

VAKUUM KAO MEDIJ GAŠENJA ELEKTRIČNOG LUKA

Branimir Galić¹, Krešimir Meštrović²

¹KONČAR – Električni aparati srednjeg napona

²Tehničko veleučilište u Zagrebu

Sažetak

Sklopni aparati su jedan od najvažnijih čimbenika zaštite u rasklopnim postrojenjima srednjeg napona, a posebno od struja kratkoga spoja. Budući da se u velikom dijelu EES Hrvatske još uvijek koriste i starije tehnologije, zbog starenja opreme se pri odabiru opreme za obnovu ili gradnju novih postrojenja od posebnog su značaja dva faktora: Ekonomska i tehnička opravdanost, odnosno povećanje pouzdanosti u rasklopnom postrojenju za uspostavljanje, održavanje i prekidanje kontinuiteta i diskontinuiteta električnih strujnih krugova u elektroenergetskim sustavima.

Nezamjenjiv medij za gašenje električnog luka na području srednjeg napona je vakuum (aparati s vakuumskim komorama). Uporaba vakuumskih prekidnih komora u strujnim putevima sklopnih aparata važan je čimbenik suvremenih rješenja za pravilno funkcioniranje i pogonsku sigurnost elektroenergetskoga susutava i sustava zaštite. U vrijeme porasta interesa za zaštitu okoliša neupitna je i njihova ekološka podobnost.

Vakuumske komore imaju izvanredna svojstva i karakteristike gašenja električnoga luka zbog visoke probojne čvrstoće vakuuma na relativno malom razmaku kontakata, te su kao takve danas nezamjenjive u području sredjenaponskih sklopnih aparata, a sve intenzivnije ulaze i na područje visokog napona [3].

Ključne riječi: vakuum, vakuumska komora, princip gašenja električnog luka, geometrija kontakata, kontakti materijal

Abstract

The switching apparatus are the most important protection factor of and the choice of new equipment the two factors are the most important: economy justifiability and increased reliability of the network, for current interruption and ensuring the continuity of the supply.

Vacuum (vacuum interrupter) is an unavoidable medium of electric arc quenching in medium voltage networks. Use of vacuum interrupters in power current paths of electrical switching appa-

ratus is important factor of the up-to-date solutions for correct function and operational safety of electrical network, as well as protection system. The environment compatibility of vacuum interrupter is also unquestionable, which is important fact in times of rising interest for ecology friendly solutions.

Vacuum interrupters have excellent technical performances and arc-quenching characteristics, due to high dielectric (breakdown) strength at relatively small contact distance. They are irreplaceable in medium voltage apparatus and recently more often used in high voltage apparatus [3].

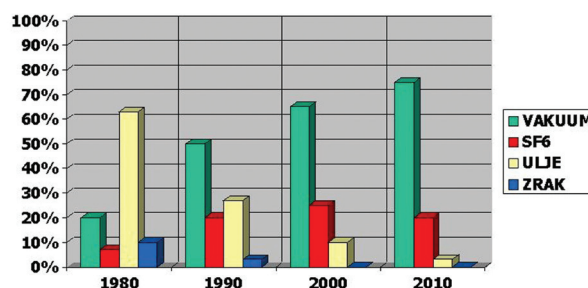
Key words: vacuum, vacuum chamber, arc extinguishing principle, contact geometry, contact material

1. UVOD

Mediji gašenja električnoga luka koji su prethodili vakuumu su bili : zrak (zračni prekidači), hidrin (hidromatski prekidači), SF6 plin i ulje (malouljni prekidači).

U usporedbi sa ovim medijima gašenja električnoga luka vidi se da su vakuumski prekidači slika 1 i 2, dakle vakuumska tehnika najzastupljeniji aparati na području srednjega napona gdje su potisnuli gotovo sve ostale tipove odnosno medije gašenja luka što se vidi iz Grafa 1. Na području srednjega napona ne vidi se za sada drugi bolji medij gašenja luka [3].

Tablica 1. Zastupljenost sklopnih tehnika u svijetu





Slika 1. Vakuumski prekidači serije VK24 kV



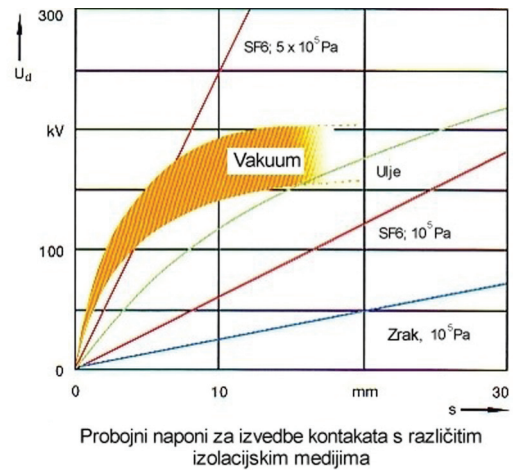
Slika 2. Vakuumski prekidači serije V 38 kV

Osim u klasičnim vakuumskim prekidačima vakuumske komore se danas koriste i u sklopnim modulima izoliranim SF6 plinom raznih neproširivih i proširivih izvedbi i parametara kako u prekidačkom dijelu tako i u tropoložajnim sklopkama- slika 3

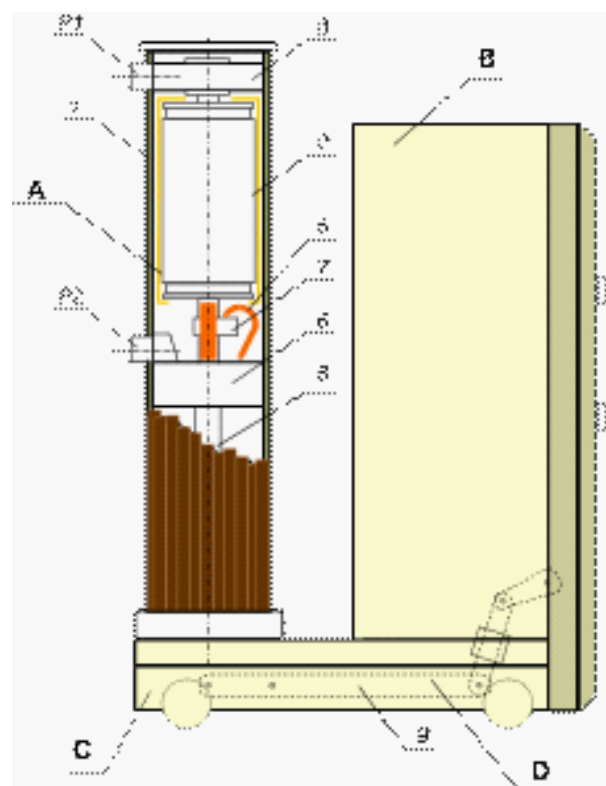


Slika 3. Prikaz složene konfiguracije VDAP aparature u TS 10(20)/0,4 kV- tvornica stočne hrane Varaždin

Na slici 4 je prikazana međuovisnost kontaktnog razmaka i probojne čvrstoće za razne medije s napomenom da se dielektrična čvrstoća vakuuma vrlo malo povećava s povećanjem razmaka samih kontakata [2].



