# Visokonaponska ispitivanja i vizualni pregledi opreme za rad pod naponom

**Arambašić, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:681816

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-19**

*Repository / Repozitorij:*

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

# VISOKONAPONSKA ISPITIVANJA I VIZUALNI PREGLEDI OPREME ZA RAD POD NAPONOM

**Diplomski rad**

**Ivan Arambašić**

**Osijek, 2017.**

# SADRŽAJ:

1. UVOD ..... 1
2. VISOKONAPONSKE ISPITNE METODE PREMA NORMI IEC 60060-1 ..... 2
2.1. Glavne definicije u području VN laboratorijskog ispitivanja ..... 3
2.2. Glavni zahtjevi vezani za ispitne procedure i ispitivane uređaje ..... 5
2.2.1. Zahtjevi vezani za ispitne procedure ..... 5
2.2.2. Priprema za provođenje ispitivanja uređaja i opreme ..... 5
2.3. Ispitivanje u vlažnim uvjetima ..... 6
2.3.1. Standardna ispitna metoda u vlažnim uvjetima ..... 6
2.3.2. Tradicionalna vlažna ispitna metoda izmjeničnim naponom ..... 8
2.3.3. Ispitivanje umjetnim onečišćenjem ..... 9
2.4. Dielektrična ispitivanja istosmjernim naponom ..... 13
2.4.1. Ispitna procedura naponske izdržljivosti istosmjernim naponom ..... 14
2.4.2. Ispitna procedura dielektrične čvrstoće istosmjernim naponom ..... 14
2.5. Dielektrična ispitivanja izmjeničnim naponom ..... 16
2.5.1. Zahtjevi za ispitni krug transformatora ..... 16
2.5.2. Ispitna procedura naponske izdržljivosti izmjeničnim naponom ..... 18
2.5.3. Ispitna procedura dielektrične čvrstoće izmjeničnim naponom ..... 18
2.6. Dielektrično ispitivanje udarnim impulsnim naponom ..... 19
2.6.1. Ispitni impulsni udarni napon ..... 21
2.6.2. Ispitna procedura naponske izdržljivosti udarnim impulsnim naponom ..... 23
2.7. Dielektrično ispitivanje impulsnom strujom ..... 24
2.7.1. Ispitne impulsne struje ..... 25
3. RAD U LABORATORIJU ..... 27
3.1. Vrste i opis laboratorija ..... 27
3.2. Akreditacija laboratorija ..... 28
3.3. Zaštita ljudi u visokonaponskom laboratoriju, osnovni tehnički i osnovni kadrovski uvjeti ..... 29
4. PRIMJER VN ISPITIVANJA ..... 33
4.1. Vizualni pregledi ..... 33
4.2. Dielektrično ispitivanje ..... 35
4.3. Postupak određivanja prijenosnog omjera transformatora za mjerenje ispitnog napona ..... 38
5. KOREKCIJSKI FAKTORI ..... 39
5.1. Faktor gustoće zraka ..... 40

5.2. Faktor vlažnosti zraka ..... 40
6. IZRADA ISPITNE METODE ..... 42
6.1. Opis ispitne procedure ..... 42
6.2. Validacija mjernih rezultata ..... 46
6.3. Mjerna nesigurnost ..... 46
6.3.1. Procjena mjerne nesigurnosti A tipa ..... 47
6.3.2. Procjena mjerne nesigurnosti B tipa ..... 48
7. SUSTAV UPRAVLJANJA KVALITETOM KONTROLNO-ISPITNOG LABORATORIJA ..... 51
7.1. Ključne funkcije kontrolno-ispitnog laboratorija ..... 51
7.2. Struktura sustava upravljanja kvalitetom kontrolno-ispitnog laboratorija ..... 53
8. ZAKLJUČAK ..... 54
9. LITERATURA ..... 55
SAŽETAK ..... 56
ABSTRACT ..... 56
ŽIVOTOPIS ..... 57

# 1. UVOD

Potražnja za električnom energijom današnjice ubrzano raste u svim segmentima potrošnje (kućanstva, industrije, javni prostori i sl.). Stoga je potrebno osigurati kvalitetan i stabilan prijenos električne energije zadovoljavajući pritom zahtjeve propisane normama. Prijenosni sustavi vode se isključivo na visokom naponu zbog smanjenja gubitaka energije u mreži. Električna oprema i uređaji koji se koriste na visokom naponu moraju izdržati različita naprezanja (mehanička, termička, kemijska i električna) uslijed djelovanja jakog električnog polja i vanjskih utjecaja. U mreži se osim normalnih i očekivanih naprezanja materijala povremeno javljaju i kvarna stanja poput prenaponskih valova i kratkih spojeva uzrokovani sklopnim operacijama u postrojenjima, industriji (uklop/isklop velikih tereta) i atmosferskim pražnjenjima. Te pojave su većinom kratkog vremenskog trajanja, ali od velikog značaja za opremu i uređaje u postrojenju jer uzrokuju dinamička naprezanja. Da bi oprema normalno funkcionirala mora proći kroz različita visokonaponska testiranja i ispitne procedure gdje ključnu ulogu ima izolacija pojedinog uređaja ili aparata.

U ovome radu prikazat će se metode i postupci visokonaponskih laboratorijskih ispitivanja prema međunarodnoj normi IEC 60060-1, zatim pregled ispitne metode na praktičnom primjeru odrađenim u jednom kontrolno ispitnom laboratoriju, korekcijski faktori u VN laboratoriju i prikaz sustava kvalitete pri obavljanju laboratorijskih aktivnosti.

# 2. VISOKONAPONSKE ISPITNE METODE PREMA NORMI IEC 60060-1

Norma IEC 60060-1 primjenjuje se u području dielektričnih ispitivanja električnih aparata i opreme na slijedeće načine:

- dielektrična ispitivanja istosmjernim naponom;

- dielektrična ispitivanja izmjeničnim naponom;

- dielektrična ispitivanja impulsnim naponom;

- ispitivanja impulsnom strujom;

- ispitivanja kombinacijom navedenih metoda [1].

Navedena norma može se primijeniti samo pri testiranju opreme na ispitnim naponima ($U_m$) 1 kV i više.

Norma nije namijenjena za ispitivanje elektromagnetske kompatibilnosti na električnim i elektroničkim uređajima.

Svrha i glavni ciljevi norme IEC 60060-1 su:

- definiranje uvjeta korištenja u općoj i specifičnoj primjeni;

- predodžba općih zahtjeva norme bez obzira na ispitnu opremu i metodu ispitivanja;

- opis metoda za generiranje i mjerenje ispitnih napona i struja;

- opis ispitnih procedura;

- opis metoda za procjenu mjerne nesigurnosti i određivanje okvirnih kriterija za prihvaćanje i odbijanje mjerenih rezultata ispitivanja [1].

## 2.1. Glavne definicije u području VN laboratorijskog ispitivanja

1. Impulsni valovi

Impulsni valovi su namjerno narinute, aperiodičke prijelazne veličine (naponi, struje) koje uobičajeno vrlo brzo rastu do maksimalne vrijednosti i nakon toga sporije opadaju do krajnje vrijednosti 0. U nekim slučajevima ispitivanja koriste se impulsne veličine aproksimativno sinusnog ili pravokutnog oblika.

Udarni i sklopni impulsi - razlika im je u vremenu trajanja vala. Impulsi s vremenom trajanja vala do 20 μs su prepoznatljivi kao udarni impulsi, a impulsi sa dužim vremenom trajanja vala su poznati kao sklopni impulsi.

2. Karakteristike vezane za proboj izolacije

Proboj izolacije - pojava uništavanja izolacije električnih aparata i opreme uslijed velikih električnih naprezanja. Tijekom ispitivanja pražnjenje potpuno uništava izolaciju (kratko ju spaja) snižavajući pritom napon između elektroda praktički do nule. Proces ispitivanja dielektrične čvrstoće koristi se kod krutih, tekućih, plinovitih i kod kombinacija navedenih dielektrika.

Preskok - proboj izolacije po površini dielektrika u plinovitim i tekućim medijima.

Puknuće - proboj izolacije kroz kruti medij.

Proboj izolacije kroz krute medije uzrokuje trajni gubitak dielektrične čvrstoće dok je taj gubitak kod plinovitih i tekućih medija samo kratkotrajan.

3. Karakteristike ispitnog napona

Karakteristike specificirane u normi za određivanje različitih tipova napona koji ujedno predstavljaju ispitne napone.

Moguće karakteristike ispitnog napona - karakteristike koje bi mogle biti dobivene u slučaju da se ne dogodi proboj izolacije.

Stvarne karakteristike ispitnog napona - karakteristike koje se pojavljuju na priključnicama ispitivanog uređaja ili dijela opreme.

4. Probojni napon ispitivanog uređaja

Predstavlja vrijednost ispitnog napona koji uzrokuje proboj izolacije, točno određen za pojedine vrste testiranja po odrednicama norme IEC 60060-1.

5. Statističke karakteristike probojnog napona

Probojni napon je predmet nasumičnih varijacija. Stoga je potrebno provesti određeno vrijeme zapažanja da bi se dobile značajne vrijednosti napona. Sve ispitne procedure koje se izvode prema ovoj normi baziraju se na statističkim razmatranjima.

Vjerojatnost ($p$) proboja izolacije ispitivanog uređaja - vjerojatnost koja ukazuje na to da bi određena vrijednost ispitnog napona u nekom trenutku ispitivanja mogla prouzrokovati proboj izolacije na ispitivanom uređaju. Parametar ($p$) može biti iskazan u postocima (0 - 100%) ili u obliku decimalnom zapisa (0 - 1).

Vjerojatnost izdržljivosti ($q$) ispitivanog uređaja - vjerojatnost koja ukazuje da se tijekom ispitne procedure neće dogoditi proboj izolacije. Prema prethodnoj definiciji vjerojatnost izdržljivosti ($q$) se određuje kao ($1 – p$).

50%-tni probojni napon ($U_{50\%}$) ispitivanog uređaja - moguća vrijednost ispitnog napona kod koje je 50% vjerojatnost da će prouzročiti proboj izolacije. Moguće su i ostale vrijednosti probojnog napona zapisano u obliku $U_{p\%}$.

Standardna devijacija ($z$) probojnog napona - razlika između 50% i 16% vrijednosti probojnog napona. Često se izražava u p.u. (per unit-ima).

Granični napon ispitivanog uređaja - vrijednost napona koja karakterizira izolaciju uređaja s obzirom na naponsku granicu iznad koje se događa proboj izolacije.

6. Klasifikacija izolacije ispitivanih uređaja

Izolacijski sustavi električnih aparata visokog napona dijele se na sustave koji su samoobnovljujući i na sustave koji se ne mogu samostalno obnoviti, a mogu se sastojati od unutarnje i/ili vanjske izolacije.

Vanjska izolacija - predstavlja zračnu izolaciju i površine čvrste izolacije aparata, koje su izložene dielektričnim naprezanjima i atmosferskim prilikama, te drugim čimbenicima kao što su vlaga, štetočine i onečišćenje zraka.

Unutarnja izolacija - uključuje unutarnje krute, tekuće ili plinovite izolacijske medije koji su zaštićeni od atmosferskih i drugih vanjskih utjecaja poput vlage, štetočina i onečišćenja zraka.

Obnovljujuća izolacija - izolacija koja u potpunosti obnavlja svoje izolacijske karakteristike nakon proboja uzrokovanog ispitnim naponom u laboratoriju.

Neobnovljujuća izolacija - izolacija koja nakon proboja ne može obnoviti svoje izolacijske karakteristike ili ih obnavlja nepotpuno. U praksi električnih aparata visokog napona dijelovi obje navedene vrste izolacija rade paralelno, te se određeni dijelovi mogu oštetiti ovisno o vanjskim i unutarnjim naprezanjima izolacije.

## 2.2. Glavni zahtjevi vezani za ispitne procedure i ispitivane uređaje

### 2.2.1. Zahtjevi vezani za ispitne procedure

Ispitne procedure prilagođene su različitim tipovima uređaja, te svaka ima svoje specifičnosti, ali postoje zajedničke odredbe koje su cilj svake ispitne procedure. To su npr. vrste ispitivanja prema karakteru napona (istosmjerno, izmjenično, kombinirano ispitivanje), broj ponavljanja ispitivanja i vremenski interval između tih ponavljanja, a određuje ih tehnički odbor stručnjaka zaduženih za provođenje ispitivanja opreme, imajući u obziru slijedeće čimbenike:

- propisana točnost mjernih rezultata ispitivanja;
- slučajna priroda ponašanja promatranog objekta i ovisnost polariteta izmjerenih karakteristika;
- mogućnost pogoršanja mjernih rezultata tijekom ponavljanja ispitivanja [1].

### 2.2.2. Priprema za provođenje ispitivanja uređaja i opreme

Prije početka ispitne procedure, uređaji i oprema moraju proći tzv. vizualne preglede (serijski broj uređaja, datum i godina proizvodnje, vrijeme od zadnjeg umjeravanja i eventualna mehanička oštećenja).

Za dobivanje povoljnih karakteristika dielektričnog proboja u uređajima, u pripremi ispitivanja važnu ulogu imaju slijedeći čimbenici:

- sigurnosna udaljenost ispitivanog uređaja od drugih, uzemljenih ili objekata pod naponom u laboratoriju;
- visinska udaljenost od tla;
- povoljan raspored i razmak između visokonaponskih ispitnih vodova.

Razmak između ispitivanog uređaja i drugih objekata u laboratoriju treba biti veći od 1.5 puta duljine najkraćeg mogućeg probojnog puta pražnjenja jer tada okolni uređaji svojom udaljenošću nemaju utjecaj na oblikovanje električnog polja koje bi moglo dovesti do pražnjenja.

