

# VPLIV STEN OB KONTAKTIH Z OBLOKOM NA IZKLOPNO ZMOGLJIVOST NIZKONAPETOSTNEGA ODKLOPNIKA

Martin Bizjak

Iskra MIS, Kranj, Slovenija

**Ključne besede:** nizkonapetostni odklopnik, napetost obloka, tokovna omejitev, kratki oblok, delitev obloka, deion komora, prepustni tok, jouski integral izklopa (integral  $I^2t$ ), vpliv plastične mase na izklopno zmogljivost.

**Izleček:** Izklopna zmogljivost nizkonapetostnega odklopnika je odvisna od razvoja električnega obloka in njegovih značilnosti. Odklopnik naj pri izklopu kratkostičnega toka zagotovi čim manjšo amplitudo prepuščenega toka in čim manjši jouski integral (integral  $I^2t$ ). To je omogoča učinek tokovne omejitve kratkostičnega toka. Tokovno omejitev določa razvoj obločne napetosti, ki naj dovolj hitro naraste preko neke kritične vrednosti. Hitrost naraščanja obločne napetosti in njena maksimalna vrednost sta odvisni od hitrosti odpiranja kontaktov, ki prekinjajo varovani tokokrog, formiranja zanke obloka med kontakti in delitve obloka na ustrezno število delnih oblokov.

Računska simulacija poteka toka in napetosti obloka med kontakti z ad hoc računskim modelom razkrije, katere značilne količine obloka odločujoče vplivajo na tokovno omejitev pri izklopu. S simulacijo ponazorimo časovni potek obločne napetosti in prepuščenega toka, kot ga registriramo eksperimentalno na oscilogramu pri preizkusu izklopne zmogljivosti. Nekatere vrednosti, ki jih potrebujemo za računsko simulacijo najdemo v literaturi, druge pa vzamemo kot variabilne parametre. Iz primerjave simulacijskih in eksperimentalnih rezultatov sklepamo na vplive, ki so posledica hitrosti odpiranja kontaktov in značilnosti v odklopniku vgrajenega materiala. Tako je bil kvalitativno ugotovljen vpliv plastične mase iz obloge kontaktno-obločnega prostora (s primerjavo dveh vrst materiala) na izklopno zmogljivost obravnavanega tipa odklopnika.

## The influence of lateral walls near arcing contacts on breaking capacity of low-voltage circuit-breaker

**Key words:** low-voltage circuit breaker, arc voltage, current limiting, short arc, arc splitting, arc chute, let-through current, joule integral ( $I^2t$  integral), influence of plastic material on breaking capacity.

**Abstract:** The breaking capacity of low-voltage circuit breaker is closely related to the development of arc voltage and its magnitude during breaking of short-circuits current. The magnitude of let-through current shall be reduced and the joule integral minimized as well in order to achieve significant current-limiting effect of circuit breaker. Current limiting requires the magnitude of arc voltage to increase in the sufficiently short time interval to the relatively stationary value above the certain critical voltage. Both of them are dependent on the movement of contact members during opening and on the elongation speed of arc column in the initial phase as well as on the subdividing of arc in the arc chute.

Numerical simulation of the variation of arc voltage and let-through current during the breaking time reveals the influencing quantities of arc crucially affecting the current limiting action. The numerical procedure simulates the current and voltage waveforms normally recorded in oscillograms of breaking test shots. Some values necessary for the calculation were found in literature, others are used for simulation as variable parameters. The mutual combination of experimental and simulation results led us to the conclusion which physical effects, either movement of contacts or characteristics of materials (metallic and non-metallic) are dominant at break. By this way a significant influence of plastic material forming lateral walls around arcing contacts on the breaking capacity of circuit breaker under discussion was indicated qualitatively by comparing effects of two types of plastics.

### 1. Uvod

Pri nastanku nenormalnih stanj v nizkonapetostnem energetskem tokokrogu, kot je pojav prenapetosti ali tokovne preobremenitve v kratkem stiku, je treba tako stanje čim hitreje odpraviti ali tokokrog zaščititi pred njim. Prevelik tok skušamo hitro prekiniti z odklopnikom, kar pa v nizkonapetostnem energetskem tokokrogu traja vsaj toliko časa, da trenutna vrednost toka doseže prvo ničelno vrednost. To preide izmenični tok na »naravni« način v vsaki polperiodi izmeničnega toka in odklopnik bi lahko uspešno opravil izklop toka, če bi po prehodu toka skozi »naravno ničlo« obdržal tok na ničelni vrednosti še naprej. V tokokrogih z veliko razpoložljivo močjo (in z velikim razpoložljivim tokom  $I_p$  v kratkem stiku) pa bi izklop trajal že predolgo in bi bil vpliv preobremenitve z jouskim integralom (integral  $I^2t$ ) in z konično vrednostjo  $I_D$  prepuščenega toka že kritičen. Zato odklopnik pri operaciji izklopa omeji tok po amplitudi (ki je bistveno manjša od amplitude izmeničnega toka) in po času

do prve tokovne ničle (bistveno krajši od trajanja polperiode izmeničnega toka), po kateri mora biti tok prekinjen, to je: ostati na vrednosti nič. Izklop je opravljen z učinkom »tokovne omejitve« /1/.

