

# Ispitivanje kvalitete električne izolacije

---

**Acalinović, Domeniko**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:662511>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-26**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**DOMENIKO ACALINOVIĆ**

**ISPITIVANJE KVALITETE ELEKTRIČNE IZOLACIJE**

**DIPLOMSKI RAD**

Rijeka, 2022. godina.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**ISPITIVANJE KVALITETE ELEKTRIČNE IZOLACIJE  
TESTING THE QUALITY OF ELECTRICAL INSULATION**

**DIPLOMSKI RAD**

Kolegij: Ispitivanja brodskih elektroničkih uređaja

Mentor: doc. dr. sc. Miroslav Bistović

Student/studentica: Domeniko Acalinović

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112061620

Rijeka, rujan 2022. godina.

Student: Domeniko Acalinović

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112061620

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom  
ISPITIVANJE KVALITETE ELEKTRIČNE INSTALACIJE  
(naslov diplomskog rada)

izradio/la samostalno pod mentorstvom

doc. dr. sc. Miroslav Bistović

(prof. dr. sc. / izv. prof. dr. sc. / doc dr. sc Ime i Prezime)

te komentorstvom \_\_\_\_\_

stručnjaka/stručnjakinje iz tvrtke \_\_\_\_\_  
(naziv tvrtke).

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezao/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student/studentica 

\_\_\_\_\_  
(potpis)

Ime i prezime studenta/studentice

Domeniko Acalinović

Student: Domeniko Acalinović

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112061620

IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student/studentica - autor



---

(potpis)

## SAŽETAK

Elektroenergetski sustav složeni je sustav opskrbe električne energije, sastoji se od mnogo električnih komponenata i uređaja koji međusobno čine podsustave, a zajedno cjelinu. Kako bi ta cjelina mogla ispravno funkcionirati bez opasnosti za ljudski život i sustav mora biti pravilno električki izolirana. Električna izolacija svake komponente u sustavu mora prvenstveno biti pravilno dimenzionirana. Zatim nakon puštanja u pogon kvaliteta električne izolacije mora se u točno određenim intervalima ispitivati i voditi nadzor kako bi sigurnost sustava bila što veća, a vjerojatnost pojave kvara zbog električne izolacije što manja. Svrha ovog rada je prvenstveno opisati važnost električne izolacije kao i opisati svojstva dielektrika te klasificirati izolacijske materijale. Zatim ukratko opisati kako se i u kojim oblicima i kombinacijama električna izolacija primjenjuje na određene komponente elektroenergetskog sustava. Za kraj su opisane neki od vrsta ispitivanja kvalitete električne izolacije te načini kontrole i nadzora iste.

**Ključne riječi:** električna izolacija, dielektrik, svojstva dielektrika, ispitivanje kvalitete električne izolacije, nadzor električne izolacije

## **SUMMARY**

The power grid is a complex system of electricity supply. It consists of many electrical components and devices that form subsystems and together constitute a total system. In order to function properly and without risk to human life, the system must be properly electrically isolated. The electrical insulation of each component of the system must first be properly sized. After commissioning, the quality of the electrical insulation must be tested and monitored at well-defined intervals to ensure that the safety of the system is as high as possible and the probability of failure due to electrical insulation is as low as possible. The objective of this paper is to first describe the importance of electrical insulation, explain the properties of dielectrics, and classify insulating materials. Then, it will briefly describe how and in what forms and combinations electrical insulation is applied to specific components of the power system. Finally, some ways of testing the quality of electrical insulation and methods of controlling and monitoring it are described.

Keywords: electrical insulation, dielectric, dielectric properties, electrical insulation quality testing, electrical insulation monitoring.

# SADRŽAJ

<b>SAŽETAK .....</b>	<b>I</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>II</b>
<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.2 RADNA HIPOTEZA.....	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA .....	1
1.4. ZNANSTVENE METODE .....	1
1.5 STRUKTURA RADA .....	2
<b>2. IZOLACIJA .....</b>	<b>4</b>
2.1. SVOJSTVA DIELEKTRIKA.....	4
2.1.1. Istosmjerna vodljivost .....	5
2.1.2. Dielektrična permitivnost.....	5
2.1.3. Kompleksna permitivnost, kut gubitka i faktor disipacije.....	6
2.1.4. Polarizacija.....	8
2.1.5. Dielektrična čvrstoća .....	8
2.2. KLASIFIKACIJA IZOLACIJSKIH MATERIJALA.....	9
2.2.1. Plinovi.....	9
2.2.2. Vakuum.....	10
2.2.3. Tekućine .....	10
2.2.4. Krutine .....	11
2.2.5. Kompoziti .....	13
2.3 PRIMJENA IZOLACIJSKIH MATERIJALA.....	13
2.3.1. Transformatori.....	14
2.3.2 Prekidači .....	15
2.3.3 Kabeli za napajanje .....	15
2.3.4 Čahure.....	16
2.3.5 Nadzemni vodovi.....	17
2.3.6 Plinom izolirani sklopni uređaji .....	18
2.3.7. Odvodnik prenapona i zaštitni otvori.....	18
2.3.8 Energetski kondenzatori.....	19
2.3.9. Rotirajući strojevi .....	19