## 2.3. Ispitivanje u vlažnim uvjetima

U visokonaponskim ispitivanjima u vlažnim uvjetima razlikuju se dvije metode ispitivanja:

1. standardna ispitna metoda u vlažnim uvjetima;
2. tradicionalna ispitna metoda izmjeničnim naponom u vlažnim uvjetima;

Posebnu kateogoriju čine ispitivanja umjetnim onečišćenjem [1].

Prva metoda namijenjena je proučavanju posljedica kiše na vanjsku izolaciju uređaja. Predstavlja glavnu ispitnu metodu, a primjenjuje se kod uređaja svih razina napona koji su kontruirani za vanjsku montažu i upotrebu. Druga metoda je slična prvoj, a razlikuju se po većoj vlažnosti i minimalnom vremenu predvlaženja u drugoj metodi (t = 1 min). Druga se metoda pretežno koristi kod ispitivanja opreme ispitnim naponima do $U_m$ = 420 kV. Za aparate ispitnih napona viših od $U_m$ = 800 kV ne postoji adekvatna vlažno ispitna metoda.

### 2.3.1. Standardna ispitna metoda u vlažnim uvjetima

Ispitivana oprema izložena je vodi, propisane temperature i otpornosti dane u tablici 1. padajući direktno na ispitivanu opremu u obliku kiše. Vertikalne i horizontalne komponente kapljica približno su jednake zbog ravnomjerne jačine raspršivanja vode iz vodenog tuša. Jačina raspršivanja mjeri se i kontrolira pomoću mjernih posuda raspoređenih oko ispitivane opreme sa horizontalnim i vertikalnim otvorima od 100 $cm^2$ do 750 $cm^2$.



***Slika 2.1.*** *Ispitivanje dielektrične čvrstoće potpornog izolatora u vlažnim uvjetima*
*izvor: (Cigre - Flashover Tests Under Wet Conditions on Full and Sectioned UHV Insulators) [2]*

Generalno, reproduktibilnost mjernih rezultata ispitivanja u vlažnim uvjetima je niža od ostalih ispitnih metoda zbog izlaganja opreme pod naponom vodi, a da bi rezultati bili zadovoljavajući u što manje ponavljanja treba obratiti pozornost na slijedeće stvari:

- Kod ispitivanih objekata visine do 1 m mjerne posude se postavljaju neposredno u blizini objekta zbog kontrole raspršivanja vode iz vodenih tuševa. Mjerna zona u ovom slučaju pokriva širinu od 1 m, koliko iznosi i visina objekta.
- Kod ispitivanih objekata visine 3 - 5 m provode se individualna mjerenja, i to iznad, u sredini i ispod objekta. Svaka mjerna zona pokriva područje jedne trećine visine objekta.
- Kod ispitivanih objekata visine iznad 3 m broj mjernih zona i širina povećava se tako da se pokrije visina objekta u cijelosti, ali bez fizičkog preklapanja.
- Različitost mjernih rezultata može se smanjiti korištenjem površinski aktivnog deterdženta prije samog vlaženja i ispitivanja objekta.

*Tablica 2.1. Uvjeti taloženja za standardnu vlažnu ispitnu metodu [1]*

| | | |
|---|---|---|
| Prosječni iznosi taloženja za sva mjerenja: | | |
| - vertikalna komponenta | mm/min. | 1,0 do 2,0 |
| - horizontalna komponenta | mm/min. | 1,0 do 2,0 |
| Ograničenja za pojedina mjerenja | | |
| i svaku komponentu | mm/min. | ± 5% od prosjeka |
| Temperatura vode | °C | sobna temperatura ± 15 °C |
| Otpornost vode | Ωm | 100 ± 15 |

Temperatura i otpornost vode mjere se na uzorku vode sakupljenom neposredno prije testiranja objekta. Postoje i druge lokacije mjerenja kao npr. spremnici s vodom u kojima elektronički senzori i regulatori ne dopuštaju protok vode dok nisu postignuti propisani uvjeti.

Na testiranom objektu radi se procedura predvlaženja 15 min. prije samog ispitivanja prema uvjetima propisanim u tablici 2.1., gdje navedeni uvjeti moraju ostati u granicama tolerancije tijekom ostatka vremena ispitivanja bez prekidanja procesa vlaženja.

Ako tehnički odbor, koji je razvio ovu normu nije drukčije odredio, vrijeme trajanja ispitne procedure u vlažnim uvjetima traje jednako kao i ispitivanje u suhim uvjetima, izmjeničnim i istosmjernim naponom, 60 s. Isto tako propisano je da se u slučaju uzastopnih testiranja smije dogoditi samo jedan proboj izolacije.

### 2.3.2. Tradicionalna vlažna ispitna metoda izmjeničnim naponom

Za razliku od prethodne standardne ispitne metode u vlažnim uvjetima, tradicionalna vlažno ispitna metoda izmjeničnim naponom karakterizira se većim količinama taloženja vode i manjim potrebnim vremenom predvlaženja, koji iznosi 1 min.

Točno je određena samo vertikalna komponenta taloženja vode, a horizontalna se vizualno procjenjuje na temelju kuta pada vode iz vodenog tuša koji treba iznositi približno 45° na ispitivani objekt.

*Tablica 2.2. Uvjeti taloženja za tradicionalnu vlažnu ispitnu metodu [1]*

| Karakteristike | mj. jed. | Europski standard | Američki standard |
|---|---|---|---|
| Prosječni iznos taloženja za sva mjerenja: | | | |
| - vertikalna komponenta | mm/min. | 3 ± 0,3 | 5 ± 0,5 |
| Ograničenja za pojedina mjerenja | mm/min. | 3 ± 0,75 | 5 ± 1,25 |
| Temperatura vode | °C | sobna temperatura ± 20 °C | |
| Otpornost vode | Ωm | 100 ± 10 | 178 ± 27 |
| Trajanje izdržljivosti ispitivanja | s | 60 | 10 |

### 2.3.3. Ispitivanje umjetnim onečišćenjem

Testovi umjetnog onečišćenja pružaju informacije o utjecaju onečišćenja na vanjsku izolaciju uređaja. Općenito, u ovakvoj ispitnoj metodi prema normi IEC 60060 - 1 koristi se konstantno narinuti napon na ispitivani objekt u trajanju od nekoliko minuta. U nekim posebnim postupcima ispitivanja koristi se i postupno povećanje napona do proboja izolacije. U slijedećim koracima opisat će se postupak ispitivanja prema normi IEC 60060-1.

Priprema - prije početka testiranja metalni dijelovi i cementni spojevi ispitivanog objekta bojaju se bojom koja je otporna na sol i vodu kako bi se osiguralo da korozijski efekti ne oštećuju izolacijske površine tijekom ispitivanja. Nakon toga objekt se ispire vodom iz slavine u koju se dodaje trinatrijev fosfat ($Na_3PO_3$), a potom ispire čistom slavinskom vodom. Postupak se provodi

sa zaštitnim rukavicama zbog mogućeg isušivanja ruku natrijem. Tehnički odbor određuje hoće li se objekt ispitivati u vertikalnom, horizontalnom ili kosom položaju.

Ispitna procedura - testovi onečišćenja mogu se raditi u svrhu određivanja maksimalnog stupnja onečišćenja na objektu koji definira izdržljivost pri ispitnom naponu, ili u svrhu određivanja graničnog napona za pojedini stupanj onečišćenja. Zbog bolje usporedbe rezultata uzastopno odrađenih mjerenja koristi se metoda određivanja graničnog napona za pojedini stupanj onečišćenja. Bilo koja odabrana metoda mora zadovoljiti konzistentnost rezultata sa statističke strane, a broj mjerenja određuje relevantni tehnički odbor.

Testovi onečišćenja mogu se opisati metodom slane pare.

### 2.3.3.1. Metoda "slane pare"

Ispitivani objekt ili njegov uzorak polaže se u specijalnu komoru koja se potom puni slanom parom (postupak dobivanja slane pare opisan je u nastavku). Okolišna temperatura u komori treba biti u rasponu od 5 do 30 °C, a testirani objekt/uzorak i slana para u temperaturnoj ravnoteži s temperaturom u komori.

Postupak dobivanja slane pare svodi se na miješanje soli komercijalne upotrebe (NaCl) s nekoliko primjesa i čistom slavinskom ili demineraliziranom vodom u komori. Koncentracija soli u jednoj litri vode kreće se u iznosima od 2.5, 3.5, 5, 7, 10, 14, 20, 28, 40, 56, 80, 112, 160 i 224 g. Točna koncentracija soli određuje se prema mjerenju otpornosti i gustoće soli na temperaturama od 10, 20 i 30 °C. Slana para se u komori proizvodi pomoću miješanja slane vode i zraka u cijevima pod tlakom od 7 bara sa tolerancijom od ± 4%. Protok slane vode u cijevi iznosi oko 0,5 l/min ± 10% po razdoblju mjerenja. Ukupna tolerancija odstupanja protoka zraka i slane vode je ± 5% tijekom testiranja.

Primjer kompozita za dobivanje slane pare:

a) 100 g kremene zemlje (dijatomita),

b) 10 g visoko disperziranog silicijevog dioksida ($SiO_2$) čestične veličine 2 - 20 μm,

c) 1000 g demineralizirane vode

d) određena količina soli u gramima [1].

*Tablica 2.3. Vrijednosti vodljivosti prema kojoj se odabire gustoća soli u vodi [1]*

| Vodljivost referentnog sloja pri temperaturi od 20 °C u μS (tolerancija: ± 15%) | Odgovarajuća vodljivost pri temperaturi od 20 °C u mS/cm |
|---|---|
| 7,5 | 2,25 |
| 10 | 3 |
| 15 | 4,5 |
| 20 | 6 |
| 30 | 9 |
| 40 | 12 |
| 60 | 8 |
| 80 | 24 |

Kada se odabere potrebna količina soli, postupkom dobivanja slane pare nanosi se na izolacijsku površinu objekta kako bi se stvorio sloj odgovarajuće debljine koji ostvaruje referentnu vodljivost.

Kada je objekt/uzorak ovlažen vodom i slanom parom u komori započinje ispitivanje priključenjem objekta/uzorka na napon kojeg se vrlo brzo podiže na određenu vrijednost (npr. 100 kV) i održava ga se konstantnim neko vrijeme, obično 1 h ili dok se ne dogodi proboj izolacije. Ispitna procedura se ponavlja nekoliko puta, a prije početka svake, objekt/uzorak se ispire čistom vodom i uklanja mu se svaki trag soli. Za ovu metodu minimalni razmak između dijelova objekta pod naponom i uzemljenih dijelova treba biti 0,5 m za svakih 100 kV ispitnog napona, a preporuča se početni razmak od 2 m. Preduvjeti za povoljne rezultate testova onečišćenja su redovita ispiranja i čišćenja objekata.

2.3.3.1.1. Mjerenje stupnja onečišćenja

Za utvrđivanje površinske vodljivosti na izolacijskoj površini objekta mjeri se propusna vodljivost $G_\Theta$ između dvije elektrode. Iz te vodljivosti računa se površinska vodljivost korištenjem faktora oblika izvedenog iz geometrije izolacijske površine. Za konzistentne rezultate napon koji se koristi kod mjerenja vodljivosti treba iznositi oko 2 kV/m po puznoj stazi.

Površinska vodljivost $K_\Theta$ izražava se iz:

$$K_\Theta = G_\Theta f \tag{2-1}$$

faktor oblika $f$ izveden je kao:

$$f = \int_0^L \frac{dx}{B(x)} \tag{2-2}$$

gdje je:

$L$ - duljina propusne staze

$dx$ - duljina dijela propusne staze, na udaljenosti $x$ između elektroda $(0 \leq x \leq L)$

$B(x)$ - širina opsega propusne staze na udaljenosti $x$.

Sloj vodljivosti $K_\Theta$ ispravlja se na vrijednost 20 °C kako bi se u slijedećem izrazu izvela veličina $K_{20}$:

$$K_{20} = \frac{1{,}6}{1+0{,}03\Theta} \tag{2-3}$$

gdje je:

Θ - temperatura izolacijske površine u stupnjevima celzijusa.

Onečišćena izolacijska površina ispire se destiliranom vodom, a potom se ta voda pažljivo prikuplja i mjeri joj se otpornost, a temperatura svodi na 20 °C. Koeficijent C predstavlja prethodno izabranu količinu soli u g/l, a količina soli po jedinici površine određena je u mg/cm$^2$ kao:

$$M = \frac{CV}{A} \tag{2-4}$$

gdje je:

M - količina soli po jedinici površine u mg/cm$^2$

$A$ - područje čiste površine u cm$^2$

$V$ - volumen prikupljene vode u cm$^3$.

## 2.4. Dielektrična ispitivanja istosmjernim naponom

Kod dielektričnih ispitivanja istosmjernim naponom ispitni napon ne bi trebao imati faktor valovitosti veći od 3% u valnom obliku. Faktor valovitosti posebno je izražen kod dielektričnih ispitivanja u vlažnim i onečišćenim uvjetima. Tolerancija odstupanja ispitnog napona tijekom testiranja u trajanju od 60 s iznosi ± 1%, a u slučaju vremenskog trajanja preko 60 s, dopušteno je odstupanje unutar ± 3%.

Valovitost istosmjernog napona - mala neželjena periodična varijacija istosmjernog napona koja nastaje zbog nepotpunog suzbijanja izmjeničnog valnog oblika iz glavnog napajanja putem ispravljača.

Generiranje istosmjernog napona - obično se za dobivanje istosmjernog napona koriste ispravljači koji se povezuju na izmjenični dio mreže. Takav način je efikasan i relativno jeftin, dok se u nekim slučajevima za dobivanje istosmjernog napona koriste i elektrostatički generatori. Karakteristike izvora moraju biti takve da u kratko vrijeme zadovolje punjenje kapaciteta testirane opreme bez naponskih propada većih od 10% $U_m$.

