



## PROCENA ŽIVOTNOG VEKA ELEKTROENERGETSKIH KABLOVA SA SINTETIČKOM IZOLACIJOM

### LIFE-TIME ESTIMATION OF EXTRUDED DIELECTRIC POWER CABLES

Miodrag Stojanović, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Srbija

Dragan Tasić, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Srbija

Dardan Klimenta, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Prištini sa privremenim  
sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Srbija

Nikola Krstić, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Srbija

### KRATAK SADRŽAJ

Rad se bavi matematičkim modelima kojima se opisuje starenje elektroenergetskih kablova sa sintetičkom izolacijom. Ova tema zaokuplja pažnju stručne javnosti više desetina godina ali za sada nema opšte prihvaćene teorije. Osnovna poteškoća pri kreiranju opšte prihvaćene teorije je veliki broj faktora (fizički, hemijski, električni) koji utiču na starenje pojedinih komponenti kablova. Fokus istraživača je na starenju same izolacije, čiji uzročnici su zagrevanje, električno polje, mehaničko naprezanje, hemijski uticaj okoline, apsorpcija vlage itd. Kako je životni vek kablova veoma dug, matematički modeli starenja određuju se iz eksperimenata ubrzanog starenja. Ovi modeli mogu se koristiti za procenu preostalog životnog veka kablova u eksploataciji, ali i za procenu cikličnog faktora preopterećenja kablova uz obezbeđivanje projektovanog životnog veka. Na test primeru trofaznog voda sačinjenog od tri jednožilna kabla sa izolacijom od umreženog polietilena, u radu je za tipični dijagram opterećenja određen ciklični faktor preopterećenja uz uvažavanje projektovanog životnog veka.

**Ključne reči:** elektroenergetski kablovi, izolacija, starenje, životni vek

### SUMMARY

The paper deals with mathematical models that describe the aging of power cables with synthetic insulation. This topic has occupied the attention of the professional public for decades, but for now there is no generally accepted theory. The main difficulty in creating a generally accepted theory is the large number of factors (physical, chemical, electrical) that affect the aging of individual cable components. The focus of the researchers is on the aging of the insulation itself, the causes of which are heating, electric field, mechanical stress, chemical influence of the environment, moisture absorption, etc. As the life-time of cables is very long, mathematical models of aging are determined from accelerated aging experiments. Mathematical models can be used to estimate the remaining service life of cables in operation, but also to estimate the cyclic current rating with the projected service life. On the test example of cable line consisting of three single-core XLPE cables and typical load diagram, cyclic current rating is estimated taking into account projected life-time.

**Key words:** aging, insulation, life-time, power cables

### 1. UVOD

Životni vek kablova sa sintetičkom izolacijom od velikog je interesa za primenu ovih kablova na svim naponskim nivoima, i to kako u fazi projektovanja kablova, tako i u fazi njihove eksploatacije. U fazi razvoja kablova definiše se „nazivni“ (ili „projektovani“) životni vek, a konstruktivni elementi kabla izrađuju se na takav način da pri nazivnim uslovima eksploatacije obezbede pouzdan rad u toku ovog vremenskog perioda. S druge strane, kablovi u eksploataciji nisu izloženi identičnim toplotnim, mehaničkim, električnim i hemijskim uticajima, pa je od interesa izvršiti procenu koliko je kabl "ostareo" u odnosu na projektovani životni vek, a samim tim i koliko je njegov očekivani preostali životni vek. Osnovni fokus pri analizi starenja kablova je na starenju izolacionog sistema. Iako je do sada objavljen veliki broj naučnih radova koji tretiraju mehanizme starenja kablova, ova oblast još uvek se može smatrati nedovoljno istraženom.

Kablovi su u eksploataciji izloženi promenljivom dijagramu opterećenja pri čemu postoje dnevne varijacije ali i sezonske varijacije. Zbog toga se kablovi u kratkim intervalima mogu opteretiti strujama koje su veće od termički trajno dozvoljenih struja. Maksimalna struja kojom se može opteretiti kabl izložen cikličnom dijagramu opterećenja definiše se cikličnim faktorom preopterećenja koji se određuje prema standardu IEC 60853. Izračunavanje cikličnog faktora preopterećenja vrši se, prema standardu, pod pretpostavkama koje su na stranu sigurnosti, tako da temperatura provodnika kablova u eksploataciji samo u kratkotrajnim periodima dostiže maksimalnu trajno dozvoljenu temperaturu ili je uvek niža od nje. Zbog toga, očekivani životni vek izolacije kablova u eksploataciji može biti značajno duži od nazivnog životnog veka, s time da se postavlja pitanje pouzdanosti ovakvog zaključka s obzirom na zanemarivanja starenja ostalih konstrukcionih elemenata kablova. U ovom radu dat je najpre osvrt na najčešće korišćene modele starenja izolacije elektroenergetskih kablova i izračunavanje cikličnog faktora preopterećenja prema odgovarajućem IEC standardu, a zatim je predložen metod za određivanje cikličnog faktora preopterećenja uz uvažavanje životnog veka kablova.