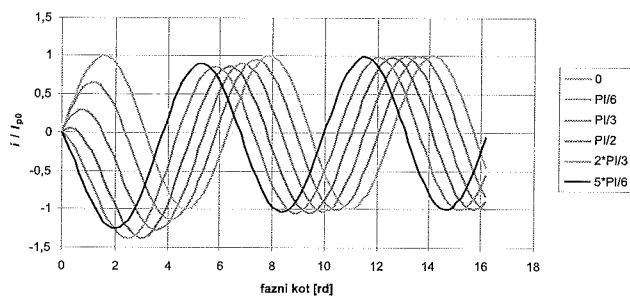
Časovni potek prepustnega toka od trenutka, ko se kontakti odklopnika začnejo odpirati, je odvisen predvsem od naraščanja napetosti med kontakti. Režo med razmikajočima se kontaktoma kontaktnega para takoj premesti električni oblok. Kot aktivno komponento tokokroga ga izkoristimo za omejitev prepustnega toka izklopa /2/.

Delovanje odklopnika v nenormalnih stanjih v tokokrogu, npr. pri kratkem stiku, ne moremo poljubno preskušati »in situ«, ampak v simuliranih razmerah, kar lahko opravljamo v specializiranih preskuševališčih. Tak laboratorij razpolaga z viri izmeničnega enofaznega ali trifaznega toka velike kratkostične zmogljivosti z možnostjo nastavitve razpoložljivega toka na nekaj 10 kA ali celo več kot 100 kA in z nastavitvijo preskusne napetosti do 1000 V. Preskusni

tokokrog, v katerem preskušamo delovanje odklopnika, vsebuje ohmske in induktivne komponente, s katerimi simuliramo razmere v realnem tokokrogu v kratkem stiku. Pogoje preskusa glede na namen odklopnika podajajo ustrezni elektrotehniški standardi /3/, /4/. S posebnim stikalom lahko vklopimo preskusni tok pri vnaprej izbranem faznem kotu sinusne napetosti vira, s čimer simuliramo nastanek kratkega stika pri poljubnem tokovnem faznem kotu.

## 2. Potek izklopa s tokovno omejitvijo

Sposobnost odklopnika, koliko velik kratkostični tok še uspešno prekine in ostane v stanju delovanja, je podana z njegovo kratkostično izklopno zmogljivostjo. Zmogljivi odklopniki opravijo izklop v prvi polperiodi izmeničnega toka. Tokokrogi, ki dajo v kratkem stiku večji razpoložljivi tok (prospective current)  $I_p$ , imajo zaradi večje induktivne komponente impedance manjši faktor moči, toda amplituda toka v prvi polperiodi je lahko večja od amplitud v naslednjih periodah. Pri tokih nad 10 000 A pri nekaterih faznih kotih začetka kratkega stika je povečanje amplitude znatno. Na grafu Slike 1 je računsko simuliran vklop toka v pretežno induktivnem tokokrogu pri faktorju moči 0,3 in pri različnih vklopnih faznih kotih. Prva amplituda pri neugodnem vklopnem faznem kotu naraste glede na ostale za faktor 1,3.



Slika 1: *Vklop toka v pretežno induktivnem tokokrogu (faktor moči 0,3) pri različnih vklopnih faznih kotih, računsko simulacija*

Pri nenadnem povečanju toka, ki ga povzroči nenormalno stanje v tokokrogu, odklopnik reagira samodejno: pri nastavljenem faktorju nadtoka, ki je običajno med 10- in 15-kratnikom toka normalne obremenitve, sproži mehanizem za odpiranje kontaktov. Poleg tega ne glede na nastavljeno prožilno vrednost se na kontaktnem paru v stiku poveča odrivna sila zaradi toka, ki teče skozi majhno stično ploskev med kontaktnima površinama in ta prevlada nad silo kontaktnega stiska, tako da razmakne (odpre) kontaktni par (contact blow-off) /5/. V odklopniku za tok delovanja v normalnem stanju pri 25 A se odskok kontaktov zgodi pri trenutni vrednosti toka kakih 1000 A. Vgrajeni magnetni sprožnik deluje z nekaj več zakasnitve od trenutka, ko trenutna vrednost toka preseže nastavljeno vrednost: udarna igla kotve nadtokovnega magnetnega sprožnika, ki jo požene magnetno polje toka v njegovi tuljavi, pospeši odpiranje gibljivega kontakta do hitrosti nekaj m/s. Hkrati sprosti še napeto vzmet mehanizma za izklop, ki požene

