

dr. sc. Sonja Ravlić Begić, mag. ing. el.  
Ravel d.o.o.  
sonja.ravlic@ravel.hr

Velimir Ravlić, dipl. ing. el.  
Ravel d.o.o.  
velimir.ravlic@ravel.hr

Josip Bošnjak, dipl. ing. el.  
Encron d.o.o.  
josip.bosnjak@encron.hr

Ante Ravlić, mag. ing. el.  
Ravel d.o.o.  
ante.ravlic@ravel.hr

## PRORAČUNSKE METODE ODREĐIVANJA POGORŠAVANJA SVOJSTAVA ZBOG STARENJA PREŠANIH SPOJEVA VODIČA

### SAŽETAK

Prešani spojevi koji se koriste za spoj AlČ (engl. Aluminium Conductor Steel-Reinforced – ACSR) vodiča podvrgnuti su prilikom starenja pogoršanju svojstava te su spojevi podložni pregrijavanju. Budući da pogoršanje svojstava spoja može, u najgorem slučaju, na kraju završiti odvajanjem spoja, potrebno je periodički vršiti dijagnostička ispitivanja prilagođena za određeni tip spoja pri čemu se koristi oprema za termografska ispitivanja infracrvenim zračenjem za identifikaciju spojeva koji se pregrijavaju. Mnogi nedovoljno poznati mehanizmi koji uzrokuju pregrijavanje u ovom procesu pokazuju da ovaj pristup nije obvezno racionalna dijagnostička metoda.

Zbog toga su svijetu razvijene metode ubrzanog ispitivanja starenja spojeva koristeći spojeve manjih dimenzija za opažanje različitih pojava do kojih dolazi tijekom pogoršanja svojstava (deterioracije).

Ove pojave su posebno izražene u slučaju postrojenja s visokim strujama kratkih spojeva te su stoga analizirane nove dijagnostičke metode koje omogućuju procjenu stanja kompletnih prešanih spojeva uz zadovoljavajuću točnost.

**Ključne riječi:** prešani spojevi, pogoršanje svojstava zbog starenja, ubrzano ispitivanje starenja, dijagnostičke metode, ispitni krug

## EVOLUTION METHOD OF AGING DETERIORATION CHARACTERISTICS OF COMPRESSED JOINTS

### ABSTRACT

Compression joints used to connect Aluminum Conductor Steel-Reinforced (ACSR) undergo aged deterioration, and the joints are subject to overheating. Since such a deteriorated joint can, in the worst case, finally separate, we have periodically run a diagnostic check on this type of joint, using infrared thermal imaging equipment to identify any overheated joints.

Many unknown mechanisms causing overheating in this process indicate that this approach is not necessarily a rational diagnostic method.

For this reason, the authors conducted an accelerated aging test using short-size joints to observe a variety of phenomena perceivable during the process of deterioration.

These phenomena provide important basic evidence for determining a new diagnostic method to accurately evaluate the integrity of the compressed joints.

**Key words:** compression joint, aging deterioration, accelerated aging test, diagnostic methods, test circuit

## 1. UVOD

Za spajanje AlČ (ACSR) vodiča nadzemnih vodova i postrojenja najčešće se koristi čahure u sklopu tlačnih (prešanih) spojeva pri čemu se vodiči umeću u aluminijsku čahuru za tlačenje koja je nosač sklopa. Ovaj način spajanja može uzrokovati probleme zbog povećanja otpora kada dolazi do pogoršanja svojstava kontakata između čahure (tuljka) i vodiča. Osim toga, čahura može uzrokovati nadtemperaturu na mjestu spoja i, u najgorem slučaju, odvajanje spoja.

U zraku je površina aluminijska prekrivena s vrlo tankim slojem izolacijskog oksida. U slučaju metode tlačnih spojeva, oksidni sloj pukne zbog mehaničkih tlačnih naprezanja i metalne površine se prijanja te osiguravaju električne vodljive spojeve. Ipak, kontaktne površine imaju progresivno propadanje svojstava te dolazi do porasta otpora kada se spoj koristi duže vrijeme. To znači da se napredovanje propadanja svojstava ne može spriječiti tako dugo dok postoje sučelja kontakata između metalnih dijelova, čak ako je konstrukcija spoja pažljivo izvedena prema uputama proizvođača.

Također i životni vijek spoja može se znatno skratiti u usporedbi sa životnim vijekom vodiča.

Kako bi se eliminirao rizik rada zbog pogoršavanja svojstava prešanih spojeva, razne elektroenergetske kompanije su počele primjenu klinastog tipa stezaljki kod projektiranja novih nadzemnih vodova. Ovaj tip stezaljki je sposoban učvrstiti vodiče bez njihova rezanja, ali nije se do sada primjenjivao u prijenosnom sustavu Republike Hrvatske.