<b>3. ISPITIVANJE IZOLACIJE .....</b>	<b>20</b>
3.1. ISPITIVANJE IZOLACIJE ROTIRAJUĆIH STROJEVA.....	20
3.1.1. <i>Ispitivanje istosmjernom strujom</i> .....	21
3.1.2 <i>Ispitivanje izmjeničnim naponom</i> .....	21
3.2. ISPITIVANJE IZOLACIJE KABELA.....	21
3.2.1. <i>Složena metoda ispitivanja izolacije kabela</i> .....	22
<b>4. KONTROLA I NADZOR IZOLACIJA .....</b>	<b>25</b>
4.1. ON-LINE MJERENJE DJELOMIČNOG PRAŽNJENJA.....	26
4.1.1. <i>Visokonaponska sonda</i> .....	26
4.1.2. <i>Prevarači</i> .....	27
4.1.3. <i>Elektronička detekcijska jedinica</i> .....	27
4.1.4. <i>Princip rada</i> .....	28
4.2 ON-LINE MJERENJE KUTA DILEKTRIČNIH GUBITAKA .....	29
4.2.1 <i>Visokonaponska sonda</i> .....	29
4.2.2. <i>Prevarači</i> .....	29
4.2.3. <i>Fazni enkoderi</i> .....	30
4.2.4. <i>Čitač signalap</i> .....	30
4.2.5. <i>Princip rada</i> .....	31
<b>5. ELEKTRIČNA IZOLACIJA U BRODSKIM SUSTAVIMA .....</b>	<b>33</b>
5.1. STANDARDI I PRAVILA KLASIFIKACIJSKOG DRUŠTVA ZA.....	33
ELEKTRIČNU IZOLACIJU NA BRODU .....	33
5.1.1. <i>Ispitivanje i testiranje</i> .....	34
5.1.2. <i>Ispitivanje brodova upisanih u Registar</i> .....	37
5.1.3. <i>Ispitivanje brodske električne izolacije uporabom termovizije</i> .....	40
5.1.4. <i>IEC- Internacional Electrotechnical commission</i> .....	45
5.2. INOVACIJE I BUDUĆNOST U BRODSKOM ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU .....	47
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>49</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>50</b>
<b>KAZALO KRATICA .....</b>	<b>51</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>52</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>53</b>

# **1. UVOD**

Elektroenergetski sustav sastoji se od mnogo manjih zasebnih komponenti i uređaja. Kako bi takav sustav mogao ispravno funkcionirati bez opasnosti za čovjeka, okolinu i samog sebe potrebno je da svaka komponenta sustava bude pravilno projektirana i instalirana. Nakon ugradnje i puštanja sustava u pogon bitno je njegovo održavanje. Održavanje sustava veoma je složen posao jer treba voditi računa o mnogim parametrima. Neki dijelovi sustava ili dijelovi komponentata se s vremenom troše te ih je potrebno pravovremeno servisirati ili zamijeniti kako ne bi došlo do kvara sustava te kako bi sustav mogao dalje funkcionirati.

## **1.1 PROBLEM, PREDMET I OBJEKT ISTRAŽIVANJA**

Jedna od stvari koja je ključna za siguran i kvalitetan rad elektroenergetskog sustava je električna izolacija. Svaka komponenta sustava mora biti pravilno izolirana kako bi sustav mogao pravilno funkcionirati. Tijekom eksploatacije elektroenergetskog sustava s vremenom električna izolacije se troši jer na nju djeluju razni čimbenici kojima je izložena. Predmet istraživanja ovog diplomskog rada je upravo kvaliteta električne izolacije, kako u kopnenim sustavima tako i u brodskoj elektroenergetskoj mreži.

## **1.2 RADNA HIPOTEZA**

Ovim radom ne želi se ništa opovrgavati niti dokazivati nego općenito pojasniti važnost električne izolacije i njenu primjenu i način održavanja radi opće sigurnosti ljudskih života i rada sustava, stoga nije potrebno postavljati radnu hipotezu.

## **1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA**

Svrha i cilj ovog rada je općenito pojasniti električnu izolaciju i njena svojstva i način primjene u elektroenergetskom sustavu. Kasnije kroz određena poglavlja biti će pojašnjeni načini primjene i ispitivanja kvalitete i stanja električne izolacije u kopnenom elektroenergetskom sustavu. Kako je brodska elektroenergetska mreže ipak malo zahtjevnija zbog nedostataka prostora i uvjeta okoline u kojoj se primjenjuje opisati će se neka pravila i standardi koji se moraju poštivati i način ispitivanja brodske elektroenergetske mreže, a sve u svrhu da čitatelju približi problematika i izazovi broskog elektroenergetskog sustava u svakodnevnoj primjeni.

## **1.4. ZNANSTVENE METODE**

Za potrebe ovog rada u svrhu istraživanja, i obrađivanja pojedinih poglavlja korištene su sljedeće znanstvene metode: metoda analize i sinteze, komparativne metode, metoda indukcije i dedukcije, metoda specijalizacije i generalizacije, metoda klasifikacije i deskripcije.

## **1.5 STRUKTURA RADA**

Struktura ovog rada podijeljena je u 6 poglavlja od kojih svako poglavlje sadrži svoja pod poglavlja.

Prvo poglavlje, UVOD odnosi se na problem, predmet i objekte istraživanja, radnu hipotezu, svrhu i ciljeve istraživanja, znanstvene metode primijenjene u radu te na kraju se navodi kratka struktura rada.

Drugo poglavlje IZOLACIJA opisuje se općenito izolacija. Za bolje razumijevanje u drugom poglavlju opisana su svojstva dielektrika, klasificirani su izolacijski materijali te načini primjene izolacijski materijala na pojedine dijelove elektroenergetskog sustava kao što su transformatori, prekidači, kabeli za napajanje i drugi.

Treće poglavlje ISPITIVANJE IZOLACIJE bavi se načinima ispitivanja stanja i kvalitete električne izolacije na kopnenim sustavima. U ovom poglavlju obrađeni su načini ispitivanja električne izolacije na rotirajućim strojevima istosmjernom strujom i izmjeničnim naponom te ispitivanje kvalitete električne izolacije kabela za napajanje.

Četvrto poglavlje KONTROLA I NADZOR IZOLACIJA prikazuje nam načine on-line mjerenja stanja i kvalitete električne izolacije. Postoje dva načina mjerenja, a to su mjerenje djelomičnog pražnjenja i mjerenje kuta dielektričnih gubitaka.

U petom poglavlju ELEKTRIČNA IZOLACIJA U BRODSKIM SUSTAVIMA opisani su standardi i pravila klasifikacijskih društava koje se odnose na električnu izolaciju u brodskim elektroenergetskim sustavima te njihovo ispitivanje i testiranje. Nadalje opisani su načini ispitivanja elektroenergetskog sustava za već upisane brodove u Registar i način ispitivanja brodske elektroenergetske mreže primjenom termovizijskih kamera. Za kraj poglavlja iznjete su neke inovacije za budućnost broskog elektroenergetskog sustava.