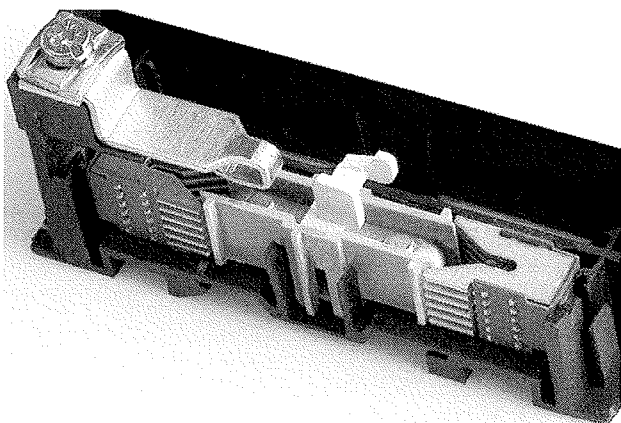
vklopno-izklopno ročičje, da dokončno razmakne kontakte in jih obdrži odprte na ustrezni medkontaktni razdalji izklopljenega stanja. Ta zadnji proces je zaradi vztrajnosti relativno velikih mas mehanizma najpočasnejši, vendar poteka v časovnem merilu milisekunde. Skupni učinek zaporednega delovanja vseh navedenih izklopnih dejavnosti je velika hitrost pri odpiranju gibljivega kontakta, ki doseže ob ločitvi kontaktnega para od 2 m/s do 5 m/s, v izklopljenem stanju pa je med njima razmik od 9 mm do 10 mm.

V trenutku ločitve kontaktov napetost na kontaktnem paru takoj naraste na 10 V do 20 V in se na oscilogramu poteka napetosti na kontaktnem paru jasno opazi kot skokovita sprememba vrednosti. Velikost »stopnice« je odvisna le od vrste kontaktnega materiala, ker v reži velikosti 0,1 mm oblok gori v kovinskih parah s površine kontaktov. Med kontakti z materialom na osnovi srebra z dodatki, npr. Ag/Ni, Ag/C, in na bakru (Cu) znaša  $(16 \pm 1) V / 6/$ . Pri nekoliko večji reži velikosti kak milimeter napetost naraste na 30 V do 35 V; ta vrednost je odvisna tudi od vrste plina, ki obdaja kontakte, ker pri tej medkontaktni reži oblok gori pretežno v okoliškem mediju /7/. Dolžina obločnega stolpca reda velikosti 1 mm pri napetostnem gradientu približno 2 V/mm vzdolž reže /8/ prispeva k celotni napetosti zanemarljivo malo. Dokler dolžina obločnega stolpca ne preseže kritične vrednosti, je oblok zasidran med kontakte in se ga ne da speljati drugam.

Ko med odpiranjem kontaktov reža med kontaktnim parom naraste preko kritične dolžine (pribl. 2 mm), lastno magnetno polje obloka že lahko obločni stolpec ukrivi v lok ali del zanke in ta se pod vplivom magnetnega polja giblje v smeri Biot-Savartove sile po podaljških kontaktnih delov, kontaktnih »rogov« in obločnih letev. Potencialno razliko na kontaktnem paru z oblokom med njima podajamo kot »napetost obloka«. V začetku odpiranja kontaktov v stanju negibljivega obloka (1 ms do 2 ms od trenutka ločitve kontaktnega para) je približno sorazmerna naraščanju medkontaktna reže (po oceni  $2 V/mm \times 5 m/s$ ), v stanju gibljivega obloka, pa začne naraščati veliko hitreje. Značilni časovni potek napetosti obloka v stanju odpiranja kontaktov je razpoznaven na oscilogramih izklopa kot »stopnica« napetosti na kontaktnem paru pri prehodu napetostne razlike na sklenjenem kontaktnem paru zaradi toka skozi prehodno upornost na kontaktnem mestu, oz. pri zaprtih kontaktih, na napetost »kratkega obloka« pri ločitvi kontaktnega para. Pogosto namesto enega kontaktnega para v odklopniku uporabljamo dvojni kontaktni par, ki prekine tokokrog na dveh zaporednih mestih. Gibljivi kontaktni del, lahek in za mehansko izvedbo enostavnejši »kontaktni mostiček«, premosti dva mirujoča kontaktna dela, tako da nastaneta pri izklopu dva zaporedna obloka. Na oscilogramu obločne napetosti se pri ločitvi kontaktnega mostička od mirujočih kontaktov opazi dve zaporedni napetostni »stopnici«, visoki po kakih 15 V.

Med naraščanjem trenutne vrednosti toka se povečuje tudi presek električno prevodnega obločnega stolpca. Prosto goreči oblok ima pri toku reda 1 kA do 10 kA premer med 10 mm in 20 mm /9/. Kontaktna dele nizkonapetostnega

odklopnika obdajata bočno dve stranski steni, ki sta razmaknjeni za kakih 5 mm. Slika 2 prikazuje razporeditev sistema para mirujočih kontaktov (na sliki je zaradi preglednosti prikazan le eden od para) in kontaktnega »mostička«, vloženi med stranski steni, ki se na obeh koncih podaljšujeta v deion komori s paketom kovinskih lamel, med katere se oblok razdeli na delne obloke. Dvojni kontaktni par poskrbi, da pri razmaknitvi kontaktnega mostička nastaneta dva izklopna obloka, med vsakim kontaktnim parom eden. Vsak od njiju nekaj časa gori med razmikajočim se kontaktnim mostičkom in mirujočim kontaktnim delom enega in drugega para, potem pa se začeta bolj ali manj sočasno premikati proti koncema kontaktnega mostička in proti obema deion komorama. Pred vstopom v komoro oba obloka gorita v prostoru med stranskima stenama. Skozi vsakega od obeh obločnih stolpcev tedaj teče tok velikosti nekaj kA in glede na toku ustreznemu premeru prosto gorečega obloka, povzet iz /9/, lahko ugotovimo, da ga stranski steni omejujeta s precej manjšim razmakom in stiskata njegov presek. Oblok se ob stiku s steno učinkovito hladi, pri tem pa se material stene na površini segreje na nekaj 100°C. Taka temperatura presega mejo termične obstojnosti večine plastičnih mas. Površina stranskih sten začne emitirati snovne komponente z izparevanjem in ablacijo. Napetostni gradient obločnega stolpca se zaradi vpliva sten lahko precej poveča in s tem tudi celotna napetost obloka /10/.



