

Igor Nujić, struč.spec.ing.el.
Končar Institut za elektrotehniku d.d.
inuji@koncar-institut.hr

Ivan Gašparović, bacc.ing.el.
Končar Institut za elektrotehniku d.d.
igasparovic@koncar-institut.hr

Siniša Gazivoda, dipl.ing.
Končar Institut za elektrotehniku d.d.
sinisa.gazivoda@koncar-institut.hr

DIJAGNOSTIKA 110 KV-NIH TRANSFORMATORSKIH PROVODNIKA – ALAT ZA PREVENCIJU KVAROVA

SAŽETAK

U zadnjih nekoliko godina, nakon razgraničenja energetske djelatnosti, HEP ODS je dobio na održavanje veći broj transformatora 110 kV-ne naponske razine. Njihovo održavanje zahtjeva veći angažman što se tiče kontinuiranih ispitivanja i dijagnostičkih praćenja. Jedan od dijelova transformatora kojem se treba posebno posvetiti pažnja, su visokonaponski transformatorski provodnici.

U radu će biti prikazano nekoliko nedostataka koji su uočeni redovnom preventivnom dijagnostikom VN provodnika. U nekoliko primjera pokazati će se kako je kontinuirana i pravovremena dijagnostika transformatorskih provodnika na terenu vrlo učinkovita u otkrivanju potencijalno velikih kvarova transformatora, prije njihova nastanka.

Ključne riječi: transformator, transformatorski provodnik, dijagnostika, kvar, održavanje, kapacitet i faktor dielektričkih gubitaka

DIAGNOSTICS OF 110 KV BUSHINGS – MALFUNCTION PREVENTION TOOL

SUMMARY

In the last few years, after delocalisation of the energy business, HEP ODS has received a larger number of 110 kV transformers. Their maintenance requires large engagement regarding continuous testing and diagnostic monitoring. Transformer parts that need to be specially monitored are the HV bushings.

The paper presents several failures found by regular preventive diagnostics of the HV bushings. In several examples it will be shown that continuous and timely diagnostics of transformer bushings on the field is very effective in detecting potentially large transformer failures before they occur.

Key words: transformer, transformer bushings, diagnostics, maintenance, capacitance and dissipation factor

1. UVOD

Transformator predstavlja vrlo važan dio elektroenergetskog sustava te o njegovoj pouzdanosti i sigurnosti u pogonu ovisi sigurna opskrba potrošača električnom energijom. Kvarovi na transformatorskim provodnicima spadaju u grupu najčešćih kvarova transformatora, te kvar provodnika izaziva ispad transformatora na dulje vrijeme s elektroenergetske mreže.

Uvođenje pravovremene, kontinuirane dijagnostike transformatora doprinijelo je stalnom rastu pouzdanosti pogona transformatora i smanjenju neisporučene energije. Dijagnostika transformatora je bitna sastavnica preventivnog održavanja, te pomaže u sprječavanju većih havarijskih događaja i umanjivanju direktne i indirektne posljedice kvara. Zbog toga je važna pravovremena preventivna dijagnostika transformatorskih provodnika u pogonu [1].

Mjerenje kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka izolacije ($\tan\delta$) provodnika prema mjernom priključku služi za dobivanje pouzdane dijagnostičke slike stanja izolacije kondenzacijskog tijela provodnika. Na osnovu tih mjerenja mogu se odrediti stanje i ovlaženost izolacije, njezina ostarjelost, stanje mjernog priključka, te eventualni proboj kondenzatorskih obloga.

Kapacitet i faktor dielektričkih gubitaka su s obzirom na trajanje pogona stalne veličine, sve dok ne nastupi neki poremećaj. Povećanje kapaciteta ukazuje na proboj tj. spoj između pojedinih kondenzatorskih obloga provodnika, a povećanje $\tan\delta$ ukazuje na povećane gubitke u izolacijskom sustavu provodnika koji nastaju najčešće zbog ovlaženosti izolacije.

U radu će biti prikazano nekoliko nedostataka koji su nađeni redovnom preventivnom dijagnostikom provodnika. U nekoliko primjera pokazati će se kako je kontinuirana i pravovremena dijagnostika transformatorskih provodnika na terenu vrlo učinkovita u otkrivanju potencijalno velikih kvarova transformatora, prije njihova nastanka. Pravovremeno otkrivanje potencijalnih kvarova sprječava nastanak velikih havarijskih događaja, odnosno gubitak transformatora iz pogona na duži period i smanjuje troškove popravka/uklanjanja nađenih nedostataka.