U slučaju nadzemnih vodova postoji veliki broj kompresijskih spojnica unutar raspona te se primjenjuje infracrveno termografsko snimanje opreme sa svrhom kontinuiranog nadzora kako bi se otkrili spojevi koji imaju nadtemperaturu. Termografsko snimanje ima velike prednosti zbog brzine rada i daljinskog dijagnostičiranja te činjenice da nadzemni vod ne mora biti isključen iz pogona. Također je omogućeno dobivanje više važnih podataka kao što su trenutne vrijednosti struje i brzine vjetra u trenutku mjerenja. Ova metoda omogućuje otkrivanje mjesta s pogoršanim svojstvima spojeva u slučajevima kada su vrijednosti otpora vrlo visoke odnosno na mjestima gdje je očigledna pojava pretjerane topline [1, 2]. To znači da se mogu otkriti mjesta gdje su značajno pogoršana svojstva spojeva. U slučaju elektroenergetskih postrojenja također se sve više primjenjuje infracrveno termografsko snimanje spojeva opreme i sabirnica. U visokonaponskim postrojenjima problem je posebno izražen u slučaju zamjene vodiča nadzemnih vodova zbog povećanja prijenosne moći nadzemnih vodova kada često treba mijenjati sabirnice i spojeve između aparata u visokonaponskim postrojenjima.

Direktno mjerenje vrijednosti otpora spoja je najpouzdanija metoda mjerenja, ali se može izvoditi samo kod isključenog nadzemnog voda. Treba naglasiti da u normama nisu definirane standardne vrijednosti za određivanje kriterija zamjene vodljivog spoja.

Zbog deregulacije tržišta, danas je imperativ smanjenje cijene održavanja i produženje životnog vijeka postojećih nadzemnih vodova i postrojenja te povećanje efikasnosti održavanja. Zato je potrebno primjenjivati pouzdane i jednostavne dijagnostičke metode.

Zbog tog razloga se primjenjuju ispitivanja s ubrzanim starenjem s primjenom kratkih spojeva za razmatranje različitih pojava za vrijeme razmatranog procesa pogoršanja svojstava. Ova ispitivanja omogućavaju dobivanje važnih podataka za određivanje novih dijagnostičkih metoda za što točnije određivanje svojstava kompresijskih (prešanih) spojeva.

## 2. KONFIGURACIJA SUSTAVA ZA PROCJENU REZULTATA ISPITIVANJA UBRZANOG STARENJA I MJERNE METODE

### 2.1. Općenito

Za sprječavanje kvarova u elektroenergetskom sustavu treba osigurati adekvatnu kontrolu kvalitete u procesu proizvodnje i montaže spojeva kako bi se dobili tehnički pouzdani spojevi.

Kroz projektirani životni vijek otpor spoja ne bi trebao porasti iznad određene vrijednosti. Naravno, ova granična vrijednost nije jednaka za sve spojeve. Ona ovisi o izvedbi opreme, dimenzijama, strujnom opterećenju, itd. te se obično određuje ispitivanjima.

U nekim normama kao što su npr. DIN VDE opisana su različita ispitivanja u svrhu određivanja prihvatljive duljine životnog vijeka spojeva i spojnog pribora za nadzemne vodove i postrojenja na osnovu rezultata ispitivanja od nekoliko tjedana (npr. 1000 ON-OFF ciklusa opterećenja s ispitnom strujom).

Treba istaknuti da postoje ispitivanja ubrzanog starenja ovjesnih i zateznih izolatora prema normi IEC 61109 koji simuliraju utjecaje okoliša. Navedeni utjecaji su ovisni o nivou zagađenja i klimatskim uvjetima, što bi značilo da se za različita mjesta ugradnje moraju primijeniti uvjeti u laboratorijima, što bi bilo vrlo teško izvesti. Prema normi IEC 61109 trajanje ispitivanja iznosi 1000 sati [3, 4, 5].

Međutim, rezultati takvih ispitivanja nisu dovoljni za procjenu preostalog životnog vijeka spojnog pribora u vezi procjene ponašanja spojnog pribora u duljem razdoblju.

Svakako treba razlikovati dva termina koji se često koriste, a prema definicijama u [5] glasi:

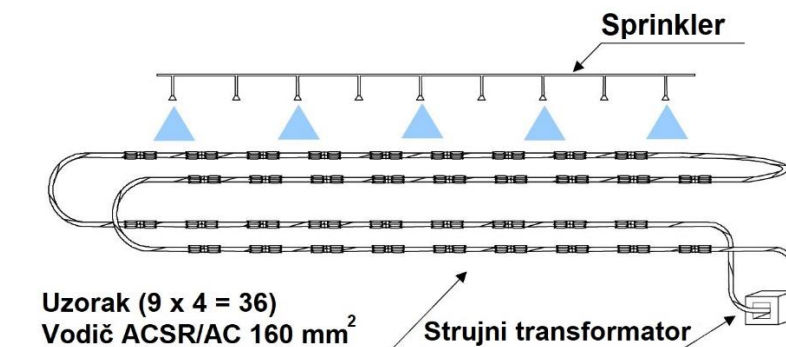
- a) deterioracija – permanentna redukcija svojstava uzrokovana primjenom naprezanja;
- b) degradacija – privremena redukcija svojstava koja prestaje nakon djelovanja naprezanja.

## 2.2. Konfiguracija sustava i ispitivanje uzoraka

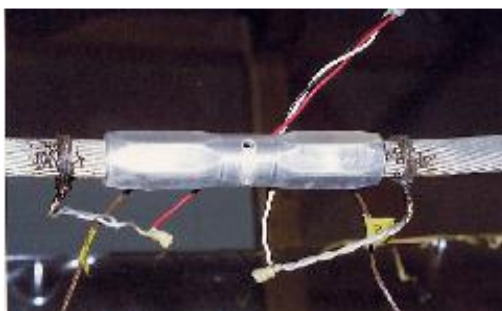
Primjenjuje se ispitivanje s primjenom cikličkog zagrijavanja pri čemu se koristi sprinkler za metodu ubrzanog pogoršanja svojstava [1]. Na slici 1 je prikazana osnovna konfiguracija ispitne opreme, a na slici 2 fotografija ispitnog kruga. Pri tome je korišten model s umanjenom veličinom 50% čahure koja se koristi kao uzorak sa svrhom razmatranja pojave starenja. Trideset šest (36) uzoraka je spojeno u seriju ispitnog kruga kako bi se osiguralo analiziranje određenog broja uzoraka u istim uvjetima starenja.