Slika 4. Ovisnost probojnog napona u raznim medijima



Slika 5. VK prekidač - prikaz sastava

1. Izolacijski cilindar od epoksidne smole armirane stakle
2. Vakuumska lučna komora
3. Čvrsti nosač
4. Fleksibilni kontakt (bakrena pletenica ili fleksibil)
5. Kućište donjeg priključka
6. Nastavak pomičnog kontakta vakuumske lučne komore
7. Izolacijska vezna motka
8. Klackalica

Električni luk se razlikuje od drugih lukova koji

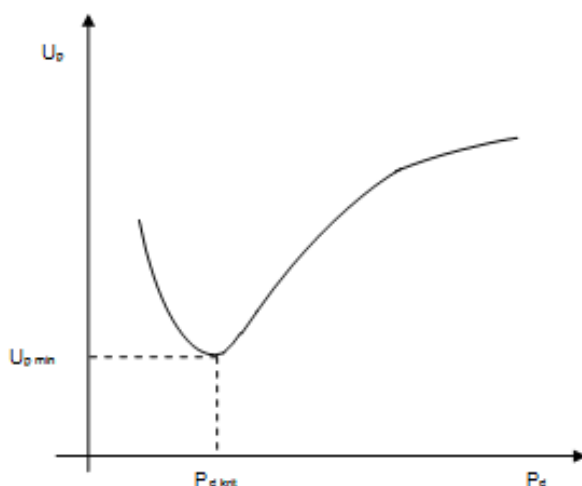
gore u nekom plinu (zrak, vodik, SF6 po tome što su mu napon i trajanje relativno mali pa je i energija luka relativno mala.

Kod vakuumskih prekidača je razmak kontakata puno manji nego kod maloljnih pa je i energija pogonskih opruga potrebna za gibanje kontakata puno manja što zapravo produžuje vijek trajanja mehanizma pa time i prekidača.

Iz svih navedenih usporedbi proizlazi da je vakuum do sada najbolji medij za gašenje električnoga luka koji u odnosu na druge medije ima slijedeće karakteristike:

- najveći broj sklapanja nazivne struje
- manju energiju luka u odnosu na druge
- veću mehaničku trajnost
- prekidače sa manje dijelova
- manja potreba za održavanjem
- bolja probojna čvrstoća
- vrijeme gašenja električnog luka kod nazivnog i isklapanja struja kratkog spoja su puno kraći nego kod drugih medija
- čišća okolina

Prve ideje o upotrebi vakuuma i prekidanju struje u njemu te za gašenje električnoga luka javljaju se krajem 19. stoljeća Paschenovim otkrićem ovisnosti veličine preskočnog napona između dviju elektroda koje se nalaze u homogenom električnom polju o umnošku tlaka i razmaka između tih elektroda (Paschenov zakon).
nim vlaknima



U_p – probojni napon

P_d – umnožak tlaka i razmaka elektroda

$U_{p\ min}$ – minimalna probojna čvrstoća

$P_{d\ krit}$ – kritični umnožak tlaka i razmaka kontakata

Znači da višim tlakom plina (p), a za isti razmak kontakata (d) raste probojni napon U_p

$$U_p = f(p \cdot d)$$

Slika 6. Opći oblik krivulje Paschenovog zakona

Iz slike 6 se vidi da je probojna čvrstoća ($U_{p\ min}$) minimalna kod tzv. kritičnog umnoška tlaka i razmaka elektroda ($P_{d\ krit}$).

Prva sustavna istraživanja vakuuma u tom smjeru počela su 1920. godine, a tri godine kasnije i eksperimentalna ispitivanja, no prva komercijalna i ozbiljna upotreba te razvoj vakuuma i vakuumskih komora započeli su tek nakon 1960. godine. Izraz vakuum označava svaki medij čiji je tlak ispod normalnoga atmosferskoga tlaka 760 mm stupca žive odnosno Pa. Vakuum se dijeli na visoki vakuum u području od Pa do Pa i na ultra visoki vakuum za područje ispod Pa [1].

1.1. Svojstva vakuuma i prekidanje struje u vakuumu

Proces sklapanja se odvija u vakuumu koji se kreće od 10^{-1} do 10^{-6} (Pa) i naziva se područje visokoga vakuuma.

Smanjivanjem tlaka raste srednji slobodni put čestica odnosno prosječna udaljenost koju prolazi atom, ion, molekula plina ili elektron u plinskom mediju prema izrazu:

$$l_{sr} = \frac{5,64}{\pi \sigma d^2} \text{ (m)}$$

gdje su:

l_{sr} - srednji slobodni put (m)

σ - gustoća medija ()

d - promjer čestice (m)

U visokom vakuumu je srednji slobodni put velik pa kod određenog nivoa vakuuma postaje veći od razmaka između kontakata tako da se samo nekoliko od mnoštva (milijuna) elektrona sudaraju s molekulama i stvaraju ione. To je zapravo glavni

razlog visoke probojne čvrstoće vakuuma kao medija gašenja luka na relativno malom razmaku kontakata [2].

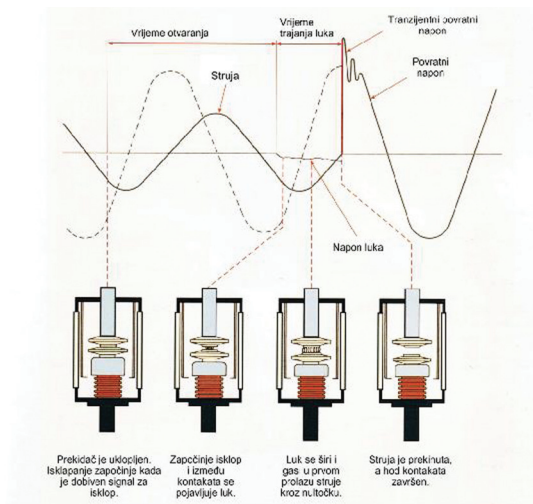
Međutim ovdje treba napomenuti da se za razliku od ostalih medija, dielektrična čvrstoća vakuuma povećava vrlo malo s povećanjem razmaka kontakata, te je to ograničenje glede visine napona koji se može koristiti na prekidnom mjestu. Ovisnost probojne čvrstoće međukontaktne razmaka za razne medije prikazan je na slici 4. Zbog toga je za sada vakuum još uvijek najzastupljeniji u području srednjega napona [2].

