

# Ispitivanje naponsko-termičke izdržljivosti kablova sa ekstrudiranim izolacijom primenom modela kabla sa tanjom izolacijom

Miroljub Jevtić, Jordan Radosavljević

Fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica

Kosovska Mitrovica, Srbija

e-mail: miroljub.jevtic@pr.ac.rs

**Sadržaj** - U radu je razrađena i primenjena metoda ispitivanja dugotrajne naponsko-termičke izdržljivosti srednjenaaponskih kablova sa ekstrudiranim izolacijom. Propisima IEC 62067 i IEC 60840 i preporukama CIGRE TB 303 i CIGRE TB 496 predviđena su ispitivanja naponsko-termičke izdržljivosti kablova. Ova ispitivanja se primenjuju samo pri osvajanju nove tehnologije ili konstrukcije kabla i novog izolacionog materijala jer su skupa i dugotrajna (traju do 1 godinu). U ovom radu se predlaže metoda ispitivanja naponsko-termičke izdržljivosti kabla prema kojoj se ispitivanje vrši na kablu sa tanjom izolacijom u odnosu na izolaciju realnog kabla. Na taj način se za kraće vreme, primenom nižih ispitnih naponova i sa manjim troškovima dobija kriva veka trajanja modela kabla. Rezultati ovih ispitivanja primjenjeni su za upoređenje različitih kablovskih izolacija u pogledu naponsko-termičke izdržljivosti. Statističkim proračunom, uvažavajući različitost debljina izolacije, dobija se kriva veka trajanja realnog kabla.

**Ključne reči** - naponsko-termička izdržljivost; kabl; vek trajanja; ekstrudirana kablovska izolacija.

## I. UVOD

Srednjenaaponski i visokonaaponski kablovi sa ekstrudiranim izolacijom su u masovnoj primeni ali još uvek postoje ograničena iskustva u pogledu njihove pouzdanosti i veka trajanja tokom dugogodišnjeg rada. Zbog toga se uvođe nova ispitivanja vremena trajanja koja se vrše jednom, pre isporuke određenog tipa kabla, i zahtevaju dugo vreme i skupu opremu. Standard IEC 62067 [1] i Tehnička preporuka CIGRE TB 303 [2] propisuju takva ispitivanja pri čemu se uzorci kablova podvrgavaju dugotrajanom dejstvu (do 1 godine), istovremeno, povišenog napona i cikličnog zagrevanja. Na osnovu rezultata ispitivanja procenjuju se parametri starenja i vreme trajanja kablova.

U ovim standardima se pretpostavlja (na osnovu potvrda u literaturi) da se promena napona probroja kabla u funkciji vremena trajanja kabla odvija prema tzv Inverznom eksponencijalnom modelu (Inverse Power Model) [3] i to kako za slučaj dugotrajanog rada kabla u eksploataciji tako i za slučaj ispitivanja sa povišenim naponom i sa cikličnim zagrevanjem kabla. Inverzni eksponencijalni model glasi:

