatím prúdovej cesty. Časť tohto tepla sa uloží do vodiča v závislosti od teploty materiálu a zvyšok sa rozptýli do okolia. V ustálenom prevádzkovom stave s konštantným zahrievaním, keď je teplota vodiča konštantná, sa celá časť generovaného tepla odvádza do priestoru. V prípade prechodných javov, v ktorých hodnota elektrického prúdu nie je konštantná, je potrebné vziať do úvahy skutočnú tepelnú kapacitu vodiča alebo tepelnú kapacitu všetkých zložiek tepelnej analýzy. Pri vytváraní modelu prehrievania prúdovej cesty je dôležité vziať do úvahy to, čo sa v konkrétnom prípade deje a ktoré možno zanedbať. Jednotlivé deje musia byť popísané rovnicami berúcimi do úvahy ich veľkosť a priebeh pôsobenia. Pre všeobecný opis účinku je rovnica [14, 16]:

$$P_z = c \cdot V \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + P_0 \quad [W] \quad (2)$$

Kde P_z je výkon ohrevu [W], c je merná objemová tepelná kapacita vodiča [$J/(m^3 \cdot K)$], V je objem vodiča [m^3], ϑ je okamžitá teplota vodiča [K] a P_0 je ochladzovací výkon [W].

III. TEPELNÁ ANALÝZA ELEKTRICKÝCH KONTAKTOV

V tejto kapitole sme sa zamerali na vplyv elektrického prúdu na teplotu vybraných kontaktov. Usúdili sme, že keď prúd prechádza jednotlivými kontaktmi, môžu sa prehriať, v dôsledku čoho môže dôjsť k degradácii kontaktov alebo poruche zariadenia. Preto je dôležité pri navrhovaní zvoliť správne rozmery a kontaktný materiál. Pokiaľ ide o teplotu, je tiež potrebné dodržiavať teplotné triedy, ktoré udávajú hodnoty teplôt, ktoré je možné dosiahnuť kontaktmi.

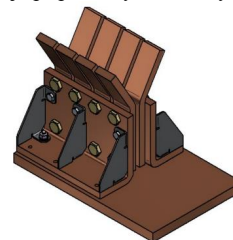
Stanovenie rozloženia teploty na jednotlivých kontaktoch je komplikované manuálnymi, číselnými výpočtami. Výhodnejším riešením je použitie špeciálne upraveného softvéru, ktorý umožní vykonať numerické výpočty v relatívne krátkom čase [17]. Na základe toho vypočíta rozloženie teploty. Jeden z mnohých špecializovaných softvérov je ANSYS, ktorý sme použili na určenie rozloženia teploty.

A) Silnoprúdový priamy kontakt

Elektrické kontakty patria medzi prvky, ktoré spájajú veľké množstvo elektrických zariadení. Hrajú dôležitú úlohu najmä v prenosovom a distribučnom systéme elektrickej energie, kde musia odolávať nepriaznivým poveternostným podmienkam, ktoré majú významný vplyv na ich degradáciu.

Výrobcom silnoprúdového priameho kontaktu, ktorý sme vybrali, je Ampac. Táto spoločnosť vyrába mnoho kontaktov s rôznymi hodnotami prúdovej kapacity. Vysokoprúdový kontakt, ktorý sme vybrali na analýzu, spĺňa všetky požiadavky na optimálny prenos energie. Prvky vedúce elektrický prúd sú vyrobené z medi (hlavná konštrukcia) a BeAg (výstužné dosky). Systém pracuje bez tlačných pružín, čo znamená, že jeho konštrukcia je jednoduchá a elementárna konštrukcia kontaktu zaisťuje nízke náklady na údržbu.

Daný kontakt je možné zaťažiť elektrickým prúdom od 500 A do 4000 A, pričom pri analýze sme uvažovali s hodnotou 3000 A. Veľkosť prechádzajúceho elektrického prúdu závisí od počtu kontaktov, ku ktorým je pripojený kontaktný nôž [18].



Obr. 1. Vysokoprúdový priamy kontakt od firmy Ampac [18].