Mjerenje aritmetičkih vrijednosti, maksimalnih vrijednosti i faktora valovitosti obavlja se pomoću uređaja koji zadovoljavaju zahtjeve IEC publikacije 60-3. Primjer takvih uređaja su instrumenti za mjerenje valovitosti istosmjernog napona, tranzijentnih pojava i naponske stabilnosti.

Mjerenje ispitnih struja kroz ispitivani objekt može se podijeliti na nekoliko komponenti, a razlikuju se po veličini i karakteru:

kapacitivna struja - punjenje kapaciteta ispitivanog objekta elektrostatičkom energijom (gibanje naboja uslijed polarizacije dielektrika);

dielektrična apsorpcijska struja - struja koja zbog toplinskog učinka na materijale uzrokuje polagano pomicanje strukture izolacijskog materijala unutar vremenskog intervala od nekoliko sekundi;

kontinuirana struja odvoda - konačni oblik istosmjerne struje narinut pod punim ispitnim naponom nakon što sve prethodne struje poprime iznos nula;

struje parcijalnih izbijanja - struje koje nastaju zbog prevelikog naponskog naprezanja zraka u okolini vodljivih dijelova s oštrim rubovima, između ostalog i vodiča i sabirnica pravokutnog oblika, trakastih sabirnica, oštećenih vodiča itd., zbog jakog električnog polja. Nastoji ih se smanjiti korištenjem vodiča okruglog profila ili korištenjem oklopa za zaštitu od prevelikog naprezanja.

Relativna jačina i značaj svake komponente struje zavisi o tipu i stanju testiranog objekta, o svrsi testiranja i trajanju testiranja.

### 2.4.1. Ispitna procedura naponske izdržljivosti istosmjernim naponom

Ispitivani objekt priključuje se na napon relativno malog početnog iznosa kako bi se izbjegle pojave prenapona tijekom uključenja. Zatim se vrijednost napona polagano podiže na nazivnu ispitnu vrijednost zbog što boljeg očitanja mjernih instrumenata, ali ne suviše sporo da bi se izbjeglo nepotrebno naprezanje izolacije u krajnjim vrijednostima $U_m$. Točnije, ovi zahtjevi se ispunjavaju ako je postotni porast napona 2% $U_m$ po sekundi, kada ispitni napon dosegne vrijednost veću od 75% $U_m$.

Ispitna procedura treba trajati 60 s, a ako se za to vrijeme ne dogodi dielektrični proboj testiranje uspješno završava, te se još mora osigurati i pražnjenje naboja električnog kruga preko odgovarajućeg otpornika [1].

### 2.4.2. Ispitna procedura dielektrične čvrstoće istosmjernim naponom

Ispitivani objekt priključuje se na napon koji se kontinuirano podiže dok ne nastane proboj izolacije. Zapisuje se vrijednost napona na kojemu se dogodio proboj, a tehnički odbor određuje stopu rasta napona, broj ponavljanja ispitne procedure i vrednovanje mjernih rezultata.

Primjer vrednovanja rezultata dan je u nastavku.

Glavna praćena veličina je $U_p$, napon pri kojemu je nastao proboj izolacije, (p - vjerojatnost proboja) može se izraziti kao:

$$U_p^* = \sum \frac{(k_m U_m)}{n} \tag{2-5}$$

gdje je:

$k_m$ - broj naponskih naprezanja ispitnim naponom $U_m$

Za ispitnu proceduru naponske izdržljivosti istosmjernim naponom napon $U_p$ je prikazan kao vjerojatnost proboja:

$$p = 1 - (0{,}5)^{\frac{1}{m}} \tag{2-6}$$

dok je za ispitnu proceduru dielektričnog proboja istosmjernim naponom prikazan kao vjerojatnost:

$$p = (0{,}5)^{\frac{1}{m}} \tag{2-7}$$

Vjerojatnosti $p$ za koje se može procijeniti vrijednost $U_p$ određene su brojem ponavljanja ispitivanja u tablici 2.4.:

*Tablica 2.4. Vjerojatnosti događaja u ovisnosti o broju ponavljanja testiranja [1]*

| **m** - broj ponavljanja testiranja | **p** - test naponske izdržljivosti | **p** - test dielektričnog proboja |
|---|---|---|
| 1 | 0,50 | 0,50 |
| 2 | 0,30 | 0,70 |
| 3 | 0,20 | 0,80 |
| 4 | 0,15 | 0,85 |
| 7 | 0,10 | 0,90 |
| 14 | 0,05 | 0,95 |
| 34 | 0,02 | 0,98 |
| 70 | 0,01 | 0,99 |

## 2.5. Dielektrična ispitivanja izmjeničnim naponom

Kod dielektričnih ispitivanja izmjeničnim naponom u obzir se uzima vršna vrijednost ispitnog napona podijeljena sa $\sqrt{2}$.

Vršna vrijednost napona - maksimalna vrijednost napona. Male frekvencijske oscilacije tijekom ispitivanja mogu se zanemariti.

Efektivna vrijednost napona - efektivna vrijednost vremenski promjenjive struje (napona) jednaka je onoj vrijednosti istosmjerne struje (napona) koja bi za isto vrijeme proizvela isti energetski učinak na istom otporu (npr. toplina koja se razvija na otporniku) [3]. Kvantitativno povezuje amplitudu i oblik izmjeničnog napona, a određuje se kao:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_m^2\, sin^2(\omega t + \varphi)dt} \tag{2-8}$$

ili:

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad [\mathrm{A}] \tag{2-9}$$

Za visokonaponska ispitivanja izmjeničnim naponom bitna je efektivna vrijednost napona i raspon frekvencije između 45 i 65 Hz.

Valni oblik napona treba biti približno sinusni s jednakim poluperiodama, a rezultati ispitivanja se smatraju točnima i neometanima (malim sinusoidalnim odstupanjima) ako je efektivna vrijednost ispitnog napona unutar ± 5%.

Napajanje izmjeničnog ispitnog napona osigurava se pomoću uzlaznog transformatora, a samo ponekad iz serijsko rezonantnih krugova koji su detaljnije objašnjeni u tekstu koji slijedi.

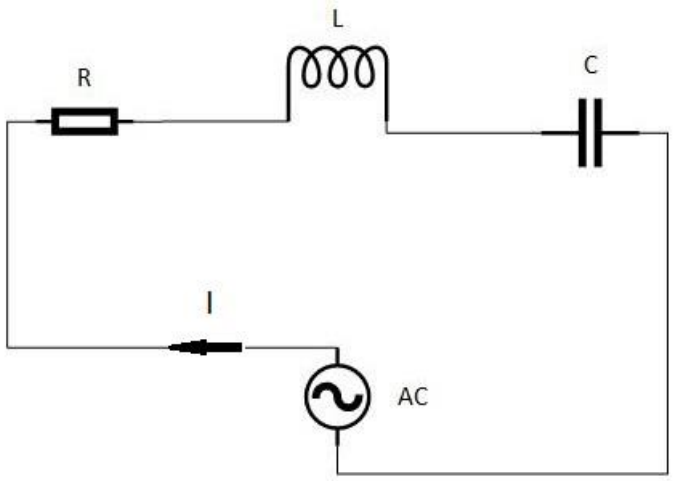
### 2.5.1. Zahtjevi za ispitni krug transformatora

Da bi ispitni napon ostao nepromijenjen bitno je da se tijekom ispitivanja osigura dovoljno velika struja kratkog spoja kada je testirani objekt u kratkom spoju da bi se spriječio utjecaj propuštajućih struja na iznos napona u slijedećim kriterijima:

- kod ispitivanja u suhim uvjetima na malim uzorcima krute izolacije odgovarajuća struja kratkog spoja iznosi 0,1 A efektivne vrijednosti;
- kod ispitivanja na vanjskoj obnovljujućoj izolaciji (npr. izolatori, rastavne sklopke) odgovarajuća struja kratkog spoja iznosi 0,1 A za suhe i 0,5 A za vlažne uvjete ispitivanja. Inače, pri testiranju velikih objekata u vlažnim uvjetima zbog velike propuštajuće struje odgovarajuća struja kratkog spoja iznosi 1 A efektivne vrijednosti.
- kod ispitivanja umjetnog onečišćenja potrebne su struje kratkog spoja iznosa 15 A i više, te dva dodatna uvjeta:

1. omjer djelatnog otpora/reaktancije treba iznositi: $\frac{R}{X} \geq 0{,}1$;
2. omjer kapacitivne struje/struje kratkog spoja ne smije prelaziti vrijednosti između 0,001 i 0,1.

Serijsko rezonantni krug sastoji se od djelatnog otpora, induktiviteta i kapaciteta te izmjeničnog izvora srednjeg napona. Rezonancija kruga postiže se mijenjanjem parametara kruga i priključenjem na izvor izmjeničnog napona sinusnog valnog oblika određene frekvencije (45 - 65 Hz).




***Slika 2.2.*** *Serijsko rezonantni krug (RLC)*

Stabilnost stanja rezonancije i ispitnog napona ovisi o konstantnosti frekvencije i karakteristikama kruga. Kada se dogodi proboj izolacije, izvor ograničava vrijednost struje u krugu te se time postiže manje oštećenje izolacije objekta.

Serijsko rezonantni krug od posebne je važnosti kod ispitivanja kabela, kondenzatora i plinom izoliranih sustava u kojima su struje odvoda na vanjskoj izolaciji vrlo male u usporedbi s kapacitivnim strujama unutar objekta i gdje je mala količina energije potrebna da bi se dogodio proboj izolacije.

### 2.5.2. Ispitna procedura naponske izdržljivosti izmjeničnim naponom

Ispitne procedure s izmjeničnim naponom vrlo su slične procedurama s istosmjernim naponom. Ispitivani objekt priključuje se na napon relativno malog početnog iznosa kako bi se izbjegle pojave prenapona tijekom uključenja. Zatim se vrijednost napona polagano podiže na nazivnu ispitnu vrijednost zbog što boljeg očitanja mjernih instrumenata, ali ne suviše sporo da bi se izbjeglo nepotrebno naprezanje izolacije u krajnjim vrijednostima $U_m$. Točnije, ovi zahtjevi se ispunjavaju ako je postotni porast napona 2% $U_m$ po sekundi, kada ispitni napon dosegne vrijednost veću od 75% $U_m$. Ispitni napon održava se neko vrijeme na nazivnoj vrijednosti, a zatim se brzo spušta do nule, ali opet ne suviše brzo zbog moguće pojave tranzijentnih prenapona koji mogu uništiti mjernu opremu i narušiti mjerne rezultate.

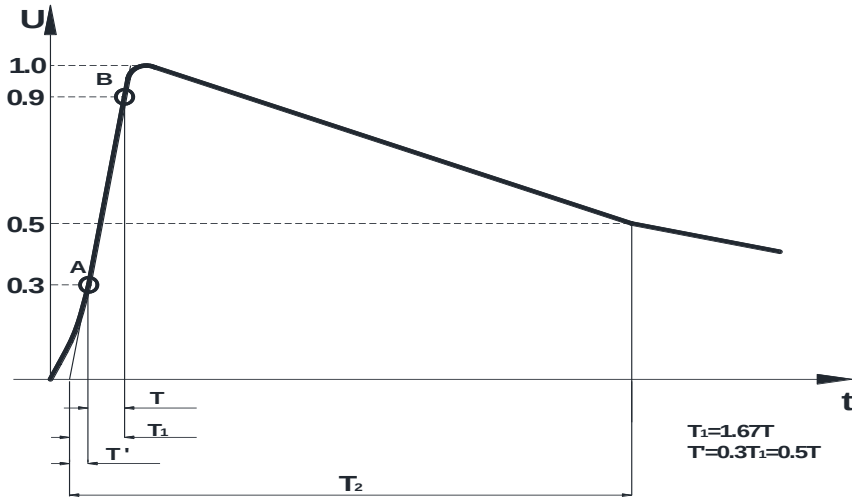
Vrijeme trajanja ispitivanja određuje tehnički odbor neovisno o rasponu frekvencije (45 - 65 Hz). Ako nije drugačije propisano to vrijeme trajanja iznosi 60 s i ako se nije dogodio proboj izolacije testiranje uspješno završava.

### 2.5.3. Ispitna procedura dielektrične čvrstoće izmjeničnim naponom

Tehnički odbor određuje stopu rasta napona, broj ponavljanja ispitnih procedura i vrednovanje mjernih rezultata. Ispitivani objekt priključuje se na napon koji se kontinuirano podiže dok ne nastane proboj izolacije i zapisuje se vrijednost napona na kojemu se dogodio proboj.

## 2.6. Dielektrično ispitivanje udarnim impulsnim naponom

Puni udarni impuls - udarni impuls bez proboja izolacije.




***Slika 2.3.*** *Puni udarni naponski impuls [1]*

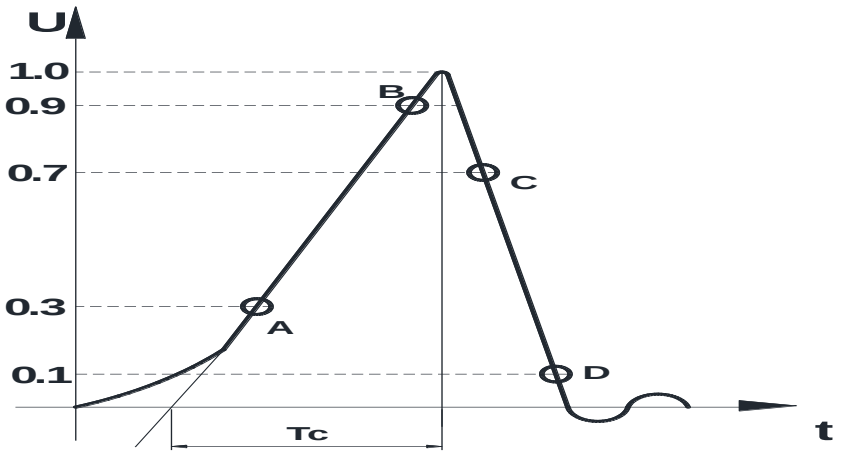
Vrijednost ispitnog napona za udarna impulsna ispitivanja bez oscilacija je vršna vrijednost napona.