2. OCJENA STANJA IZOLACIJE PROVODNIKA

2.1. Ocjena stanja prema faktoru dielektričkih gubitaka $\tan\delta$ izolacije provodnika

Prema našim iskustvima i dostupnoj literaturi [2] $\tan\delta$ novih transformatorskih provodnika, mjeren s 10 kV kod približno 20 °C iznosi:

- za OIP (oil-impregnated paper) provodnike 0,20 % do 0,40 %, a iznimno do 0,50 % kod starijih konstrukcija s poluvodljivim (grafitnim) elektrodama
- za RIP (resin-impregnated paper) provodnike oko 0,40 %
- za RBP (resin-bonded paper) provodnike 0,40 % do 0,60 %.

Kriteriji za ocjenu stanja izolacijskog sustava provodnika prema $\tan\delta$ mogu biti vezani za njegovu vrijednost ili za njegovu promjenu tijekom pogona. Zbog toga što početna vrijednost $\tan\delta$ obično nije poznata, postojeći kriterij za ocjenu stanja izolacijskog sustava je slijedeći [2]:

- $\tan\delta < 0,70$ % - stanje izolacije provodnika je uredno
- $0,70 < \tan\delta < 1,00$ % - oprez, stanje izolacije provodnika je nepouzđano. Potrebna su češća mjerenja (u roku od 6 mjeseci do godine dana) ili zamjena provodnika
- $\tan\delta \geq 1,00$ % - provodnik je neispravan. Smatra se da mu je ugrožena pogonska sigurnost i treba ga što prije zamijeniti.

Ako je poznata početna vrijednost faktora dielektričkih gubitaka novog provodnika $\tan\delta_p$, predlaže se primjena kriterija za ocjenu stanja izolacijskog sustava provodnika prema promjeni tijekom pogona [2].

- $\tan\delta < 1,5 \tan\delta_p$ - stanje provodnika je uredno
- $1,5 \tan\delta_p \leq \tan\delta < 2,5 \tan\delta_p$ - oprez, stanje izolacije provodnika je nepouzđano. Potrebna su češća mjerenja (u roku 6 mjeseci do godine dana) ili zamjena provodnika
- $\tan\delta \geq 2,5 \tan\delta_p$ - provodnik je neispravan. Smatra se da mu je ugrožena pogonska sigurnost i treba ga što prije zamijeniti.

Kod primjene navedenih kriterija treba imati na umu da je kriterij prema vrijednosti $\tan\delta$ nešto stroži za RBP provodnike, dok je drugi kriterij, prema promjeni $\tan\delta$, nešto stroži za OIP provodnike. Za RIP provodnike oba su kriterija praktički jednako primjenjiva.

2.2. Ocjena stanja prema promjeni kapaciteta C_1

Kapacitet C_1 je visokonaponski kapacitet, tj. kapacitet mjeran između visokonaponskog priključka i mjernog priključka. Kriterij za promjenu kapaciteta C_1 ovisi o broju serijski spojenih (elementarnih) kondenzatora koji ga tvore, ali tu se javlja problem, jer je taj broj poznat samo proizvođaču provodnika [1]. Broj elementarnih kondenzatora se povećava s naponom provodnika, a u određenoj mjeri ovisi i o njegovoj izvedbi. Prema iskustvu, povećanje kapaciteta od 2 do 3 % smatra se znakovitim. Ako se kojim slučajem, povećanje kapaciteta, poprati sa povećanjem $\tan\delta$, tada se preporuča takav provodnik ne stavljati više u pogon. Na temelju pretpostavke o proboju kondenzatora, predlažu se dozvoljena odstupanja kapaciteta u skladu s tablicom I.

Tablica I. Dozvoljena odstupanja kapaciteta C_1 provodnika u ovisnosti o naponskoj razini

$U_{\text{maksimalni napon opreme}} / \text{kV}$	Broj elementarnih kondenzatora u C_1	Dozvoljeno odstupanje C_1 , %
52	10	11
123	22	4,8
245	38	2,7
420	60	1,7

Ako se kapacitet promijeni za vrijednost jednaku ili veću od dozvoljenih odstupanja prema tablici I., provodnik treba zamijeniti prvom prilikom.