Slika 2: Gibljivi kontaktni mostiček med stenama kontaktno-obločnega prostora z parom deion komor

Dokončno pa obločno napetost povečamo na željeno vrednost v deion komori, kjer oblok razdelimo na več zaporednih delnih oblokov. Napetost obloka  $U_{oblok}$  lahko uravnamo s številom lamel deion komore, ki določa število delnih oblokov  $n_{do}$ . Za oblok med jeklenimi lamelami z razmakom 2,5 mm je bila izmerjena napetost med 26,5 V in 27,5 V, pri ocenjenem gradientu 2,25 V/mm dolžine obloka /8/. Za delni oblok v deion komori nizkonapetostnega odklopnika, ki ima lamele običajno razmaknjene za 1 mm, lahko za oceno napetosti celotnega obloka  $U_{oblok}$  vzamemo napetost delnega obloka 28 V,  $U_{oblok}$  pa je v približku (1) sorazmerna številu delnih oblokov  $n_{do}$ :

$$U_{oblok} = 28 \cdot n_{do} [V] \quad (1)$$

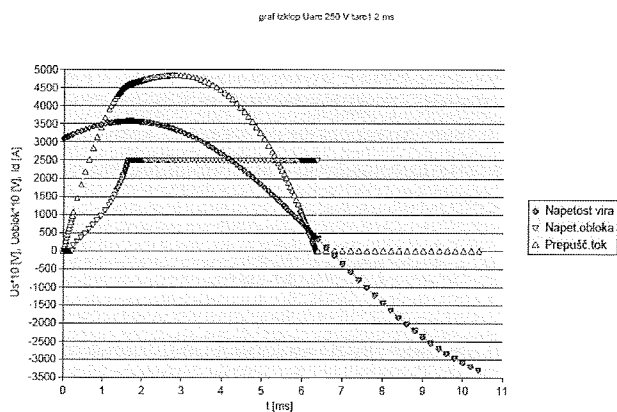
Velikost napetosti obloka v deion komori in čas, v katerem to vrednost doseže, pogojujeta učinek tokovne omejitve pri izklopu. Z njim želimo doseči omejitve konične vrednosti prepuščenega toka  $I_D$  in čim manjši jouski integral  $I^2t$ , ki je določen z (2):

$$I^2t = \int_0^{t_0} i^2 dt \quad (2)$$

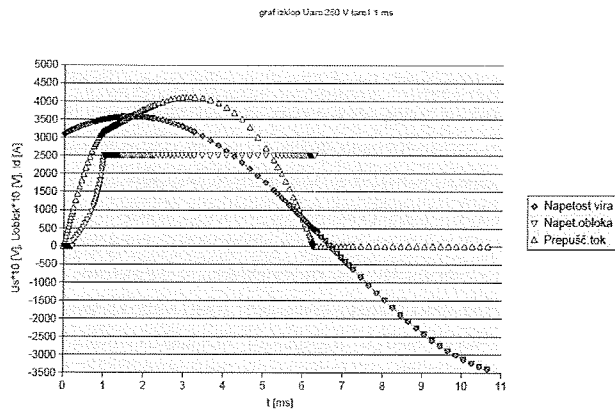
kjer je  $i = i(t)$  tok med skozi odklopnik od trenutka nastanka v času  $t = 0$  do trenutka  $t_0$ , ko  $i(t)$  doseže ničelno vrednost,  $i(t_0) = 0$ , in jo obdrži poljubno dolgo,  $i(t \geq t_0) = 0$ . Če je čas trajanja izklopa  $t_0$  krajši, je tudi vrednost  $I^2t$  običajno manjša.