$$t_T = t_0 \left( \frac{U_T}{U_0} \right)^{-n} = t_0 (K_T)^{-n} \quad (1)$$

gde je:  $t_T$  - trajanje ispitivanja;  $t_0$  – predviđeno vreme trajanja kabla u eksploataciji;  $U_0$  - nominalni fazni napon kabla;  $U_T$  – dovedeni napon kabla tokom ispitivanja;  $n$  – eksponent veka trajanja ili "koeficijent napomske izdržljivosti" i  $K_T$  – faktor ispitnog napona ili "koeficijent starenja". Prema zadatim uslovima ispitivanja u standardu IEC 62067, primenom Inverznog eksponencijalnog modela za visokonaaponske kablove sa polietilenskom izolacijom vrednost  $n$  se dobija na sledeći način. Zadata vrednost napona  $U_T$  je  $U_T = 1,7 U_0$  a zadato trajanje ispitivanja je  $t_T = 1$  godina (8760 časova) [1]. Garantovano vreme trajanja kabla u eksploatacionim uslovima treba da bude  $t_0 = 40$  godina. Kada se ove vrednosti uvrste u izraz (1), dobije se potrebna vrednost  $n \approx 7$ . Prema podacima u Tehničkoj preporuci CIGRE TB 496 [4], na sličan način, za visokonaaponski kabl jednosmernog napona dobija se  $n = 10$ . U standardu [1] daje se i način primene i broj termičkih ciklusa pri zagrevanju kabla tokom ispitivanja. U radu [3] se razmatraju broj i vremenske varijacije trajanja ciklusa zagrevanja kabla tokom ispitivanja i njihovog uticaja na vreme trajanja kabla. Ova dugotrajna i skupa ispitivanja predviđena su samo pri osvajanju novog tehnološkog postupka izrade kabla, pri novoj konstrukciji kabla ili pri uvođenju novog izolacionog materijala. Zbog toga su proizvođači kablova izbegavali da ponavljaju ispitivanja kako ne bi pokvarili dobijene rezultate i kako bi smanjili troškove ispitivanja.

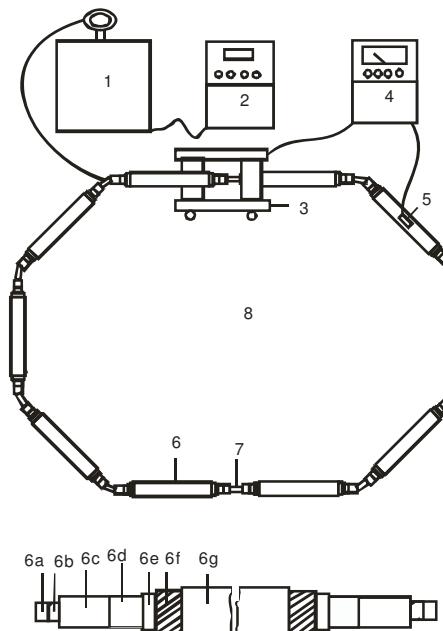
Da bi se proizvođači kablova stimulisali da ćešće vrše ovakva ispitivanja pouzdanosti kablova (u uslovima bliskim eksploatacionim) donete su dopune i korekcije postojećih propisa i tehničkih preporuka [5], [6] koje ublažavaju zahteve iz prethodnih propisa.

Autori ovog rada i radova [7], [8] su razvili metodu dobijanja krive veka trajanja srednjenaaponskih kablova (do 35 kV) sa ekstrudiranim izolacijom na bazi ispitivanja modela kabla sa tanjom izolacijom u odnosu na izolaciju stvarnog

kabla. Ispitivanja se vrše sa povišenim naponom i istovremenim cikličnim zagrevanjem a dobijena kriva veka trajanja se podvrgava inverznom eksponencijalnom zakonu. Ovakav model i postupak ispitivanja omogućuju da se umesto složene i skupe opreme za komplikovano i dugotrajno ispitivanje naponsko-termičke izdržljivosti realnih kablova primene relativno jednostavnija oprema i jednostavniji model za ispitivanje iz kojeg se statističkim proračunom [7] može dobiti i kriva veka trajanja realnog kabla. Na ovaj način se mogu upoređivati različiti izolacioni materijali kablova, konstrukcije i tehnološki postupci izrade u pogledu dugotrajne izdržljivosti na istovremeno dejstvo povišenog napona i cikličnog termičkog naprezanja.

## II. ISPITNI UREĐAJ, POSTUPAK I REZULTATI ISPITIVANJA

Uređaj koji je u ovom radu primjenjen za ispitivanje dugotrajne naponske i termičke izdržljivosti i procenu vremena trajanja srednjenačinskih kablova sa ekstrudiranim izolacijom prikazan je na Sl. 1a. Na Sl. 1b prikazan je ispitni odrezak kabla sa smanjenom debljinom izolacije.