## 2. UZROCI STARENJA KABLOVA

Osnovna poteškoća pri kreiranju jedinstvene, opšte prihvaćene, teorije starenja kablova, ali i druge elektroenergetske opreme, predstavlja veliki broj različitih faktora koji utiču na starenje. U CIGRE [1] su za kablove sa sintetičkom izolacijom sistematizovani faktori koji su od interesa za pojedine konstruktivne elemente kabla (izolaciju, poluprovodni ekran, elementi za sprečavanje prodora vlage, metalni omotač i armatura i spoljašnji plašt), i podeljeni na:

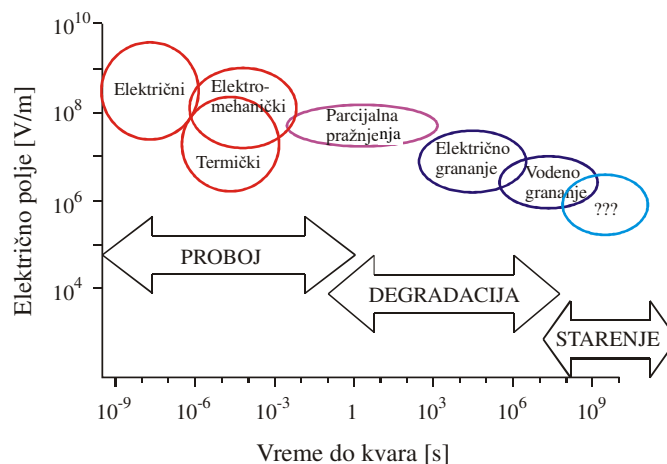
- fizičke,
- hemijske,
- fizičko-hemijske, i
- električne.

Istraživanja starenja kablova uglavnom su fokusirana na starenju izolacije, koja se apostrofira kao najznačajniji segment starenja kablova. U Forthegill [2] je napravljena razlika između starenja izolacije i degradacije izolacije. Na slici 1 prikazana je podela procesa koji se odvijaju u izolaciji prema [2]. Termin starenje uveden za procese koji se odvijaju u toku celokupnog životnog veka izolacije, degradacijom su označeni procesi srednjeg trajanja, dok su procesi proboja praktično trenutni i nastaju nakon nekoliko godina procesa degradacije.

Postoji veliki broj uzročnika starenja izolacije, električno starenje, mehaničko starenje, UV radijacija, hemijsko starenje, termičko starenje i apsorpcija vlage, Long [3]. Za analizu procesa starenja izolacije istraživači primenjuju merenja parcijalnih pražnjenja, akumulisanog slobodnog naelektrisanja, merenje elektroluminiscencije, električnog i vodenog grananja, spektroskopiju dielektrika i merenje dielektrične čvrstoće. S obzirom na to da je životni vek kablova u normalnom pogonu veoma dug, pri istraživanju mehanizama starenja izolacije primenjuju se ubrzano starenja u laboratorijskim uslovima. Cilj eksperimenata je da se prikupe informacije o ponašanju izolacije i definišu matematički modeli starenja.

Jedna od osnovnih dilema koja se javlja pri tumačenju rezultata eksperimenata sa ubrzanim starenjem je koliko se ponašanje dielektrika pri povećanim naprežanjima može preslikati na normalna radna naprežanja, a povezano sa time i koja su maksimalna naprežanja pri kojima je potrebno vršiti eksperimente. Kako eksperimenti na realnim kablovima, u fazi razvoja kablova, zahtevaju značajno vreme kao i značajna finansijska ulaganja, eksperimenti ubrzanog starenja često se sprovode na modelima kablova (minijaturni kablovima) ili na tankim filmovima izrađenim od primenjenog dielektrika. Rezultate eksperimenata sprovedenih na modelima kablova potrebno je naravno preskalirati na nivo dimenzija realnih kablova.

Kao osnovni kriterijum starenja izolacije koristi se vrednost dielektričke čvrstoće, ali se koriste i vrednosti drugih karakteristika koje su na određeni način povezane sa vrednošću dielektrične čvrstoće. Tako standard IEC 60216, u kome je izvršeno formalizovanje procedura termičkog starenja i interpretacije njihovih rezultata, za elastomere predviđa sledeće kriterijume kraja životnog veka: 50% početne dielektričke čvrstoće, 50% početne prekidne čvrstoće, 50% prekidnog izduženja.



Slika 1 - Podela procesa koji se odvijaju u električnoj izolaciji [2]

### 3. MATEMATIČKI MODELI STARENJA

#### 4.1 Modeli termičkog starenja

Prve studije starenja izolacije bavile su se samo sagledavanjem termičkih efekata. U radu Montsinger [4] pokazano je da se životni vek izolacije skraćuje na polovinu sa porastom temperature za 8 do 10 stepeni (poznat i kao "pravilo 10 stepeni"). Na osnovu rezultata eksperimenata sprovedenih na papirnoj izolaciji u vazduhu i u ulju Monstinger je predložio prvu relaciju za određivanje životnog veka izolacije u obliku:

$$L_T = L_0 e^{-m\theta} , \quad (1)$$

gde su  $L_0$  i  $m$  konstante koje zavise od materijala a  $\theta$  temperatura u °C.

Značajni napredak u sagledavanju starenja izolacije učinio je Dakin [5,6] koji je uveo pretpostavku da povećanje temperature dovodi do povećanja brzine hemijskih reakcija, te se stoga može primeniti empirijska Arenijusova (Arrhenius) relacija koja daje vezu brzine hemijske reakcije i temperature u obliku:

$$k = A e^{-\frac{E_a}{RT}} , \quad (2)$$

gde je  $E_a$  aktivaciona energija hemijske reakcije,  $A$  konstanta hemijske reakcije,  $R$  univerzalna gasna konstanta, a  $T$  apsolutna temperatura. Starenje izolacije dovodi do promene određenih karakteristika materijala, i ako se posmatra karakteristika  $P$ , osnovni zakon starenja prema Dakinu je dat sa:

$$\frac{dP}{dt} = -kP^\alpha , \quad (3)$$

gde je  $\alpha$  stepen hemijske reakcije. U radu Simoni [7] polazeći od Dakinove teorije predložena je sledeća relacija za određivanje životnog veka izolacije izložene termičkom naprezanju:

$$L_T = k_t e^{\frac{B}{T}} , \quad (4)$$

gde su  $k_t$  i  $B=E_a/R$  konstante koje zavise od materijala. Relacija (4), koja se najčešće naziva Arenijusov model, daje pravolinijsku karakteristiku na grafiku  $\log(L_T)=f(1/T)$  i iskorišena je u standardu IEC 60216. Relacija se sreće i u obliku:

$$L_T = L_0 e^{-BAT} , \quad (5)$$

gde je  $\Delta T = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}$  tzv. konvencionalno termičko naprezanje a  $L_0$  životni vek pri temperaturi  $T_0$ .