Princip prekidanja izmjeničnih električnih strujnih krugova u vakuumskim komorama započinje tako što se nakon razdvajanja kontakata u komori pali električni luk, a koji gori do prolaza struje kroz prirodnu nul točku, a gasi se prije zaustavljanja pomičnoga kontakta u njegovome krajnjem isklonnom položaju.

Takav proces prekidanja kao i prijelazne pojave koje se javljaju u tom procesu, prikazani su na slici 7 na kojoj se vidi da kroz komoru teče struja od trenutka davanja naloga za isklon (a) do trenutka otvaranja kontakata (b), kada se pojavljuje električni luk određenog napona i trajanja (c), a kojim i dalje teče struja do njegovoga prolaska kroz nul – točku (d) gdje se luk gasi i struja prekida.

Nakon prekida struje između otvorenih kontakata komore pojavljuje se prijelazni povratni napon vlastite frekvencije koji se ubrzo stabilizira i ostaje kao povratni napon industrijske frekvencije na otvorenim kontaktima prekidača [1].

TRANZIJENTNI = PRIJELAZNI POVRATNI NAPON



Slika 7. Proces prekidanja izmjenične struje u vakuumskoj komori

Kao što je navedeno do prekidanja strujnoga kruga dolazi mehaničkim – galvanskim razdvajanjem kontakata kojom prilikom između njih nastaje električni luk.

U izmjeničnom strujnom krugu upravo električni luk osigurava da se struja ne prekine trenutno jer bi u tom slučaju nastali veliki prenaponi, koji su štetni za kontakte i aparat, nego da luk prirodno po sinusoidi dođe u nulu. U trenutku kad struja prolazi kroz nulu luk se sam gasi i treba osigurati da se ponovno ne upali.



Slika 8. Presjek vak.komore i komore spremne za montažu

Na slici 8 prikazana je vakuumaska komora u presjeku i komore kakve se ugrađuju u sklopne aparate.

U sklopnim modulima „Končar“ se električni luk gasi u vakuumskim komorama, a plin SF₆ (sumporni heksafluorid) se koristi samo kao medij naponske izolacije za međuizolaciju dijelova pod naponom i prema zemlji. Iz toga razloga ne dolazi do onečišćenja ni kontakata, niti samoga plina što je ekološki prihvatljivo.

Današnje vakuumske komore koriste čeonni tip kontakata i djelovanje magnetskog polja na električni luk između kontakata. Glavna karakteristika električnog luka u vakuumu su katodne mrlje koje se gibaju vrlo brzo i nasumice po površini katode. Nositelj struje su elektroni, a ne ioni kao kod SF₆ plina ili zraka.

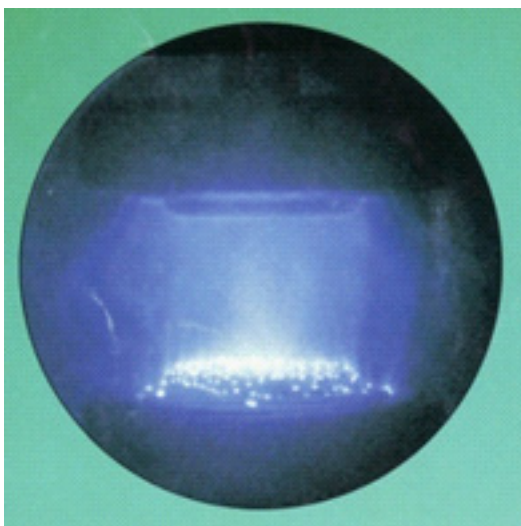
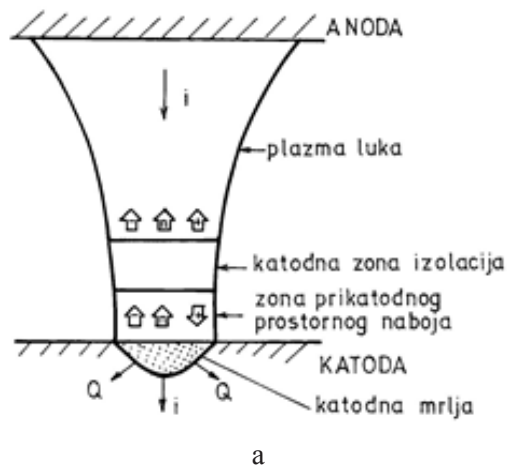
Za male struje do 150 A glavni izvor električnog luka leži u materijalu koji se ispari iz katode – metalne pare koje su nositelj električnog luka, a uslijed visoke temperature katodnih mrlja (užarene katodne mrlje).

Struja elektrona ionizira neutralne metalne čestice koje se emitiraju isparavanjem iz katodne mrlje i time stvara ioniziranu zonu iznad katodne mrlje.

Kod ovih malih struja postoji samo jedna katodna mrlja iz koje se vrši emisija elektrona i neutralnih čestica.

Za struje do 8 kA (porastom struje) katodna mrlja

se dijeli u više katodnih mrlja. Svaka od njih nosi svoj dio struje i kreće se nekontrolirano po površini katode. U prostoru između nje i anode formira se homogena plazma, a anodna struja je raspršena po cijeloj površini anode. Luk koji pri tome nastaje zove se difuzni luk (Slika 9 a i b) [1,2].



Slika 9. a) Shematski prikaz održavanja vakuumske b) Difuzni luk luka malih struja

Difuzni oblik je posljedica suprotnog djelovanja vlastitog magnetskog polja koje u blizini katode steže strujne silnice luka (pinch-efekt) i tlaka nastalih metalnih para koji ga nastoji proširiti. Kod malih struja luk obično gori kao difuzni dok kod velikih struja gori kao koncentrirani luk. Koncentrirani luk u vakuumu ima vrlo malu prekidnu moć, a difuzni luk vrlo veliku prekidnu moć. Za struje veće od 8 kA povećava se utjecaj magnetskog polja struje na putanje elektrona i iona, koje se počnu savijati. Time je srednji slobodni put elektrona smanjen te sudari čestica postaju vjerojatniji i učestaliji.