Sl. 1.: Osnovna konfiguracija ispitne opreme



Sl. 2.: Shematski prikaz ispitnog kruga



Sl. 3.: Konstrukcija uzorka [1]

### 2.3. Uvjeti cikličnog zagrijavanja

Sa zahtjevom efikasne identifikacije pogoršanja svojstava u kratkom vremenu, primjenjuje se 180% dopuštenog strujnog opterećenja uzorka [1].

Jedan ciklus se sastoji iz tri perioda: kontinuirano opterećenje kroz 2 sata, hlađenje raspršivanjem vode kroz 10 minuta nakon prekida napajanja električnom energijom i izlaganje sobnoj temperaturi kroz 1 sat i 50 minuta, što znači da je ukupno trajanje ovog ispitivanja 4 sata.

### 2.4. Uvjeti za procjenu svojstava uzoraka

U tablici 1 prikazani su uvjeti prešanja za razmatrane uzorke. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere otpori pri protjecanju izmjenične struje za svaki uzorak kao parametar za indicaciju pogoršanja svojstava.

Također se mjeri i temperatura kao bitan podatak za analizu dobivenih vrijednosti otpora. Pri tome se mjeri temperatura svakog uzorka i vodiča.

Tablica 1. Uvjeti prešanja za ispitne uzorke [1]

Uvjeti prešanja (standardni)		Premaz
Omjer presjeka kod prešanja	Tlak kontaktnih površina	
6,3	48,0 MPa	Bez premaza Premaz starije izvedbe Premaz suvremene izvedbe

## 3. REZULTATI ISPITIVANJA

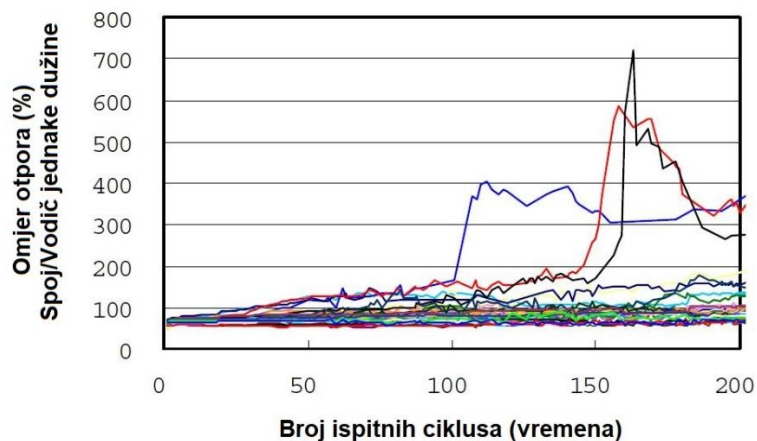
### 3.1. Ispitivanje bez premaza

S ciljem izbjegavanja utjecaja kiše koja bi mogla djelovati na pogoršanje svojstava prešanog spoja primjenjuju se premazi za spojeve. To znači da se primjenjuju ispitivanja bez premaza za prešane spojeve kako bi se dodatno istaknuo utjecaj pogoršanja svojstava na mjestu spoja.

Na slici 4 su prikazani rezultati ovog ispitivanja. Pri tome su na vertikalnoj osi prikazane vrijednosti otpora uzoraka s vrijednostima otpora samog vodiča (pretvoreno u vrijednosti pomnožene s 20), a na horizontalnoj osi je broj ciklusa (vrijeme).

U slučaju svih uzoraka koji su korišteni u ovom ispitivanju, uočeno je da je omjer otpora prije ispitivanja (u početnim uvjetima) iznosio približno 60% vrijednosti otpora vodiča jednake dužine. Vrijednosti se postepeno povećavaju kako se površina spoja pogoršava zbog djelovanja cikličkog zagrijavanja s raspršivanjem vode.

Uočeno je da svaki uzorak nije imao jednak prirast pogoršanja u istim ispitnim uvjetima i samo se otpor tri uzorka značajno povećao iznad određene krajnje vrijednosti (oko 150% u usporedbi s vodičem jednakih svojstava) koja slijedi zbog ekstremno nesigurnog ponašanja.



Sl. 4.: Promjena otpora bez premaza [1]

### 3.2. Utjecaj vrste premaza

Dok se ranije koristio premaz za zaštitu od korozije, koji je kao osnovnu komponentu koristio cinkov kromat (engl. tetabasic zinc chromate), sada se koriste izvedbe bez štetnih komponenti. Kod spojeva sa starijom izvedbom premaza uočeno je nastajanje velikog pogoršavanja svojstava u usporedbi sa spojevima koji koriste premaz suvremene izvedbe. Međutim, utjecaj premaza nije kvantitativno izračunat zbog razlika u radnom vijeku užeta i zbog različitih utjecaja okoline.