### 3. Ocena vplivov obločne napetosti na tokovno omejitve

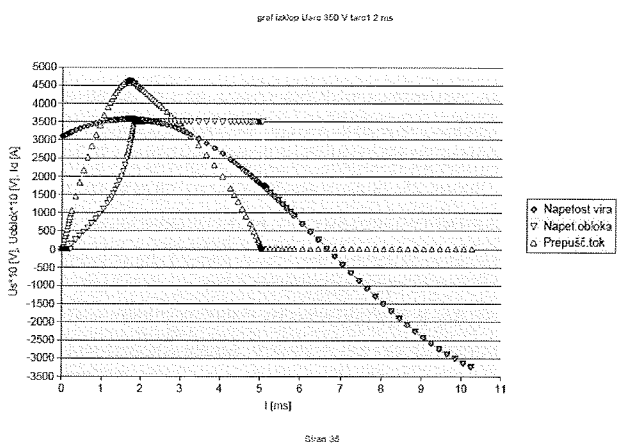
Vpliv velikosti napetosti obloka  $U_{oblok}$  in časa naraščanja  $u_{oblok}(t)$  do  $U_{oblok}$  na potek prepuščenega toka  $i(t)$  pokaže računski simulacija izklopa, kot je prikazana na Slikah 3a, 3b, 3c, 3d, 3e in 3f. S simulacijo so raziskane razmere v pretežno induktivnem tokokrogu, ki ga napaja vir izmenične napetosti 50 Hz z vrednostjo  $U_S = 230$  V in pričakovano variacijo + 10%, pri razpoložljivem toku  $I_p = 10$  kA, kjer je faktor moči 0,45 z pričakovanim odstopanjem - 0,05. V neugodnem primeru pri  $U_S = 253$  V, faktor moči 0,40 kratek stik nastopi pri napetostnem faznem kotu 60°. Stikalna pot skozi odklopnik ima neko impedanco, ki je pretežno ohmska in je določena z zgornjo mejo dopustne disipacije  $P \leq 2,0$  W pri nazivnem toku odklopnika  $I_n$ . Ko trenutna vrednost  $i(t)$  doseže 1000 A (izmerjeno v primeru obravnavanega tipa odklopnika), se zaradi elektrodinamičnega (blow-off) učinka kontaktni par loči, napetost med kontakti  $u_{oblok}(t)$  takoj naraste od 0 v  $t = 0$  na 15 V in narašča po  $t$  najprej linearno v skladu s predpostavko, da je v začetku odpiranje kontaktnega para linearno po času  $t$ , potem pa hitreje proti asimptotični vrednosti. Za presojo učinka hitrosti naraščanja  $u_{oblok}(t)$  proti  $U_{oblok}$ , je opravljena simulacija izklopa za asimptoto  $u_{oblok}(t) \rightarrow \infty$  pri 1 ms in pri 2 ms. Simulacija izklopa za obe predpostavljene vrednosti je prikazana na Slikah 3a, b in c za asimptoto  $u_{oblok}(t)$  pri 2 ms, na Slikah 3d, e in f pa pri 1 ms od nastanka kratkega stika. Po tem času se oblok nahaja v deion komori razdeljen med lamelami komore na delne obloke, zato je napetost obloka po času konstantna,  $u_{oblok}(t) = U_{oblok}$ . Vpliv vrednosti  $U_{oblok}$  je obdelana s simulacijo pri vrednostih 250 V, 350 V in 500 V. Te vrednosti so izbrane glede na izbrano napetost vira  $U_S = 253$  V: prva je približno enaka  $U_S$ , druga je blizu temenski vrednosti  $U_S$  (358 V), zadnja pa je približno enaka 2  $U_S$ . Rezultati simulacije za  $U_{oblok} = 250$  V so prikazani na grafih Slike 3a in Slike 3d, za  $U_{oblok} = 350$  V na grafih Slike 3b in Slike 3e, za  $U_{oblok} = 500$  V pa na Sliki 3c in Sliki 3f.



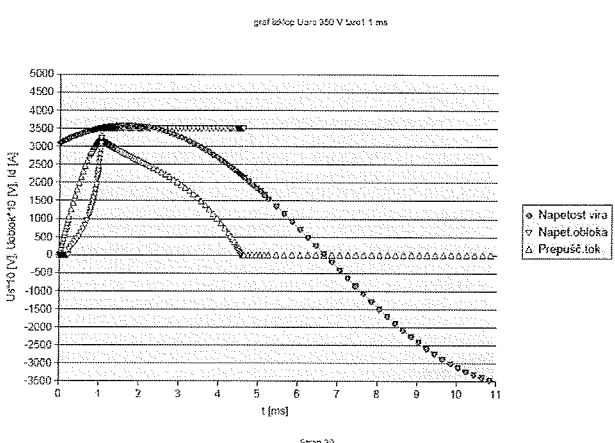
Slika 3a: Simulacija izklopa  $I_p = 10$  kA pri  $U_{oblok} = 250$  V, čas dviga  $u_{oblok} = 2$  ms.



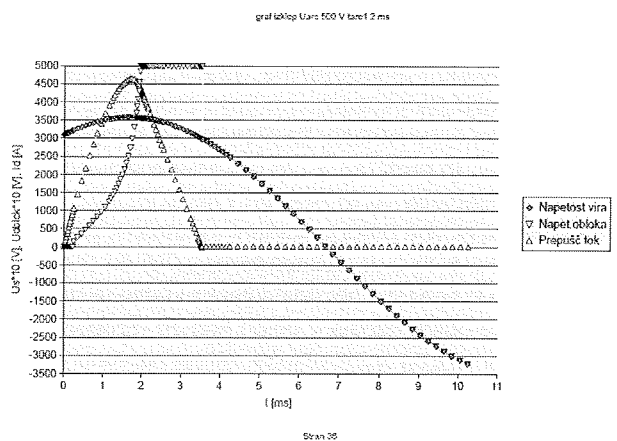
Slika 3d: Simulacija izklopa  $I_p = 10$  kA pri  $U_{oblok} = 250$  V, čas dviga  $u_{oblok} = 1$  ms.