3. ŠTO JE KVAR PROVODNIKA?

U fizikalnom smislu kvar nastaje kada pogonska naprezanja premaše podnosiva naprezanja materijala. Na tome se temelji i široko prihvaćena definicija kvara kao gubitak funkcionalnih svojstva koji ima za posljedicu isključenje iz pogona. Djelomičan gubitak svojstava naziva se nedostatkom.

Možemo razlučiti dvije vrste kvarova provodnika. Treba uzeti u obzir da neki transformatori mogu imati i do 10 provodnika, a kvar bilo kojeg provodnika predstavlja ujedno i kvar transformatora.

Podjela kvarova transformatorskih provodnika [3]:

- Potpuni kvar provodnika predstavlja potpuni gubitak pogonskih svojstava. Najčešće je to njegovo rasprsnuće i obično je uzrokom velikih oštećenja i onečišćenja transformatora, a često i požara s povećom kolateralnom štetom. Dakle to su neplanirani, forsirani ispadi s velikim direktnim i indirektnim troškovima. Uzrok rasprsnuća uvijek je proboj kondenzatorskog tijela, gornjeg ili donjeg omotača (slika 1.).



Slika 1. Rasprsnuće gornjeg tijela transformatorskog provodnika

- Početni kvar provodnika nastaje kada nekom dijagnostičkom metodom registriramo nedostatak koji se može razviti u potpuni kvar. Ova vrsta kvara sanira se obično bez većih posljedica za transformator i u relativno kratko vrijeme, dakle s malim direktnim i indirektnim troškovima.

Gledajući ukupno, kvarovi provodnika se dijagnostikom stanja ne mogu spriječiti (oni su određeni kvalitetom provodnika i uvjetima pogona), ali se tako smanjuje udio potpunih kvarova na račun početnih, te ostvaruje veća pouzdanost pogona i znatna gospodarstvena ušteda.

4. TERENSKA DIJAGNOSTIKA TRANSFORMATORSKIH PROVODNIKA

4.1. Primjer 1 - promjena tanδ tijekom vremena

Na transformatoru proizvedenom 1975. godine redovita periodička ispitivanja su provedena svake dvije godine. Tvornički transformatorski provodnici nisu imali mjerni priključak, pa su 1993. godine zamijenjeni novim provodnicima. Novi provodnici su OIP tipa s porculanskim vanjskim omotačem, opremljeni s mjernim priključcima. U tablici II. prikazana su mjerenja od 2011. godine [4].

Tablica II. promjena tanδ tijekom vremena

Godina mjerenja	U_m / kV	tanδ / %	C / pF	Mjesto ispitivanja
2011	10	0,21	179,9	Teren
2013	10	0,25	180,3	
2015	10	0,39	179,6	
2017	10	1,95	180,1	
2017	10	1,66	184,9	Laboratorij
2017	50	2,11	185,5	

Kao što se vidi iz tablice II., dijagnostička mjerenja su pokazala da je, 24 godine nakon ugradnje, transformatorski provodnik neispravan po svim kriterijima za ocjenu stanja izolacije provodnika, te ga je potrebno zamijeniti novim. Kako nam je vlasnik transformatora izašao u susret i ustupio nam provodnik za daljnju analizu, na provodniku su napravljena mjerenja kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka tanδ u visokonaponskom laboratoriju. Iz tablice II. također je vidljivo da sa porastom napona raste i tanδ.

Dodatno, u laboratoriju su napravljena i mjerenja parcijalnih izbijanja na predmetnom transformatorskom provodniku, a rezultati se nalaze u tablici III.

Tablica III. Mjerenje parcijalnih izbijanja

U_m , kV	PI / pC
50,1	150
45,0	122
36,0	80
33,0	2

Iz tablice III. vidljivo je da sa porastom ispitnog napona dolazi po porasta parcijalnih izbijanja. Izmerene vrijednosti ne zadovoljavaju kriterije s obzirom na propisane u IEC 60137:2017, tablica 9 [5]. Ispitni napon nije dizajniran više od 50 kV zbog opasnosti od rasprsnuća provodnika.