Druga relacija koja se sreće u literaturi za opisivanje termičkog starenja sledi iz Eyringove (Eyring) jednačine za brzinu hemijske reakcije. Eyringova jednačina je dobijena iz teoretskog razmatranja, a opštija je od Arenijusove jednačine. Životni vek izolacije primenom Eyringove jednačine može se napisati u obliku:

$$L_T \cong \frac{h}{kT} e^{-\frac{\Delta G}{kT}} , \quad (6)$$

gde je  $h$  Plankova (Planck) konstanta, a  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$  Gibsova (Gibbs) aktivaciona energija ( $\Delta H$  i  $\Delta S$  su aktivaciona entalpija i entropija). Pravolinijska karakteristika u ovom slučaju dobija se na grafiku  $\log(L_T T) = f(1/T)$ .

## 4.2 Modeli električnog starenja

Najpopularniji model za opisivanje električnog starenja je "model inverznog stepena" (Inverse Power Model u daljem tekstu IPM) dat sa:

$$L_E = CE^{-n}, \quad (7)$$

Karakteristika životnog veka nacrtana na grafiku  $\log(L_E) = f(\log(E))$  daje pravu liniju pa je IPM model postao jako popularan za ekstrapolaciju rezultata dobijenih pri velikim jačinama električnog polja. Do relacije (7) se došlo empirijski, a kasnije je u radovima Simoni [7] i Occhini [8] i pokazano da se uklapa u Weibulovu (Weibull) raspodelu koja je opšte prihvaćena za opisivanje verovatnoće proboja. Relacija (7) nema jasnu teorijsku osnovu i daje nerealne rezultate kada se izvrši ekstrapolacija rezultata eksperimenata dobijenih pri jačinama električnog polja znatno većim od normalnih radnih.

Eksperimentalni rezultati pokazali su da se povećanjem dimenzija uzoraka smanjuje dielektrička čvrstoća izolacije. Osim toga, raspodela električnog polja u kablovskoj izolaciji nije homogena, tako da nisu svi delovi izolacije izloženi jednakim jačinama električnog polja. Jasno je da se rezultati dobijeni na jednoj geometriji izolacije ne mogu direktno primeniti na neku drugu geometriju. U radu Occhini [8] data je relacija za geometrijsku transformaciju koja se primenjuje za svođenje rezultata merenja dielektrične čvrstoće izolacije sa jedne geometrije na drugu geometriju izolacije. Za dva kabla izrađena od identičnog materijala verovatnoća preživljavanja u proizvoljnom trenutku  $t$  biće jednaka ukoliko je veza maksimalnih jačina električnog polja:

$$E_{02} = E_{01} D^{-1/\beta_E}. \quad (8)$$

gde je  $D$  takozvani faktor uvećanja ("enlargement factor"):

$$D = \frac{L_2 r_{p2}^2 1 - (r_{p2}/R_2)^{\beta_E} E^{-2}}{L_1 r_{p1}^2 1 - (r_{p1}/R_1)^{\beta_E} E^{-2}}, \quad (9)$$

gde su  $L_1$  i  $L_2$  dužine uzoraka kablova a  $r_{p1}$ ,  $r_{p2}$ ,  $R_1$  i  $R_2$  unutrašnji i spoljašnji poluprečnici izolacije. IPM model omogućava jednostavno preračunavanje vremena do proboja iz rezultata progresivnog testa. Odnos vremena do proboja pri progresivnom testu i vremena do proboja pri konstantnom električnom polju čija jačina odgovara vrednosti pri kome je došlo do proboja u progresivnom testu, dat je sa:

$$\frac{L_{EP}}{L_E} = n + 1. \quad (10)$$

Drugi model električnog starenja izolacije koji se sreće u literaturi je eksponencijalni model:

$$L_E = C_E e^{-nE}, \quad (11)$$

gde su  $C_E$  i  $n$  odgovarajuće konstante, a model daje pravu liniju na grafiku  $\log(L_E) = f(E)$ .

## 4.3 Modeli kombinovanog elektrotermičnog starenja

Kao što je za čisto termičko ili čisto električno starenje razvijen veći broj modela, i za slučaj kombinovanog elektrotermičkog starenja postoji veći broj modela

**4.3.1 Arenijus-IPM model** – U Simoni [10] je izvršen je pokušaj kreiranja jedinstvene teorije elektrotermičkog starenja. Simoni je pošao od Eyringove relacije za brzinu hemijske reakcije u malo modifikovanom obliku, koja je prethodno iskorišćena u Endicott, Hatch i Sohmer [9] za analizu starenja kondenzatora:

$$R = k_1 T^s e^{-\frac{B}{T}} e^{(k_2 + \frac{k_3}{T})f(E)}, \quad (12)$$

gde su  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $s$  i  $B$  konstante koje zavise od materijala, a  $f(E)$  neka funkcija jačine električnog polja. S obzirom da se apsolutna temperatura u radnim uslovima relativno malo menja, a da je koeficijent  $s$  u relaciji (12) približno jednak jedinici, umesto  $T^s$  se kod analize starenja dielektrika može koristiti konstanta. U prilog ovome