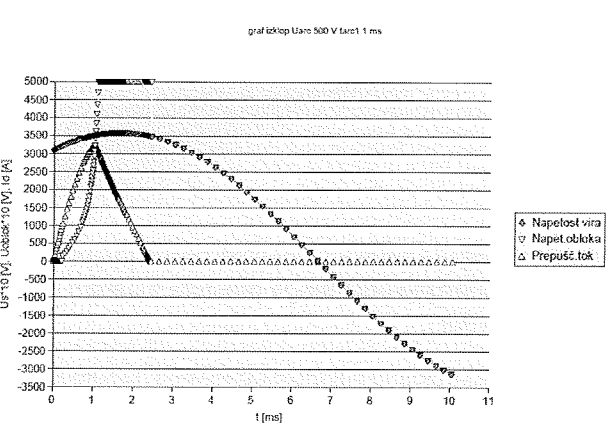
Slika 3b: Simulacija izklopa  $I_p = 10$  kA pri  $U_{oblok} = 350$  V, čas dviga  $u_{oblok} = 2$  ms.



Slika 3e: Simulacija izklopa  $I_p = 10$  kA pri  $U_{oblok} = 350$  V, čas dviga  $u_{oblok} = 1$  ms.



Slika 3c: Simulacija izklopa  $I_p = 10$  kA pri  $U_{oblok} = 500$  V, čas dviga  $u_{oblok} = 2$  ms.



Slika 3f: Simulacija izklopa  $I_p = 10$  kA pri  $U_{oblok} = 500$  V, čas dviga  $u_{oblok} = 1$  ms.

Pri presoji vplivov hitrosti razvoja obloka iz »kratkega« obloka do popolnoma na delne obloke v deion komori »razdeljnega« obloka iz rezultatov simulacije razberemo, da hitrost prehoda iz začetne faze obloka v končno vpliva predvsem na konično vrednost prepuščenega toka  $I_D$ , če

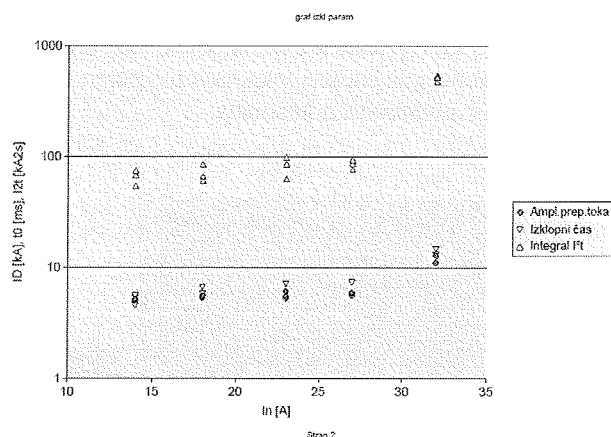
je  $U_{\text{oblok}} \geq U_S \cdot \sqrt{2}$ . Če torej  $U_{\text{oblok}}$  ne dosega vsaj temenske vrednosti vira  $U_S$ , je učinek tokovne omejitve pri izklopu majhen in izklop bo mogoč šele v trenutku blizu prve naravne ničle sinusnega toka. Pri večanju  $U_{\text{oblok}} \rightarrow 2 U_S$  je učinek tokovne omejitve že zelo velik, saj tok  $i(t)$  upada od  $I_D \rightarrow 0$  že s hitrostjo začetnega naraščanja proti  $I_D$ . Večji učinek tokovne omejitve v praksi ni sorazmeren vložku, s katerim bi ga dosegli. Da omejimo joulski integral izklopa  $I^2t$ , je treba predvsem zadostiti kriteriju, da je  $U_{\text{oblok}}$  večja ali vsaj približno enaka temenski vrednosti napetosti vira  $U_S$ , velikost  $I_D$  je v šibki korelaciji z vrednostjo  $I^2t$ . Zato pri izklopu izmeničnega toka 50 Hz (s polperiodo 10 ms) čas naraščanja obločne napetosti pod 1 ms nima odločilnega vpliva na vrednost  $I^2t$ , če vrednost  $U_{\text{oblok}}$  ne dosega kritične vrednosti, dokler ga omejujemo na vrednost, ki je za red velikosti manjša od trajanja ene polperiode izmeničnega toka. Pri ekstremno dolgih časih naraščanja  $u_{\text{oblok}}(t) \rightarrow U_{\text{oblok}}$  v trajanju 1/2 polperiode ali dalj, seveda učinek tokovne omejitve na velikost  $I^2t$  tudi pri preseganju kriterija za vrednost  $U_{\text{oblok}}$  nima uporabnega vpliva.