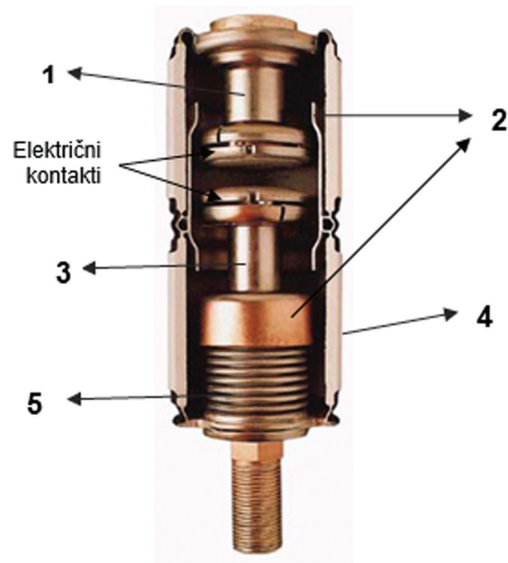
Luk se počinje sužavati i na katodi i na anodi – stvaraju se skupine katodnih mrlja koje se kreću po površini katode.

1.2. Vakuumska komora i geometrija kontakata

Vakuumske komore za sklopne aparate su jednostavne konstrukcije no izuzetno sofisticirane u pogledu specifične tehnologije izrade i upotrebe specifičnih materijala, njihovoga spajanja, vakuumiranja i ispitivanja.

Sastavni dijelovi vakuumske komore:

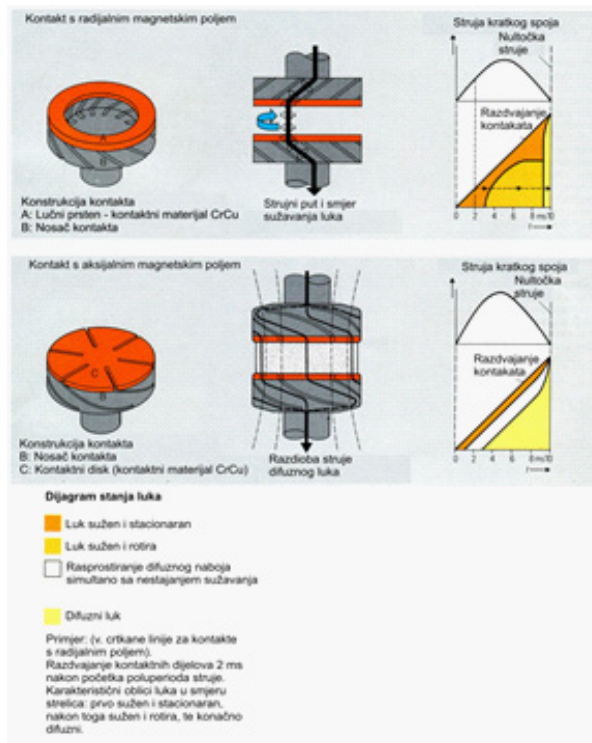
- 1 = nepomični kontakt
- 2 = čelični cilindar-zaslon za kondenzaciju metalnih para i zaštitu mjeha
- 3 = pomični kontakt
- 4 = keramički plašt (izolacijsko kućište)
- 5 = metalna membrana (mijeh) pomičnog kontakta



Slika 10. Osnovni oblik vakuumske komore za prekidače

Materijal za izradu izolacijskih kućišta je u većini slučajeva aluminij-oksidna keramika, tzv. korundom keramika (Al_2O_3). Ima vrlo veliku tvrdoću u odnosu na staklo, nepropusnost, ne upija vlagu, otporna je na termičke šokove itd. Gledajući na geometriju kontakata rade se takvi koji stvaraju DIFUZNI luk – koji osigurava smanjeno trošenje kontakata (struje < 10 kA). Radi se naime o pojavi odnosno načinu stvaranja el. luka koji se u silnicama (strujnicama) raspršuje po površini kontakata i time se olakšava njegovo gašenje u odnosu na prva rješenja komora u ko-

jima se stvara KONCENTRIRANI luk (struje >10 kA) koji praktički nastaje u jednoj točki odnosno giba se po rubu kontakata te ga je teško ugasiti, stradavaju oba kontakta zbog velike količine metalnih para, a i sami prenaponi na taj način su veći nego u komorama sa difuznim lukom.



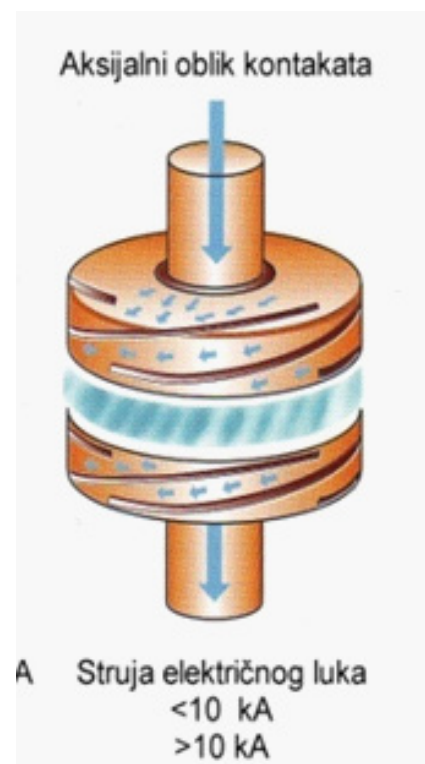
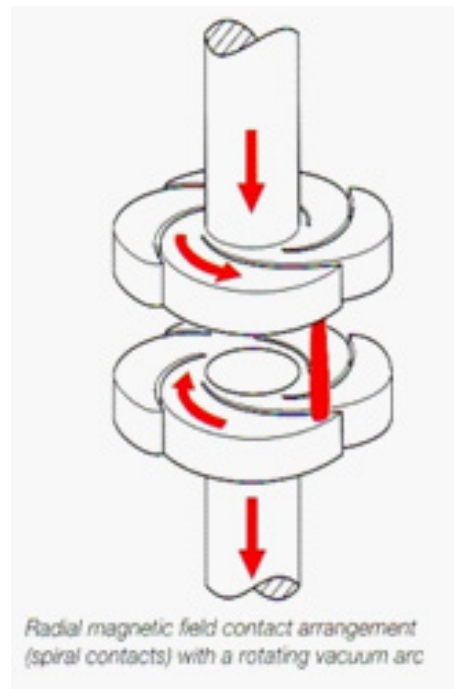
Slika 11. Prikaz kontakata s radijalnim i aksijalnim magnetskim poljem

Ovisno o samoj geometriji kontakata u primjeni su izvedbe kontakata koje stvaraju tri vrste magnetskih polja. To su kontakti koji stvaraju:

Radijalno magnetsko polje - je polje vlastite strujne petlje. U tu svrhu se koriste spiralni kontakti. Električni luk se potiskuje na vanjske rubove spirale čime se onemogućuje gašenje (prekidanje) luka na jednome mjestu već se cijela površina elektrode koristi kao lučna površina odnosno rotacija luka po cijeloj površini. Struja se prekida praktički u prvoj nul točki zbog velike brzine pomicanja luka pa anoda ostaje hladna. Ovo se polje odnosno geometrija kontakata najčešće koristi (Slika 11 i 12a).