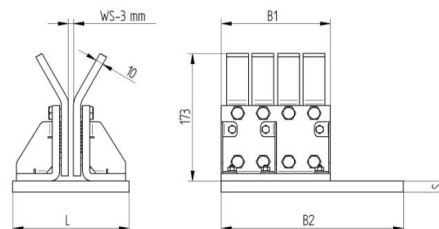
B) Parametre priameho kontaktu

Hodnoty uvedené v tabuľke 1 sa vzťahujú na rozmery uvedené v diagrame priameho kontaktu.

TABUĽKA I
Rozmery jednotlivých priamych kontaktov [18].

Prúd [A]	Rozmery [mm]				Počet kontaktov
	B1	B2	L	S	
500 – 1000	50	100	160	10	2
1500	70	120	160	10	4
2000 – 2500	100	150	160	10	6
3000	150	250	160	15	8
4000	200	300	160	20	10

Hodnoty uvedené v tabuľke 1 platia pre rozmery zobrazené na schéme priameho kontaktu.



Obr. 2. Schéma s rozmermi pre priamy kontakt [18].

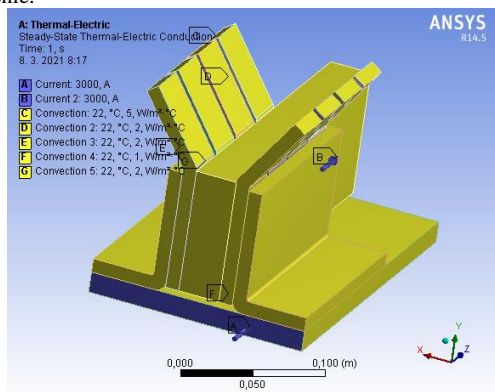
C) Simulácia rozloženia teploty priameho kontaktu

Simuláciu rozloženia teploty sme vykonali na priamom kontakte pomocou softvéru ANSYS Workbench. Verziu Workbench sme vybrali, pretože umožňuje vytváranie geometrie objektov v 3D rozhraní.

Pri simulácii kontaktu bolo spočiatku potrebné vytvoriť alebo vybrať zo zoznamu materiálov, ktoré boli neskôr priradené k jednotlivým častiam. Druhým krokom bola úprava jeho geometrie, kde sme najskôr načrtli jednotlivé časti kontaktu v 2D rozlíšení a potom sme ho transformovali do 3D tvaru. Po vytvorení všetkých dielov sme ich nastavili ako jeden „diel“, vďaka ktorému do seba základňa, držiaky kontaktov, kontakty a kontaktný nôž zapadajú. V treťom kroku sme jednotlivým častiam priradili materiály a zostrojili sme sieťovanie kontaktu (mesh). Potom sme určili okrajové podmienky, ktorými je smer elektrického prúdu, ktorý začínal v základni a končil na konci noža.

Nastavenie tepelnej konvekcie pre každú časť bolo posledným krokom simulácie, po ktorom sme vykonali výpočet, na základe ktorého program vypočítal a vizualizoval rozloženie teploty na priamom kontakte.

Na obr. 3 je viditeľný priamy kontakt s nastavenými hodnotami tepelných konvekcií a elektrického prúdu. Konvekcia (tok tepla) je jedným zo spôsobov šírenia tepla v kvapalinách a plynch. V programe ANSYS však predstavuje takzvané straty tepelného povrchu. Tento parameter umožňuje pri modelovaní zohľadniť spôsob uloženia určitého objektu, ako je vertikálne alebo horizontálne upevnenie.



Obr. 3. Model priameho kontaktu s uvedením elektro-tepelných podmienok (Body A, B predstavujú elektrický prúd a body C-G tepelnú konvekciu).

V simulácii sme uvažovali o voľnej tepelnej konvekcií, ktorá vzniká v dôsledku gravitácie a má zvislý smer prenosu tepla. Čo v skutočnosti znamená, že odvod tepla z hornej časti objektu je väčší ako z jeho strán alebo spodnej časti [19]. Na základe týchto zistení sme nastavili konvekciu pre horné povrchy priameho kontaktu na $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, bočné $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ a spodné $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Pri použití vyšších hodnôt by sa uvažovalo o nútenej tepelnej konvekcií, ku ktorej dochádza pri nútenom prúdení, napr. pod vplyvom ventilátora. Pri tomto type prúdenia závisí smer prenosu tepla od smeru prúdenia vzduchu.