$T_1$ - virtualni parametar prvog vremena definiran kao $1{,}67 \cdot T$ kada je vrijednost impulsa između 30 i 90% tjemene vrijednosti.

$T_2$ - virtualni parametar definiran kao vremenski interval između rastućih 30% i padajućih 50% vrijednosti napona (slika 2.3.).

Isprekidani udarni impuls - udarni impuls tijekom kojega proboj izolacije uzrokuje vrlo brzi pad napona, praktički do nulte vrijednosti. Pad napona može se dogoditi na čelu, vrhu ili na hrptu vala.

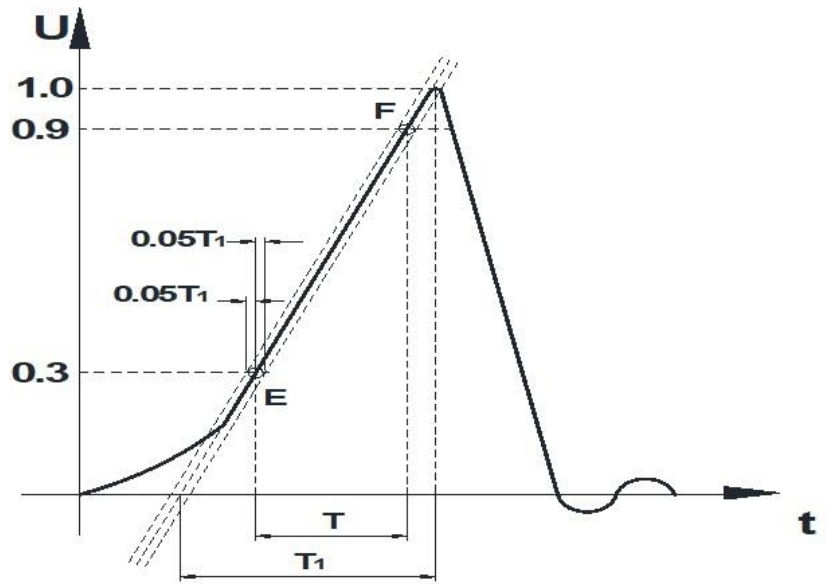
Naponski kolaps - pojava u kojoj niz događaja praćenih naponskom nestabilnošću dovodi do jako niskog, neprihvatljivog iznosa napona za rad sustava. U praksi se obično manifestira kao manjak reaktivne snage na visoko opterećenim vodovima koja se u određenim kombinacijama radnih uvjeta ponekad i ne može ostvariti iz izvora reaktivne snage poput generatora i kompenzatora. Takva pojava može uzrokovati slom dijela ili čak cijelog opskrbnog sustava.




***Slika 2.4.*** *Preskok na čelu vala [1]*

Virtualne karakteristike pada napona tijekom preskoka definirani su dvjema točkama (C i D) na 70% i 10% vrijednosti impulsnog napona (slika 2.4.). Strmost pada napona je omjer iznosa napona u trenutku preskoka i trajanja naponskog kolapsa. Ovaj se pristup uzima samo u teorijskim razmatranjima ispitivanja. Praktično se trajanje i strmina naponskog kolapsa ne mogu izmjeriti sa dovoljnom točnošću.

Napon koji raste približno konstantnom strminom do trenutka kada je presječen probojem izolacije opisan je linearno rastućim impulsnim valom. Za opis takvog vala potrebno je odrediti odgovarajuću karakteristiku koja prolazi uzduž čela vala između 30% i 90% tjemene vrijednosti. Vrijednosti su prikazane točkama E i F (pogledati sliku 2.5.).




***Slika 2.5.*** *Linearno rastući impulsni val [1]*

Impuls je definiran sa:

- vršnom vrijednosti napona U;
- virtualnim parametrom prvog vremena $T_1$;
- strminom S.

U obliku:

$$S = \frac{U}{T_1} \tag{2-10}$$

Prethodni izraz predočava nagib pravca koji prolazi uzduž čela vala kroz točke E i F, a omeđen je paralelnim isprekidanim linijama od kojih je vremensko pomaknut za 0,005 $T_1$. Obično se izražava u kV/μs.

### 2.6.1. Ispitni impulsni udarni napon

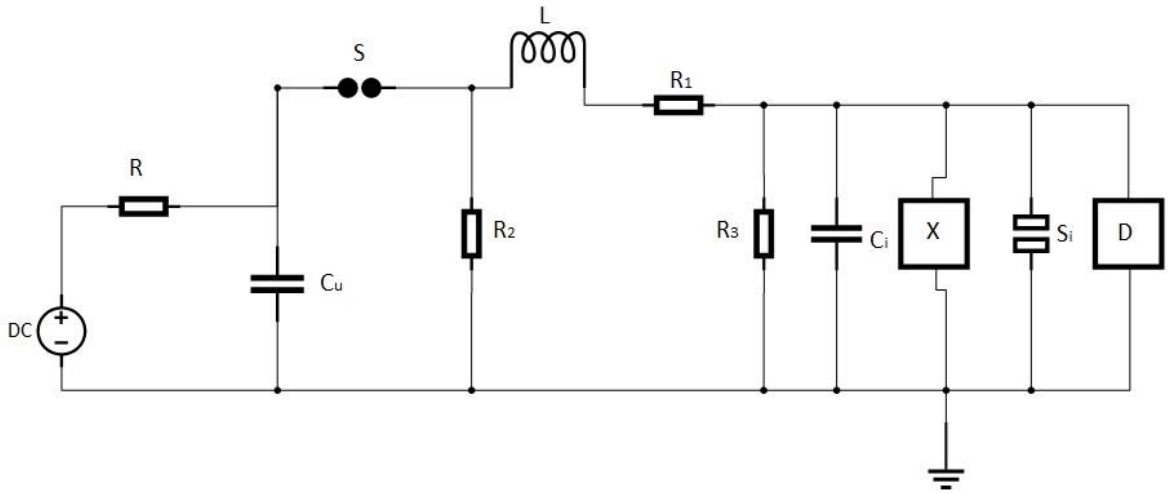
Standardni udarni impuls ima karakteristike prvog vremena $T_1 = 1{,}2\ \mu s$ i drugog vremena $T_2 = 50\mu s$. Iskazuje se i kao:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{1{,}2}{50} \tag{2-11}$$

Tolerancija odstupanja pojedinih varijabli tijekom ispitivanja:

- vršna vrijednost U: ± 3%;
- prvo vrijeme $T_1$: ± 30%;
- drugo vrijeme $T_2$: ± 20%.

Ispitni napon uobičajeno se dobiva putem impulsnog generatora koji se u osnovi sastoji od većeg broja kondenzatora u paralelnom spoju nabijenih iz istosmjernog izvora, a potom ispražnjenih u seriji sa strujnim krugom u kojem se nalazi ispitivani objekt.




***Slika 2.6.*** *Marxov udarni ispitni generator*

DC - izvor istosmjernog napona za punjenje kondenzatora;

R - zaštitni otpornik za ograničenje struje punjenja i zaštita izvora od naglog pražnjenja $C_u$;

$C_u$ - Kondenzatori udarnog generatora;

S - sferno iskrište za određivanje napona pražnjenja kondenzatora $C_u$;

L - induktivni otpor ispitnog kruga koji utječe na trajanje čela vala;

$R_1$ - prigušni otpornik (utječe na trajanje čela vala);

$R_2$ i $R_3$ - izbojni otpornici (utječu na trajanje hrpta vala);

$C_i$ - kapacitet ispitnog kruga;

X - ispitivani uređaj;

$S_i$ - mjerni uređaj;

D - naponsko djelilo.

### 2.6.2. Ispitna procedura naponske izdržljivosti udarnim impulsnim naponom

Za ispitivanje opreme udarnim impulsnim naponom postoji više vrsta procedura (A, B, C i D). U procedurama A, B i C ispitivanje se vrši jednim određenim naponskim nivoom, dok u proceduri D postoji više propisanih vrijednosti.

Ispitna procedura A

Tri impulsa određenog valnog oblika, polariteta i vrijednosti napona primjenjuju se na testirani objekt. Zahtjevi ispitivanja su zadovoljeni ako se ne dogode indikacije proboja izolacije poput prekomjernog zagrijavanja ispitivanog objekta ili kratkog spoja uslijed električnog luka koje se prate metodama detekcije dielektrične čvrstoće propisanih od strane tehničkog odbora. Ova vrsta procedure preporučena je kod ispitivanja uređaja sa neobnovljujućom izolacijom.

Ispitna procedura B

Petnaest impulsa određenog valnog oblika, polariteta i vrijednosti napona primjenjuju se na testirani objekt. Zahtjevi ispitivanja su zadovoljeni ako se ne dogode više od dva proboja izolacije u obnovljujućem dijelu izolacije i ako se ne dogode indikacije proboja u neobnovljujućem dijelu izolacije koje se prate metodama detekcije dielektrične čvrstoće propisanih od strane tehničkog odbora.

Ispitna procedura C

Tri impulsa određenog valnog oblika, polariteta i vrijednosti napona primjenjuju se na testirani objekt. Ako se ne dogodi proboj, testiranje uspješno završava, a ako se dogodi više od jednog proboja testiranje je neuspješno. U slučaju pojave samo jednog proboja u obnovljujućem dijelu izolacije priključuje se 9 dodatnih impulsa na testirani objekt i ponavlja se postupak ispitivanja.

Ispitna procedura D

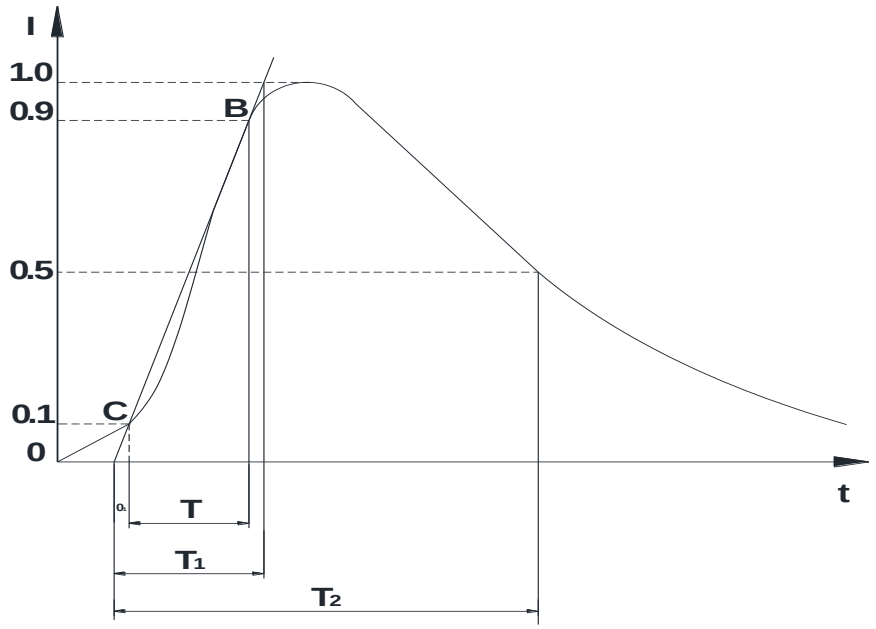
Za obnovljujuću izolaciju može se odrediti $U_{10}$ (10%-tni probojni napon) statističkim metodama preko poznavanja vrijednosti $U_{50}$ jednadžbom:

$$U_{10} = U_{50}(1 - 1{,}3z) \tag{2-12}$$

Tehnički odbor specificira konvencionalnu devijaciju probojnog napona $z$. Npr. za suha ispitivanja na zračnoj izolaciji, bez drugih vrsta izolacija p.u. vrijednost $z$ iznosi 0,03. Zahtjevi za ispitivani objekt su zadovoljeni ako $U_{10}$ nije manji od specificiranog ispitnog napona.

## 2.7. Dielektrično ispitivanje impulsnom strujom

Kod dielektričnog ispitivanja impulsnom strujom koriste se dva oblika struje. Za prvi oblik karakteristično je povećanje vrijednosti struje od nulte do vršne vrijednosti za vrlo kratko vrijeme (eksponencijalni oblik), a potom i opadanje do nule u relativno kratkom vremenu. Ovaj oblik definiran je prvim $T_1$ i drugim $T_2$ vremenom (pogledati sliku 2.7.).




***Slika 2.7.*** *Eksponencijalni oblik impulsne struje [1]*

$T_1$ - virtualni parametar prvog vremena definiran kao $1{,}25 \cdot T$ između trenutaka kada je strujni impuls između 10% i 90% tjemene vrijednosti.