ide i činjenica da su eksperimentalni rezultati pokazali dobro poklapanje sa Arenijusovom relacijom, koja predstavlja specijalan slučaj opštije Ejringove relacije, a koja ispred eksponencijalnog člana ima konstantu. Imajući u vidu činjenicu da je životni vek obrnuto proporcionalan brzini starenja, kao polazna relacija u [10] se za analizu životnog veka izolacije izložene kombinovanom elektrotermičkom naprezanju koristi:

$$L = \frac{1}{A} e^{\frac{B}{T}} e^{-(k_2 + \frac{k_3}{T})f(E)}, \quad (13)$$

gde je  $A$  odgovarajuća konstanta. Kako pri malim jačinama električnog polja ne postoje efekti električnog starenja može se uvesti referentna jačina električnog polja  $E_0$ , koja je manja od granične jačine električnog polja (ispod koje se smatra da je proces starenja čisto termički). Očigledno je da je relacija (13) primenljiva za jačine električnog polja  $E \geq E_0$ , kao i da je  $f(E_0) = 0$ . Kada je temperatura jednaka sobnoj temperaturi  $T_0$  i jačina električnog polja jednaka vrednosti  $E_0$ , životni vek izolacije je  $L_0$ , pa se dolazi do:

$$L = L_0 e^{-B(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})} e^{-(k_2 + \frac{k_3}{T})f(E)}. \quad (14)$$

Jedna od funkcija koja zadovoljava zahtev  $f(E_0) = 0$  je  $f(E) = \ln\left(\frac{E}{E_0}\right)$ , čijom se zamenom u (14), uz uvođenje oznake  $b = k_3$ ,  $n = k_2 + \frac{k_3}{T_0}$  i  $\Delta T = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}$ , dolazi do oblika:

$$L = L_0 e^{-B\Delta T} \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-(n-b\Delta T)}. \quad (15)$$

Relacija (15) se u literaturi obično naziva Arenijus-IPM model, pošto na sobnoj temperaturi  $T_0$  odgovara IPM modelu električnog starenja, a pri električnom polju  $E=E_0$  odgovara Arenijusovom modelu termičkog starenja. Ukoliko bi se kao funkcija  $f(E)$  u (14) iskoristilo  $f(E) = E$ , dolazi se do sledećeg modela:

$$L = L_0 e^{-B\Delta T - nE + b\Delta TE}. \quad (16)$$

**4.3.2 Žurkovljev (Zhurkov) model** – Analizom uticaja mehaničkih naprezanja na starenje u radu [18] Žurkov je predložio sledeću empirijsku relaciju za izračunavanje vremena do preloma čvrstog tela izloženog naprezanju  $\sigma$ :

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{w-\gamma\sigma}{RT}}. \quad (17)$$

U prethodnoj relaciji sa  $\tau_0$  je označena konstanta čija je vrednost bliska periodu termičkih oscilacija atoma,  $R$  univerzalna gasna konstanta,  $T$  apsolutna temperatura u K,  $w$  aktivaciona energija, a  $\gamma$  strukturni parametar. Relacija (17) primenjena je u Bagirov [12] i Mamedov [13] za izračunavanje životnog veka izolacije izložene električnom i termičkom naprezanju u obliku:

$$L = \tau_0 e^{\frac{w-\chi E}{RT}}. \quad (18)$$

gde je  $E$  jačina električnog polja, a  $\chi$  strukturni parametar. Ovaj model se u literaturi obično naziva Žurkovljev model. Ako se relacija (18) napiše preko konvencionalnog termičkog naprezanja dolazi se do oblika identičnog relaciji (16) s time da je:  $L_0 = \tau_0 e^{\frac{w}{RT_0}}$ ,  $B = w/R$ ,  $n = \chi/(RT_0)$  i  $b = \chi/R$ .

**4.3.3 Krajnov (Crine) model** – Primenom Dakinove pretpostavke da je električno starenje termički iniciran proces, u Crine [14] je dat matematički model kombinovanog elektrotermičkog starenja prema kome je životni vek:

$$L = \frac{\frac{h}{kT} e^{\frac{\Delta G}{kT}}}{\sinh\left(\frac{e\lambda E}{kT}\right)}. \quad (19)$$

Nakon revizije u skladu sa Parpal [15] i Lewis [16], Krajnov model elektrotermičkog starenja je publikovan u obliku Crine [17]:

$$L = \frac{\frac{h}{2kT} e^{\frac{\Delta G}{kT}}}{\sinh\left(\frac{e_0 \varepsilon \Delta V E^2}{2kT}\right)}. \quad (20)$$

gde su  $\varepsilon_0$  i  $\varepsilon'$  dielektrična konstanta vakuma i relativna dielektrična konstanta izolacije, a  $\Delta V$  aktivaciona zapremina. U Crine [18] je razmatrana zavisnost aktivacione zapremine od zapremine izolacije i pokazano da ova zavisnost ima pravolinijsku karakteristiku na grafiku  $\log(\Delta V)=f(\log(V))$ .