Aksijalno magnetsko polje - je polje koje osigurava stabilni difuzni oblik el. luka u obliku mnoštva manjih lukova raspršenih po cijeloj površini elektrode što omogućava njegovo efikasno gašenje čak i kod velikih struja (struje kratkog spoja) uz minimalno razaranje kontaktnih površina (Slika 11 i 12b).

Radijalno magnetsko polje se koristi za velike struje, a aksijalno za najveće struje.

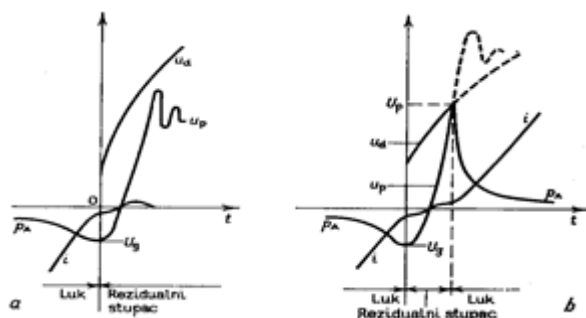


Slika 12. a) Spiralni kontakt – princip gašenja luka b) Aksijalni oblik kontakata radijalnim magnetskim poljem

Tangencijalno magnetsko polje – vlastite strujne petlje generiraju koso segmentirani kontakti – središnji dio kontakta je u obliku diska s prstenom oko udubljenja, a prema van su istaknuti kosi spiralni izdanci. Magnetsko polje zarotira električni luk u procesu njegovoga prekidanja i tako onemogućuje gorenje na jednome mjestu [1,4].

1.2.1. Gašenje električnoga luka – energija prekidanja

Za uspješno gašenje električnoga luka odnosno za prekidanje struje kruga – prema „Slepianovoj teoriji utrke“ potreban je brzi porast dielektrične čvrstoće između kontakata tako da krivulja probojnog napona U_d uvijek bude iznad krivulje povratnog napona U_p kako je prikazano na krivuljama (Slika 13a).



Slika 13. a Uspješno prekidanje luka b Neuspješno prekidanje luka

Slika 13a prikazuje uspješno prekidanje luka dok je na slici 13b prikazano neuspješno gašenje luka odnosno krivulja povratnog napona je u jednom trenutku dostigla krivulju probojnog napona i došlo je do ponovnog paljenja električnoga luka Pa i ponovnog toka struje i [2].

Probojni napon (U_d) je visina napona kod kojega je došlo do proboja materijala (veličina električnog polja gdje dolazi do proboja)

Povratni napon (U_p) je napon koji se javlja na stezaljkama sklopnog aparata neposredno nakon gašenja električnoga luka.

Rezidualni stupac je ionizirani prostor za koji je mjerodavna prekidna struja – koja je efektivna vri-

jednost simetrične komponente struje u trenutku paljenja luka.

Zaključak: gašenje luka se događa kada se rezidualnom stupcu naglo poveća otpor i dielektrična čvrstoća te se tako onemogućiti ponovno paljenje luka.

1.2.2. Energija uklapanja

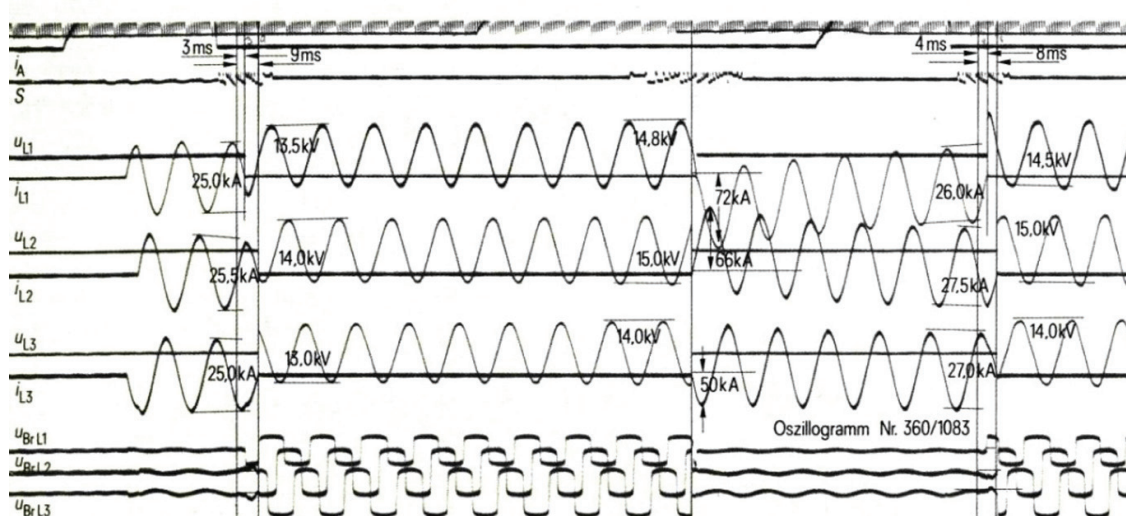
Energija uklapanja je energija koja se razvija tijekom gorenja luka, a koji se pojavljuje u trenutku uklapanja sklopnog aparata odnosno kontakata komore kada se kontakti toliko približe da dođe do pojave luka – to je probojni razmak i traje do galvanskog spoja kontakata, a ova pojava se naziva pretpaljenje luka. Ta energija je određena izrazom:

$$W_{Aukl} = \int_0^{t_A} E_A(t) (a - v_k t) i(t) dt \text{ (J)}$$

gdje su:

- $E_A(t)$ gradijent luka (V/m) – napon luka u vremenu t /duljina luka
- a probojni razmak (m) (ovisi od medija za gašenje)
- v_k brzina gibanja kontakata (m/s)
- $t_A = a / v_k$ vrijeme gorenja luka (s)
- $a - v_k t = l_a$ duljina luka (m)

Kod sklapanja izmjeničnih veličina vrlo je važno trajanje luka ograničiti na manje od četvrtine periode ($t_A \ll 1/4f$), zato da bi uklapanje u slučaju kratkoga spoja završilo prije nego što struja naraste na vrijednost udarne struje kratkoga spoja. Znači da brzina uklapanja treba biti: $v_k \gg 4af$ [2].



Slika 14. Oscilogram uspješnog sklapanja struje kratkoga spoja

Praktično je iskustvo kod vakuuma kao medija gašenja luka da se luk ne može ugasi ako je nul točka naišla odmah nakon otvaranja kontakata jer se oni moraju razmaknuti za min. 2-3 mm da bi se uspostavila potrebna probojna čvrstoća među kontaktima. Kod trolnih prekidača nije naročito bitno kada će nastupiti otvaranje kontakata jer ta prirodna nul točka nailazi svakih 3,3 i više ms i ima dovoljno vremena da ona naiđe u nekoj od faza te da se luk ugasi prije nego se kontakti zaustave.