Za rješavanje navedenog problema izvršena su usporedna ispitivanja koja uzimaju u obzir reprodukciju svojstava premaza starije izvedbe kako bi se verifikacijskim ispitivanjima dokazao utjecaj premaza na pogoršanje svojstava.

Na slikama 5 i 6 prikazani su rezultati ispitivanja za premaze starije i sadašnje izvedbe.

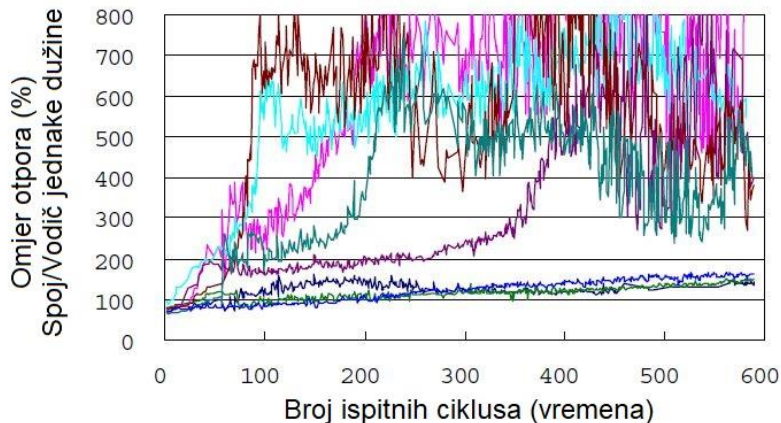
U slučaju premaza starije izvedbe uočena su značajna pogoršanja svojstava, dok su u slučaju premaza koji sada koriste (suvremene izvedbe) pogoršanja svojstava bila vrlo mala.

Usporedbom rezultata sa slika 4 i 5 vidljivo je da u slučaju spojeva sa starijom izvedbom premaza dolazi do drastičnog pogoršanja svojstava u usporedbi s izvedbom spojeva bez premaza [1].

To znači da premazi suvremene izvedbe obavljaju originalnu svrhu sprječavanja pogoršavanja svojstava spoja dok su premazi starije izvedbe poticali pogoršanje svojstava spoja.

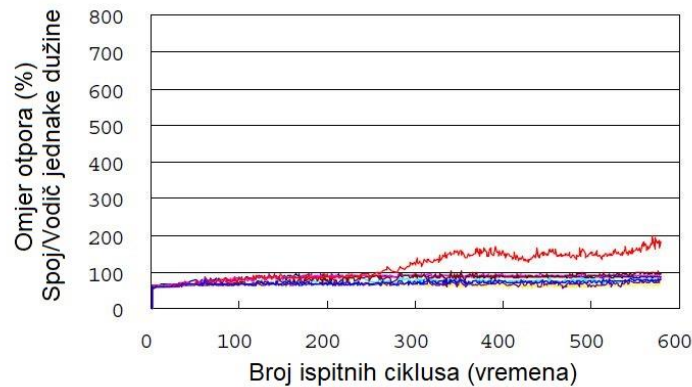
Sa slike 5 se može očitati da pogoršanje svojstava nije značajno i da otpor brzo poraste do odabrane postavne vrijednosti (oko 250% vrijednosti otpora u usporedbi s otporom samog razmatranog vodiča) nakon čega je ekstremno nestabilno ponašanje.

Dodatno je sa slike 6 vidljivo da je samo jedan uzorak imao pogoršana svojstva. Za vrijeme perioda ispitivanja, na ovom uzorku je bilo prisutno stupnjevano povećanje vrijednosti otpora, vrijednost otpora je iznenada povećana i ušla je u nestabilno područje, slično kao i u ostalim slučajevima, te se ta pojava treba analizirati u budućim ispitivanjima [1].



Sl. 5.: Promjena otpora u slučaju starijih premaza





Sl. 6.: Promjena otpora u slučaju suvremenih premaza

### 3.3. Opažanja u vezi velikih pogoršanja svojstava uzoraka

S prekoračenjem pogoršanja svojstava uzoraka prelazi se u nestabilno područje otpora, te se može predvidjeti smanjenje svojstava unutar spoja kao i neupotrebljivost metalnog kontakta. Za potvrdu ovih informacija, izvršena je demontaža spoja te su pronađene točke taljenja čiji su uzrok lokalne koncentracije struje.

Za opis pojave naglog porasta vrijednosti otpora, izveden je električni krug s modelom kompresijskog spoja kako bi se pokušalo reproducirati promjene otpora u procesu pogoršanja svojstava spoja.

Za određivanje pogoršanja svojstava uzoraka koristi se termovizijsko (termografsko) snimanje s ciljem otkrivanja lokalnog pregrijavanja čiji su uzrok koncentracije struja na žici što rezultira toplim mjestima na vodiču u blizini ruba čahure. Najviše temperature žice mogu dostići 270 °C dok temperature čahure i vodiča iznose približno 180 °C do 200 °C [1].