Pri vytváraní modelu sme zanedbali podperné plechy pre držiaky kontaktov, pretože ich hlavnou úlohou nie je odvádzať teplo, ale zvýšiť mechanickú pevnosť držiakov.

IV. VPLYV MATERIÁLOV A NEČISTÔT PRIAMEHO KONTAKTU NA ROZLOŽENIE TEPLoty

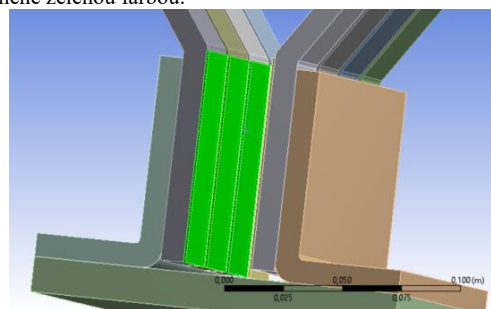
Vybrali sme štyri materiály, ktoré sa často používajú v elektrotechnike pri výrobe kontaktov alebo vodičov. Základným materiálom bola meď, z ktorej je vyrobený priamy kontakt. Ďalšími materiálmi boli hliník, mosadz a striebro, napriek tomu, že striebro sa v súčasnosti používa v menšej miere ako ostatné tri materiály. Použili sme ho, pretože má lepšie elektrické vlastnosti ako meď [20].

Simulovali sme vplyv rôznych materiálov na rozloženie teploty (na kontaktnom povrchu) nastavením príslušných hodnôt súčiniteľa tepelnej vodivosti λ a rezistivity ρ . Jednotlivé hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti a rezistivity sú uvedené v tabuľke 2.

TABUĽKA II
Zadané hodnoty pre jednotlivé materiály [20].

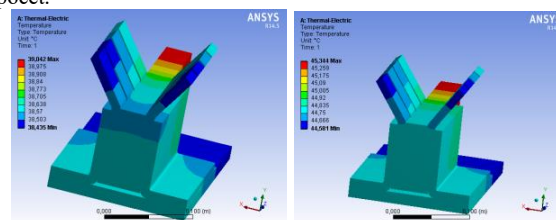
Materiál	λ [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]	ρ [$\Omega \cdot \text{m}$]
Meď	390	$1,72 \cdot 10^{-8}$
Hliník	237	$2,65 \cdot 10^{-8}$
Mosadz	111	$6,3 \cdot 10^{-8}$
Striebro	428	$1,59 \cdot 10^{-8}$
Nečistota	30	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-4}$

Vplyv nečistôt na rozloženie teploty sme určili pridaním objemu so šírkou 1 mm k všetkým kontaktom. Tento objem je charakterizovaný miernym opotrebovaním, nerovnosťami a najmä oxidáciou kontaktov, ku ktorej dochádza v dôsledku negatívneho vplyvu prostredia, starnutia materiálu atď. V skutočnosti sú hrúbky takýchto nečistôt oveľa menšie, rádovo 10–4 mm, ale kvôli určitým nedokonalostiam programu by sa pri takýchto rozmeroch mohli vyskytnúť chyby vo vytváraní zosieťovania na prímiesiach. Na obr. 4 sú nečistoty zvýraznené zelenou farbou.



Obr. 4. Známenie nečistôt na kontaktoch (zelenou farbou).

Na počítačové simulácie pri výrobe daného typu kontaktu sme použili meď, ako materiál používaný výrobcom [18]. Na základe čoho sme určili dôležitosť zadaných parametrov a hodnôt pre presný výpočet.



Obr. 5. Rozloženie teploty priameho kontaktu medi bez nečistôt (vľavo) a s rezistivitou nečistôt $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (vpravo).