Slika 1 Blok šema uređaja za ispitivanje dugotrajne naponske i termičke izdržljivosti kablova sa smanjenom debljinom izolacije. 1 - rezonantni naponski uredaj za dovođenje napona odrescima kabla; 2 - pult za podešavanje dovedenog napona odrescima kabla; 3 - strujni transformator za zagrevanje odrezaka kabla pomoću struje; 4 - pult za podešavanje struje odrezaka kabla; 5 - termopar za merenje temperature izolacije odrezaka kablova; 6 - odresci kabla koji su međusobno povezani u prsten (8); 7 - spojne čaure odrezaka; 6a - provodno uže kabla; 6b - prvi slaboprovodni sloj; 6c - izolacija; 6d - poluprovodni premaz za oblikovanje polja u izolaciji; 6e - drugi slaboprovodni sloj; 6f - električna zaštita; 6g - plašt kabla.

Navedeni kabl smanjene debljine izolacije, prikazan na Sl. 1b izrađen je istim tehnološkim postupkom i od istih materijala, kao standardni kabl odgovarajućeg preseka i razlikuje se od standardnog kabla po debljini izolacije koja je manja i iznosi 0,9 mm do 1 mm. Ovakvim konstruktivnim

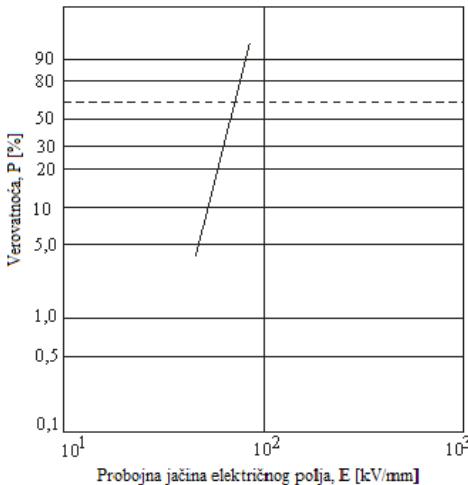
rešenjem kabla na kome se sprovodi postupak dobija se: (i) mogućnost dobijanja krive veka trajanja standardnog kabla iz krive veka trajanja kabla sa manjom debljinom izolacije zbog jednakih rasporeda i gustina linija električnog polja u izolacijama, primenom matematičke statistike i verovatnoće; (ii) mogućnost dobijanja probajnih napona i vremena probaja kablovskih odrezaka, u toku postupka, u ekonomski opravdano vreme i bez primene skupih kablovskih završetaka koji su zamenjeni poluprovodnim premazom za oblikovanje električnog polja na krajevima slaboprovodnih slojeva i (iii) mogućnost upoređivanja različitih izolacija kabla u pogledu trajne naponske i termičke izdržljivosti.

Navedenim uređajem, sprovoden je postupak za određivanje veka trajanja srednjenačinskog kabla sa polimernom izolacijom na sledeći način:

1. Biraju se dužine i broj odrezaka kabla gore navedene smanjene debljine izolacije, zavisno od tehničkih karakteristika rezonantnog naponskog uređaja. Najmanja dozvoljena dužina odreska kabla iznosi 2,5 m a najmanji broj odrezaka u jednom uzorku je 12 komada. Na Sl. 1b prikazan je jedan odrezak kabla predložene smanjene debljine izolacije, koji je pripremljen za sprovođenje postupka. Odresci kabla navedene smanjene debljine izolacije, su prethodno ispitani prema standardu koji važi i za standardni kabl i moraju zadovoljiti zahteve istog.
2. Određuju se dielektrične čvrstoće, tj. probajne jačine električnog polja, na pojedinim odrescima kabla smanjene debljine izolacije, odabranog uzorka od 12 do 20 odrezaka pomoću rezonantnog naponskog uređaja. Ovakav tip naponskog uređaja se koristi zato što se pomoću njega mogu dobiti visoki naponi na izolaciji odreska, dovođenjem odreska, koji je kapacitivni elemenat, u rezonansu sa promenljivom prigušnicom u uređaju, koja je induktivni elemenat. Postupak određivanja dielektrične čvrstoće izolacije odrezaka kontinualnim povišenjem napona do probaja vrši se pojedinačno na svakom odresku iz odabranog uzorka. Brzina povišenja napona do probaja podešava se na pultu za podešavanje napona, prikazanom na Sl. 1, i iznosi 1 kV/s a frekvencija napona je 50 Hz. Iz dobijenih vrednosti probajnih napona izračunavaju se probajne maksimalne jačine električnog polja prema izrazu:

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R}{r}} \quad (2)$$

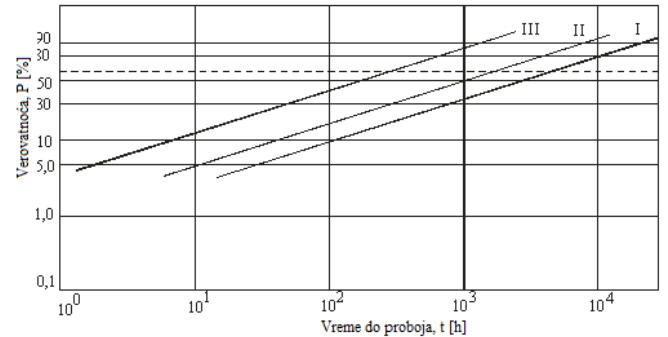
gde su:  $E$  – probajna maksimalna jačina električnog polja u izolaciji odreska kabla;  $U$  – probajni napon odreska kabla;  $r$  – unutrašnji poluprečnik izolacije;  $R$  – spoljni poluprečnik izolacije. Iz dobijenih vrednosti probajnih električnih polja,  $E_i$ , pojedinih odrezaka crta se Vejbulova raspodela veličina  $E_i$ . Na Sl. 2 prikazana je Vejbulova raspodela probajnih električnih polja.



Slika 2. Vejbulova raspodela probojnih jačina električnog polja odrezaka kablova sa smanjenom debljinom izolacije. Odgovarajući standardni kabl je tipa XHP 48-A-1x150/25 mm<sup>2</sup>, 12/20 kV.

3. Određuju se vremena proboja pri kombinovanom, toplotnom i električnom, starenju izolacije odrezaka kabla smanjene debljine izolacije, na sledeći način: odresci kabla jednog uzorka se povežu na red, spajanjem krajeva njihovih užadi, u zatvorenu konturu koja se provlači kroz otvor jezgra strujnog transformatora za zagrevanje izolacije, tako da ona predstavlja sekundar ovog transformatora; Strujnim transformatorom se odresci kabla ciklično zagrevaju uz istovremeno dovođenje izolaciji povišenog napona konstantne amplitude, pomoću rezonantnog naponskog uređaja; jedan grejni ciklus se sastoji od 8 časova zagrevanja na dozvoljenoj radnoj temperaturi izolacije i 16 časova stajanja odrezaka na temperaturi okoline od  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , čime se omogućuju toplotni uslovi bliski eksploracionim; u formiranoj konturi sačinjenoj od odrezaka kabla, jedan odrezak je bez drugog slaboprovodnog sloja i električne zaštite, tako da njegova izolacija nije pod naponom; na izolaciji ovog odreska postavljen je termopar koji je povezan sa pultom za regulisanje struje kroz odreske i, samim tim, temperature izolacije; odrescima kabla doveden je pomoću rezonantnog naponskog uređaja povišen napon konstantne amplitude koji iznosi 40% od srednje vrednosti probojnih napona dobijenih prema postupku opisanom u prethodnoj tački 2; u momentu kad probije jedan od odrezaka zapisuje se vreme od početka postupka do proboga, a postupak se nastavlja do proboga poslednjeg odreska; dobijene vrednosti vremena proboga,  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ , redaju se po veličini u niz i izračunavaju se njihove pojedinačne verovatnoće  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ ; postupak se ponavlja za odreske drugog uzorka kabla pri čemu je dovedeni napon odrescima proizvoljno odabran ali je viši od napona prethodnog uzorka; postupak se ponavlja na trećem uzorku sačinjenom od odrezaka kabla sa još višim, proizvoljno odabranim naponom; na Sl. 3 nacrtane su tri Vejbulove raspodele  $P(t)$  na Vejbulovom papiru verovatnoće, za tri napred navedena slučaja. Sve tri Vejbulove krive raspodele na Sl. 3 imaju isti nagib zbog toga što su fizički mehanizmi