## 4. OSVRT U VEZI REZULTATA ISPITIVANJA

### 4.1. Pojava naglog porasta vrijednosti otpora

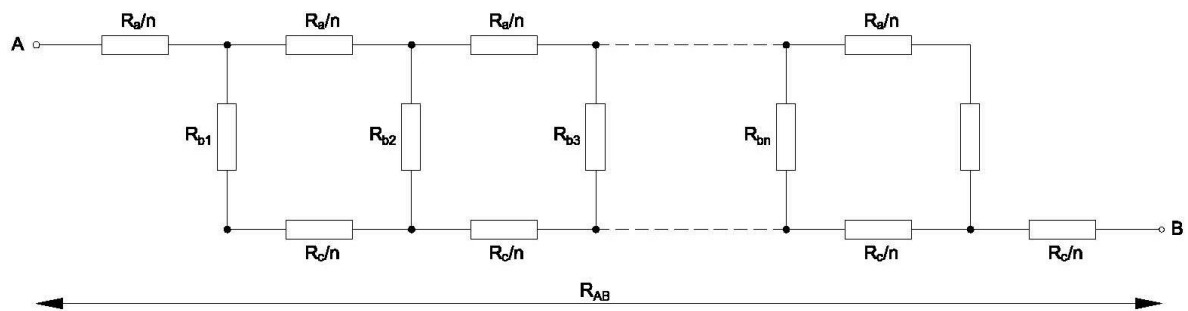
Za opis pojave naglog porasta vrijednosti otpora, predložen je električni krug s modelom kompresijskog spoja (slika 7.) kako bi se pokušalo reproducirati promjene otpora u procesu pogoršanja svojstava spoja [1].

U ekvivalentnom krugu modela prešani spoj je prikazan kao lanac otpora koji se sastoji od otpora čahure ( $R_a$ ), otpora vodiča ( $R_c$ ) i kontaktnog otpora ( $R_b$ ). Sljedeći uvjeti se moraju pretpostaviti u vezi kontaktnih mjesta:

1. Kontaktna mjesta su jednoliko distribuirana u smjeru dužine spoja i njihov je ukupni broj „ $n$ “.
2. Geometrija kontaktnih mjesta je kružna i početno mjesto kontakta polumjera  $a_0$  je isto.
3. Polumjer kontaktnih mjesta smanjuje se konstantno s pogoršanjem svojstava kontakta. Ako je smanjenje omjera polumjera kontaktnih mjesta po jedinici vremena „ $k$ “, tada se polumjer kontaktnog mjesta nakon vremena „ $t$ “ sati može opisati formulom „ $a = a_0 - k \cdot t$ “.

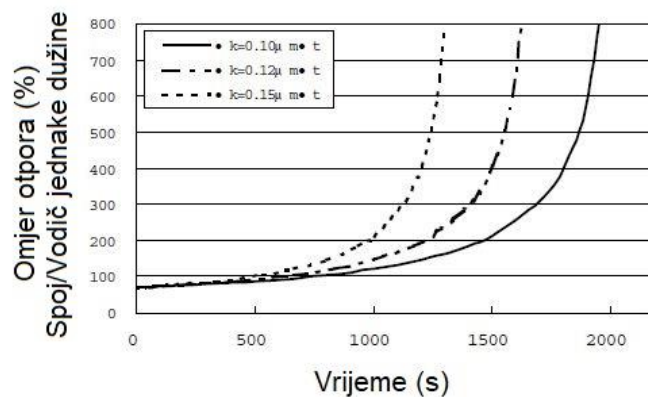
Dodatno su neovisnim vrijednostima rezultata mjerenja otpora čahure i otpora vodiča, te s početnim vrijednostima kontaktnog otpora koji se izračunava iz izmjerenih vrijednosti ukupnog otpora ( $R_{AB}$ ) nakon izvršenog prešanja spoja, dobivene sve vrijednosti pojedinih otpora.

Slika 8. prikazuje promjene ukupnog otpora spoja na površini kontaktne točke u slučaju ukupnog broja kontaktnih točaka  $n = 18$ .



Sl. 7.: Ekvivalentni krug modela prešanih (kompresijskih) spojeva

- $R_a$  - otpor
- $R_c$  - otpor vodiča
- $R_b$  - otpor kontakta
- $a_0$  - početni polumjer kontakta
- $a$  - polumjer kontaktne točke ( $= a_0 - k \cdot t$ )
- $k$  - smanjenje omjera polumjera kontakta
- $n$  - broj kontakata
- $\cdot$  - otpor kontakta
- $R_{AB}$  - otpor kompletnog spoja



Sl. 8.: Promjene otpora tijekom primijenjene vremenske sekvence (vremena) primjenom ekvivalentnog kruga modela [1]

Kao što je vidljivo sa slike 8., veće smanjenje prirasta kontaktnog dijela otpora znači i kraći period prije pogoršanja svojstava.

U svim slučajevima je pojava iznenadnog porasta otpora uspješno prikazana. Dodatno granična vrijednost iznosi oko 200% u usporedbi s vodičem iste dužine, što znači da je uvijek postignuta usuglašenost s rezultatima ispitivanja ubrzanog starenja.

U slučaju gdje dolazi do smanjenja stvarne kontaktne površine, očita je vjerojatnost da lagana povećanja ili smanjenja zbog promjena temperature imaju veći utjecaj ako su površine male, jer su tada promjene brže.

Ako se pretpostavi opisano ponašanje, pojava iznenadnog povećanja vrijednosti otpora može se objasniti.