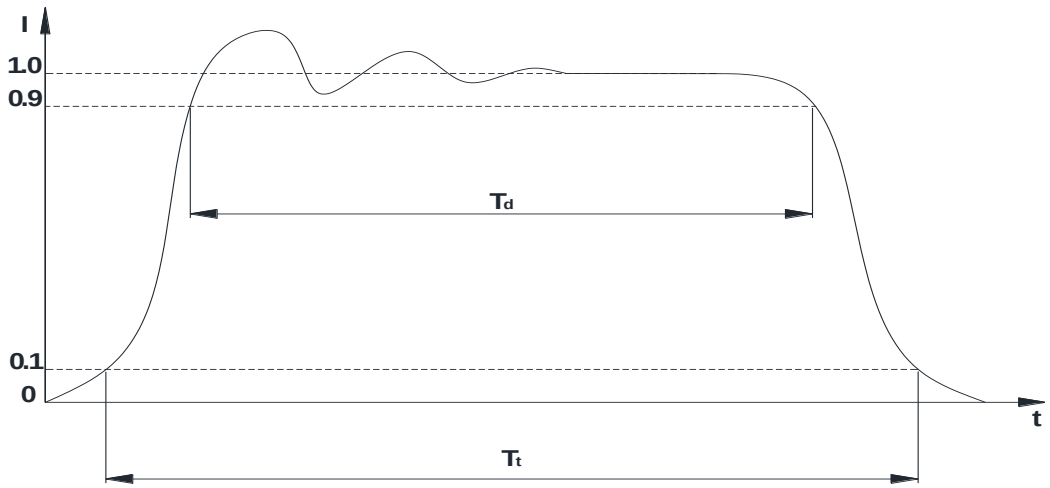
$O_1$ - virtualni početak impulsne struje koji prethodi za $0{,}1 \cdot T_1$ u trenutku kada struja dostigne 10% tjemene vrijednosti.

$T_2$ - virtualni parametar drugog vremena definiran kao vremenski interval između virtualnog početka $O_1$ i trenutka u kojemu struja pada na polovicu tjemene vrijednosti.

Drugi oblik impulsne struje karakteriziran je kao približno pravokutni oblik, a određen je trajanjem vrha vala i ukupnim trajanjem (pogledati sliku 2.8.).

$T_d$ - virtualni parametar definiran kao vrijeme u kojem je struja veća od 90% tjemene vrijednosti.

$T_t$ - virtualni parametar definiran kao vrijeme u kojem je struja veća od 10% tjemene vrijednosti.




***Slika 2.8.*** *pravokutni oblik impulsne struje [1]*

### 2.7.1. Ispitne impulsne struje

Koriste se četiri vrste impulsnih struja po prvom, eksponencijalnom obliku struje opisanom na početku potpoglavlja 2.7.:

*Tablica 2.5. Vremena trajanja četiriju standardnih impulsnih struja [1]*

| | | |
|---|---|---|
| 1/20 impuls | $T_1$: 1 μs | $T_2$: 20 μs |
| 4/10 impuls | $T_1$: 4 μs | $T_2$: 10 μs |
| 8/20 impuls | $T_1$: 8 μs | $T_2$: 20 μs |
| 30/80 impuls | $T_1$: 30 μs | $T_2$: 80 μs |

Pravokutne impulsne struje imaju vrijeme trajanja vrha vala $T_d$ 500 μs, 1000 μs, ili u rasponu od 2000 do 3200 μs.

Ukoliko tehnički odbor nije drukčije odredio, tolerancija odstupanja mjernih rezultata od onih postavljenih i stvarno izmjerenih, za eksponencijalni oblik struje iznosi:

- vršna vrijednost: ± 10%
- prvo vrijeme $T_1$: ± 10%
- drugo vrijeme $T_2$: ± 10%.

Mali preskoci amplitude u blizini glavnog vrha vala toleriraju se u iznosu od + 5% vršne vrijednosti.

Za pravokutni oblik struje tolerancija mjernih rezultata iznosi:

- vršna vrijednost: ± 20%;  - 0%
- trajanje vrha vala: ± 20%;  - 0%.

Mali preskoci amplitude u blizini glavnog vrha vala toleriraju se u iznosu od + 10% vršne vrijednosti.

# 3. RAD U LABORATORIJU

Glavni zadatak svakog laboratorija je zaprimiti objekt ili uzorak, ispitati ga i dati valjani tehnički rezultat [3]. Povjerenje u valjanost ispitnog rezultata izuzetno je važno jer na temelju njega korisnici donose daljnje odluke.

## 3.1. Vrste i opis laboratorija

Postoje tri vrste laboratorija, a to su:

- kontrolno ispitni laboratorij;
- kontrolno umjerni laboratorij;
- kontrolno analitički laboratorij.

Za svaki od navedene tri vrste laboratorija bitna je akreditacija u području u kojemu se ispituje, umjerava ili analizira objekte, te kontrola svih navedenih.

1. Kontrolno ispitni laboratorij - područja koja su zastupljena u ovoj vrsti laboratorija široko su orijentirana, a neka od njih su: toplinska mjerenja, protueksplozijska zaštita, ispitivanja tekstila, građevinskih proizvoda, visokonaponska i homologacijska ispitivanja [4].
2. Kontrolno umjerni laboratorij - klub umjernih laboratorija predstavlja važan korak prema stalnom unapređenju djelatnosti umjeravanja između državnih i inozemnih ustanova koje su nadležne za tu funkciju, te zajednička razmjena iskustava. Među članovima kluba nalaze se svi etalonski laboratoriji koji razvijaju i održavaju Nacionalne etalone duljine, mase, gustoće, sile, temperature i tlaka, te posjeduju međunarodnu akreditaciju. U Europi je to EA *(engl. European Cooperation for Acreditation)* [4].
3. Kontrolno analitički laboratorij - djelatnost analizacijskog laboratorija vezana je uz organizaciju međulaboratorijskih poredbenih ispitivanja i izradu dokumentacije o instrumentaciji i mjernoj/ispitnoj opremi u svim laboratorijima. Značajno je i povezivanje ovih laboratorija sa industrijom i visokoškolskim ustanovama, te međunarodnom suradnjom [4].

## 3.2. Akreditacija laboratorija

Akreditacija predstavlja osposobljenost laboratorija i rada u skladu s normom prema kojoj se akreditira [5]. Akreditirano područje pokriva sve aspekte rada u laboratoriju (pravila ponašanja zaposlenih, postupci korištenja mjerne/ispitne opreme i rezultata, te dokumentacije). Bez obzira na opremu i mogućnosti laboratorija, akreditacija se odnosi samo na rad koji je vezan za akreditirane metode u laboratoriju. Akreditaciju izdaje državna akreditacijska agencija.

U Republici Hrvatskoj postoji znatan broj akreditiranih laboratorija u različitim područjima istraživanja i komercijalne uporabe kao što su kemijsko, tekstilno, strojarsko, građevinsko i elektrotehničko inženjerstvo. Detaljniji postupci rada pojedinih laboratorija mogu se pronaći na web stranicama CROLAB-a. Akreditacija je prvenstveno namijenjena laboratorijima koji pružaju komercijalne usluge za tržište [5]. Nakon detaljne provjere koristi i nedostataka od akreditacije pristupa se provođenju postupka akreditiranja laboratorija za pojedinu djelatnost putem norme HRN EN ISO/IEC 17025. Ovaj postupak vrši se dobrovoljnim odlučivanjem laboratorija o akreditaciji. Međutim, sve je češći slučaj da se za dobivanje ovlaštenja laboratorija od tijela državnih uprava iziskuje akreditacija i time se umanjuje mogućnost dobrovoljnog izbora akreditiranih laboratorija, pogotovo u smislu zadržavanja kupaca i mogućnosti proširenja poslovanja laboratorija.

Koristi koje pruža akreditacija:

- povećanje povjerenja kupaca u laboratorijske rezultate;
- bolja konkurentnost laboratorija na tržištu;
- laboratorijski rezultati su međunarodno priznati;
- povećanje prihoda laboratorija/tvrtke [5].

Nedostaci koje pruža akreditacija i koji su bitni pri planiranju uvođenja akreditacije:

- uvođenje akreditacije potrebno je obnavljati;
- mogućnost povećanja cijene usluge;
- generalno veći materijalni troškovi.

## 3.3. Zaštita ljudi u visokonaponskom laboratoriju, osnovni tehnički i osnovni kadrovski uvjeti

U visokonaponskim laboratorijima i ispitnim stanicama postoji velika opasnost od strujnog udara zbog čestih promjena zahtjeva ispitivanja i zbog otvorenog pristupa dijelovima pod naponom.



***Slika 3.1.*** *Prenaponsko ispitivanje 550 kV-nog VN prekidača*

*(izvor: Siemens - VN Laboratorij u Berlinu) [6]*

Zbog velike odgovornosti koju zahtjeva rad u laboratoriju i ispitnim stanicama, radnici osim osnovnog znanja o opremi i sigurnosti rukovanja njome moraju proći i neke specifične obuke o rukovanju alatima i dodatnim mjerama sigurnosti. U specifičnim obukama radnika naglašene su mjere sigurnosti tijekom izvođenja ispitivanja opreme i na sigurnu pripremu izvođenja ispitivanja. Sva pravila koja se odnose na rukovanje opremom i alatima kao i mjere sigurnosti u VN laboratorijima nalaze se u za to propisanim normama (EN 50191, EN 61010-1, EN 61010-2 itd.)

U tablicama u nastavku prikazane su očekivane kvalifikacije/treninzi radnika u VN laboratoriju kao i vremena trajanja kvalifikacija u tjednima prema sigurnosnom priručniku propisanom od strane ISSA-e *(International Social Seurity Association)* [7].

*Tablica 3.6. Kvalifikacije/treninzi radnika za siguran rad u VN laboratoriju [7]*

| **Preporučena znanja iz specifičnih područja rukovanja opremom i zaštitom radnika:** | **Broj tjedana kvalifikacije:** |
|---|---|
| • Teorijska znanja o VN laboratoriju. | 5 |
| • Norme:<br>– EN 50191: zahtjevi za sklapanje i rad električne ispitne opreme;<br>– EN 61010-1: sigurnosni zahtjevi za rukovanje laboratorijskom opremom;<br>– EN 61010-2-031: mjerna oprema. | 1 |
| • Sigurnosne mjere:<br>– zaštitno odjeljivanje;<br>– izoliranje ispitne lokacije;<br>– relejna zaštita;<br>– SELV/PELV. | 1 |
| • Mjerne procedure:<br>– U, I, R, C, L. | 1 |
| • Unutrašnjost laboratorija:<br>– oznake i identifikacija ispitnih prostorija visokog i niskog napona;<br>– zaštitni uređaji za isključivanje u nuždi;<br>– zaštita na ulazu u ispitnu prostoriju;<br>– znakovi upozorenja i indikacijska svjetla | 1 |

| | |
|---|---|
| • Zaštitni uređaji:<br>– zaštitni uređaji za isključivanje u nuždi;<br>– zaštita na ulazu u ispitnu prostoriju. | 0,5 |
| • Osnovna znanja o elektromagnetskim poljima i zračenjima | 0,5 |
| • Praktična iskustva | 8 |
| • Ukupno | 13 |

Radnici koju obavljaju periodička ispitivanja na električnoj opremi također moraju proći obuku iz sličnih, prethodno navedenih područja:

*Tablica 3.7. Kvalifikacije/treninzi radnika za obavljanje periodičkih ispitivanja na VN opremi [7]*

| **Preporučena znanja iz specifičnih područja rukovanja opremom i zaštitom radnika:** | **Broj tjedana kvalifikacije:** |
|---|---|
| • Teorijska znanja | 4 |
| • Norme:<br>– EN 50110;<br>– EN 60204;<br>– HD 384-6;<br>– EN 61010-1: sigurnosni zahtjevi za rukovanje laboratorijskom opremom.<br>– EN 61010-2-031: mjerna oprema. | 1,5 |
| • Sigurnosne mjere:<br>– zaštitno odjeljivanje;<br>– izoliranje ispitne lokacije; | |

| | |
|---|---|
| – relejna zaštita;<br>– SELV/PELV. | 0,5 |
| • Mjerne procedure:<br>– otpor izolacije;<br>– dielektrična čvrstoća;<br>– ispitna struja;<br>– otpor zaštitnog zemljanog vodiča;<br>– duljina puzne staze. | 1,5 |
| • Unutrašnjost laboratorija:<br>– oznake i identifikacija ispitnih prostorija visokog i niskog napona;<br>– zaštitni uređaji za isključivanje u nuždi;<br>– zaštita na ulazu u ispitnu prostoriju;<br>– znakovi upozorenja i indikacijska svjetla. | 0,5 |
| • Praktično iskustvo | 6 |
| • Dodatna znanja:<br>– rukovanje ručnim alatima;<br>– električni uređaji za grijanje;<br>– indikacijska svjetla;<br>– zaštitna izolacijska oprema;<br>– oprema korištena u specifičnim okruženjima (gradilišta, u zatvorenim prostorima). | 1 |
| • Ukupno | 15 |

# 4. PRIMJER VN ISPITIVANJA

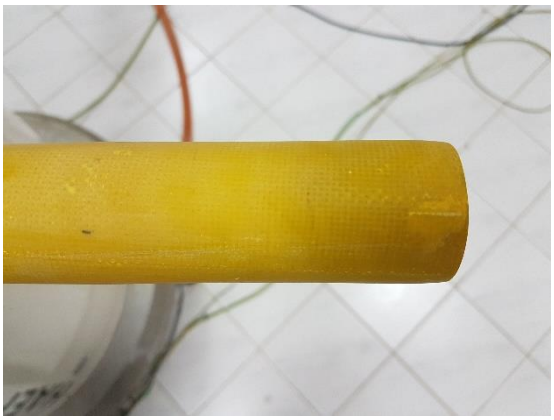
VN ispitivanje opreme za rad pod naponom sastoji se iz sva dijela. Redom, prvi dio predstavljaju vizualni pregledi ispitnog objekta, a drugi dio su dielektrična ispitivanja. Prije vizualnih pregleda utvrđuju se još i zapisuju opće informacije o ispitnom objektu poput duljine, promjera, godine proizvodnje, proizvođačke oznake i serijski broj.