starenja i proboga izolacije u sva tri slučaja isti (ista je izolacija).



Slika 3 Vejbulove raspodele vremena do proboga pri različitim jačinama električnog polja: I – 9,73 kV/mm; II – 10,78 kV/mm; III – 12,16 kV/mm.

4. Crtanje krive veka trajanja kabla smanjene debljine izolacije u koordinatnom sistemu sa osama sa logaritamskom podelom,  $t = f(E)$ , kroz tri tačke čije su koordinate određene iz izraza Vejbulovih krivih raspodela vremena proboga prikazanih na Sl. 3, pri verovatnoći  $P = 1\%$ . Na primer, iz izraza (5) koji opisuje krive na Sl. 3, dobijaju se, za zadatu verovatnoću  $P = 1\%$ , vrednosti  $t_1, t_{II}, t_{III}$ , kojima odgovaraju zadate vrednosti jačine električnog polja  $E_b, E_{II}, E_{III}$ .

5. Određuju se parametri  $\alpha'$ ,  $\beta$  i  $t_0$  Vejbulovih raspodela čije su krive prikazane na slikama 2 i 3, i čiji su izrazi:

$$P = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{E}{E_0} \right)^{\alpha'} \right] \quad (4)$$

$$P = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{t_0} \right)^{\beta} \right] \quad (5)$$

metodom najmanjih kvadrata [7].

6. Određuju se koordinate tačaka  $\{E_i, t_i\}$  krive veka trajanja standardnog kabla, namenjenog eksploraciji. Pri tome, koriste se izrazi koje su autori ovog rada izveli u radu [7] a iz kojih se mogu izračunati probojne jačine električnog polja realnog kabla iz probojnih jačina električnog polja kabla smanjene debljine.

$$E_i = E_I \left[ \frac{\ell_{(1)}}{\ell} \left( \frac{R_{T(1)}}{R_r} \right)^2 H \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (6)$$

$$H = \frac{1 - \left( \frac{R_{r(1)}}{R_{1(1)}} \right)^{\alpha-2}}{1 - \left( \frac{R_r}{R_1} \right)^{\alpha-2}} \quad (6a)$$

$$\alpha = \alpha' - \beta \quad (6b)$$

gde su:  $E_i$  – preračunato maksimalno električno polje realnog kabla;  $E_I$  – vrednost maksimalnog električnog polja pri

ubrzanom starenju odrezaka kabla smanjene debljine izolacije;  $\ell_{(I)}$  – efektivna dužina adreska;  $\ell$  - dužina realnog kabla kome se određuje vek trajanja;  $R_{r(I)}$  – unutrašnji poluprečnik izolacije adreska smanjene debljine izolacije;  $R_r$  – unutrašnji poluprečnik izolacije realnog kabla;  $R_{I(I)}$  – spoljašnji poluprečnik izolacije adreska smanjene debljine izolacije;  $R_I$  – spoljašnji poluprečnik izolacije realnog kabla;  $\alpha$  – parametar oblika opšte Vejbulove raspodele  $P(E, t, \ell)$  [7]; i