#### 4.2. Pojava nestabilnih vrijednosti otpora

Unutar prešanih spojeva ekstremno pogoršanih svojstava, gdje dolazi do nestabilnog područja vrijednosti otpora, potrebno je razmatrati sljedeće pojave:

1. S pogoršanjem svojstava kontaktne površine dolazi do smanjenja stvarne kontaktne površine koja sudjeluje u električnoj vodljivosti spoja.
2. Kontaktne točke se pregrijavaju zbog koncentracije struje i neke od njih dostižu temperaturu točke taljenja aluminija.
3. U točki taljenja aluminija dolazi do značajnog privremenog porasta kontaktne površine. Kontaktni otpor se na tim mjestima smanjuje i temperatura kontaktnih točaka opada u pojedinim slučajevima.
4. Zbog toga što te kontaktne točke gube blizinska adhezijska svojstva i zbog toga što postoje spajanja i odvajanja područja taljenja, vrijednosti otpora su ekstremno nestabilne.

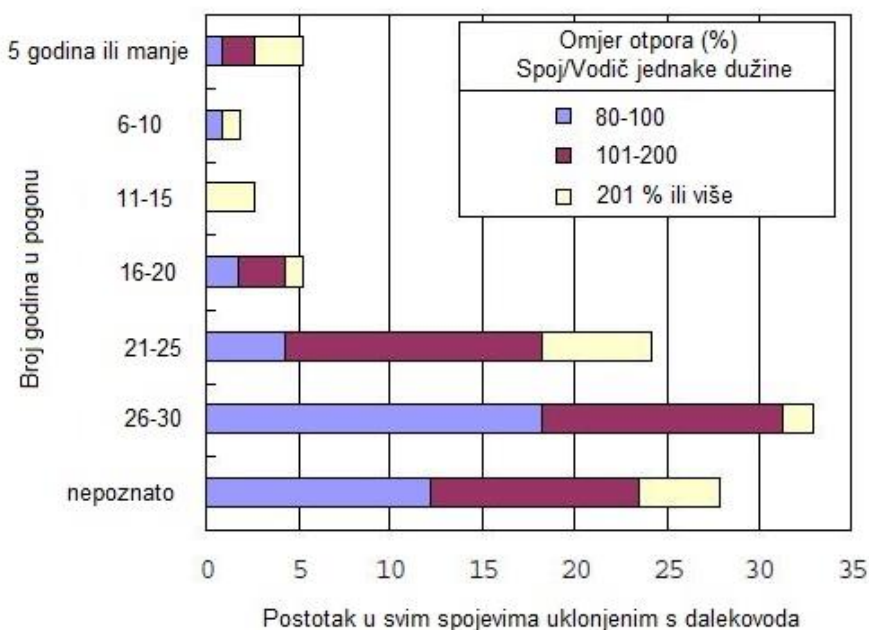
Tradicionalno nadziranje s termografskim infracrvenim snimanjem može pokazati da nema pretjeranog toplinskog zagrijavanja tijekom nadzora nakon što se pojava pretjeranog zagrijavanja spoja bila dogodila. Ekstremno pogoršana svojstva spoja predstavljaju nestabilno područje vrijednosti otpora, ali pojave pretjeranog zagrijavanja nema zbog toga jer su vrijednosti temperature spoja smanjene prilikom ponovnog nadzora.

#### 4.3. Utjecaj premaza na pogoršanje svojstava

Utvrđeno je da suvremene izvedbe premaza kontroliraju pogoršanje svojstava dok su starije izvedbe premaza pospješile pogoršanje svojstava. Uzrok ovog zaključka je da cinkov kromat (engl. tetabasic zinc chromate), koji je primarna komponenta starijih izvedbi premaza, reaktivno djeluje s aluminijem zbog zagrijavanja (Jouleovi gubici zbog protjecanja struje) uz podržavanje procesa pogoršanja svojstava što proizvodi visokootporni aluminijev oksid ili hidroksid na površini kontakata, a kao rezultat dolazi do pojave povećanja kontaktnog otpora.

#### 4.4. Određivanje faktora ubrzanja procesa pogoršanja svojstava

Analizom podataka o vrijednostima otpora prešanih spojeva dobivene iz vodova koji su u pogonu, faktor ubrzanja procesa može se izračunati iz izvršenih ispitivanja pogoršanja svojstava. Na slici 9. prikazani su omjeri između uvjeta pogoršanja svojstava i trajanja pogona spoja (uz korištenje starijih premaza čak je više od 80% vrijednost otpora u usporedbi s vodičima iste dužine) koji su dobiveni iz vodova koji su u pogonu [1].



Sl. 9.: Razine pogoršanja svojstava spojeva za određeno trajanje pogona

Uz analizu uzoraka koji su se koristili kroz zadnjih 20 godina ili nešto kraće vrijeme, pogoršanje svojstava rezultat su konstrukcijskih grešaka ili grešaka kod montaže kao što su asimetrična montaža ili