Šesto poglavlje odnosno zadnje poglavlje ZAKLJUČAK, služi da bi objedinili sve misli i činjenice iznesene u radu te kako bi dali osobno mišljenje i stav o važnosti kvalitete električne izolacije.



## **2. IZOLACIJA**

Električna izolacija je okosnica svih modernih mreža elektroenergetskog sustava. Različite vrste dielektrika koji čine ove izolacijske elemente su izloženi raznim stresovima tijekom svog životnog vijeka. Stoga je temeljito poznavanje njihovih osnovnih svojstava bitno za njihov prikladan i optimalan dizajn kao i za njihovo ispitivanje prije i nakon ugradnje te pouzdan rad. Brzorastuća potražnja za električnom energijom u današnjem svijetu zahtijeva njegov prijenos na visokim naponskim razinama. Inženjeri elektrotehnike se moraju učinkovito uhvatiti u koštac s kompliciranim problemima izolacije i prenaponima koji nastaju u energetske mrežama. Za obuku i bolje opremanje inženjera sada i u budućnosti nužno je da osigurati relevantnu specijaliziranu pozadinu.

Dakle, kao što je već spomenuto visokonaponska oprema je okosnica modernog elektroenergetskog sustava. Osim proizvodnje, prijenosa i distribucije električne energije, visoki naponi se također intenzivno koriste za mnoge industrijske, znanstvene i inženjerske aplikacije.

U svim takvim primjenama, izolacija visokonaponskog vodiča je od primarnog značaja. Za pravilan dizajn te siguran i pouzdan rad izolacijskog sustava vrlo je važno, poznavanje fizikalnih i kemijskih pojava koji određuju dielektrična svojstva izolacijskog materijala. Osim toga, osnovni procesi koji dovode do degradacije i neuspjeh takvih materijala i odgovarajuće dijagnostičke tehnike su od velike važnosti jer svaki takav kvar može prouzročiti privremenu ili trajnu štetu sustavu, a time utjecati na njegovu pouzdanost i cijenu. S obzirom na visoku cijenu i relativno dug životni vijek (20-40 godina) visokonaponske opreme, potrebno je uložiti sve napore da se odabere najprikladnije materijale kao i dizajn, ugradnju i radne parametre za takav sustav.

### **2.1. SVOJSTVA DIELEKTRIKA**

Postoji nekoliko svojstava dielektrika koja su od praktične važnosti. Najvažnija od ovih svojstava su ukratko definirani ovdje.

### 2.1.1. Istosmjerna vodljivost

Istosmjerna vodljivost,  $\sigma$ , definirana je kao:

$$\sigma = J/E \quad (2.1)$$

gdje je  $J$  gustoća struje (A/m<sup>2</sup>) koja proizlazi iz primjene izravnog električnog napreznja  $E$  (V/m). Povezana je s ukupnim otporom  $\rho$  dielektrika i  $\sigma = 1/\rho$ , a izračun se vrši iz izmjerenih vrijednosti otpora izolacije. Alternativno, ako su poznati  $\rho$  i geometrija, može se izračunati otpor izolacije. Otpor izolacije koristi se kao pokazatelj ponašanja vodljivosti izolacijskih materijala u mnogim praktičnim primjenama, kao što je ispitivanje visokom otpornošću. Za većinu izolacijskih materijala  $\sigma$  ovisi o čistoći materijala, njegovoj temperaturi  $T$  i električnom napreznju  $E$ . Općenito  $\sigma$  se povećava kako se povećavaju ionske nečistoće u izolacijskom sustavu. Slično,  $\sigma$  također ima tendenciju povećanja s  $T$  i  $E$  u većini slučajeva nakon odnosa tipa:

$$\sigma(T) = Ae^{-E/kT} \quad (2.2)$$

gdje je:

$k$  - Boltzmanova konstanta,

$A$  - je konstanta,

a  $\sigma(T)$  – vrijednost od  $\sigma$  na temperaturi  $T$ .

Osim toga, zbog polarizacijskih učinaka,  $\sigma$  također ovisi o vremenu primjene napreznja. Utječe na gubitke snage u dielektriku i kontrolira distribuciju električnog napona pod izravnim primjenama napona.

### 2.1.2. Dielektrična permitivnost

Dielektrična permitivnost, relativna permitivnost ili dielektrična konstanta izolacijskog materijala definirani su kao:

$$\varepsilon_r = C/C_0 \quad (2.3)$$

gdje je:

$C$  - kapacitivnost između dvije paralelne ploče s prostorom između njih ispunjenim izolacijski materijal kojeg se promatra

$C_0$  - kapacitivnost za isti paralelne ploče kada su one odvojene vakuumom.

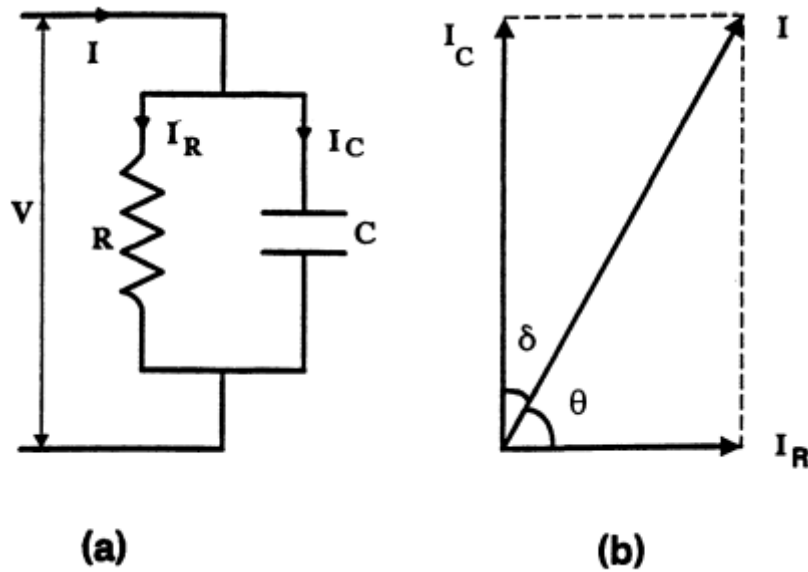
Općenito  $\varepsilon_r$  nije fiksni parametar. On ovisi o temperaturi, frekvenciji i molekularnoj strukturi izolacijskog materijala.