***Slika 4.1.*** *Proizvođačke oznake jedne uzemljivačke motke*

## 4.1. Vizualni pregledi

Vizualni pregledi prvi su od dva dijela VN ispitivanja. Bitni su zbog uočavanja mogućih oštećenja na izolaciji objekta, te zbog preventivnih radnji. Oštećenja na izolaciji mogu biti kritična (duboke i široke ogrebotine, nedostatak vijka i sl.) i mala oštećenja (manje ogrebotine). U slučaju kritičnih oštećenja ispitni objekt ne prolazi dalje na dielektrična ispitivanja jer postoji velika mogućnost dielektričnog proboja na izolaciji pa se u tom slučaju na ispitni izvještaj zapisuje da ispitni objekt ne zadovoljava kriterij prolaznosti sa napomenom uzroka.



***Slika 4.2.*** *Kritično oštećenje stakloplastične izolacije uzemljivačke motke*

Pod manja oštećenja na izolaciji smatraju se manje tj. površinske ogrebotine te ispitni objekt može nastaviti sa drugim, dielektričnim dijelom ispitivanja.



***Slika 4.3.*** *Površinsko oštećenje izolacije uzemljivačke motke*

Osim vanjske izolacije (plastika ili stakloplastika), uzemljivačka motka može biti ispunjena sa izolacijskom pjenom koja predstavlja unutarnju zaštitu od prodora vlage kroz motku.



***Slika 4.4.*** *Presjek izolacije uzemljivačke motke*

## 4.2. Dielektrično ispitivanje

Nakon detaljno proučenih vizualnih pregleda ispitnog objekta prelazi se na dielektrična ispitivanja. Ovaj oblik ispitivanja izvodi se kao nerazorno ispitivanje u vremenu trajanja 1 min. Ispitni objekt u ovom primjeru je uzemljivačka motka duljine 1,5 m koja se postavlja na ispitni stol, dijeli se na pet sekcija po 30 cm i svaka sekcija obavija se kugličastim elektrodama.



***Slika 4.5.*** *VN ispitni stol*

Kugličaste elektrode koriste se zbog stvaranja homogenog električnog polja uslijed priključenog visokog napona, jer bi korištenjem pravokutnih ili trakastih elektroda uzrokovalo visoka parcijalna izbijanja i ioniziranje zraka. Samim time bi mjerenje i ispitivanje bilo neprecizno i netočno.

Na svaku sekciju uzemljivačke motke priključuje se izmjenični napon u vrijednosti 100 kV efektivne vrijednosti dobijen iz mreže, preko laboratorijskog transformatora i kapacitivnog djelila. Za svakih 1 V napona efektivne vrijednosti na primaru dobije se približno 680 V na sekundaru transformatora. Postupak određivanja prijenosnog omjera transformatora opisan je u sljedećem poglavlju.

Porast napona na elektrodama ispitnog stola odvija se u rasponu 1,5 - 2 kV po sekundi, u susjednoj upravljačkoj prostoriji, a vrši se digitalnim uređajem za mjerenje napona *(eng. Peak Voltmeter)*.




***Slika 4.6.*** *Digitalni uređaj za mjerenje napona*

Razvodni ormar sa zaštitom i signalizacijom povezan je sa uređajem za mjerenje napona i ukoliko se dogodi proboj izolacije nadstrujna zaštita će proraditi i prekinuti daljnje ispitivanje (pogledati sliku 4.7.). Upravljačka prostorija spojena je sa razvodnim ormarom preko koaksijalnog kabela. Jako električno polje uslijed ispitivanja uzrokuje smetnje i šumove na kabelu koji se ne mogu ukloniti u potpunosti.

Tolerancija odstupanja ispitnog napona u vrijednosti 100 kV efektivne vrijednosti iznosi ± 3%, a samo ispitivanje traje 1 min. Ako se u tom vremenu ne dogodi proboj izolacije, površinski preskok ili preskok kroz motku, ispitni objekt prolazi i ovaj dio ispitivanja i u ispitnom se izvještaju piše da je objekt zadovoljio kriterije oba ispitivanja. Za kvalitetan rezultat bitno je još ručno opipati motku nakon ispitivanja kako bi se osiguralo da se izolacija nije zagrijala. Ako se izolacija na motki zagrijala znači da na tom dijelu postoji puzna staza te da bi lako moglo doći do proboja izolacije u sljedećem korištenju.



***Slika 4.7.*** *Razvodni ormar*

Kompletno VN ispitivanje vrši se malim iznosima struje (oko 10 μA), a time i malim snagama transformatora (do 10 kVA) na frekvenciji 50 Hz.




***Slika 4.8.*** *VN laboratorijski transformator*

## 4.3. Postupak određivanja prijenosnog omjera transformatora za mjerenje ispitnog napona

Ispitni napon koji se za vrijeme ispitivanja mjeri i podešava na digitalnom uređaju za mjerenje napona u omjeru 1 V/680,924 V, dobiven je iz tvorničkih podataka kapaciteta i umjernice VN transformatora čiji se prijenosni omjer u ovom primjeru određuje slijedećim putem:

$C_{NN+kab} = 70{,}175 \cdot 10^{-9}\ F$

$C_{VN} = 103{,}210 \cdot 10^{-12}\ F$

$f = 50\ Hz$

$$U_2 = \frac{x_{NN}}{x_{VN} + x_{NN}} = \frac{\frac{1}{2\pi f C_{NN+kab}}}{\frac{1}{2\pi f C_{VN}} + \frac{1}{2\pi f C_{NN+kab}}} =$$

$$= \frac{\frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 70{,}175 \cdot 10^{-9}}}{\frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 103{,}210 \cdot 10^{-12}} + \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 70{,}175 \cdot 10^{-9}}} =$$

$$= \frac{\frac{1}{2{,}203495 \cdot 10^{-5}}}{\frac{1}{3{,}240794 \cdot 10^{-8}} + \frac{1}{2{,}203495 \cdot 10^{-5}}} = \frac{45382{,}449}{30856635{,}75 + 45382{,}449} = \frac{45382{,}449}{30902018{,}199} =$$

= 0,00146859175047242033 V

$$N = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{0{,}00146859175047242033}$$

$N = 680{,}924$

# 5. KOREKCIJSKI FAKTORI

Atmosferski uvjeti u ispitnim laboratorijima moraju uvijek biti prilagođeni na određene vrijednosti kako bi se u što većoj mjeri otklonio njihov utjecaj na točnost mjernih rezultata. Najvažnije atmosferske veličine koje se u laboratoriju nazivaju standardnim atmosferskim uvjetima su temperatura, tlak i vlažnost zraka, u iznosima:

- temperatura: $t_0 = 20\ °C$
- tlak: $b_0 = 101{,}3\ kPa\ (1013\ mbar)$
- apsolutna vlažnost: $h_0 = 11\ g/m^3$

Dielektrična čvrstoća na vanjskoj izolaciji ispitivanog objekta uvelike ovisi o atmosferskim uvjetima. Uobičajeno se probojni napon za pretpostavljeni zračni put povećava s povećanjem vlažnosti zraka. Međutim, kada relativna vlažnost prijeđe 80% iznosa, probojni napon postaje nepogodan za ispitivanje i potrebno je prilagoditi uvjete i ponoviti ispitivanje.

Primjenom korekcijskih faktora probojni napon mjeren u standardnim uvjetima (temperatura $t$, tlak $b$, vlažnost $h$) može se preračunati na vrijednost koja bi bila dobivena da se mjerenje odvijalo u standardnim atmosferskim uvjetima ($t_0$, $b_0$, $h_0$).

Probojni napon proporcionalan je atmosferskom korekcijskom faktoru $K_t$, koji je produkt dvaju korekcijskih faktora:

- faktora gustoće zraka $k_1$;
- faktora vlažnosti zraka $k_2$.

$$K_t = k_1 \cdot k_2 \tag{5-1}$$

Napon koji se priključuje na vanjsku izolaciju uređaja određen je ispitnim naponom $U_0$ pomnožen sa atmosferskim korekcijskim faktorom $K_t$:

$$U = U_0 \cdot K_t \tag{5-2}$$

Slično, mjereni probojni napon $U$ je sveden na $U_0$ što odgovara standardnim atmosferskim uvjetima podijeljen sa $K_t$:

$$U_0 = \frac{U}{K_t} \tag{5-3}$$

Izvješće ispitivanja uvijek sadržava informacije o stvarnim atmosferskim uvjetima u kojima se mjerenje odvijalo i korekcijske faktore koji su se tada upotrijebili.

## 5.1. Faktor gustoće zraka

Faktor gustoće zraka $k_1$ ovisi o relativnoj gustoći zraka δ i općenito je zapisan kao:

$$k_1 = \delta^m \tag{5-4}$$

gdje je eksponent $m$ - korekcijski eksponent gustoće zraka, prikazan na slici 8.

Kada su temperature $t$ i $t_0$ izražene u stupnjevima Celzijevima i atmosferski tlakovi $b$ i $b_0$ izraženi u kilopaskalima ili milibarima, relativna gustoća zraka iznosi:

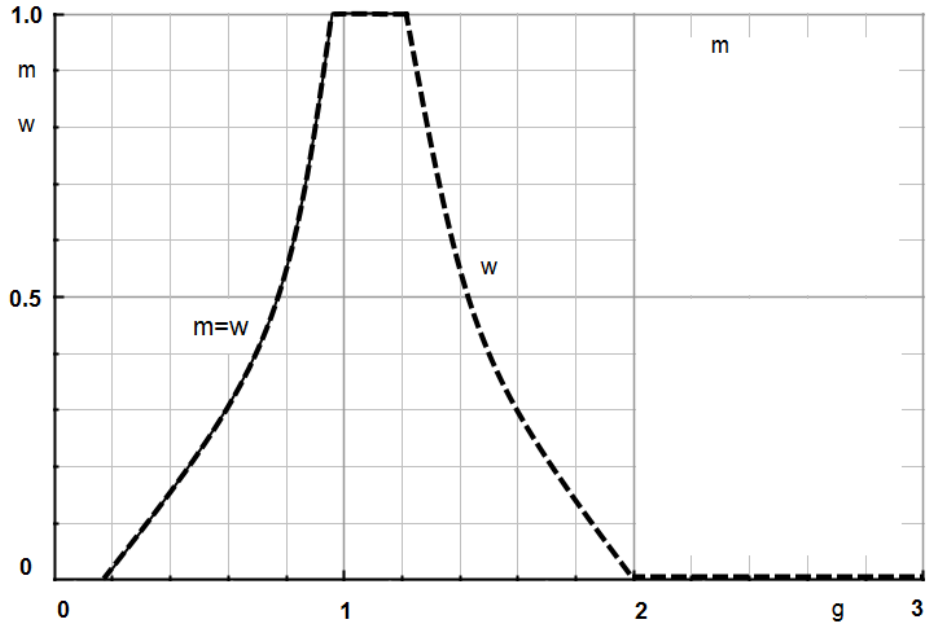
$$\delta = \frac{b}{b_0} \cdot \left(\frac{273+t_0}{273+t}\right) \tag{5-5}$$

## 5.2. Faktor vlažnosti zraka

Faktor vlažnosti zraka $k_2$ određen je u izrazu:

$$k_2 = k^w \tag{5-6}$$

gdje je eksponent $w$ - korekcijski eksponent vlažnosti zraka prikazan na slici 5.1., a $k$ je parametar koji ovisi o tipu ispitnog napona. Za praktičnu primjenu parametar k može se približno dobiti kao funkcija omjera apsolutne vlažnosti zraka $h$ i relativne gustoće zraka δ.




***Slika 5.1.*** *Vrijednosti korekcijskih eksponenata* ***m*** *i* ***w*** *kao funkcije parametra* ***g*** *[1]*

Kako korekcijski faktori ovise o tipu naponskog pražnjenja uveden je novi parametar:

$$g = \frac{U_B}{500 \cdot L\delta k} \tag{5-7}$$

gdje je $U_B$ 50% vrijednosti ispitnog napona (izmjerenog ili procijenjenog) u stvarnim atmosferskim uvjetima u kilovoltima, a $L$ je minimalni put pražnjenja u metrima zajedno sa δ i $k$.

Kod ispitivanja u vlažnim uvjetima i uvjetima umjetnog onečišćenja ne rade se korekcijski faktori za vlagu, dok se korekcijski faktori za gustoću zraka uzimaju u obzir.

# 6. IZRADA ISPITNE METODE

Svrha i dijelovi svake ispitne metode su:

a) definirati opće uvjete ispitivanja uređaja za rad pod naponom;
b) validirati odabrani postupak ispitivanja i rezultate ispitivanja;
c) iskazati mjernu nesigurnost rezultata.

Vezani dokumenti za ispitne procedure su:

a) radni list ispitivanja;
b) ispitni izvještaj pojedinog uzorka.

## 6.1. Opis ispitne procedure

Ispitne metode koje se koriste kod ispitivanja opreme za rad pod naponom normirane su metode i kao takve direktno se referenciraju na pojedinu normu, npr. HRN EN 608321-1:2011 "Izolacijske motke i pričvrstive naprave za rad pod naponom – 1. dio: Izolacijske motke (IEC 60832-1:2010, EN 60832-1:2010)" [8]. Nakon referenciranja ispitnih procedura slijedi provedba aktivnosti kako je to opisano u 3. poglavlju (vizualna i dielektrična ispitivanja uzemljivačke motke).

Vizualni pregled

1. Uzorak se vizualno pregledava kako bi se otkrile konstrukcijske ili funkcionalne greške.
2. Vanjska površina mora imati hidrofobska (svojstvo materijala koji odbija vodu) svojstva.
3. Vanjska i unutarnja površina ne smiju imati oštećenja poput širokih ili dubokih ogrebotina, nagnječenja, raslojavanja, izloženih vlakana i površinskih oštećenja koja mogu zahvatiti nečistoće te time smanjiti dielektričnu čvrstoću [8].