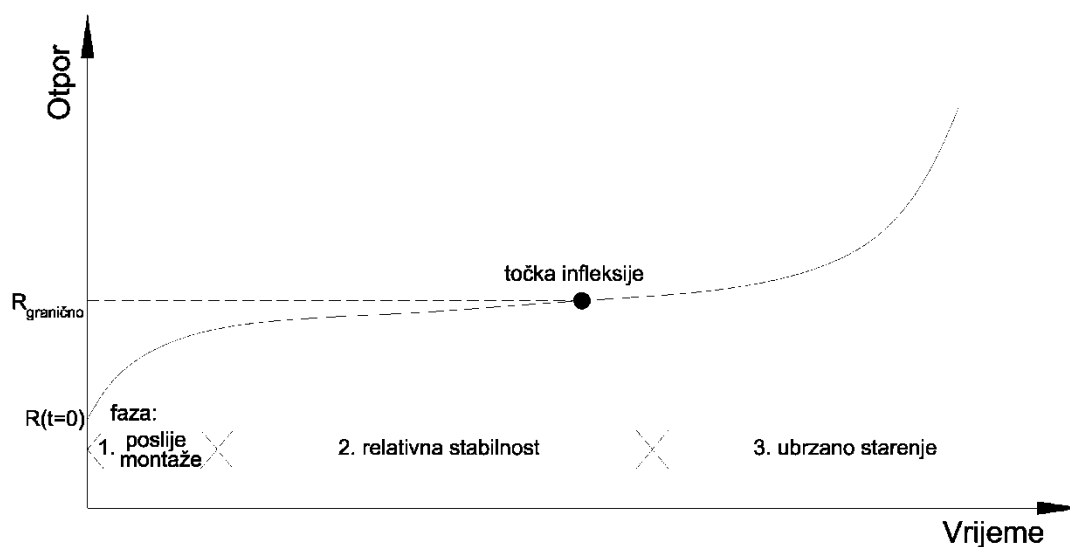
nečiste površine kontakata, ali u većini slučajeva dolazi do prirodnog pogoršanja svojstava koji su posljedica rada u stvarnim uvjetima vodova ili postrojenja te je očito da je zbog toga došlo u posljednjih 20 godina do drastičnog porasta pogoršanja svojstava. Na slici 5 pokazani su spojevi sa značajnim utjecajem pogoršanja svojstava (250% ili više u usporedbi s vodičem iste dužine) nakon približno 60 ciklusa. Ako se 60 ciklusa u ispitivanju ubrzanog starenja usporedi s 20 godina rada u stvarnim uvjetima nadzemnih vodova ili postrojenja, može se pretpostaviti faktor ubrzanja, koji bi u razmatranom slučaju iznosio približno 730.

#### 4.5. Osvrt u vezi matematičkog modela starenja

Općenito se promjena otpora tijekom duljeg vremena može razmatrati kroz tri faze:

1. faza: promjena otpora nakon montaže (nekoliko dana ili tjedana);
2. faza: faza relativne stabilnosti (nekoliko mjeseci, godina);
3. faza: ubrzano starenje, početak razaranja (nekoliko godina ili desetaka godina).

Kritična veličina otpora može se uzeti kao točka infleksije na krivulji promjene otpora (između prve i druge faze ili se može odrediti kao fiksna veličina tijekom ispitivanja), slika 10.



Sl. 10.: Principni prikaz promjene otpora zbog starenja kontakata [3]

## 5. OSNOVNI UZROCI NASTANKA KVAROVA SPOJEVA

Osnovni uzroci nastanka kvarova spojeva su: korozija aluminijskih kontaktnih površina, neprikladno očišćeni vodiči, asimetrična montaža aluminijskih čahura i čeličnih čahura za AlČ vodiče. Svi navedeni uzroci nastanka kvarova spojeva imaju svojstvo povećanja otpora duž spoja. Ukupni otpor duž spoja sastoji se od otpora vodiča, otpora čahure i kontaktnog otpora. Vrijednosti otpora se mijenjaju kasnije s dužim vremenom rada.

Usukavanje vodiča uzrokuje nehomogenost vodiča, a prešanje spoja ne može kompletno eliminirati praznine između strukova žica, te voda koja je često onečišćena, može prodirati u spoj. Voda tada ostaje u šupljinama sve dok ne ispari kroz zračne raspore unutar vodiča. Ova pojava je ovisna o temperaturi u spoju i vlažnosti u okolnoj atmosferi.

Voda unutar spoja tijekom vremena mijenja sadržaj kisika duž strujnog puta i stvara razlike potencijala. Razlike potencijala uzrokuju koroziju i pukotine u aluminiju, unutar spoja.

Vrijeme isušivanja vode utječe na jakost korozijskog procesa čije su posljedice pukotine u materijalu (engl. stress corrosion cracking ili crevice corrosion).

Uz dinamička naprezanja materijala zapaža se korozijski zamor (engl. corrosion fatigue) koji snižava granicu zamora u korozijskoj sredini.

Korozija čelične jezgre je općenito rezultat galvanске korozije. Ona se može opaziti kada je temperatura galvanizirane čelične jezgre iznad  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , te zaštitna uloga galvaniziranog sloja u odnosu na čelik može biti obrnuta. Tada čelik štiti galvanizirani sloj.

## 6. METODE ISPITIVANJA NA LOKACIJI

Električni otpor spoja je osnovni faktor za ispitivanje spojeva. Pri tome se može koristiti metoda temperaturnih mjerenja i metoda otpornih mjerenja ili obje metode.

Nije moguće detektirati asimetričnu montažu spojnih čahura koristeći metode temperaturnih mjerenja jer je razdioba temperature u aluminiju vrlo jednolična.

Različite izvedbe mjerenja na lokaciji nisu predmet ovog članka.

Pomoću boroskopskog ispitivanja moguće je detektirati koroziju u čeličnoj jezgri u AlČ vodičima, u blizini čelične čahure.

Ako je spoj ispunjen s masti za vrijeme montaže, tada se boroskopsko ispitivanje ne može primijeniti.

Stručna osoba koja interpretira rezultate ispitivanja treba poznavati činjenicu da površina čelične jezgre ovisi o tipu zaštite od korozije koja je primijenjena na čeličnu čahuru, npr. crvena olovna boja, boja bogata cinkom, vruće pocinčanje, paste bogate uljem ili neki drugi načini zaštite.