### 2.1.3. Kompleksna permitivnost, kut gubitka i faktor disipacije

Da bi se odredio odziv dielektrika na izmjenične napone, koristimo paralelni RC strujni krug. Takav strujni krug zajedno s svojim fazorskim dijagramom prikazana je na slici 2.1. Ovdje  $R$  predstavlja dio dielektrika s gubicima uzimajući u obzir nastale gubitke od elektronske i ionske vodljivosti, orijentacije dipola i prostornog naboja polarizacija itd., a  $C$  je kapacitivnost u prisutnosti dielektrika kako je ranije definirano. Ako se primijeni izmjenični napon:

$$v = \sqrt{2} * V * \sin\omega t \quad (2.4)$$

tada se kapacitivna komponenta struje je  $I_C = j\omega CV$  dok je otporna komponenta struje  $I_R = -jI \tan\delta$ . Budući da je kut gubitka  $\delta$  obično vrlo malen.



**Slika 1-(a) Paralelni ekvivalentni krug dielektričnog materijala i (b) odgovarajući fazorski dijagram**

Izvor: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203758816/electrical-insulation-power-systems-malik>

$I_C \approx I$  i  $I_R = -jI_C \tan \delta$ . Dakle, ukupna struja  $I = I_C + I_R$  može biti izraženo kao:

$$I = I_C = j\omega C_0 V (\epsilon_r - j \epsilon_r \tan \delta) = j\omega C_0 V \epsilon^* \quad (2.5)$$

gdje je:

$\epsilon^*$  - kompleksna relativna permitivnost čiji je realni dio jednak dielektrična konstanta,  $\epsilon_r$ , i imaginarni dio jednak faktoru gubitka,  $\epsilon_r \tan \delta$ .

Faktor gubitaka razlikuje gubitke u jednom dielektričnom materijalu od onih u onom drugom.  $\tan \delta$  je općenito poznat kao tangens gubitka ili faktor disipacije ili ponekad kao faktor snage ( $\cos \theta$ ) dielektrika. To obično ovisi o učestalosti i na nju može utjecati i primijenjeno električno naprezanje kao i temperatura. Gubitak snage u dielektriku dano je kao:

$$\text{Gubitak snage} = \omega C V^2 \tan \delta = \omega C_0 V^2 \epsilon_r \tan \delta \quad (2.6)$$

Nadalje  $\sigma$  i  $\tan \delta$  povezani su kao:



$$\tan\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0 \varepsilon\Gamma} \quad (2.7)$$

gdje je  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  F/m permitivnost slobodnog prostora ili vakuuma.[1]

#### 2.1.4. Polarizacija

Za razliku od vodiča gdje su slobodni elektroni lako dostupni, većina elektrona u izolacijskim materijalima su vezani i ne mogu se slobodno kretati. Pod utjecajem primijenjenog električnog polja, elektrostatske sile stvoriti će određenu razinu polarizacije tvoreći dipole. Upravo ta elektronska polarizacija rezultira relativnom permitivnošću većom od 1 za većinu dielektričnih materijala. U nekim kristalnim dielektričnim materijalima dolazi do relativnog pomaka između pozitivnih i negativnih iona, kao što je  $\text{Na}^+$  i  $\text{Cl}^-$  stvara atomsku polarizaciju. U drugom mehanizmu koji djeluje u organskim tvarima, uključujući mnoge polimere, stalni molekularni dipoli su preorijentirani u električnom polju. Posljednja vrsta mehanizma koju možemo razmatrati je međufazna polarizacija koja se promatra za heterogene materijala. U ovom slučaju, pokretni vodljivi naboji se zadržavaju na granici unutar dielektrika. Elektrolitski kondenzatori u kojima se zadržava naboj na površini elektrode primjer je dvostrukog sloja ove vrste polarizacije.

#### 2.1.5. Dielektrična čvrstoća

Definira se kao najveća vrijednost primijenjenog električnog polja pri kojoj dielektrični materijal, napregnut u sustavu elektroda s homogenim poljem, razgrađuje se i gubi izolacijska svojstva. Mjeri se u V/m. Probojna čvrstoća većine dielektrika ovisi o čistoći materijala, vremenu i način primjene napona, vrsti primijenjenog naprezanja kao i drugim eksperimentalnim parametrima i okruženju. Iako u mnogim slučajevima, može biti teško dodijeliti jedinstvenu vrijednost dielektrične čvrstoće danom materijala, raspon vrijednosti može se pronaći i koristiti u svrhu izračuna. Iako se po definiciji dielektrična čvrstoća odnosi na sustav uniformnog polja, u mnogim primjenama potrebno je definirati probojnu čvrstoću u uvjetima nehomogenog polja i ponekad se naziva nejednolika dielektrična čvrstoća polja.