Z rozloženia teploty na (obr. 5 vľavo) je zjavné, že najvyššia teplota je na začiatku kontaktného noža s maximálnou hodnotou $39,042^\circ\text{C}$. Najnižšie teploty sú v časti základne, nad ktorou nie sú umiestnené držiaky kontaktov a súčasne na koncoch kontaktov umiestnených na konci noža, kde minimálna hodnota teploty dosahuje $38,435^\circ\text{C}$. Kontaktný model (obr. 5 vľavo) sme navrhli bez uvedených nečistôt, t.j. ukazuje takzvaný „ideálny“ prevádzkový stav, počas ktorého sa kontakty vplyvom nečistôt neprehrievajú. V takom prípade môže dôjsť k prehriatiu, napr. pri zvýšenej hodnote elektrického prúdu pretekajúceho priamym kontaktom.

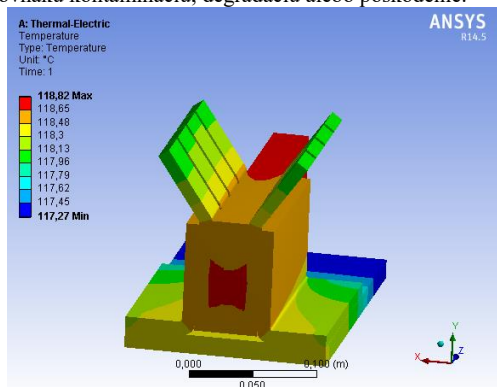
Vo všetkých ostatných simuláciách sme použili povrchy s nečistotami. Rovnako ako pre materiály a nečistoty bolo potrebné zadať hodnotu súčiniteľa tepelnej vodivosti a rezistivity. Tieto hodnoty nájdete v tabuľke 2 s rozsahom hodnôt $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$.

Použitím tohto rozsahu rezistivity sme vytvorili zhoršujúcu sa elektrickú vodivosť, ktorá bola kontamináciou medzi kontaktmi a kontaktným nožom. Hodnota $1 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ predstavovala malé prímiesi a hodnota $1 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$ charakterizovala veľmi veľké znečistenie oblastí. Kontakt s rezistivitou $1 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ je znázornený na (obr. 5, vpravo). Predpokladali sme, že táto hodnota vyjadruje „skutočný“ prevádzkový stav pri prvom uvedení do prevádzky.

Dané rozloženie teploty potvrdzuje vyššiu maximálnu a minimálnu hodnotu teploty v porovnaní s predchádzajúcim stavom (bez

nečistoty), pričom došlo k nárastu približne o 6°C . Najvyššie a najnižšie teploty sa nachádzajú na rovnakých miestach ako na (obr. 5 vľavo) s rozdielom, že v niektorých oblastiach nachádzajúcich sa v strede kontaktu došlo k miernemu nárastu. Tieto skutočnosti vyjadrujú rozdiel medzi ideálnym a skutočným stavom priameho kontaktu.

Nasledujúci obrázok ukazuje priamy kontakt s rezistivitou nečistoty $1\cdot 10^{-4}\ \Omega\cdot\text{m}$, ktorý predstavuje stav po dlhodobom použití. Samozrejme, je veľmi ťažké predpovedať, že po takom dlhom období používania sa kontaktná plocha môže do takej miery znečistiť. Dôvodom je, že žiadny predmet vyrobený z rovnakého materiálu nemá rovnakú kontamináciu, degradáciu alebo poškodenie.



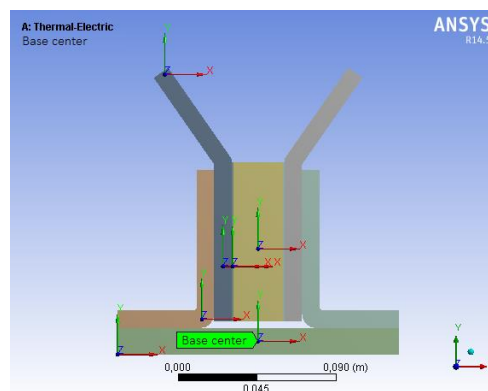
Obr. 6. Rozloženie teploty priameho kontaktu medi s rezistivitou nečistoty $10^{-4}\ \Omega\cdot\text{m}$.