## 7. KRITERIJ PRIHVATLJIVOSTI

Kako bi se ostvario visoki stupanj pouzdanosti spojeva na starijim nadzemnim vodovima i postrojenjima, određen je skup kriterija prihvatljivosti.

Kriteriji sadrže tri razine pouzdanosti, uzimajući u obzir važnost voda ili postrojenja u vezi osjetljivosti na ispađe iz pogona, slučajeve mjesta prijelaza vodova i rizik za ljude u blizini voda ili postrojenja.

Kako je svojstvo standardnih tipova vodiča (ACSR, AAC, AAAC i ACAR) da mogu normalno raditi na temperaturama do 100 °C, te da je u mnogim državama preporuka da maksimalna temperatura u normalnom pogonu ne prelazi 75 °C, otpor spoja je veličina na osnovu koje se donosi odluka o hitnoj zamjeni.

U tom slučaju se planovi o budućem porastu strujnog opterećenja trebaju uzeti u obzir prilikom izbora rješenja.

## 8. KRITERIJ RAZINA OTPORA ILI TEMPERATURE SPOJA

Tri preporučene razine kriterija otpora ili temperature prema preporukama iz [6]:

1. Za spojeve gdje kvar i pad vodiča ima veliki utjecaj i ugrožava pouzdanost rada:

$$R_{spoja} < 0,7 \cdot R_j, T_j = T_c$$

2. Za spojeve gdje kvar i pad vodiča ima utjecaj i dovodi u opasnost pouzdanost rada:

$$R_{spoja} < R_j, T_j = T_c$$

3. Za spojeve gdje kvar i pad vodiča ima mali utjecaj na pouzdanost rada:

$$R_{spoja} < R_j, T_j = T_c + 10K$$

To znači da prva razina označava da otpor spoja treba biti manji od 70 % izračunate vrijednosti otpora kod koje spoj i vodič imaju istu temperaturu.

Treća razina prikazuje približno granicu moguće detekcije infracrvene fotografije u slučaju vrlo dobrih uvjeta.

U tablici 2 je prikazan primjer koji prikazuje prihvatljive vrijednosti otpora spoja za tri različite razine kriterija prihvatljivosti.

Tablica 2. Prihvatljive vrijednosti otpora spoja za tri različite razine kriterija prihvatljivosti [6]

Razina kriterija	Otpor spoja ( $\mu\Omega$ ) kod temperature vodiča	
	50 °C	80 °C
1	36	58
2	52	83
3	216	102

## 9. ZAKLJUČAK

Analizirani su osnovni podaci koji se događaju u procesu pogoršanja svojstava spojeva uz primjenu ispitivanja ubrzanog starenja sa spojevima kratke dužine kod različitih uvjeta. Ovi podaci su vrlo bitni za određivanje nove dijagnostičke metode za što točnije određivanje svojstava prešanih spojeva. Pri tome su doneseni sljedeći zaključci:

1. Granične vrijednosti otpora su određene u procesu pogoršanja svojstava prešanih spojeva i mogu biti referentne vrijednosti za donošenje odluke o potrebi zamjene. Također je uspješno izvršeno teorijsko razmatranje ove problematike pomoću električnog kruga modela spoja.

2. Ekstremno pogoršana svojstva spojeva pokazuju nestabilne vrijednosti otpora što znači da bi uzrok moglo biti ponovno spajanje taljenjem i razdvajanje točaka električnog kontakta, što omogućuje zaključivanje da su svojstva pogoršana ako je nadzor izveden ispravno.

3. Dok vjerojatnost nastanka pogoršanja svojstava prešanih spojeva varira u ovisnosti o tipu premaza, prikladno održavanje je moguće uz primjenu odgovarajućih premaza. Moguće je smanjiti cijenu održavanja izostankom stalnog nadzora prešanih spojeva uz primjenu premaza suvremene izvedbe koji ne sadrže cinkov kromat (engl. tetabasic zinc chromate).

Kontaktni otpor može se mjeriti odmah nakon izvršene montaže kako bi se odredile oslabljene točke i povećala pouzdanost rada te jamčio pouzdan rad sustava tijekom životnog vijeka.

### LITERATURA

- [1] A. Nozue, T. Nakazawa, E. Nishida: *Evaluation Method of Aging Deterioration Characteristics of Compressed Joints*, CIGRE Session 2002, 22-201
- [2] K. Nakamura, Y. Hase, Y. Yokota, E. Nishida: *Reduction of maintenance cost for overheated compression type clamps through newly developed countermeasure and improved control method*, CIGRE Session 2000, 22-205
- [3] V. Ravlić, D. Fortuna, B. Đikić: *Životni vijek kontakata u elektrotehničkim sustavima*, 16. Međunarodni „Elektroinženjerski simpozij“ Dani Josipa Lončara, Šibenik, 2008.
- [4] Dielectric of Electrical Equipment for AC Applications and its Effects on insulation Coordination, CIGRE, Session 1990, SC 15 and SC 33
- [5] V. Ravlić: *Užetne sabirnice u visokonaponskim postrojenjima*, Školska knjiga/Ravel, Zagreb, 2017.
- [6] *Joints on transmission line conductors field testing and replacement criteria*, CIGRE BROCHURE No 216, WG 22.12, 2002.