#### 4. STRUJNA OPTERETLJIVOST KABLOVA IZLOŽENIH CIKLIČNOM OPTEREĆENJU

U projektovanju elektroenergetskih kablova primenjuje se konzervativna pretpostavka da će u toku životnog veka temperatura najtoplije tačke kabla biti jednaka nazivnoj temperaturi kabla. Ova pretpostavka u praksi gotovo nikada nije ispunjena i kablovi se u eksploataciji najveći deo vremena nalaze na temperaturi koja je značajno niža od maksimalne trajno dozvoljene temperature. Strujno opterećenje kablova podleže dnevnim dijagramima, pa je samim tim i kabl izložen temperaturnim ciklusima na dnevnom nivou. Ciklični faktor preopterećenja, uveden u standardima za proračun strujne opteretljivosti kablova izloženih cikličnom opterećenju, izveden je pod konzervativnim pretpostavkama, od kojih je najznačajnija da maksimalna temperatura kabla ne sme biti veća od nazivne temperature. Ovaj proračun zasnovan je na analizi nestacionarnog zagrevanja koja je detaljnije obrazložena u radu Stojanović [19], s time da je uvedeno dodatno uprošćenje kako bi se mogao realizovati i bez računara. U proračunu se obuhvata samo šest časova koji prethode trenutku kada je temperatura maksimalna. Stanje koje prethodi ovom periodu od 6 sati uvažava se imajući u vidu faktor gubitaka  $\mu$ , odnosno kao da je kabl opterećen konstantnom strujom čija je vrednost  $\sqrt{\mu}I$  kao što je prikazano na slici 2. Ukoliko nije poznato u kom trenutku u toku dana je temperatura kabla maksimalna, kao referentni se uzima poslednji trenutak u kome je strujno opterećenje maksimalno. Pored toga, za proračun maksimalne temperature provodnika koristi se i pretpostavka da termičke i električne otpornosti ne zavise od temperature, pa se može smatrati da je nadtemperatura provodnika srazmerna kvadratu struje. Tako se za neki vremenski interval  $t$  pri opterećenju strujom  $I_i$  nadtemperatura  $\vartheta_{pI_i}(t)$  može odrediti kao:

$$\vartheta_{pI_i}(t) = \vartheta_p(t) \frac{I_i^2}{I_n^2} . \quad (21)$$

gde je  $\vartheta_p(t)$  nadtemperatura koja bi se za vreme  $t$  dostigla pri opterećenju nazivnom strujom  $I_n$ . Pod gore navedenim pretpostavkama, a koristeći teoriju proračuna nestacionarnog zagrevanja kablova, može se pisati:

$$\vartheta_p(\infty) = M^2 \{ \mu [\vartheta_p(\infty) - \vartheta_p(6)] + \sum_{i=0}^5 \frac{I_i^2}{I_n^2} [\vartheta_p(i+1) - \vartheta_p(i)] \} , \quad (22)$$

gde je  $\vartheta_p(\infty)$  maksimalna trajno dozvoljena nadtemperatura provodnika kabla,  $M = \frac{I}{I_n}$  ciklični faktor preopterećenja a  $I$  maksimalna struja u toku ciklusa. Iz relacije (22) jednostavno je izraziti ciklični faktor preopterećenja:

$$M = \frac{1}{\left\{ \mu \left[ 1 - \frac{\vartheta_p(6)}{\vartheta_p(\infty)} \right] + \sum_{i=0}^5 \frac{I_i^2}{I_n^2} \left[ \frac{\vartheta_p(i+1)}{\vartheta_p(\infty)} - \frac{\vartheta_p(i)}{\vartheta_p(\infty)} \right] \right\}^{1/2}} . \quad (23)$$

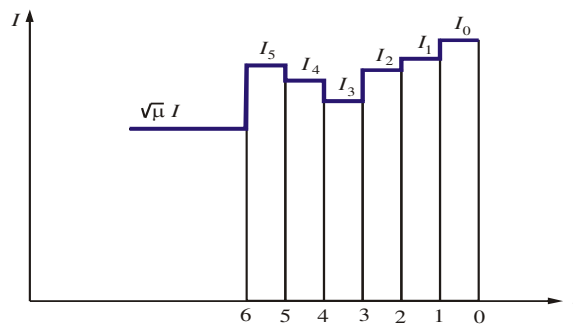
Odnos  $\frac{\vartheta_p(t)}{\vartheta_p(\infty)}$  u prethodnoj relaciji izračunava se kao:

$$\frac{\vartheta_p(t)}{\vartheta_p(\infty)} = A(t) \left[ 1 - \frac{\vartheta_k(\infty)}{\vartheta_p(\infty)} + \beta(t) \frac{\vartheta_k(\infty)}{\vartheta_p(\infty)} \right] . \quad (24)$$

gde je  $A(t)$  faktor temperaturnog doseg provodnika,  $\beta(t)$  faktor temperaturnog doseg spoljne površine kabla, a  $\vartheta_k(\infty)$  temperatura površine kabla pri trajnom opterećenju nominalnom strujom. U slučaju kabla sa električnom zaštitom i mehaničkom zaštitom položenog u zemlju na dubini  $h$ , faktori temperaturnog doseg računaju se kao:

$$A(t) = \frac{\vartheta_{p0}(t)}{W_J [R_{T1} + (1 + \lambda_1)nR_{T2} + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)R_{T3}]} , \quad (25)$$

$$\beta(t) = \frac{-Ei\left(-\frac{d_k^2}{16Dt}\right) + Ei\left(-\frac{h^2}{Dt}\right)}{2 \ln \frac{4h}{d_k}} . \quad (26)$$



Slika 2 – Aproximacija dijagrama opterećenja za analizu cikličnog faktora preopterećenja - IEC 60853

U relacijama (25) i (26)  $R_{T1}$ ,  $R_{T2}$  i  $R_{T3}$  su termičke otpornosti izolacije, unutrašnjeg i spoljašnjeg plašta respektivno,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  i  $\lambda_3$  faktori gubitaka u provodniku, električnoj zaštiti i mehaničkoj zaštiti,  $\vartheta_{p0}(t)$  pad temperature unutar kabla za vreme  $t$ ,  $D = \frac{1}{\rho_t c \gamma}$  difuznost,  $\rho_t$  specifična termička otpornost,  $c$  specifični toplotni kapacitet,  $\gamma$  gustina zemljišta, a  $Ei(-x)$  integralna eksponencijalna funkcija.