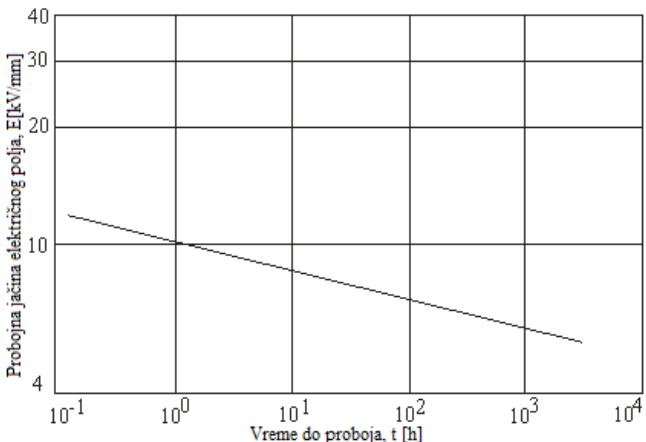
$$t_i = t_{0i} \sqrt{\beta - \ell n(1 - P)} \quad (7)$$

gde su  $t_i$  – vrednosti vremena proboga odrezaka pri verovatnoći  $P = 1\%$ ;  $t_{0i}$ ,  $\beta$  – parametri raspodela (5) koje su nacrtane na Sl. 3. Izrazi (6), (6a), (6b) i (7) izvedeni su tako što je cilindrična izolacija kabla posmatrana kao serijska veza elementarnih cilindričnih izolacija sa određenim verovatnoćama proboga i probojnim jačinama električnog polja. Na Sl. 4 nacrtana je kriva veka trajanja primenom relacija (6) i (7) za standardni kabl tipa XHP 48-A-1x150/25 mm<sup>2</sup>, napona 12/20 kV, dužine  $\ell = 1000$  m, sa izolacijom od umreženog polietilena tipa HFDM4201 BP. Koordinate tri tačaka pomoću kojih je kriva veka trajanja nacrtana su: {9,73 kV/mm, 2,78 h}, {10,78 kV/mm, 0,83 h}, {12,16 kV/mm, 0,13 h}.

7. Izračunava se vek trajanja standardnog kabla pri eksploraciji, iz izraza koji opisuje njegovu krivu veku trajanja i koji glasi:

$$t \cdot E^n = \text{const} \quad (8)$$

gde je  $n$  – eksponent veka trajanja koji određuje nagib krive veka trajanja u koordinatnom sistemu sa logaritamskim koordinatnim osama.



Slika 4. Kriva veka trajanja (dobijena na osnovu razrađenog modela i postupka) srednjenaaponskog kabla XHP 48-A-1x150/25 mm<sup>2</sup>, 12/20 kV, dužine 1000 m.

Zamenom u jednačini (8) vrednosti koordinata jedne od poznatih tačaka krive veka trajanja  $\{t_1, E_1\}$  i, zatim, tačke  $\{t_n, E_n\}$  koja odgovara nominalnom režimu rada kabla a koja je dobijena proračunom iz izraza (2), i deljenjem levih i desnih strana dobijenih jednačina, dobija se izraz za vek trajanja,  $t_n$ ,

pri nominalnom režimu, tj nominalnom električnom polju kabla,  $E_n$ :

$$t_n = t_1 \left( \frac{E_1}{E_n} \right)^n \quad (9)$$

Eksponent veka trajanja  $n$  određuje se primenom metode najmanjih kvadrata za izraz (8), [7]. Za dati primer kabla, čija je kriva veka trajanja prikazana na Sl. 4, dobijen je eksponent  $n = 12 \pm 2$  pa je vek trajanja, uzimajući donju granicu vrednosti koeficijenta  $n$

$$t_n = 64 \text{ godine}$$

gde je  $E_n$  određeno iz izraza (2) za  $U_n = 12$  kV i za vrednosti  $r$  i  $R$  standardnog kabla. Prema tome, vek trajanja standardnog kabla tipa XHP 48-A-1x150/25 mm<sup>2</sup> napona 12/20 kV koji bi bio podvrgnut starenju pod dejstvom električnog polja i cikličnog zagrevanja u toku eksploracije, iznosi 64 godine, što je prihvatljiva vrednost s obzirom na izuzetni kvalitet izolacije od umreženog polietilena i s obzirom da se propisima [1], [2] predviđa garantovani vek trajanja 40 godina.