#### 4. Rezultati preskusov izklopa velikih tokov

Nizkonapetostni odklopniki za splošne namene zaščite inštalacij ali motorjev se izdelujejo za različne vrednosti nazivnih tokov. Za določeno območje nazivnih tokov, npr. po stopnjah za  $I_n$  od 2 A, 2,5 A, 4 A, 6,3 A, 10 A ... do zgornje vrednosti 25 A so istega tipa, to je iste velikosti in konstrukcije, za  $I_n$  od 63 A navzgor so drugega tipa, ki je večji in drugačne zgradbe. Zaradi funkcionalnih zahtev so včasih med različicami istega tipa, ki pripadajo različnim vrednostim  $I_n$ , nekatere razlike v materialu in izvedbi posameznih vgrajenih delov. Pri večjih vrednostih nazivnih tokov so potrebni večji preseki vodnikov ali termično bolj odporen material in podobno. Zaradi neizbežnega kompromisa pri spremembi materiala se včasih na preskušanju prototipov ali izdelkov v redni proizvodnji pojavijo neželeni stranski učinki.

Na osnovi rezultatov simulacije izklopa, kot so prikazani na Slikah 3(a ... f) so bile določene smernice za konstrukcijsko zasnovo kontaktno-obločnega sistema odklopnika za zaporedje nazivnih tokov  $I_n$  do 32 A. Odklopniki za nekaj največjih vrednosti  $I_n$  so bili preskušeni na kratkostično izklopno zmogljivost v laboratorijskih pogojih pri nastavljeni napetosti vira 253 V z razpoložljivim tokom  $I_p = 25$  kA. Preskusi izklopa so bili opravljeni pri vklopnih faznih kotih laboratorijskega »kratkostičnega« toka  $\alpha$ ,  $\alpha + 30^\circ$  in  $\alpha + 60^\circ$ . Kot  $\alpha$  je bil nastavljen na sinusoidi napetosti vira, vklopni fazni kot preskusnega toka pa je odvisen od faze difference med napetostjo in tokom v preskusnem tokokrogu. Pri vsakem preskusu izklopa (operacija »O«) je bil posnet oscilogram prepuščenega toka  $i(t)$ . Potek  $u_{\text{oblok}}(t)$  na oscilogramu ni bil registriran zaradi nevarnosti za merilni sistem, ker bi bilo treba za to meriti napetostno razliko med deloma kontaktnega para v prisotnosti obloka. Iz registriranih oscilogramov je bila določena vrednost  $I_D$ , iz-

klopni čas  $t_0$ , ki je časovni interval med vklopom preskusnega toka in dokončno prekinitvijo toka, ko tok doseže ničelno vrednost in ostane na tej poljubno dolgo, s pomočjo vgrajenega integratorja izračunan joulski integral  $I^2t$ . Preskus je bil opravljen na vsaj treh odklopnikih z istim nazivnim tokom. Za preskušance z  $I_n$  14 A, 18 A, 23 A, 27 A in 32 A so merski rezultati urejeni kot zveza med izklopnimi količinami in nazivnim tokom  $I_n$ :  $\{t_0, I_D, I^2t\} = f(I_n)$ . Grafično jih podaja Slika 4: za odklopnike nazivnih tokov  $I_n$  z vrednostjo 14 A, 18 A, 23 A, in 27 A korelacijo med izmerjenimi količinami  $t_0$ ,  $I_D$ ,  $I^2t$  in  $I_n$  lahko prikažemo kot funkcijsko zvezo. Za  $I_n = 32$  A pa rezultati odstopajo od te za več, kot je interval deviacije izmerjenih vrednosti.

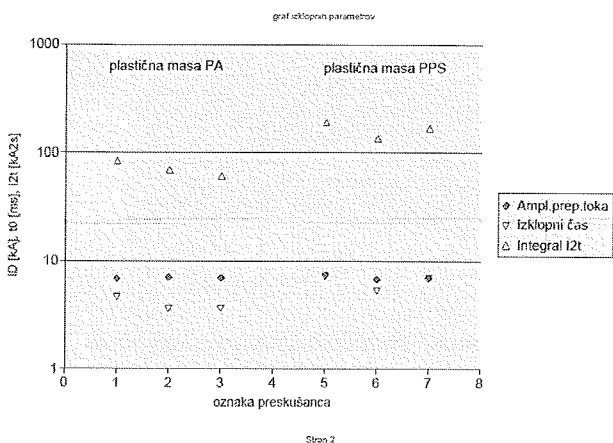


Slika 4: Vrednosti značilnih izklopnih količin za odklopnike z  $I_n = 14A, 18A, 23A, 27A$  in  $32A$