Na slici 14 prikazan je oscilogram uspješnog sklapanja struje kratkoga spoja od 25 kA na nazivnom naponu 24 kV u ciklusu automatskog ponovnog uklopa (O-0,3s-CO) [3].

Gdje je:

i_A	impuls za sklapanje
s	gibanje (priključena je naprava za mjerenje gibanja)
$i_{L1,L2,L3}$	isklopna struja
$u_{L1,L2,L3}$	povratni napon
$u_{Br L1,L2,L3}$	napon luka

Iz oscilograma se vidi da je kod prvog isklopa struja i_{L1} u fazi L1 došla u 0 nakon 3 ms, a luk se ugasio nakon 9 ms. U drugom isklopu struja je došla u 0 nakon 4 ms, a luk je trajao 8 ms. Sve se to odvijalo do približno polovine putanje (s) gibanja kontakata na razmaku od oko 6 mm iza toga [3].

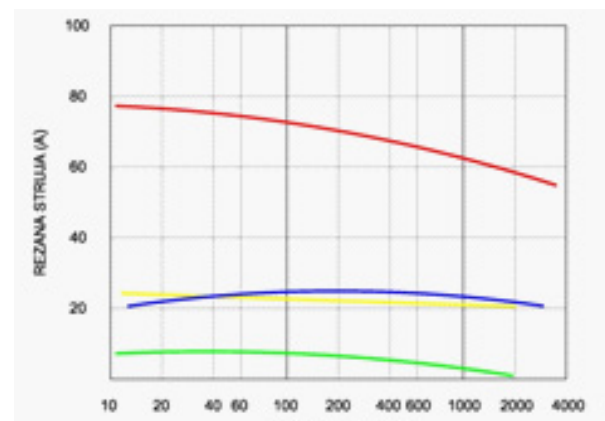
1.2.3. Rezanje struje u vakuumu

Velike prekidne moći vakuumskih komora postižu se ravnomjernom raspodjelom toplinske energije koja nastaje gorenjem luka, a time i njenim smanjenjem. Za kontakte je najvažnije osigurati njihovo minimalno trošenje uslijed djelovanja električnoga luka i minimalno rezanje struje. To smanjeno trošenje kontakata se osigurava difuznim lukom, a minimalno rezanje struje održavanjem stabilnog luka. U tu svrhu se danas za izradu kontakata koristi tzv. čeon tip kontakata i djelovanje magnetnog polja na električni luk između kontakata [2]. Rezanje struje je pojava koja se javlja kada kod prekidanja struje paralelno s procesima ionizacije teku u električnom luku i procesi deionizacije i kondenzacije metalnih para.

U vremenu kad struja poprima niske vrijednosti, procesi deionizacije prevladaju nad procesima ionizacije, te luk postane nestabilan i struja se prisilno prekine prije njenog prirodnog prolaska kroz nulu. Posljedica rezanja struje u induktivnom

krugu (prekidanje induktivnih struja motora ili transformatora) su prenaponi, što je negativna pojava u strujnim krugovima jer predstavlja opasnost za izolaciju ostalih elemenata mreže odnosno postrojenja.

S primjenom suvremenih kontaktnih materijala opasnosti od posljedica rezane struje su smanjene u odnosu na klasične tehnike prekidanja. Primjenom „tvrđih“ kontaktnih materijala se može trajanje oscilacije nestabilnosti luka svesti na vrijeme blisko nuli odnosno može se postići trenutno prekidanje luka [2].



■	Pneumatski prekidač
■	Malouljni prekidač
■	SF6 prekidač
■	Vakuumski prekidač

Slika 15. Ovisnost rezane struje o induktivitetu mreže kod raznih vrsta prekidača

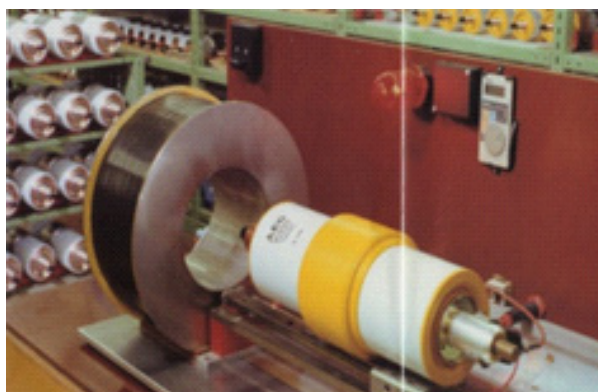
Kod vakuumskih prekidača rezana struja ovisi o kontaktnom materijalu, a vrlo malo gotovo neznačajno o parametrima mreže, kako je prikazano na slici 15.

Na slici 15 prikazana je ovisnost visine rezane struje o induktivitetu mreže za različite izvedbe prekidača. Materijali kontaktnih elektroda su legure izrazito vodljivih materijala Cu-Cr tako da su prenaponi unutar dozvoljenih granica. Ranija tehnologija kontaktnih elektroda Cu-Bi je izazivala relativno visoke rezane struje tj. visoke prenapone pa su se morali ugrađivati i odvodnici prenapona kako bi se isti sveli u podnošljive granice.

1.2.4. Vijek trajanja vakuumskih komora

Vijek trajanja vakuumskih komora određen je s dva aspekta:

1. vremensko trajanje
 2. broj sklapanja
1. s vremenskog aspekta vijek trajanja određuje kvarenje vakuuma, ono je uzrokovano propusnošću koja ako je 10-13 Pa l/s garantira vijek trajanja komore od minimalno 30 godina. Provjera razine vakuuma i propusnosti vakuumskih komora se provodi tijekom i završetkom proizvodnje, korištenjem uređaja (leak detektor) temeljenom na magnetronskom izboju koji mjeri rezidualni tlak i propusnost plina (slika 16).

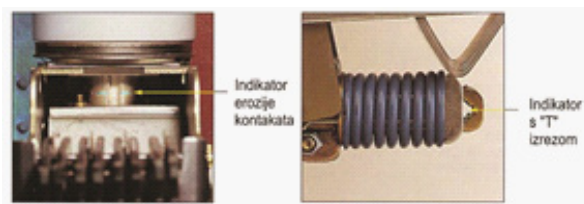


Slika 16. Izgled magnetrona AEG

2. Sklapanja nazivnih struja, a naročito struja kratkoga spoja dovode do trošenja kontakata. Trošenje kontakata od npr. 3 mm omogućuje prosječnoj komori oko 10 000 ciklusa sklapanja nazivne vrijednosti struje i 100 ciklusa sklapanja maksimalne struje kratkoga spoja.