Nakon provedbe vizualnog pregleda, u radni list ispitivanja, u stupcu „Vizualni pregled" upisuje se DA ako je uzorak zadovoljio navedene uvjete, a NE ako nije. Ako je ocjena NE tada uzorak nije potrebno izlagati dielektričnom ispitivanju, već takav uzorak dobiva ocjenu „NIJE ZADOVOLJIO".

Na osnovu vizualnog pregleda popunjava se i ispitni izvještaj pojedinog uzorka.

Dielektrična ispitivanja

1. Priprema motke za ispitivanje.
2. Postavljanje elektroda na razmak od 300 mm.
3. Naizmjenično spajanje potencijala faze i potencijala zemlje na elektrode (na prvu elektrodu potencijal zemlje, na drugu potencijal faze, na treću potencijal zemlje, na četvrtu potencijal faze...)
4. Priključenje napona od 100 kV (efektivne vrijednosti), frekvencije 50 Hz u trajanju od 60 sekundi [8].

Motka je u ispravnom stanju ako su tijekom ili nakon provedbe testa zadovoljeni sljedeći uvjeti:

1. nema preskoka, pojave iskrenja ili proboja;
2. nema vizualnih tragova puzne staze ili erozije na površini;
3. nema osjetnog povećanja temperature sekcija ispitnog uzorka.

Radni list ispitivanja i ispitni izvještaj pojedinog uzorka

Radni list ispitivanja koristi se pri ispitivanju i on je izvorni, rukom pisani zapis u kojem se nalaze svi podaci (interne oznake, vizualni pregled, električna ispitivanja, zabilješke i napomene) vezani za pojedine uzorke tijekom ispitivanja. Nakon provedbe električnog ispitivanja u radni list upisuje se u odgovarajuće stupce DA ako je uzorak zadovoljio navedene uvjete, a NE ako nije. Ako je u svim stupcima ocjena DA, onda je konačna ocjena DA i uzorak dobiva oznaku „ZADOVOLJIO JE“.

Zatim se tako ispunjeni zapis prepisuje u bazu podataka, a izvorni rukom pisani zapis se arhivira u „Mapu evidencija zapažanja pri ispitivanju“. Tako arhivirani zapisi u arhivi moraju biti 5 godina.

Na osnovu električnog ispitivanja popunjava se i ispitni izvještaj pojedinog uzorka.

Na slijedeće dvije stranice nalaze se primjeri neispunjenog radnog lista ispitivanja i ispitnog izvještaja.

| Radni lista ispitivanja broj: | Datum: | Ispitivači: | | | | | | | Mjesto ispitivanja: | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Oznaka uzorka | Proizvođač, tv. br. , godina proizvodnje | $U_n$ (kV) | Vizualni pregled | $U_{isp}$ (kV) | DA / NE | $I_{odv}$ (mA) | DA / NE | Ocjena | Broj ispitnog izvještaja | Vrijedi do | Napomena |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

***Slika 6.1.*** *Radni list ispitivanja [8]*




***Slika 6.2.*** *Ispitni izvještaj pojedinog uzorka [8]*

## 6.2. Validacija mjernih rezultata

Laboratoriji koji upotrjebljavaju standardnu laboratorijsku ispitnu proceduru definiranu relevantnim normama (rad bez upotrebe nestandardnih procedura, procedura koje je specijalno razvio sam laboratorij ili upotrebe standardnih procedura izvan opsega njihove primarne namjene), nemaju potrebu za posebnom validacijom [8]. Validacija mjernih rezultata obično se provodi međusobnim laboratorijskim uspoređivanjima.

## 6.3. Mjerna nesigurnost

Pri utvrđivanju ispravnosti izolacije alata za rad pod naponom, mjerna nesigurnost je sastavni dio rezultata ispitivanja koji se može izračunati na osnovi iskustvenih vrijednosti i eksperimentalnih mjerenja uz promjenu parametara koji utječu na rezultantno električno polje (to su napon između elektroda i udaljenost između elektroda). Međutim, budući se ispitnom metodom ne iskazuje (mjeri) brojčana vrijednost, već je mjerni rezultat logička vrijednost DA/NE, odnosno ZADOVOLJIO JE/NIJE ZADOVOLJIO radi se o vjerojatnosti ispravnosti rezultata, odnosno kako se rezultat nalazi u određenom razredu točnosti s odabranom vjerojatnošću [8].

Objekt ispitivanja su izolacijske motke (šuplje i ispunjene pjenom).

Metoda ispitivanja štapova i cijevi sastoji se od dijelova: vizualna i funkcionalna provjera, te dielektričko ispitivanje.

U prvom dijelu ispitivanja odnosno pri vizualnoj i funkcionalnoj provjeri nesigurnost može potjecati jedino od ispitivača koji vrši vizualnu i funkcionalnu provjeru, pošto se ne vrši nikakvo mjerenje. Ta nesigurnost se ne može brojčano iskazati jer je isključivo subjektivna i opisnog je karaktera.

Dielektrično ispitivanje provodi se tako da se alat postavi na propisani način u ispitni stol, elektrode se nalaze na svakih 300 mm i spojene su na izvor napona efektivne vrijednosti od 100 kV, 50 Hz, te se izolacijski segmenti alata istomu izlažu u vremenskom trajanju od 1 minute.

Pri dielektričkom ispitivanju bilježi se trenutna vlaga i temperatura u prostoru u kojem se obavlja ispitivanje, mjeri se vrijeme trajanja izloženosti alata naponu. Nakon provedenoga ispitivanja ponovno se vrši vizualna provjera ispravnosti alata.

Ova metoda ispitivanja nema funkcijsku ovisnost rezultata o ulaznim parametrima, a rezultat ispitivanja se iskazuje u logičkom obliku što znači da je on ili pozitivan ili negativan: DA/NE, odnosno ZADOVOLJIO JE/NIJE ZADOVOLJIO. Ne može se razviti matematički model za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata ispitivanja, stoga je laboratorij napravio popis parametara od kojih se može očekivati da imaju značajan utjecaj na nesigurnost, te je procijenio njihov utjecaj na ukupnu nesigurnost.

### 6.3.1. Procjena mjerne nesigurnosti A tipa

U mjernu nesigurnost A tipa ulazi utjecaj odstupanja napona koji je isključivo posljedica kolebanja napona mreže iz koje se sustav napaja, odnosno utičnice.

Procjena mjerne nesigurnosti Tipa A dobije se statističkom obradom eksperimentalnih podataka. Za potrebe iskaza ovog dijela mjerne nesigurnosti treba provesti minimalno 10 mjerenja uz namjerno variranje napona na elektrodama u granicama kolebanja mrežnog napona napajanja (otprilike do 2 %) [8].

*Tablica 6.1. rezultati mjerenja napona mrežnog napajanja pri ispitivanju 15 alata [8]*

| **Broj šipke** | **Izmjereni napon mrežnog napajanja [kV]** |
|---|---|
| 1. | 99,90 |
| 2. | 99,80 |
| 3. | 99,85 |
| 4. | 99,87 |
| 5. | 100,50 |
| 6. | 100,30 |
| 7. | 100,20 |
| 8. | 100,40 |
| 9. | 99,85 |
| 10. | 100 |
| 11. | 100 |
| 12. | 100,10 |
| 13. | 100,20 |
| 14. | 99,90 |
| 15. | 99,95 |

Eksperimentalna standardna devijacija napona mrežnog napajanja dobiva se iz jednadžbe:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{6-1}$$

Eksperimentalna standardna devijacija napona mrežnog napajanja iznosi $s_A$= 0,219 kV.

### 6.3.2. Procjena mjerne nesigurnosti B tipa

Procjena mjerne nesigurnosti B tipa dobiva se iskustvom, analizom ispitivanja, analizom prijašnjih podataka, te iz umjernih izvještaja ispitne i mjerne opreme.

Utjecaj nesigurnosti dobivene iz tehničkih podataka o mjernoj konzoli:

Prva sastavnica mjerne nesigurnosti B tipa je klasa točnosti mjerne konzole koja iznosi ± 0,5%. Umjeravanjem je potvrđeno odstupanje od ± 0,1% što za vrijednosti u predmetnom ispitivanju rezultira procijenjenom mjernom nesigurnošću od $s_{B1}$ = 0,05 kV [8].

Utjecaj nesigurnosti dobivene iz tehničkih podataka o upravljačkoj konzoli:

Druga sastavnica mjerne nesigurnosti B tipa je klasa točnosti upravljačke konzole koja iznosi <2%, što za vrijednosti u predmetnom ispitivanju rezultira maksimalnom procijenjenom mjernom nesigurnošću ± 1,99% odnosno $s_{B2}$ = 1 kV [8].

Treća sastavnica mjerne nesigurnosti B tipa je mjerna nesigurnost kapacitivnog djelila (uključujući i kapacitet spojnog koaksijalnog kabela), odnosno prijenosnog omjera koja se očitava iz umjernog izvještaja. Procijenjeni postotni doprinos kapacitivnog djelila mjernoj nesigurnosti napona iznosi ± 1,58%, odnosno $s_{B3}$ = 0,79 kV prema važećoj formuli i podacima umjernog izvještaja [8].

Sve sastavnice mjerne nesigurnosti B tipa računaju se prema izrazu:

$$s_{Bx} = \frac{U_{srx} \cdot r_{\%}}{k} \cdot 100\% \tag{6-2}$$

gdje su:

$U_{srx}$ - srednja vrijednost napona umjeravanja;

$r_{\%}$ - postotna mjerna nesigurnost iz umjernice ili tehničke dokumentacije uređaja;

$k$ - koeficijent razdiobe.

**Ostale napomene**

Laboratorij je procijenio da udaljenost među elektrodama nema značajan utjecaj na mjernu nesigurnost jer se isti drži konstantnim (težinski faktor je 0). Također, laboratorij je procijenio kako temperatura i relativna vlaga ne utječu na mjernu nesigurnost ispitnog napona (u konačnici i el. polja - njihov težinski faktor iznosi 0) [8]. Ispitivanje se vrši u normalnim atmosferskim uvjetima, a radi osiguranja provedbe ispitivanja u normom propisanim atmosferskim uvjetima ispitne prostorije, raspon dozvoljene temperature i relativne vlažnosti zraka sužava se za vrijednosti mjerne nesigurnosti dane u umjernim izvještajima termometra i higrometra (npr. za normom dozvoljenih 18-28 °C uz podatak proširene mjerne nesigurnosti termometra od ± 0,6°C određuje ispitivanje u uvjetima 18,6-27,4°C, i npr. uz podatak mjerne nesigurnosti higrometra od ± 2,4% npr. za dozvoljenih 45-75% relativne vlažnosti određuje ispitivanje u uvjetima 47,4-72,6%.)

*Tablica 6.2. doprinosi i iznosi sastavnica (utjecajnih parametara) mjerne nesigurnosti [8]*

| TIP A | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| R.br. | izvor | $U_{sr}$ [kV] | nesigurnost [%] | razdioba | koeficijent | $S_A$ [kV] | napomena |
| 1 | 15 mjer. | 100,05 | 0,44 | normalna | 2 | 0,219 | st. dev. |
| TIP B | | | | | | | |
| R.br. | izvor | $U_{sr}$ [kV] | nesigurnost [%] | razdioba | koeficijent | $S_{B1,2,3}$ [kV] | napomena |
| 1 | OT 276 | 100,05 | 1,99 | normalna | 2 | 1,00 | teh. pod. |
| 2 | DMI 551 | 100,05 | 0,1 | normalna | 2 | 0,05 | umjernica |
| 3 | CC. djel. | 100,05 | 1,58 | normalna | 2 | 0,79 | umjernica |

Težinski faktor temperature, relativne vlažnosti zraka, udaljenost između elektroda i vremena ispitivanja je 0 i prema tome oni ne čine sastavnice (utjecajne parametre) mjerne nesigurnosti napona.