Maximálna hodnota teploty na aktuálnom obrázku dosiahla $118,82^{\circ}\text{C}$, pričom minimálna teplota má hodnotu $117,27^{\circ}\text{C}$. Porovnanie týchto teplôt s teplotami zistenými v predchádzajúcich dvoch podmienkach ukázalo viac ako dvojnásobný nárast hodnôt. V porovnaní s predchádzajúcim „skutočným“ prevádzkovým stavom sa najvyššia teplota zvýšila o $73,476^{\circ}\text{C}$ a v porovnaní s „ideálnym“ prevádzkovým stavom sa najvyššia teplota zvýšila o $79,778^{\circ}\text{C}$.

Významné zmeny nastali aj z hľadiska rozloženia jednotlivých teplotných zón. Pri aktuálnom stave prevládajú tzv. teplé farby, ktoré dokazujú, že najviac sa prehrievajú časti v blízkom okolí noža. Čiže znečistenie kontaktov môže vo veľkej miere ovplyvňovať teplotu elektrických spojov. Preto je dôležité vykonávať kontroly kontaktov v pravidelných intervaloch [21].

A) Sumarizácia výsledkov teplotného rozloženia priameho kontaktu z medi

Po rozrezaní objektu v prostredí ANSYS sme na konkrétne miesta modelu umiestnili teplotné sondy. Tieto sondy umožňujú meranie teploty v ľubovoľnom bode. Použili sme šesť sond na rôznych miestach a obr. 7 ukazuje ich usporiadanie, umiestnené na rovnakých miestach ako súradnicové systémy. Tak, ako je na obrázku napísaný názov teplotnej sondy v zelenej bubline, tak sú na tom aj ostatné. Jednotlivé mená sme zadávali na základe ich pozícií.



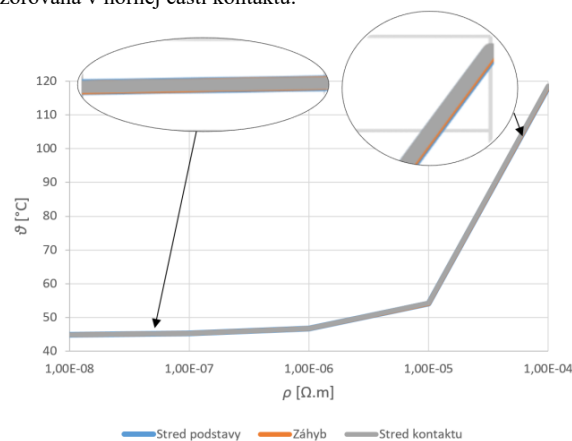
Obr. 7. Zobrazenie rozmiestnenia teplotných sond v strede priameho kontaktu.

Hodnoty teploty namerané teplotnými sondami boli zapísané do tabuliek. Z nameraných hodnôt boli vytvorené grafické závislosti, ktoré naznačujú, ako sa mení teplota v určitých bodoch v strede kontaktu, pod vplyvom jednotlivých druhov nečistôt.

TABUĽKA III
Namerané hodnoty teplôt (silnoprúdový medený kontakt).

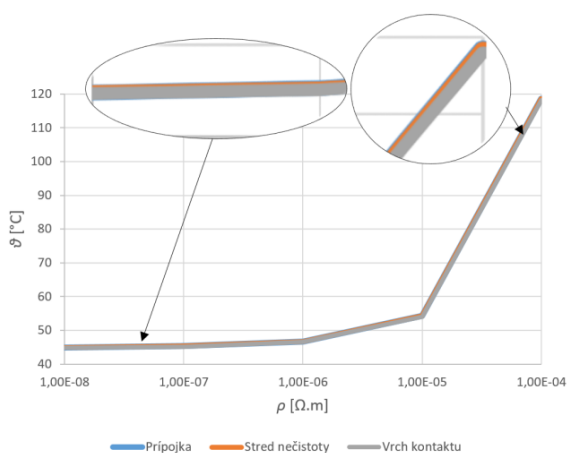
ρ [$\Omega\cdot\text{m}$]	Stred podsta vy ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	Záhyb ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	Stred kontak tu ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	Stred noža ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	Stred nečis oty ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	Vrch kontak tu ϑ [$^{\circ}\text{C}$]
$1\cdot 10^{-4}$	118.21	118.37	118.62	118.66	118.67	118.11
$1\cdot 10^{-5}$	54.133	54.175	54.236	54.246	54.243	54.066
$1\cdot 10^{-6}$	46.632	46.659	46.696	46.7	46.698	46.564
$1\cdot 10^{-7}$	45.15	45.239	45.272	45.276	45.274	45.147
$1\cdot 10^{-8}$	44.79	44.813	44.845	44.849	44.847	44.723