4.2. Primjeri 2 i 3 - promjena tanδ u odnosu na početne vrijednosti

Transformator i provodnici proizvedeni su 2003. godine. Također kao i u prvom primjeru radi se o OIP tipu provodnika s porculanskim vanjskim omotačem. U vremenu do 2014. godine napravljena su samo dva dijagnostička mjerenja (2009. i 2014.). Kod ovog provodnika primjenjen je kriterij za ocjenu stanja izolacije prema promjeni tanδ tijekom pogona kad je poznata početna vrijednost tanδ. Rezultati terenskih mjerenja su prikazani u tablici IV. [6].

Tablica IV. Primjena kriterija prema promjeni tanδ tijekom pogona – primjer 2

Godina mjerenja	U_m / kV	tanδ / %	C / pF
2009	10	0,19	353,8
2014	10	0,36	353,8

S obzirom da smo imali barem jedno mjerenje prije zadnjeg mjerenja 2014. godine, vrijednost tanδ tog mjerenja smo proglasili početnom vrijednosti faktora dielektričkih gubitaka izolacije provodnika. Primjenom kriterija $1,5 \tan\delta \leq \tan\delta < 2,5 \tan\delta$ preporučeno je, uzimajući u obzir važnost transformatora, da se provodnik zamijeni prvom prilikom. Važno je napomenuti da ostala tri provodnika iz drugih faza na tom transformatoru nisu imali porast dielektričkih gubitaka izolacije provodnika.

Još jedan sličan primjer je nađen na transformatoru starom 30 godina. Na njemu su montirani novi provodnici 1991. godine, nakon 5 godina pogona transformatora. Prvo mjerenje obavljeno je 2000. godine, a ostala dva 2011. i 2016. godine. Rezultati su dati u tablici V. [7].

Tablica V. Primjena kriterija prema promijeni tanδ tijekom pogona – primjer 3

Godina mjerenja	U_m / kV	tanδ / %	C / pF
2000	10	0,18	192,80
2011	10	0,21	191,66
2016	10	0,57	191,34

I u ovom primjeru je pravovremena dijagnostika na vrijeme „ulovila“ transformatorski provodnik s oslabljenim izolacijskim sustavom. Najveći porast faktora dielektričkih gubitaka izolacije provodnika tanδ, odnosno slabljenje izolacije, nastalo je u periodu od 2011. do 2016. godine. U tom periodu tanδ narastao je za više od dva puta. Primjenom kriterija $\tan\delta \geq 2,5 \tan\delta$ ovaj provodnik je odmah nakon ispitivanja zamijenjen novim provodnikom.

4.3. Primjer 4 - ovisnost tanδ o naponu i frekvenciji

Razvojem dijagnostičkih uređaja polako se uvodi i novo mjerenje u dijagnostici transformatorskih provodnika. Osim klasičnog mjerenja kod 10 kV, 50 Hz, sada se pruža mogućnost i mjerenja tanδ transformatorskog provodnika u ovisnosti o naponu (2-12 kV), te ovisnost tanδ o frekvenciji (15 – 400 Hz). U ovom primjeru pokazano je kakav utjecaj imaju provodnici s lošim izolacijskim svojstvima na vrijednosti tanδ u ovisnosti o naponu i frekvenciji.

Predmetni transformator je proizveden 2003. godine kad i provodnici. Na transformatoru je OIP tip provodnika sa porculanskim vanjskim omotačem. Rezultati mjerenja pri 10 kV, 50Hz kroz godine su dani u tablici VI. [8].

Tablica VI. Promjena tanδ tijekom pogona

Godina	tanδ / % pri 20°C			
	Nultočka	Faza U	Faza V	Faza W
2011	0,17	0,17	0,17	0,17
2013	0,21	0,21	0,21	0,21
2017	0,18	0,35	0,61	0,21

Pri standardnom mjerenju u prva dva ispitivanja provodnici su bili u ispravnom stanju, s dobrom izolacijom, dok se provodnik u fazi V pokazao lošim pri mjerenju iz 2017. godine. Na transformatoru su napravljena mjerenja $\tan\delta$ u ovisnosti o naponu i frekvenciji čiji su rezultati dani u tablicama VII. i VIII. [8].