Prema izrazu:

$$u_c = \sqrt{(S_A^2 + S_{B1}^2 + S_{B2}^2 + S_{B3}^2)} \tag{6-3}$$

sastavljena mjerna nesigurnost iznosi:

$$u_c = 1{,}294\ kV \tag{6-4}$$

Uz vjerojatnost rezultata P = 95% faktor pokrivanja je k = 2. Uz to može se izračunati proširena mjerna nesigurnost U, prema izrazu:

$$U = u_c \cdot k \tag{6-5}$$

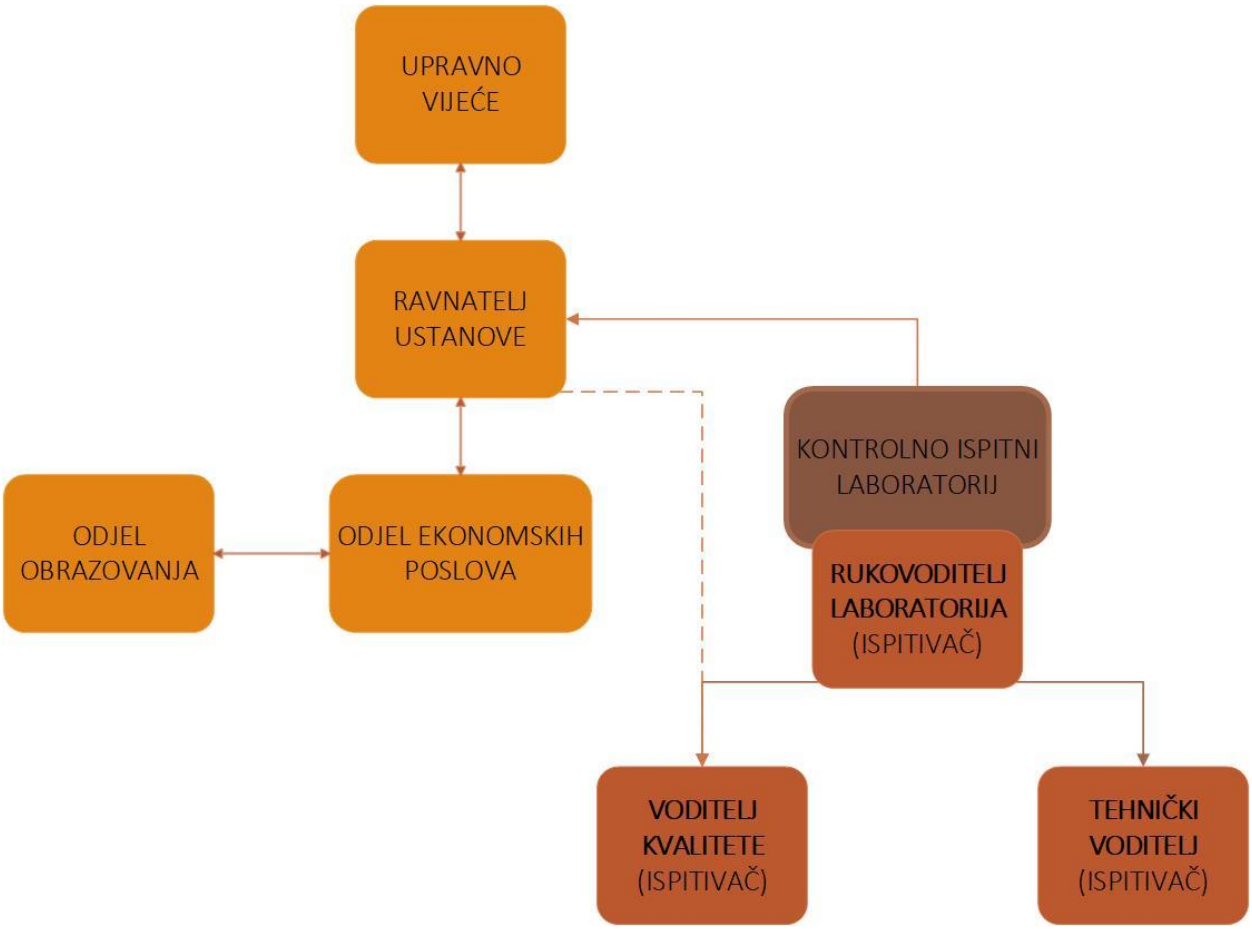
proširena mjerna nesigurnost iznosi:

$$U = 2.59\ kV \tag{6-6}$$

Uzevši u obzir sve dostupne podatke o utjecajnim parametrima postotak pouzdanosti ispitne metode iznosi 97,3 %.

# 7. SUSTAV UPRAVLJANJA KVALITETOM KONTROLNO-ISPITNOG LABORATORIJA

Svrha sustava upravljanja kvalitetom kontrolno ispitnog laboratorija i dokumentacije u cijelosti je definirati način osiguranja kvalitete pri obavljanju aktivnosti iz područja djelatnosti kontrolno ispitnog laboratorija.




***Slika 7.1.*** *Primjer organizacijske sheme kontrolno-ispitnog laboratorija*

## 7.1. Ključne funkcije kontrolno-ispitnog laboratorija

Ravnatelj ustanove

- U nedostatku rukovoditelja laboratorija ravnatelj potpisuje ispitne izvještaje;
- zajedno s voditeljem kvalitete sudjeluje u otklanjanju uočenih problema vezanih uz kvalitetu ispitivanja;
- sudjeluje na sastancima tima za kvalitetu;

- donosi interne akte kontrolno-ispitnog laboratorija;
- vrši konačno odobravanje za nabavku laboratorijskih usluga i potrepština prema preporuci voditelja.

Rukovoditelj laboratorija

- Osigurava primjenu pravila dobrog ponašanja i prakse *(engl. GLP-good laboratory practice)* opisanih u važećim referentnim dokumentima;
- izdaje ili uskraćuje suglasnost za izdavanje rezultata korisnicima usluga ispitivanja;
- potpisom ovjerava sva laboratorijska ispitivanja i izvještaja;
- ako je potrebno određuje, razvija i uvodi poboljšanja mjerne sposobnosti Laboratorija kako bi se zadovoljile norme, programi i korisnici usluga ispitivanja.

Voditelj kvalitete

- Izrađuje godišnje izvještaje o ciljevima kvalitete;
- kontrolira dokumentaciju sustava upravljanja kvalitetom;
- održava, analizira i ažurira statističke podatke i/ili kontrolne grafove;
- održava priručnik kvalitete;
- odgovoran je za izradu planova i provedbu periodičkih provjera sustava osiguranja laboratorija.

Tehnički voditelj

- Odgovoran je za administrativne i tehničke postupke sustava upravljanja kvalitetom;
- osigurava kontinuiranu akreditaciju laboratorija;
- provjerava dobavljače i umjeravanja;
- određuje tehničke parametre nabave.

Ispitivač

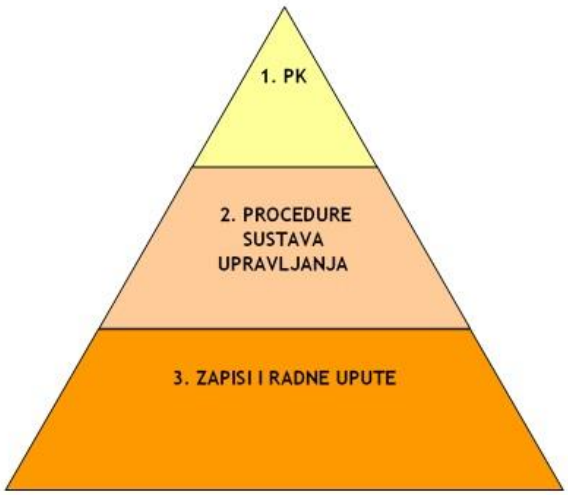
- Odgovoran je za provedbu zaštite na radu tijekom ispitivanja;
- održavanje ispitne opreme;
- pravilno rukovanje mjernom opremom;
- ispravno unošenje rezultata ispitivanja.

## 7.2. Struktura sustava upravljanja kvalitetom kontrolno-ispitnog laboratorija

Potrebe i želje korisnika usluga ispitivanja, te povratne informacije o pruženim uslugama predstavljaju osnovu za osmišljavanje i realizaciju svih usluga laboratorija, stoga im se zbog toga pruža posebna pažnja kako bi kvaliteta tih usluga bila uvijek na visokom nivou. Uz to laboratorij preuzima odgovornost da sve svoje operacije vrši u skladu sa zakonskim i primjenjivim regulativama, te normama i smjernicama. Sustav upravljanja kvalitetom pokriva sve djelatnosti pod akreditacijom, a koje se obavljaju unutar prostorija laboratorija.

Tim za kvalitetu laboratorija ima odgovornost za organizaciju, kontrolu i održavanje sustava upravljanja kvalitetom kao i za sljedeće aktivnosti:

- planiranje uvođenja, proširivanja i/ili mijenjanja sustava upravljanja kvalitetom;
- upravljanje zakonskim i regulatornim dokumentima, kao i zapisima kvalitete;
- upravljanje procedurama pritužbi i popravnih radnji;
- kontrola kvalitete rezultata ispitivanja kroz upravljanje procesom ispitivanja uključujući kontrolu metoda i opreme;
- razvijanje mjerne sposobnosti laboratorija;
- upravljanje dokumentacijom;
- sudjelovanje u provjeri kvalitete pruženih usluga;
- provjera da usluge i proizvodi laboratorija zadovoljavaju postavljene zahtjeve uprave;
- Određivanje i sprječavanje odstupanja od propisane kvalitete sustava upravljanja kvalitetom, procesa te pruženih usluga i proizvoda [9].




***Slika 7.2.*** *Struktura dokumentacije sustava upravljanja kvalitetom*

# 8. ZAKLJUČAK

Visokonaponska ispitivanja i vizualni pregledi predstavljaju vrlo bitan faktor u korištenju opreme za rad pod naponom. Prvi i najbitniji faktor je sigurnost radnika koji obavljaju radove pod naponom, a drugo, redovitim periodičkim ispitivanjima može se produljiti vijek trajanja alata koji se koriste u toj djelatnosti. Razvijen je znatan broj normi koje se koriste pri različitim ispitivanjima uređaja u obliku međunarodnih (IEC), europskih (EN) i usvojenih hrvatskih (HRN) normi. Akreditacija djelatnosti također predstavlja vrlo bitan čimbenik u poslovanju laboratorija jer se time poboljšava i unaprjeđuje odnos sa stalnim i potencijalnim kupcima. Djelatnost VN kontrolno-ispitnog laboratorija temelji se na dva dijela, a to su vizualni pregledi i dielektrična ispitivanja, nakon kojih se na osnovu dobivenih podataka popunjavaju radni list ispitivanja i ispitno izvješće pojedinog uzorka sa svim predviđenim stavkama i ocjenom „ZADOVOLJIO“ ili „NIJE ZADOVOLJIO“. Laboratorij ima obavezu ostvarivanja međulaboratorijske suradnje s laboratorijima u smislu poredbenih ispitivanja na istim ispitnim uzorcima ili usporedbi određene mjerne veličine, npr. napona. Svrha ovakvih suradnji je potvrđivanje mjernih rezultata i dokazivanje mjerne ponovljivosti, kontrola mjernih instrumenata, te promocija i proširivanje komercijalne ponude laboratorija.

# 9. LITERATURA


[1] IEC 60060-1 Standard - High voltage test techniques, second edition (1989-11), 1989.

[2] Orsino O. Filho, Darcy R. Mello, José A. Cardoso, Rogério M. de Azevedo, Sylvia G. Carvalho, Waldenir A.S. Cruz: Flashover tests under wet conditions on full and sectioned UHV insulators, Cigré, 2010.

http://www.cigre.org.br/download.asp?arq=archives/files/bienal2010/Apresent_D1_201_Poster_2010.pdf

[3] Tehnički fakultet sveučilišta u Rijeci - Periodičke izmjenične veličine,

http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zee/nastava/stel/oe2/download/Periodicke.pdf

[4] CROLAB - Hrvatski Laboratoriji (ispitni, umjerni, analitički),

https://www.crolab.hr/web/63_73_539_-1_-1_-1_detalj_default.aspx

https://www.crolab.hr/web/53_94_0_-1_-1_-1_podizbornik_default.aspx

[5] Ivanka Lovrenčić Mikelić: „Kako akreditirati laboratorij prema normi HRN EN ISO/IEC 17025“ - praktične upute za početnike, časopis „Svijet po mjeri“ (broj 1), 2015.

[6] ISSA - International Social Seurity Association - Guideline for Assesing the Competence of Electrically Skilled Persons, 2004.

[7] High voltage circuit breaker in the Siemens switchgear manufacturing plant in Berlin

https://www.siemens.com/press/en/presspicture/?press=/en/pp_ptd/2007/soptd200701-22.htm

[8] Priručnik kontrolno-ispitnog laboratorija - metode ispitivanja, validacija i mjerna nesigurnost.

[9] Priručnik kvalitete kontrolno-ispitnog laboratorija za ispitivanje izolacije alata i zaštitne izolacijske opreme.

# SAŽETAK

Rad pod naponom predstavlja djelatnost koja se izvodi u znatnom broju država diljem svijeta. Za siguran rad pod naponom potrebna su sigurnosna pravila i upute za rad, ali i pouzdani alati. Kako bi se otklonio bilo kakav rizik od opasnosti rukovanja s alatom za rad pod naponom, bitno je kontinuirano ispitivati izolaciju opreme u, za to predviđenim laboratorijima (kontrolno-ispitni). Praksa je inače takva da se izolacijske karakteristike alata ispituju na pretpostavljenom računalnom modelu prije proizvodnje, zatim na fizičkom modelu po njihovoj proizvodnji u tvornici, a potom slijede kontinuirana laboratorijska ispitivanja (vizualna i dielektrična) svakih 5-6 godina.

Ključne riječi: rad pod naponom, sigurnost, izolacija, alat, visokonaponska ispitivanja, vizualni pregledi.

# ABSTRACT

Live work is an activity that is performed in a number of countries around the world. For a safe live operation, protection regulations and operating instructions must be obtained, as well as reliable tools. To eliminate any risk of operating hazard with a live power tool, it is essential to continuously inspect the insulation of equipment in the corresponding laboratories (control-test). Techniques that are usually used in this type of activity are testing the insulating characteristics of tools on prefabricated computer model, then on a physical model by their production at the factory, and then followed by continuous laboratory tests (visual and dielectric) every 5-6 years.

Keywords: livework, protection, insulation, tool, high voltage tests, visual inspections.

# ŽIVOTOPIS

Ivan Arambašić rođen je 4. listopada 1990. u Osijeku. Osnovnu školu M.P. Katančić u Valpovu pohađa u razdoblju od 1. do kraja 5. razreda, a kasnije nastavlja u OŠ Franje Krežme u Osijeku. Nakon završetka osnovne škole upisuje i završava II. gimnaziju u Osijeku, a potom zainteresiran za elektroenergetiku upisuje stručni studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Nakon završetka stručnog studija upisuje i završava Razlikovne obveze i upisuje sveučilišni diplomski studij elektrotehnike, smjer: održiva elektroenergetika. Tijekom studija odrađuje dvije prakse, 2012. godine u HEP - Operatoru prijenosnog sustava i 2016. godine u Hrvatskom operatoru prijenosnog sustava. Od izvannastavnih aktivnosti bavi se sviranjem tambure, a pohađao je i „tamburašku školu Batorek“ u Osijeku.