### III. REZULTATI UPOREDNIH ISPITIVANJA KABLOVA SA RAZLIČITIM IZOLACIJAMA

Razvijena metoda je sprovedena na modelima izrađenim u fabrici kablova, radi upoređenja dva tipa kablovske izolacije od umreženog polietilena: A - polietilen sa puniocem kaolinom, umrežen u vodenoj pari (tip ELKEN 2003-10) i B – polietilen bez punioca umrežen u vodenoj pari (tip HFDM 4201 BP) [9], [10]. Punjeni umreženi polietilen se sastoji od 100 masenih delova polietilena niske gustine, 20 masenih delova neorganskog punioca kaolina, 5 delova dodataka (antioksidant i peroksid). Ispitna tela su izrađena prema proceduri i sa dimenzijama datim u prethodnom poglavljju. Koeficijent  $n$  je iznosio za izolaciju A:  $n = 15 \pm 3$  i za izolaciju B:  $n = 12 \pm 2$ . Vidi se da je kriva veka trajanja za adreske sa izolacijom A ima veći nagib (veći koeficijent  $n$ ) nego kriva veka trajanja izolacije B. Izvršena je ekstrapolacija krivih veka trajanja do njihovog preseka i utvrđeno je da se one sekut pri  $E = 7,9$  kV/mm, što znači da se pri električnim poljima bliskim eksploracionim ove krive (u logaritamskom koordinatnom sistemu – prave) sasvim približavaju. Međutim, teško je eksperimentalno potvrditi ekstrapolirane delove krivih veka trajanja i, samim tim, njihov presek. Manja vrednost  $t$  za iste vrednosti  $E$  kod izolacije A u odnosu na izolaciju B mogu se objasniti nehomogenošću izolacije A (zbog prisustva punioca) usled koje se u pojedinim tačkama izolacije javljaju veće jačine jačine električnog polja ( $E_{max}$ ) u odnosu na srednju jačinu električnog polja u izolaciji ( $E_{sr}$ ) [11]. Povećane lokalne jačine električnog polja ( $E_{max}$ ) izazivaju ubrzano starenje izolacije. Pošto je kaolin sitno-disperzionalni praškasti punilac, onda kao model punjenog polietilena (izolacija A) može služiti sistem koji se sastoji od sfernih uključaka poluprečnika  $r$  koji su simetrično raspoređeni na vrhovima kocki. Za proračun  $E_{max}$  u izolaciji (u tački na površini sfernog uključka) može se koristiti relacija Releja [11]. Prema ovoj relaciji odnos  $E_{max}/E_{sr}$  je veći ako je veća razlika dielektričnih

konstanti polimera i punioca. Za izolaciju A od umreženog punjenog polietilena, prema relaciji Releja, maksimalna jačina električnog polja, uslovljena česticama punioca kaolina, je 1,7 do 2 puta veća od srednje jačine električnog polja izolacije, što očigledno može da smanji vreme do probaja izolacije A.

Drugo objašnjenje smanjenja vremena do probaja izolacije A u odnosu na izolaciju B, može da bude promena nadmolekularne strukture punjenog polietilena u odnosu na nepunjeni. Čestice punioca se mogu javiti kao centri kristalizacije, što uslovjava uvećanje dimenzija sferolita, makroskopske defektosti izolacije i, u krajnjoj liniji, smanjenje vremena do probaja izolacije A.