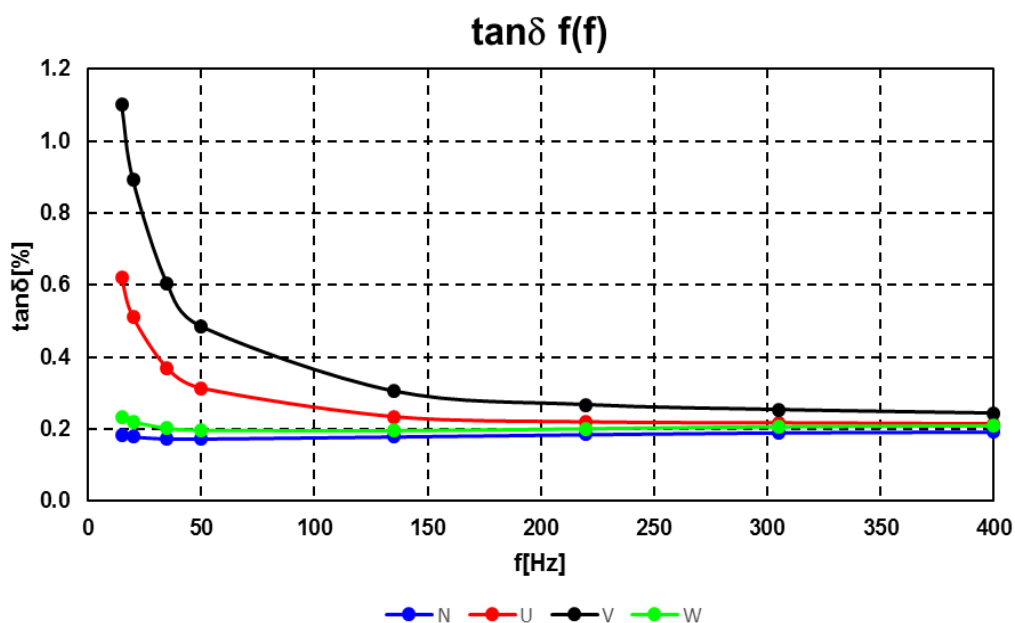
Tablica VII. Mjerenje $\tan\delta$ u ovisnosti o naponu

Napon mjerjenja / kV	$\tan\delta$ / %, pri 20°C, 50 Hz			
	Nultočka	Faza U	Faza V	Faza W
2	0,17	0,31	0,48	0,20
4	0,17	0,32	0,51	0,20
6	0,17	0,33	0,55	0,20
8	0,18	0,34	0,58	0,20
10	0,18	0,35	0,61	0,21
12	0,19	0,36	0,64	0,22

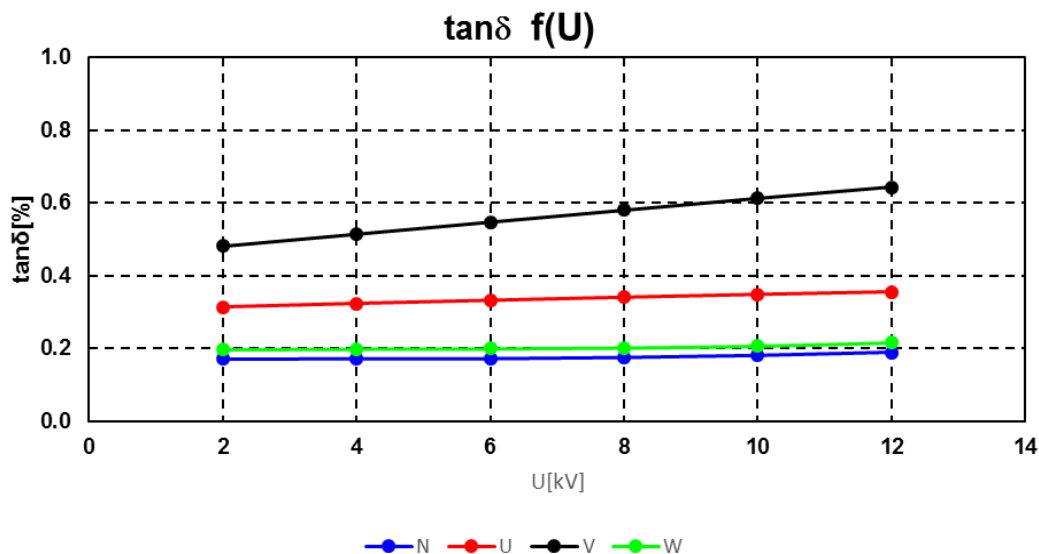
Tablica VII. Mjerenje $\tan\delta$ u ovisnosti o frekvenciji

Frekvencija / Hz	$\tan\delta$ / %, pri 20°C, 2kV			
	Nultočka	Faza U	Faza V	Faza W
15	0,18	0,62	1,10	0,23
20	0,18	0,51	0,89	0,22
35	0,17	0,37	0,60	0,20
50	0,17	0,31	0,48	0,20
135	0,18	0,23	0,30	0,20
220	0,19	0,22	0,27	0,20
305	0,19	0,22	0,25	0,21
400	0,19	0,21	0,24	0,21

Radi preglednosti rezultata, napravljena su dva grafa iz tablica VII. i VIII. prikazana na slici 2 i 3.