Razlog za opisano razlika je v zgradbi tipske različice odklopnika za  $I_n = 32$  A glede na različice za  $I_n < 32$  A, kar se odraža tudi v zveznem spreminjanju izklopnih količin  $t_0$ ,  $I_D$  in  $I^2t$  z  $I_n$  do 32 A in z nezveznostjo pri različici za 32 A. V tej je bilo treba zagotoviti večji kontaktni stisk in večjo odpornost kontaktov na zavaritev pri velikih tokih, zaradi velike termične obremenitve odklopnika pri nazivnih pogojih obremenitve pa je bilo treba izbrati za stene kontaktno-obločnega prostora in nosilec gibljivega kontakta termično odpornejši plastični material. Ta običajno v stiku z vročim obločnim medijem manj degradira in zato manj emitira v plazmo obloka. Eksperimentalni rezultati (Slika 4) kažejo, da so se pri odklopniku za 32 A vse vrednosti prikazanih izklopnih količin prekomerno povečale glede na pričakovane, ki bi jih dobili z ekstrapolacije rezultatov za 14 A, 18 A, 23 A in 27 A. S pomočjo rezultatov simulacije izklopa, prikazanih na Slikah 3 (a - f), presojamo, da je pri odklopniku za 32 A povečanje vrednosti  $I^2t$  verjetno posledica manjše  $U_{\text{oblok}}$ , kar hkrati podaljša tudi izklopni čas  $t_0$ , povečanje  $I_D$  pa posledica počasnejšega naraščanja  $u_{\text{oblok}}(t)$  do končne  $U_{\text{oblok}}$ , ki ga pogojuje počasnejše odpiranje kontaktov

Hipoteza, da ima v odklopniku za 32 A vgrajen plastični material za stene kontaktnega prostora manjši učinek gašenja obloka, je bila preverjena eksperimentalno na odklopniku za  $I_n = 18$  A. Ta v standardni izvedbi izkazuje dobro

izklopno zmogljivost, ki dobro korelira z rezultati preskusov na odklopnikih ostalih nazivnih vrednosti. Zato sta bili za preskus vpliva plastičnega materiala na izklopno zmogljivost odklopnika izdelani dve različici odklopnika za 18 A: prva, v kateri so bile stene kontaktno-obločnega prostora iz poliamida (PA) in druga, v kateri je bil uporabljen polifenilensulfid (PPS). V obeh različicah odklopnika za 18 A so bili izdelani po trije preskušanci ene in druge verzije in preskušeni pri enakih pogojih. Izmerjene vrednosti značilnih izklopnih količin  $t_0$ ,  $I_D$  in  $I^2t$  so prikazane na grafu Slike 5. Pri obeh verzijah je konična vrednost prepuščenega toka  $I_D$  v mejah merske nenatančnosti enaka. Vrednost  $I^2t$  pa je za preskušance z vgrajenim PPS materialom skoraj dvakrat večja, kot pri različici z vgrajenim PA materialom. Pri tem se je tudi izklopni čas  $t_0$  povečal iz povprečno 4 ms na povprečno 7 ms. Rezultati preskusa očitno kažejo kvalitativni vpliv materiala na stene kontaktno-obločnega prostora na izklopno zmogljivost odklopnika.



Slika 5: Odvisnost značilnih izklopnih količin  $t_0$ ,  $I_D$  in  $I^2t$  od vrste plastičnega materiala ob kontaktih, izklop  $I_p = 25$  kA

## 5. Sklep

Značilnosti izklopnega pojav pri preskusu kratkostične izklopne zmogljivosti se odražajo v oscilogramih časovnega poteka napetosti med kontakti in prepuščenega toka. Merjenje medkontaktne napetosti in napetosti obloka zahteva poseg v merjeni vzorec, ki ni zaželen, nevarno pa je tudi za

merilni inštrumentarij. Zato smo za razlago pojavov, ki so registrirani na oscilogramih, opravili še simulacijo izklopa z ad hoc računskim modelom. S hkratno obravnavo eksperimentalnih in simulacijskih rezultatov smo kvalitativno razpoznali vpliv plastičnega materiala za stene kontaktno-obločnega prostora na oblok pri izklopu kratkostičnega toka in izbrali za praktično uporabo ustrežnejši material.

## 6. Literatura

- /1/ M. Lindmayer: Schaltgeräte, Springer, 1987
- /2/ G. Burkhard: Schaltgeräte der Enenergiotechnik, 1. Auflage, VEB Verlag Technik, Berlin, 1985
- /3/ Standard SIST EN 60947-2: 2006, Nizkonapetostni odklopniki
- /4/ Standard SIST EN 60898-1: 2004, Inštalacijski odklopniki
- /5/ E. Vinaricky: Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen, 2. Auflage, Springer, 2002
- /6/ A. Erk, H. Finke: Über das Verhalten unterschiedlicher Kontaktwerkstoffe beim Einschalten prellender Starkstrom-Schaltglieder, ETZ - A 86 (1965), pp.297-302
- /7/ E. Vinaricky: Das Abbrand- und Schweissverhalten verschiedener Silber-Grafit-Kontaktwerkstoffe in unterschiedlichen Atmosphären, disertacija, TH Wien, 1994
- /8/ H. Klepp: Über den Einfluss der Löschkammerkonstruktion auf die Lichtbogelöschung in Schützen grosser Nennstromstärken, disertacija, TU Carolo-Wilhemina, Braunschweig, 1982
- /9/ P. G. Slade: Electrical Contacts, Marcel Dekker, 1999
- /10/ M. Bizjak: Model ablacijsko stabiliziranega obloka v odklopniku, disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, 1992

dr. Martin Bizjak, univ. dipl. ing. fizike  
 R&R, Iskra MIS, d. d.  
 Ljubljanska cesta 24a  
 4000 Kranj  
 e-mail: martin.bizjak@iskra-mis.si

Prispelo (Arrived): 02.09.2008

Sprejeto (Accepted): 09.06.2009