## 5. CIKLIČNI FAKTOR PREOPTEREĆENJA UZ UVAŽAVANJE ŽIVOTNOG VEKA KABLOVA

Kao što se može uočiti pri određivanju cikličnog faktora preopterećenja prema IEC standardu nije sagledan životni vek kablova. Primenom proračuna nestacionarnog stanja zagrevanja kablova može se odrediti dnevni dijagram promene temperature provodnika kabla izloženog cikličnom opterećenju. Za maksimalnu vrednost struje u toku ciklusa uzeće se termički trajno dozvoljena struja pomnožena sa faktorom preopterećenja koji se može varirati u opsegu od 1 do 1,4. Kada je određen dnevni dijagram promene temperature provodnika kablova, za svaki stepen opterećenja može se sračunati skraćenje životnog veka primenom nekog od matematičkih modela starenja. Skraćenje životnog veka kabla u toku jednog stepena (stepen i) čije je trajanje  $\Delta t_i$ , a u toku koga je opterećenje konstantno, određuje se prema relaciji:

$$LF_i = \int_0^{\Delta t_i} \frac{dt}{L_i(T)} \quad (27)$$

gde je sa  $L_i(T)$  označen životni vek kabla pri temperaturi  $T$ . Ukoliko se želi izbeći funkcija životnog veka pod integralom, može se pretpostaviti da je temperatura kabla u toku jednog stepena konstantna. Jedna od mogućnosti je da se koristi srednja temperatura u toku stepena. Prema Majnerovom (Miner) zakonu kumulativnog oštećenja do kvara dolazi kada je suma skraćenja životnog veka jednaka jedinici. Imajući to u vidu broj dana do kvara kabla izloženog dnevnim ciklusima opterećenja iznosi:

$$K = (\sum_{i=1}^N LF_i)^{-1} \quad (28)$$

Kada se vrednosti procenjenog životnog veka nacrtaju na grafiku na kome je logaritam životnog veka dat u funkciji odnosa maksimalnog i nominalnog opterećenja kroz ucrtane tačke može se provući kriva. Vrednost odnosa maksimalne i nominalne struje za koju je vrednost procenjenog životnog veka jednaka nazivnom životnom veku predstavlja ciklični faktor preopterećenja uz uvažavanje životnog veka kablova. Za kabl izložen odabranom obliku dijagrama opterećenja sa cikličnim faktorom preopterećenja određenim na prethodno opisani način očekivano je da će nazivni životni vek kabla biti zadržan.

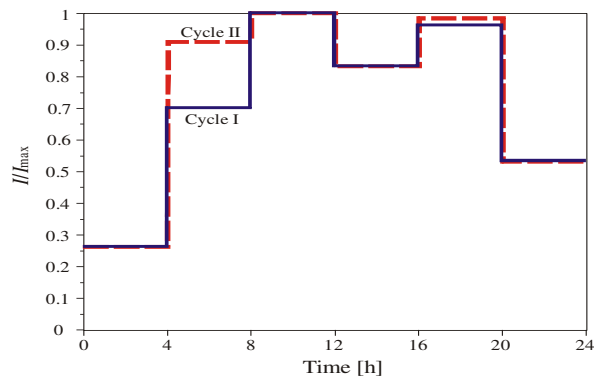
## 6. TEST PRIMER

Analiza je izvršena za slučaj tri 123 kV jednožilna kabla sa izolacijom od umreženog polietilena, poprečnog preseka aluminijumskog provodnika od  $630 \text{ mm}^2$  sa električnom zaštitom od bakarnih provodnika. Prečnik provodnika ovog kabla je 29,8 mm, Prečnik iznad izolacije 58,6 mm, debljina izolacije 13 mm, a prečnik kabla 72,3 mm. Pretpostavljeno je da su kablovi položeni u ravni i izvršena transpozicija električnih zaštita. Kablovi su položeni na dubini 1 m, temperatura referentne zemlje iznosi  $20^\circ\text{C}$  a rastojanje između susednih kablova 70 mm, nazivna temperatura kablova iznosi  $90^\circ\text{C}$ . Termički trajno dozvoljena struja kabla pri pretpostavljenom načinu polaganja iznosi 740 A.

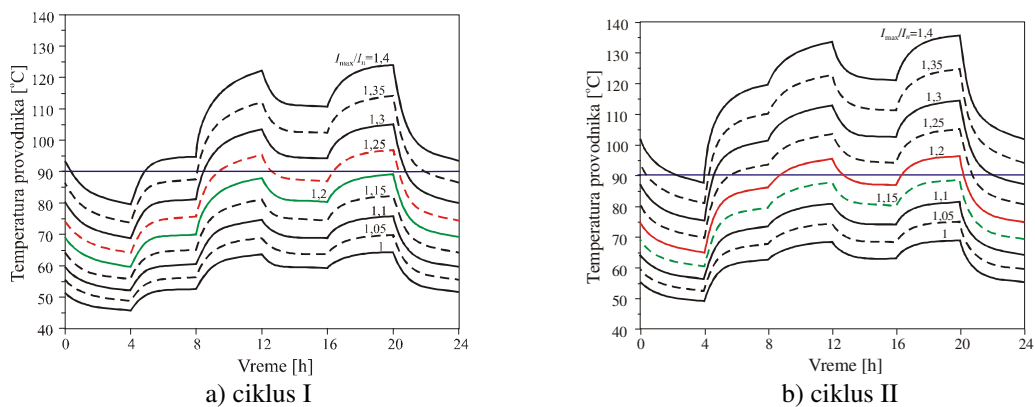
Termička otpornost i termički kapacitet umreženog polietilena iznose  $3,5 \text{ Km/W}$  i  $2,4 \cdot 10^6 \text{ J/(m}^3\text{K)}$ , termička otpornost zemljišta  $1 \text{ Km/W}$ , termička kapacitivnost aluminijuma  $2,5 \cdot 10^6 \text{ J/(m}^3\text{K)}$ , a termička kapacitivnost bakra  $3,45 \cdot 10^6 \text{ J/(m}^3\text{K)}$ . U analizi će biti pretpostavljeno da je kabl izložen konstantnoj vrednosti jačine