Namerané teploty sondami, uvedené v tabuľke 3, nemajú významne odlišné hodnoty, v niektorých prípadoch ide o maximálny rozdiel $0,5^{\circ}\text{C}$. Najvyššie teploty sú v strede noža alebo nečistoty, pričom najvyššia teplota dosiahla $118,67^{\circ}\text{C}$ a najnižšia $44,79^{\circ}\text{C}$ pozorovaná v hornej časti kontaktu.



Obr. 8. Závislosť teploty od rezistivity nečistôt pri priamom kontakte z medi.

Pre lepšiu prehľadnosť grafických závislostí boli skonštruované dva grafy, v ktorých sú umiestnené tri krivky. Poznámka: Ak by bolo do jedného grafu uložených šesť kriviek, charakteristiky by sa ešte viac prekrývali a teplotný rozdiel by nebol viditeľný.

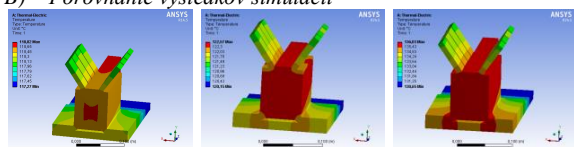


Obr. 9. Závislosť teploty od rezistivity nečistôt pri priamom kontakte z medi.

Z grafických závislostí na obrázkoch obr. 8 a obr. 9 je pozorovateľné nelineárne zvýšenie teploty. S odporom nečistôt od 10^{-8} $\Omega\cdot\text{m}$ do hodnoty 10^{-6} $\Omega\cdot\text{m}$ sa teplota zvýšila o malý krok pozdĺž lineárnej krivky. Zmena by mala nastať pri rezistivite nečistôt 10^{-6} $\Omega\cdot\text{m}$ na 10^{-5} $\Omega\cdot\text{m}$, pričom najväčší skok teploty je medzi 10^{-5} $\Omega\cdot\text{m}$ na hodnotu 10^{-4} $\Omega\cdot\text{m}$.

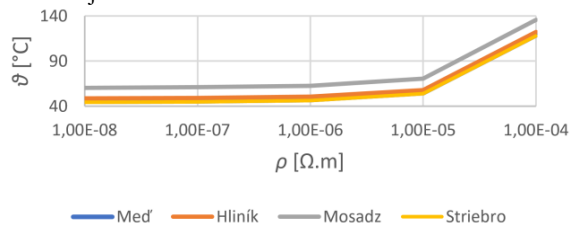
Ak je možné uvažovať s vyšším prípustným prúdom (v tomto elektrickom kontakte až do 4 000 A), získané teploty budú vyššie, ale stále v prípustnej hodnote, ktorá je predpísaná výrobcem elektrického kontaktu [18].

B) Porovnanie výsledkov simulácií



Obr. 10. Rozdelenie teploty priameho kontaktu z medi (vľavo), hliníka (v strede) a mosadze (vpravo) s najvyššou uvažovanou rezistivitou nečistoty 10^{-4} $\Omega\cdot\text{m}$

Grafické závislosti pri použitých materiáloch boli zatiaľ popísané a porovnané len individuálne a neboli jasne viditeľné rozdiely teplôt. Preto boli z tabuliek, v ktorých sa nachádzali namerané teploty sondami, vybraté iba hodnoty namerané v jednom mieste (strede kontaktu) a následne bola z nich zostrojená grafická závislosť. Toto miesto bolo zvolené v dôsledku toho, že je to časť priameho kontaktu, ktorá bola najviac namáhaná.



Obr. 11. Závislosť teploty od rezistivity nečistôt pri všetkých materiáloch v strede kontaktu.