## 2.2. KLASIFIKACIJA IZOLACIJSKIH MATERIJALA

Postoje gotovo stotine izolacijskih materijala koji se koriste u elektroprivredi. Svi takvi materijali mogu se općenito klasificirati u različite kategorije:

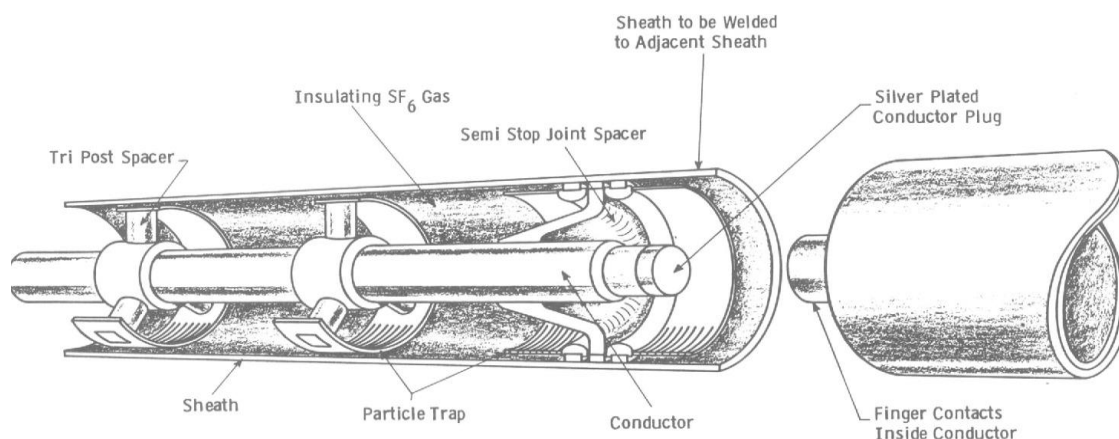
- Plinovi
- Vakuum
- Tekućine
- Krutine
- Kompoziti

Neki materijali koji se obično koriste i njihova svojstva sažeta su u nastavku.

### 2.2.1. Plinovi

U normalnom stanju većina plinova su dobri izolatori. Posljedično, nadzemni vodovi i otvoreni zračni prekidači koji koriste zračnu izolaciju u uporabi su od početka elektroprivrede. U novije vrijeme, razvodni uređaji u metalnom kućištu i plinom izolirani kabeli ispunjeni komprimiranim sumpornim heksafluoridnim plinom, SF<sub>6</sub>, ušli su u elektroenergetske sustave. U posebnim primjenama, kao na primjer u Van de Graaf akceleratorima ili u mjernim kondenzatorima, također se koriste drugi plinovi ili smjese SF<sub>6</sub> s plinovima kao što su N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, zrak i N<sub>2</sub>O.

Idealan plinoviti izolator trebao bi biti jeftin, kemijski i toplinski stabilan i ne smije stvarati otrovne, korozivne ili zapaljive proizvode prilikom primjene. Trebao bi imati dobar prijenos topline i svojstva gašenja električnog luka te pokazivati nisku temperaturu kondenzacije čak i kada je pod pritiskom. Što je najvažnije, trebao bi imati visoku vrijednost dielektrične čvrstoće za homogena i nehomogena polja pod istosmjernim, izmjeničnim i impulsnim naponima te ne bi trebao mijenjati svojstva prilikom dugotrajne uporabe.

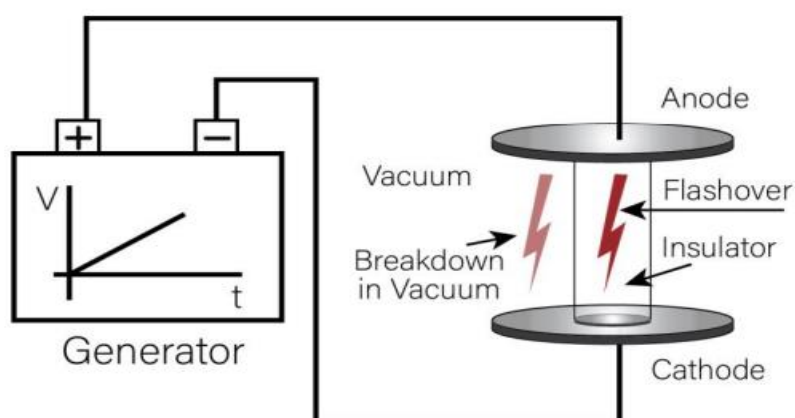


**Slika 2-Presjek kabela s komprimiranim plinom u svojstvu električne izolacije**

Izvor: <https://www.semanticscholar.org/paper/Gas-Insulated-Cables-Cookson/480a7ed9a086ca07b834fd8f19cb546cc211038e>

### 2.2.2. Vakuum

Odsutnošću ostalih plinova u među elektrodnom prostoru postiže se vakuumski medij koji ima izvrsna izolacijska svojstva i svojstva gašenja električnog luka. Pravi vakuum vrlo je teško postići stoga je dozvoljeno da zaostali tlak drugih plinova reda veličine  $10^{-9}$  do  $10^{-12}$  bara može postojati u vakuumski izoliranoj opremi. U takvoj opremi, materijal, oblik i površinska obrada elektroda, ostatak tlak plina i kontaminirajuće čestice važni su čimbenici. Vakuum se koristi za izoliranje srednje naponskih sklopki i prekidača.



**Slika 3-Primjer vakuuma kao električne izolacije**

Izvor: <https://isdeiv.events/files/DEIV.pdf>

### 2.2.3. Tekućine

Idealan tekući izolator trebao bi imati visoke vrijednosti dielektrične čvrstoće, volumnog otpora, specifične topline, visoku toplinsku vodljivost i temperaturu vrelišta, također bi trebao imati niske vrijednosti faktora gubitka, viskoznosti, temperaturu ledišta i gustoću. Nadalje, tekućina mora biti nekoroziivna, nezapaljiva, netoksična i kemijski stabilna s dobrim svojstvima gašenja električnog luka kao i svojstvima apsorpcije plina. Ne postoji niti jedna tekućina koja posjeduje sva ova svojstva i obično se moraju raditi kompromisi. Mineralno ulje koje ima alkane, ciklo alkane i arome kao glavne sastojke koristi se od prošlog stoljeća. Druga klasa tekućina koje su se koristile za transformatore i kondenzatore su klorirani aromati ili askrali, također zvani PCB. Oni pokazuju izvrsnu otpornost na plamen i vrlo dobra električna svojstva i izvedeni su iz benzena ili iz bifenila. Sedamdesetih godina prošlog stoljeća utvrđeno je da ovi spojevi predstavljaju znatnu opasnost po zdravlje i u većini zemalja sada su zakonski zabranili proizvodnju i korištenje ovih tekućina. Od tada je razvijeno mnogo drugih tekućina koje su bez štetnih ekoloških učinaka i također posjeduju svojstva koja su usporediva s onima PCB-a. To uključuje silikonsko ulje, sintetičke ugljikovodike i fluorirane ugljikovodike.