Za kontrolu istrošenosti koristi se par metoda prikaza utonuća kontakata od njihove početne veličine – nove komore:

- a) na pomičnom isklopljenom kontaktu se nalazi crta koja kada uroni u komoru označava da je kontakt toliko istrošen da treba mijenjati komoru i to sve tri za trolpolni prekidač.
- b) Postoji i prikaz istrošenosti kontakata na kontaktnoj opruzi
- c) Prikaz istrošenosti na prednjoj strani prekidača sistemom klackalice koja je na jednoj strani vezana za pomične kontakte, a na drugoj nosi kazaljku sa oznakom min – za početno stanje i max – za istrošene kontakte (slika 17 a,b,c) [5].



Slika 17. Pokazivač istrošenosti kontakata u vakuumskoj komori

1.2.5. Röntgensko zračenje vakuumskih komora

Općenito se röntgensko zračenje pojavljuje na blizu postavljenim elektrodama koje se nalaze u vakuumu, a na njih je narinut visoki napon. U skladu s time postoji standard za vakuumske komore koji govori o dozvoljenoj granici zračenja i opisuje ispitivanja novih komora gdje se propisuje ispitivanje dielektričke čvrstoće s 75 % vrijednosti ispitnog napona kako bi se izbjegla opasnost od röntgenskog zračenja za osoblje koje ispituje. Za vrijeme normalnoga rada, električno polje koje postoji u vakuumu ne proizvodi štetno röntgensko zračenje [5].

1.3. Odskakivanje kontakata

Odskakivanje kontakata je nepoželjna pojava, kao i naknadno otvaranje (popping) jer izaziva iskrenje prilikom razdvajanja kontakata. Naime prilikom uklapanja prekidača odnosno struje svako odskakivanje kontakata nakon uspostave galvanske veze izaziva paljenje luka, a to znači uništavanje kontaktne površine i brzo trošenje kontakata. To može dovesti i do zavarivanja kontakata i funkcionalnih problema u tom pogledu. Kada se sudare dva tijela s različitim početnim brzinama nemoguće je da na mjestu dodira ostanu u kontaktu ako ne dođe do gubitka kinetičke energije. Ako kontakti ne ostanu u dodiru dolazi do odskakivanja.

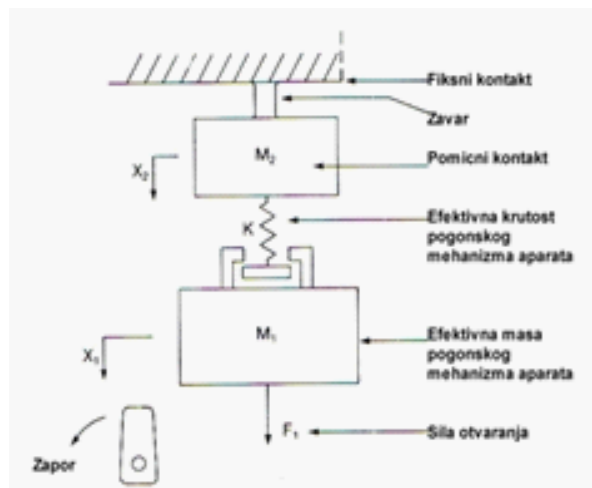
Da bi se to spriječilo ugrađuju se na osovinu opruge za dodatni kontaktni pritisak odnosno dodatnu kontaktnu silu koja omogućuje nesmetano proticanje struje kratkoga spoja, te sprečavanja odskakivanja i autorepulzije. Isto tako da bi se spriječio problem odskakivanja

u isklupu na pogonski mehanizam odnosno glavnu osovinu montira se hidraulički amortizer koji apsorbira kinetičke energije pri isklupu. Ukoliko je povratno odbijanje kontakata preveliko, ugroženo je uspostavljanje dielektrične čvrstoće između kontakata.

Zavarivanja kontakata pri proticanju struje je u većoj ili manjoj mjeri neizbježno i posljedice zavarivanja kontakata su pozitivne sa stanovišta protoka struje, ali aparat mora biti u stanju prekinuti var u trenutku kad je dobiven nalog za isklup. Gotovo univerzalan način lomljenja zavarenih kontakata je udarac. Prilikom zatvaranja kontakata aparata, mehanizam nastavlja gibanje i nakon što su se kontakti dodirnuli, da bi se ispraznile opruge i proizvela neophodna dodatna kontaktna sila koja sprečava otvaranje kontakata u situacijama naglog porasta struje. Također, prilikom otvaranja kontakata aparata, mehanizam ostvaruje taj isti put prije nego pomični kontakt započne svoje gibanje. Neposredno prije razdvajanja kontakata, značajna količina kinetičke energije već je uskladištena u pokretnim dijelovima pogonskog mehanizma. Ta energija koristi se za raskidanje zavarenih točaka na kontaktima i djeluje na pomični kontakt koji se odvaja od fiksnog kontakta. Akcija je impulsna.

Slika 18 prikazuje model prekidača za analizu kidanja zavarenih kontakata u kojemu su uzeti u obzir svi ključni elementi [3].

- F_1 = sila isklupne opruge
 M_1 – masa pogonskog mehanizma
 M_2 – masa pomičnog kontakta
 K = ekvivalentna krutost pogonskog mehanizma prekidača



Slika 18. Model prekidača za analizu kidanja zavarenih kontakata

1.4. Kontaktni materijali za vakuumske prekidače

Od materijala za kontakte vakuumskih prekidača traže se slijedeća svojstva:

- podnositi visoke napone bez pojave autoelektronske emisije (nastaje kada je jakost polja u blizini katode reda veličine 10 kV/cm pa elektroni bivaju iščupani iz katode [6])
- gorenje luka ne smije bitno utjecati na geometriju kontakata
- osigurati prekidanje velikih struja ali i malo rezanje struje
- malo trošenje kontakata
- visoka otpornost na zavarivanje
- mali sadržaj plinova u strukturi kontaktnog materijala
- dobra električna vodljivost [2].