Namerané hodnoty a skonštruovaná grafická závislosť (obr. 11) ukázali, že najvyššie teploty sa vyskytovali v priamom kontakte z mosadze a najnižšie v priamom kontakte zo striebra. Teploty boli podobne nízke pre strieborný materiál a medený materiál. Pozorovateľná je aj symetria všetkých nelineárných charakteristík

danej závislosti (obr. 11), pri ktorej teplota stúpa v dôsledku zvyšujúceho znečistenia kontaktov.

Všetky simulácie a z nich vyhotovené tabuľky a grafické závislosti ukázali, že materiál zvolený výrobcem na výrobu priameho kontaktu, ktorým je meď, má najlepšie rozloženie teploty v porovnaní s inými nami vybranými materiálmi, s výnimkou striebra. Výrobcovia pri výbere vhodného materiálu samozrejme berú do úvahy aj ich ďalšie dôležité vlastnosti ako elektrickú vodivosť, mechanickú pevnosť, vplyv nepriaznivých poveternostných podmienok, cenu a podobne. Je potrebné uviesť, že z hľadiska rozloženia teploty by bolo najvhodnejším materiálom striebro, potom meď, potom hliník a mosadz.

V. ZÁVER

Cieľom tohto príspevku bolo predstaviť výsledky rozloženia teploty na povrchu silnoprúdového kontaktu pri prevádzkovom menovitom prúde 3000 A (prípustné hodnoty prúdu pre tento typ kontaktu boli v rozsahu 500 A až 4 000 A). Príspevok predstavuje výstupy z programu ANSYS Workbench, ktorý bol použitý na posúdenie rozloženia teploty v okolí elektrického kontaktu. Simulácie ukázali nárast teploty s rastúcimi hodnotami rezistivity nečistoty. Tieto rezistivity predstavovali jednotlivé stupne znečistenia, kde najväčšie nečistoty dosahovali rezistivity s hodnotami 10^{-4} $\Omega\cdot\text{m}$ a najmenšie znečisťujúce látky na hodnoty odporov 10^{-8} $\Omega\cdot\text{m}$. Nárast teplôt potvrdili aj hodnoty namerané teplotnými sondami, ktoré sa nachádzali na rôznych miestach v strede silnoprúdového kontaktu. Grafické závislosti zostrojené z nameraných hodnôt následne vizualizovali nelineárny nárast teplôt so zvyšujúcou sa rezistivitou nečistôt. Tieto výsledky ukazujú, že je veľmi dôležité dbať na čistotu elektrických kontaktov, vykonávať pravidelné kontroly a čistiť povrch elektrických kontaktov.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore Agentúry na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-19-0576, Kultúrnej a edukačnej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR pod číslom KEGA 013TUKE-4/2021 a Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR a SAV podporených grantom VEGA 1/0757/21 a VEGA 1/0435/19.

LITERATÚRA

- [1] *IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms*, In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 6, pp. 37a-37a, Nov. 1980, doi: 10.1109/TPAS.1980.319816.
- [2] Grachev, N.; Andryukhin, A.; Chernoverskaya, V., *Investigation of the Characteristics of the Transient Electrical Resistance of Contacts in the Designs of Radio Electronic Devices in the Conditions of the Formation of Contact Radio Interference*, International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/SED51197.2021.9444520.
- [3] Paunescu, M.; Dan, M.; Dragan, F.; Topa, V., *The Effect of Corrosion on Electrical Contacts*, 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/MPS.2019.8759650.
- [4] Damle, T.; Xu, C.; Varenberg, M.; Graber, L., *Electric Field Between Contacts of Fast Mechanical Switches Subjected to Fretting Wear*, IEEE 66th Holm Conference on Electrical Contacts and Intensive Course (HLM), 2020, pp. 144-148, doi: 10.1109/HLM49214.2020.9307904.
- [5] Shen, Q.; Lv, K.; Liu, G.; Qiu, J., *Impact of Electrical Contact Resistance on the High-Speed Transmission and On-Line Diagnosis of Electrical Connector Intermittent Faults*, In: IEEE Access, vol. 5, pp. 4221-4232, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2679223.
- [6] Byerly, J. M.; Schneider, C.; Schloss, R.; West, I., *Real-time circuit breaker health diagnostics*, 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/CPRE.2017.8090047.