**Tablica 1 Svojstva različitih vrsta ulja koja se koriste kao sredstva električne izolacije**

Properties	Mineral oils	Silicone oils	Synthetic esters	Vegetable oils	Test method
Dielectric breakdown, kV	30–85	35–60	45–70	82–97	IEC60156
Relative permittivity at 25°C	2.1–2.5	2.6–2.9	3.0–3.5	3.1–3.3	IEC60247
Viscosity at 0°C, mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	<76	81–92	26–50	143–77	ISO3104
Viscosity at 40°C, mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	3–16	35–40	14–29	16–37	ISO3104
Viscosity at 100°C, mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	2–2.5	15–17	4–6	4–8	ISO3104
Pour point, 0°C	–30 to –60	–50 to –60	–40 to –50	–19 to –33	ISO3016
Flash point, 0°C	100–170	300–310	250–270	315–328	ISO2592(1)
Fire point, 0°C	180–185	340–350	300–310	350–360	ISO2592(1)
Density at 20°C, kg dm <sup>3</sup>	0.83–0.89	0.96–1.10	0.90–1.00	0.87–0.92	ISO3675
Specific heat, J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	1.6–2.0	1.5	1.8–2.3	1.5–2.1	ASTME1269
Thermal conductivity, Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.11–0.16	0.15	0.15	0.16–0.17	(DCS)

Izvor: [https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-electrical-insulating-liquids-typical-values-28\\_tbl4\\_318345116](https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-electrical-insulating-liquids-typical-values-28_tbl4_318345116)

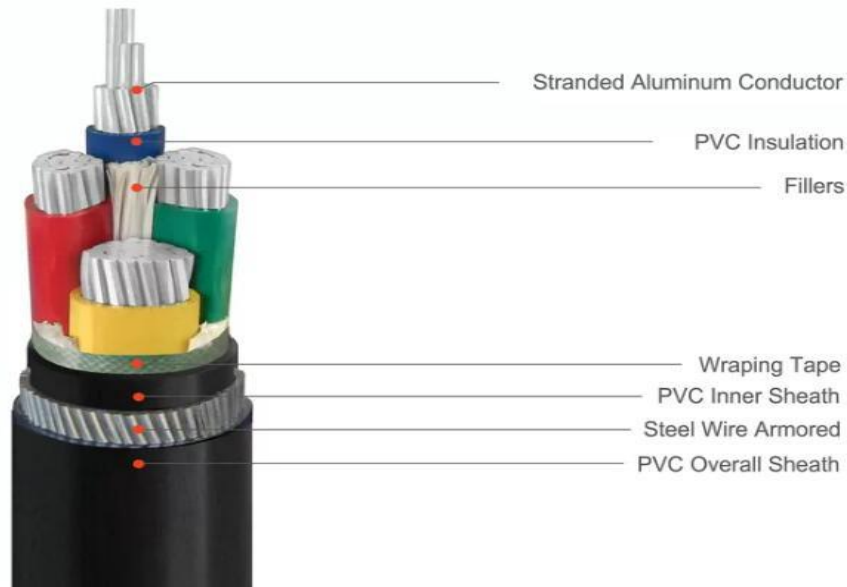
#### 2.2.4. Krutine

Idealan čvrsti dielektrik mora imati neka od ranije spomenutih svojstava za plinove ili tekućine. Osim toga, treba imati dobra mehanička svojstva i svojstva vezivanja. Anorganski kao i organski čvrsti izolacijski materijali imaju široku primjenu u elektroničkim komponentama. Najvažniji anorganski materijali su keramika i staklo koji se koriste za izradu izolatora, čahure i druge visokonaponske komponente. Najistaknutiji organski materijali su termoreaktivne epoksidne smole ili termoplastični materijali kao što su polivinilklorid (PVC), polietilen (PE) ili umreženi polietilen (XLPE). Termoplastični materijali uglavnom se koriste za izradu ekstrudiranih dielektričnih energetskih kabela. Kraft papir, prirodna guma, etilen polipropilen guma (EPR), silikonska guma i polipropilen još su neki od čvrstih dielektričnih materijala koji se široko koriste.



**Slika 4-Primjer čahure izradene od keramike**

Izvor: [https://en.wikipedia.org/wiki/Insulator\\_%28electricity%29#/media/File:Insulator\\_railways.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Insulator_%28electricity%29#/media/File:Insulator_railways.jpg)



**Slika 5-Primjer korištenja krutina kao izolacijskog materijala za električne kabele**

Izvor: <http://www.tddlcable.com/products/medium-low-voltage-cables/low-voltage-power-cable/41.html>

### **2.2.5. Kompoziti**

U mnogim inženjerskim primjenama koristi se više vrsta izolacijskih materijala. Oni se kombiniraju zajedno što dovodi do kompozitnog ili hibridnog tipa izolacijskog sustava. Primjeri takvih sustava koji koriste čvrstu/plinsku izolaciju su izolatori dalekovoda i čvrsti materijali koji se koriste u plinski izoliranoj rasklopnoj opremi. U kompozitima čvrsto/plin, obično sučelje čvrsto/plin predstavlja najslabiju kariku i mora biti pažljivo osmišljen. Slično tome, u sustavima s vakumskom izolacijom, sučelje čvrstog izolacijskog materijala i vakuuma pokazala se kao slaba karika. Primjeri čvrstih/tekućih kompozitnih izolacija su papirnate trake impregnirane uljem koje se koriste u visokonaponskim kabelima, transformatorima, kondenzatorima i izolacijskim čahurama. Slično tome, kombinacija uljne impregnacije i metalizirane plastične folije koje se koriste u energetskim kondenzatorima također pripadaju ovoj kategoriji izolacije. U primjenama kompozita važno je osigurati da su obje komponente kompozita kemijski stabilne i ne smiju reagirati jedni s drugima pod kombiniranim toplinskim, mehaničkim i električnim naprezanjima tijekom očekivanog vijeka trajanja opreme i trebaju imati gotovo jednake dielektrične konstante. Nadalje, tekući izolator ne smije upiti ništa nečistoće iz krutine koje mogu negativno utjecati na njegovu otpornost, dielektričnu čvrstoću, faktor gubitka i druga svojstva.