Tablica 2. Kontaktni materijali

KONTAKTNI MATERIJALI ZA VAKUUMSKE KOMORE			
Materijal	Primjena	Karakteristike	Tipične nazivne vrijednosti
WCuAg	SKLOPNICI	Mala struja rezanja (ispod 1,5 A) Jednostavno rukovanje pri proizvodnji komora	Niski napon Visoki napon < 7,2 kV
WCu	SKLOPNICI	Malo zavarivanje, niska erozija Visoka dielektrična čvrstoća	Do 12 kV Prekidna moć 12 kA
		RASTAVNA SKLOPKA	Do 36 kV Uklonna moć 20 kA
	WCu30	Optimirana dielektrična čvrstoća Optimiran kontaktni otpor	
	WCu20 WCu30Sb1	Mala erozija Optimirano zavarivanje Optimirana struja rezanja	Niski napon Prekidna moć 12 kA
Mo disk / Sb - Bi	SKLOPNICI	Vrlo mala struja rezanja (ispod 1 A)	Niski napon Visoki napon < 10 kV
CuCr	PREKIDAČI	Visoka prekidna moć	12 kV / 50 kA (80 kA) (*) 36 kV / 25 kA
		Mali kontaktni otpor	Nazivna struja > 3000 A
		Malo zavarivanje Optimirana dielektrična čvrstoća	Nazivni napon > 36 kV

(*) Aksijalno magnetsko polje

U praksi sve te tražene uvjete ne može zadovoljiti niti jedan materijal kao jedinka, već se koriste kombinacije raznih materijala – legure (glavni sastojak je Cu, a ostali se dodaju za povećanje otpornosti prema varenju, mehaničke čvrstoće, smanjenje struje rezanja. Cu-Bi; Cu-Sn; Cu-Pb; Cu-Pb; Cu-Cr i drugi) ili kao kombinacija vatrostalni materijal + dobar vodič (W-Cu; Mo-Cu). Tu se radi o njihovom sinteriranju, nevatrostalni materijal + dobar vodič (Cr-Fe-Co, i Ni-Cu-Cr) i čisti metali i njihove legure (Cu nije prikladan za trajno zatvorene kontakte, ali se primjenjuje za klizne kontakte u aparatima bez intenzivnog luka, Ag – za trajno vođenje struje, ima svojstvo rekuperacije - ponovno taloženje isparenog metala na kontaktne plohe u zraku - koja omogućuje da se poveća električna trajnost aparata. Legirani materijali – imaju bolje mehaničke osobine i veću kemijsku otpornost, ali nižu električnu vodljivost i talište, a to su (Ag-Ni, Ag-Cd, Ag-Pd) [2, 3].

U Tablici 1 dat je prikaz optimalnog izbora materijala prema vrsti sklopnog aparata i nazivnim parametrima komora, a na slici 19 su prikazani metalni prahovi Cu i Cr i kontaktna pločica koja se dobije postupkom sinteriranja (miješanja prahova Cu i Cr pod visokim tlakom).



Slika 19. Metalni prahovi Cu i Cr te sinterirana kontaktna pločica

Ta kombinacija se danas najviše koristi jer daje kvalitetnu strukturu kontakata (glatki bez šiljaka i risova koji smanjuju dielektričnu čvrstoću), Cr spušta maks. vrijednost rezane struje od 16A kod čistog Cu na manje od 5A. Idealan omjer je 1:1 – kod nižeg udjela Cr je iskrenje, a višeg: krhkost, manja el. i termička vodljivost. Od sintera se

izrađuju samo dijelovi kontakata (skupo je) koji su izloženi zavarivanju i nagananju [2, 3].

2. ZAKLJUČAK

Sklopni aparati i moduli za gradnju sklopnih postrojenja srednjeg napona kod svih svjetskih proizvođača ovakve opreme temeljeni su na suvremenim medijima za gašenje električnog luka i održavanje dielektričnih karakteristika (ultravio-soki vakuum i elektronegativni plinovi, krute i polukrute izolacije).

Nove principe gradnje sklopnih aparata i postrojenja, koji bi naglo smijenili ovaj pristup gradnji nije za očekivati tako skoro, pa većinu pažnje proizvođači ovakve opreme pri razvoju novih proizvoda u svijetu posvećuju njihovom minimiziranju i automatiziranju te korištenju vakuuma kao medija gašenja električnog luka, a u cilju što racionalnije proizvodnje i minimalnim potrebama za eksploatacijskim održavanjem.

Prikazan je i analiziran tehnološki i generacijski razvoj te princip gašenja električnog luka u vakuumu kao i prikaz zbivanja u komori tijekom gašenja luka, kontakti materijali i problemi, a iz čega se zaključuje da je tehnika visokog vakuuma najbolji način gašenja električnog luka u današnje vrijeme na području sredjenaponske sklopne tehnike.

Svakako je ovdje prisutan i naglašen ekološki aspekt ovakvog medija.

3. LITERATURA

- [1] R. Milošević: „Električni sklopni aparati srednjeg napona za unutarnju upotrebu“, Končar-EASN, Zagreb, 1996
- [2] K. Meštrović: „Sklopni aparati srednjeg i visokog napona“, Graphis, Zagreb, 2007.
- [3] R. Milošević: „Vakuumski električni sklopni aparati“, Graphis, Zagreb, 2011.
- [4] R. Milošević: „Mehanizmi električnih sklopnih aparata“, Graphis, Zagreb, 2004.
- [5] R. Milošević, Ž. Bago: „O nekim osobitostima vakuumskih sklopnih aparata“, 2. Savjetovanje CIRED, Umag 2010.
- [6] I. Uglešić: „Tehnika visokog napona“, FER, Zagreb 2002.

AUTORI



Dr. sc. Krešimir Meštrović- nepromjenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design Vol. 1, No. 1, 2013.



Branimir Galić rođen 01.10.1956. godine u Zagrebu, Hrvatska. Srednju elektrotehničku školu u Zagrebu – Klaićeva ulica, završio 1976 godine, a na višoj elektrotehničkoj školi u Zagrebu diplomirao 1979. godine (jaka struja).

Nakon diplome zaposlio se u „Končar-srednjenaponski aparati“, koji su sada „Končar-Električni aparati srednjeg napona“ gdje radi i danas. Na Tehničkom veleučilištu je diplomirao 2012. godine na katedri sklopni aparati Dr.sc. Krešimira Meštrovića te stekao titulu stručnog specijaliste inženjera elektrotehnike. Tijekom radnoga staža radio je dvije godine u pripremi specijalnih malouljnih prekidača, četiri godine u završnoj kontroli kvalitete posebno na razvojnom ispitivanju vakuumskih sklopnika nazivnog napona 7,2 kV, te svestrano izoliranih postrojenja. Više od 23 godine operativno vodi servis i logistiku sklopnih aparata srednjega napona u tvornici i postrojenjima u Hrvatskoj i svijetu. Zadnje vrijeme je rukovoditelj odjela kontrole kvalitete i servisa. Više od 24 godine vodi poslove remonta srednjenaponskih aparata u NE Krško.

Pohađao niz specijaliziranih seminara i tečajeva iz područja nuklearne energetike, za vodeće inženjere montaže, auditore sustava kontrole kakvoće i dr. Autor je i koautor nekoliko članaka objavljenih u knjizi, časopisima, znanstvenim i stručnim konferencijama i skupovima.