- [7] Carvou, E.; Ben Jemaa, N.; Porte, M.; Razafiarivelo, J., *Contact heating by long arcing during connector disconnection*, Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2005, pp. 360-365, doi: 10.1109/HOLM.2005.1518270.
- [8] Parkansky, N.; Boxman, R. L.; Goldsmith, S.; Rosenberg, Y., *Arc erosion reduction on electrical contacts using transverse current injection*, In: IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 25, no. 4, pp. 543-547, Aug. 1997, doi: 10.1109/27.640663.
- [9] Zhou, Y.; Lv, Y.; Wang, H.; Ma, A.; Liu, H., *Electrical Contact Behavior of Several Typical Materials in Dust at Static and Dynamic Conditions*, Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2010, pp. 1-12, doi: 10.1109/HOLM.2010.5619469.
- [10] Xixiu, W.; Meihua, D.; Zhenbiao, L.; Chengyan, L., *The composition change of contact material surface*, Proceedings of the Forty-Ninth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2003, pp. 139-144, doi: 10.1109/HOLM.2003.1246489.
- [11] Timsit, R. S., *Electrical Contact Materials*. In: Wang Q.J., Chung YW. (eds) Encyclopedia of Tribology. Springer, 2003, Boston, MA. doi: 10.1007/978-0-387-92897-5_425.
- [12] Elbekri, T.; Chaâbane, L., *Experimental investigation on parameters of switches contacts*, 26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012), 2012, pp. 390-392, doi: 10.1049/cp.2012.0681.
- [13] Chen, J.; Yang, F.; Luo, K.; Wu, Y.; Rong, M., *Experimental investigation of the electrical contact characteristics in Rolling Contact Connector*, IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), 2015, pp. 235-240, doi: 10.1109/HOLM.2015.7355103.
- [14] Zhou, X.; Schoepf, T., *Characteristics of Overheated Electrical Joints Due to Loose Connection*, IEEE 57th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), 2011, pp. 1-7, doi: 10.1109/HOLM.2011.6034795.
- [15] Tang, L., et.al., *Hotspot Temperature Monitoring of Fully Insulated Busbar Taped Joint*, In: IEEE Access, vol. 7, pp. 66463-66475, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2918556.
- [16] Cesky, L.; Janicek, F.; Kubica, J.; Skudrik, F., *Overheating of primary and secondary coils of voltage instrument transformers*, 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPE.2017.7967359.
- [17] Rot, D.; Kozeny, J.; Jirinec, S.; Jirinec, J.; Podhrazky, A.; Poznyak, I., *Induction melting of aluminium oxide in the cold crucible*, In: 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) 2017, pp 1-4, doi: 10.1109/EPE.2017.7967281.
- [18] Ampac, *High current Direct-Contacts 500 up to 4000 ampere*, [online], [cit. 2021-09-08], Available at: <<https://www.ampacremscheid.de/en/products/high-current-contacting-for-galvano-and-eloxal-technology/direct-contacts/>>.
- [19] Wang, Y., *Coupled Electromagnetic and Thermal Analysis and Design Optimization of Synchronous Electric Machines*, University of Wisconsin-Milwaukee, 2014, Theses and Dissertations, 966, Available at: <<https://dc.uwm.edu/etd/966>>.
- [20] Ekpu, M.; Bhatti, R.; Ekere, N.; Mallik, S., *Advanced thermal management materials for heat sinks used in microelectronics*, 18th European Microelectronics & Packaging Conference, 2011, pp. 1-8.
- [21] Chudnovsky, B. H., *Electrical Contacts Condition Diagnostics Based on Wireless Temperature Monitoring of Energized Equipment*, Electrical Contacts - 2006. Proceedings of the 52nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2006, pp. 73-80, doi: 10.1109/HOLM.2006.284068.

ADRESY AUTOROV

doc. Ing. Dušan Medveď, Ph.D., Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Dusan.Medved@tuke.sk

Tento príspevok je monitorovaný v rámci dopadov projektu "Inovatívne postupy testovania pre priemysel 21. storočia (kód ITMS:NFP313010T565), operačného programu Výskum a inovácie.