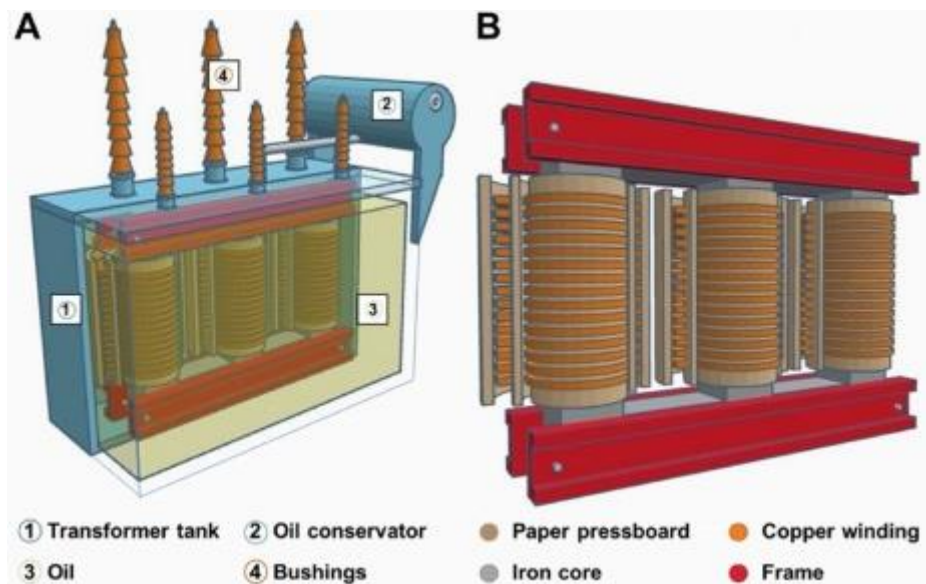
## **2.3 PRIMJENA IZOLACIJSKIH MATERIJALA**

Elektroenergetski sustav ima mnogo visokonaponskih komponenti kao što su generatori, transformatori, prekidači, kabeli, čahure, nadzemni vodovi, odvodnici prenapona, plinom izolirani sklopni uređaji, kondenzatori, rotirajući strojevi. Sve takve komponente trebaju odgovarajuću izolaciju. Četiri su glavna područja gdje se mora primijeniti izolacija [1]:

- između zavojnica i zemlje (izolacija faza prema zemlji)
- između svitaka različitih faza (faza do faza izolacija)
- između zavoja u zavojnici (izolacija između zavoja)
- između zavojnica iste faze (izolacija između zavojnica).

### 2.3.1. Transformatori

Sadašnji visokonaponski energetska transformatori koriste emajlirane vodiče, papir, staklenu ili termoplastičnu izolacijsku traku, prešane ploče, staklenu tkaninu, porculan i mineralno ili silikonsko ulje. Namotaji su izolirani trakom pričvršćenom preko željezne jezgre sa komadima prešane ploče, staklene tkanine ili porculana te impregnirani izolacijskom tekućinom koja također djeluje kao rashladni medij. Koriste se različite izvedbe namota i medija za hlađenje ulja.



**Slika 6-Primjer izolacije transformatora**

Izvor: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861720313692>

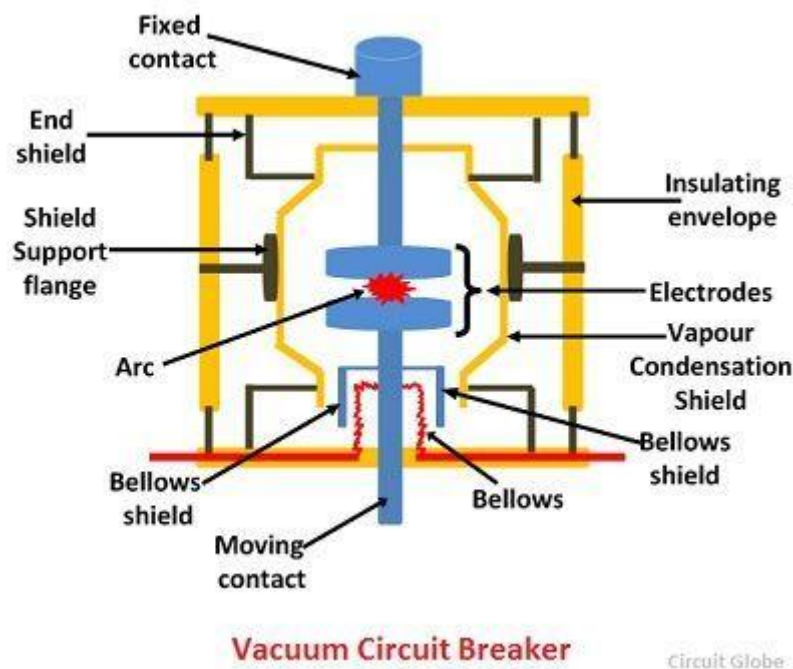
U transformatorima male snage kao i u strujnom i naponskom mjernih transformatora, korišteni izolacijski materijali su termoreaktivne smole, izolacijske trake, SF<sub>6</sub> plin, i slično. U takvim slučajevima, stlačeni SF<sub>6</sub> plin pruža izolacijsku i rashladnu funkciju. Transformatori



otporni na vatru koriste izolacijske tekućine kao što su mineralno ulje s visokom točkom paljenja, klorofluorouglikovodici ili perkloretilen.

### 2.3.2 Prekidači

Visokonaponski prekidači koriste keramiku, epoksidne smole, epoksidnu smolu vezanu staklenim vlaknima, poliesterske smole, vulkanizirana vlakna, sintetičke smole vezani papir, SF<sub>6</sub> plin, zrak, vakuum i mineralno ulje. Zrak, ulje, SF<sub>6</sub> plin ili vakuum služi kao glavna izolacija i medij za gašenje luka dok se dijelovi od keramike ili epoksidne smole koriste za mehaničku potporu, izolaciju sabirnica i segmente lučne komore, itd. U niskonaponskim prekidačima, letvice od sintetičke smole koriste se za nošenje metalnih dijelova.