električnog polja koja odgovara vrednosti korišćenoj pri projektovanju kablova. Kabl je izložen dnevnom dijagramu opterećenja prikazanom na slici 3. Na slikama 4a) i 4b) prikazani su dijagrami promene temperatura kablova poprečnog preseka  $630 \text{ mm}^2$  izloženih dnevnim dijagramima opterećenja prikazanim na slici 3 za odnose maksimalnog opterećenja i nominalnog opterećenja od 1 do 1,4 sa korakom 0,05.

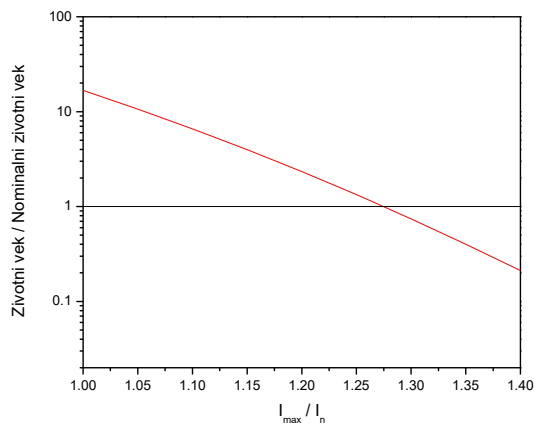
Sa slike 4a) može se videti da za odnos maksimalnog i nominalnog opterećenja manji ili jednak 1,2 temperatura kabla ne prelazi nikada  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kada je kabl izložen dnevnom dijagramu označenom kao Ciklus II za odnos maksimalne i nominalne struje od 1,15 temperatura provodnika je uvek manja od  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Na osnovu grafika 4a) i 4b) za ciklični faktor preopterećenja mogu se proceniti vrednosti 1,21 za dnevni dijagram Ciklus I i 1,16 za dijagram Ciklus II. Ovi rezultati su oko 3% za Ciklus I i 1,2% za Ciklus II veći od vrednosti dobijene prema standardu IEC 60853. Parametri Arenijus-IPM i Krajnovog modela preuzeti su is rada Mazzanti [21], a zavisnost aktivacione zapremine od zapremine iz rada Crine [18]. Na slici 5 prikazana je zavisnost životnog veka od faktora preopterećenja za dva dijagrama prikazana na slici 3 uz primenu Arenijus-IPM i Krajnovog modela starenja.



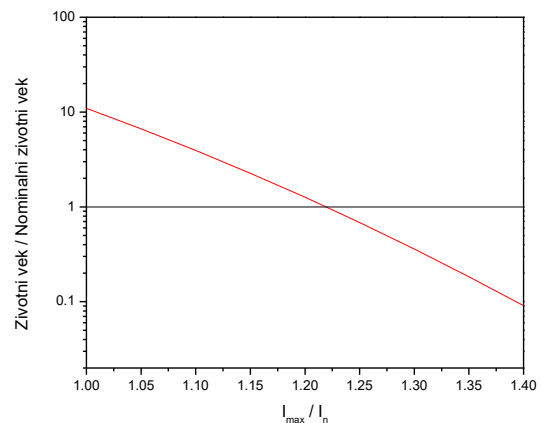
Slika 3 – Ciklični dijagrami opterećenja Mazzanti [21]



Slika 4 - Temperature provodnika pri dnevnim dijagramima sa slike 3 za jednožilne kablove  $630 \text{ mm}^2$

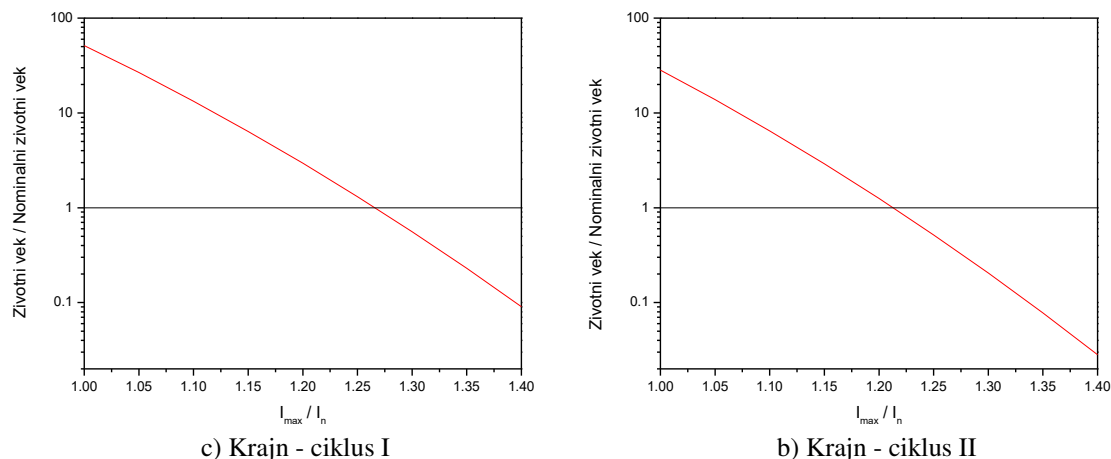


a) Arenijus-IPM - ciklus I



b) Arenijus-IPM - ciklus II





Slika 5 - Zavisnost životnog veka od faktora preopterećenja kablova izloženih dnevnim dijagramima opterećenja