#### IV. ZAKLJUČAK

Visokonaponski i srednjjenaponski kablovi sa ekstrudiranim izolacijom su već dugo u primeni ali još uvek nisu do kraja razjašnjeni mehanizmi njihovog starenja tokom eksploracije. Zbog toga se propisuje jedno od najskupljih i najdužih (do 1 godine) ispitivanja ovih kablova - ispitivanje naponsko termičke izdržljivosti. Ovo ispitivanje se vrši samo pri velikim promenama u konstrukciji kabela ili u izolacionom materijalu i tehnologiji izrade. U radu je predložena i uspešno primenjena metoda ubrzanog ispitivanja naponsko termičke izdržljivosti kablova, pri kojoj se ispitivanje vrši na specijalno izrađenom kablu sa tanjom izolacijom u odnosu na realan kabl, istovremenim povišenim naponom i cikličnim zagrevanjem. Na njemu se dobijaju parametri starenja iz kojih se statističkim metodama preračunavaju odgovarajući parametri realnog kabla. Na taj način se mogu, u ekonomski opravdano vreme i bez skupocene opreme, ispitivati i upoređivati kablovi u pogledu njihove naponsko-termičke izdržljivosti.

#### ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na finansiranju projekta TR 33046 u okviru kojeg je nastao ovaj rad.

#### LITERATURA

- [1] IEC 62067, "Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ( $U_m=170$  kV) up to 500 kV ( $U_m=550$  kV) - Test methods and requirements", Ed. 1.0, October 2001.
- [2] CIGRE TB 303, "Revision of qualification procedures for HV and EHV AC extruded underground cable systems", CIGRE Working Group B1.06, August 2006.
- [3] G. Mazzanti, "Analysis of the combined effects of load cycling, thermal transients and electro-thermal stress on life expectancy of high voltage ac cables", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, pp. 2000-2009, October 2007.
- [4] CIGRE TB 496, "Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kV", CIGRE WG B1-32, April 2012.
- [5] IEC 62067, "Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ( $U_m=170$

kV) up to 500 kV ( $U_m=550$  kV) - Test methods and requirements", Ed. 2.0, November 2011.

- [6] IEC 60840, "Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ( $U_m=36$  kV) up to 150 kV ( $U_m=170$  kV) - Test methods and requirements", Ed. 4.0, November 2011.
- [7] M.Jevtić i A.Todorović, "Uredaj za određivanje veka trajanja srednjjenaponskih kablova sa polimernom izolacijom", Isprava o malom patentu broj 966U, Zavod za intelektualnu svojinu Republike Srbije, 2008.
- [8] M.Jevtić, "Modeliranje izolacije srednjjenaponskih kablova u cilju određivanja krive života", Tehnika-Elekrotehnika, vol.44, no. 9-10, str. E9-E11, 1995.
- [9] M. Jevtić and A. M. Andreyev, 'PD Tests to Measure the Electrical Treeing Resistance of Cable Insulation and the Erosion Rate Resistance of Capacitor Metalized Films', IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 15, no. 6, pp. 5-11, 1999.
- [10] M.Jevtić, "Krine života kablovske izolacije od umreženog polietilena sa neorganskim puniocem i bez punioca", Plastika i guma, vol.16, no.1, str. 5-8, 1996.
- [11] B.I.Sazhin, Elektricheskie svoistva polimerov, Khimiya, Leningrad, 1986.

#### ABSTRACT

**Content** - In the paper is developed and applied a test method for testing of voltage-thermal endurance of medium voltage cables with extruded insulation. By the standards IEC 62067 and IEC 60840 and recommendations CIGRE TB 303 and CIGRE TB 496 the voltage-thermal endurance tests of cables are predicted. These tests are applied only during the introduction of new technological processes and new designs and insulation materials because they are expensive and take a long time (up to 1 year). This paper proposes a method of testing the voltage-thermal endurance of cable, in which the testing is carried out on the cable with thinner insulation than isolation of the real cable. In this way, in a shorter time, by using lower testing voltages and with a smaller cost, the life curve of cable model is received. The results of these tests were applied for the comparison of different cable insulations in terms of voltage-thermal endurance. By the statistic calculation, taking into account the difference of insulation thicknesses, the life time curve of real cable is given.

#### TESTING OF THE ELECTRO - THERMAL ENDURANCE OF CABLES WITH EXTRUDED INSULATION USING THE CABLE MODEL WITH THINER INSULATION

Miroljub Jevtić and Jordan Radosavljević