Slika 2. Graf ovisnosti $\tan\delta$ o frekvenciji



Slika 3. Graf ovisnosti tanδ o naponu

Iz grafa ovisnosti tanδ o naponu može se uočiti sljedeće:

- povećane vrijednosti tanδ provodnika u fazi V na čitavom mjernom području u odnosu na provodnike u nultochki, fazi W (izraženije), te fazi U (manje izraženo)
- porast vrijednost tanδ provodnika u fazi V s povećanjem napona dok je to manje izraženo kod provodnika u fazi U, a praktično zanemarivo kod provodnika u nultochki i fazi W.

Ovo mjerenje je otklonilo svaku sumnju da se radi o lošem provodniku u fazi V.

Iz grafa ovisnosti tanδ o frekvenciji vidi se kako provodnik u fazi V ima iznimno velike vrijednosti pri niskim frekvencijama što samo potvrđuje još jednom njegovu dijagnozu. No međutim, značajno povećanje tanδ pri niskim frekvencijama ima i provodnik u fazi U. Iako u početku provodnik nije „izgledao“ tako loš, mjerenjem s ovisnosti o frekvenciji pokazalo se da ima razloga za zabrinutost. Vlasnik transformatora je odlučio zamijeniti oba provodnika prije puštanja transformatora u pogon.

Primjer je pokazao da mjerenjem provodnika u ovisnosti s naponom i frekvencijom možemo ranije predvidjeti lošu izolaciju nego s standardnim mjerenjem pri 10 kV, 50Hz.

5. ZAKLJUČAK

Primjeri iz prakse prikazani u članku pokazali su da pravremena i kontinuirana dijagnostika te redovita ispitivanja transformatorskih provodnika povećavaju pouzdanost i sigurnost pogona transformatora. Suvremena dijagnostička oprema nam omogućava da sa sigurnošću možemo u terenskim uvjetima odrediti stanje, odnosno ocijeniti pouzdanost provodnika.

Također, zadnjih godina se osim standardnog mjerenja kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka izolacije provodnika tanδ kod 10 kV, 50 Hz, uvodi i mjerenje tanδ s promijenjivim naponom i frekvencijom. Smatra se da će ta nova vrsta dijagnostičkog alata pomoći da se u budućnosti još ranije detektiraju „problematici“ provodnici i osigura još sigurniji i pouzdaniji pogon transformatora. Da bi se to ostvarilo potrebno je i u planove održavanja transformatora uvoditi metode i kriterije koji daju kompletniju sliku stanja transformatorskog provodnika,

6. LITERATURA

- [1] Igor Nujić, "Terenska dijagnostika transformatorskih provodnika", seminarski rad, Tehničko veleučilište u Zagrebu, studeni 2011. godine
- [2] Antun Mikulecky, Magistarski rad, "Dijagnostika kondenzatorskih provodnika transformatora", Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2003
- [3] Antun Mikulecky, Doktorska dizertacija, "Kapacitet i faktor dielektričkih gubitaka transformatorskih provodnika", Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2006
- [4] Končar – Institut za elektrotehniku, "Izvještaj o ispitivanju", broj 033611, 029013, 110215, 104217, 022617, Zagreb 2011-2017
- [5] IEC 60137:2017, tablica 9, Insulated bushing for alternating voltages above 1000 V, December 2017
- [6] Končar – Institut za elektrotehniku, "Izvještaj o ispitivanju", broj 056009, 013114, Zagreb 2009-2014
- [7] Končar – Institut za elektrotehniku, "Izvještaj o ispitivanju", broj 0212/00, 047811, 103916, Zagreb 2000-2016
- [8] Končar – Institut za elektrotehniku, "Izvještaj o ispitivanju", broj 052111, 032213, 104017, 022417, Zagreb 2011-2017