Tabela 1 – Poređenje cikličnog faktora preopterećenja prema IEC 60853 i uz uvažavanje životnog veka kablova

Model	Ciklus I		Ciklus II	
IEC 60583	1,174		1,146	
Arenijus-IPM	1,278	8,15%	1,223	6,28%
Krajn	1,271	7,61%	1,217	5,85%

Faktor preopterećenja za koji se dobija životni vek jednak nazivnom životnom veku predstavlja ciklični faktor preopterećenja uz uvažavanje životnog veka kablova. U tabeli 1 prikazani su rezultati dobijeni sa grafika 5. Iz tabele se uočava da se primenom modela Arenijus-IPM dobijaju nešto veće vrednosti nego kod primene Krajnovog modela, kao i da su rezultati između 5,85% i 8,15% veći od vrednosti dobijene primenom IEC 60853.

## 7. ZAKLJUČAK

Analiza starenja kablova značajna je za primenu kablova, ali za sada još uvek ne postoji opšte prihvaćena teorija. Od matematičkih modela elektrotermičkog starenja koji se sreću u literaturi najzastupljeniji su Arenijus-IPM i Krajnov model. Strujna opteretljivost kablova izloženih cikličnom opterećenju uobičajeno se određuje primenom uprošćenog postupka predloženog u IEC standardu koji daje rezultate na stranu sigurnosti i ne sagledava životni vek kablova. U radu je predložen postupak za određivanje cikličnog faktora preopterećenje na način da životni vek izolacije bude jednak nominalnom životnom veku. Pokazano je da se za tipične dnevne dijagrame opterećenja kablovi mogu opteretiti maksimalnom strujom više od 5% većom od izračunate primenom standarda IEC 60853.

## LITERATURA

- [1] CIGRE Working Group 21.09, 1992, "Consideration of Ageing Factors in Extruded Insulation Cables and Accessories", Electra No. 140.
- [2] J. C. Forthegill, 2007, "Ageing, Space Charge and Nanodielectrics: Ten Things We Don't Know About Dielectrics", International Conference on Solid Dielectrics, UK.
- [3] D. N. Long, 2011, Impulse Ageing of Polymeric Materials, PhD Thesis, University of Southampton, UK.
- [4] V. M. Montsinger, 1930, "Loading Transformers by Temperature", AIEE Trans. 49, 776-790.
- [5] T. W. Dakin, 1948, "Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon", AIEE Transactions, vol. 67, no. 1, 113-122.
- [6] T. W. Dakin, 1960, "Electrical Insulation Deterioration", Electrotechnology, 123-130.
- [7] L. Simoni, 1973, "A New Approach to the Voltage-Endurance Test on Electrical Insulation", IEEE Transactions on Electrical Insulations, Vol EI-8, No. 3, 76-86.
- [8] E. Occhini, 1971, "A Statistical Approach to the Discussion of Electric Strength in Electric Cables", IEEE Trans. Power App. Syst., PAS-90, 2671-2678.
- [9] H. S. Endicott, B. D. Hatch, R. G. Sohmer, 1965, "Application of of Eyring Model to Capacitor Ageing Data", IEEE Trans. on Component Parts, vol. CP-12, 34-41.
- [10] L. Simoni, 1981, "A General Approach to the Endurance of Electrical Insulation under Temperature and Voltage", IEEE Transactions on Electrical Insulations, Vol EI-16, No. 4, 277-289.
- [11] S. N. Zhurkov, 1965, "Kinetic Concept of Strength of Solids", International Conference on Fracture, Japan.

- [12] M.A.Bagirov, Y.A. Ragimov, T.F. Abbasov and S.A. Abbasov, 1973, "Temperature and time dependences of the electrical and mechanical strength of polymer film", *Sov. Phys. Solid State*, Vol. 15, 1056–1058.
- [13] S. Mamedov, V. Alekperov, N. Can, F. Aras and G. Yilmaz, 2004, "Effects of Mechanical and Thermal Stresses on Electric Degradation of Polyolefins and Related Materials", *Macromolecular Symp.*, 293– 298.
- [14] J.P Crine, A. K. Vjih, 1985, "A Molecular Approach to the physico-chemical factors in the electric breakdown of polymers", *Applied Physics Communications*, vol 5(3), pp. 139-63.
- [15] J. L. Parpal, J. P. Crine, C. Dang, 1997, "Electrical Ageing of Extruded Dielectric Cables – A Physical Model", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 4, no. 2, 197-209.
- [16] T. J. Lewis, J.P. Llewellyn, M.J. van der Sluijs, J. Freestone, R.N. Hampton, 1996, "A new model for electrical ageing and breakdown in dielectrics", *XVII Int. Conf. on Diel. Materials, Meas. and Applications*, 23-26.
- [17] J. P. Crine, 2002, "Aging and Polarization Phenomena in PE under High Electric Fields", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulations*, Vol 9, No. 5, 697-703.
- [18] J-P. Crine, 2005, "On The Interpretation of Some Electrical Aging and Relaxation Phenomena in Solid Dielectrics", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 6, 1089-1107.
- [19] M. Stojanović, D. Tasić, N. Cvetković, A. Ristić, 2012, "Uticaj dnevnog dijagrama opterećenja na zagrevanje jednožilnih kablova položenih u zemlju", *CIGRE, Vrnjačka Banja, Srbija*, R-1.05.
- [20] ABB, 2010, *XLPE Land Cable Systems, User's Guide*.
- [21] G. Mazzanti, 2009, "The Combination of Electro-thermal Stress, Load Cycling and Thermal Transients and its Effects on the Life of High Voltage AC Cables", *IEEE Trans. on DEI*, vol. 16, no. 4, 1168-1179.