Slika 7-Vakumski prekidač

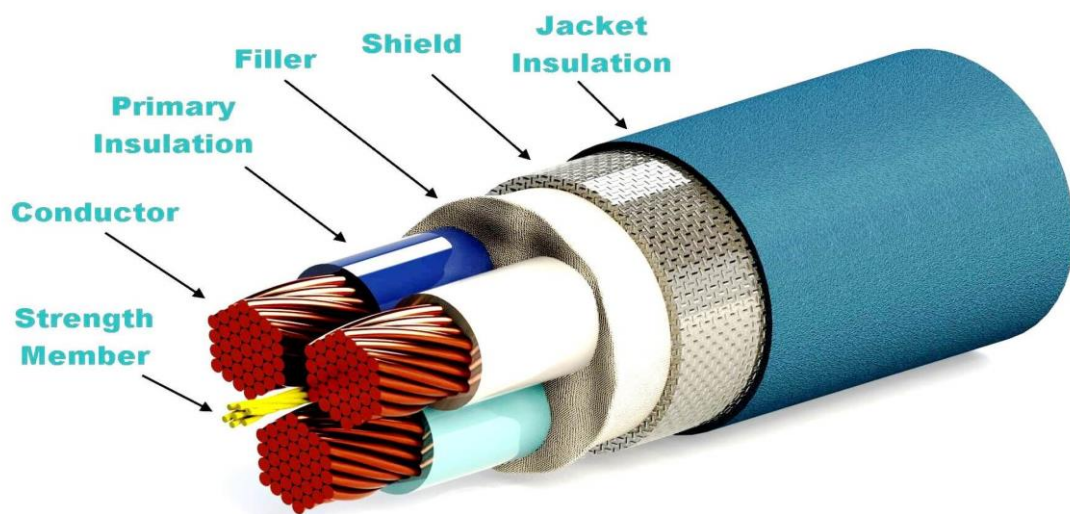
Izvor: <https://circuitglobe.com/vacuum-circuit-breaker.html>

### 2.3.3 Kabeli za napajanje

Izolacijski materijali koji se koriste u energetskim kabelima su papirnata ili plastična traka, termoplastični materijali (kao što su PE, XLPE ili PVC), silikonska guma, EPR, termoreaktivne smole, SF<sub>6</sub> plin i mineralna ulja. U kabelima punjenim uljem, unutarnji vodič



je izoliran preklapljenom papirnatom trakom i impregniran mineralnim ulje. U kabelima s polimernom izolacijom, vodič i izolacijski materijali se zajedno ekstrudiraju, a zatim se izolacija stvrdnjava i umrežava. U plinski izoliranim kabelima, unutarnji vodič se drži koncentrično u metalnoj cijevi izolacijskim odstojećima od termoreaktivnih smola i cijev je ispunjen stlačenim SF<sub>6</sub> plinom. Niskonaponski kabeli od PVC-a, PE-a ili XLPE izolacija obično su bez drugog izolatorskog materijala.

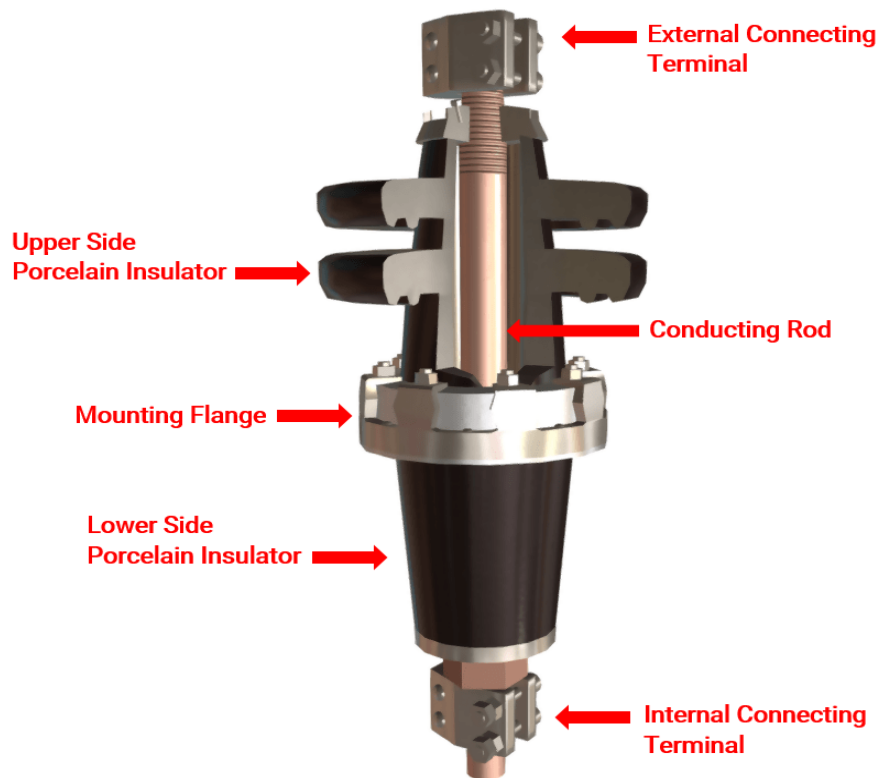


**Slika 8-Električna izolacija kabela za napajanje**

Izvor: <https://instrumentationtools.com/insulating-material-cable-requirements/>

#### 2.3.4 Čahure

Čahure su izrađene od porculana, stakla, termo reaktivne lijevane smole, zraka, SF<sub>6</sub> plin, papirnatih traka i ulja itd., a konstruirani su tako da je prolaz kroz vodič izoliran papirnatom trakom i uljem i smješten je u porculansku cijev koja ulazi u kućište visokonaponske opreme. Obično se koriste dvije vrste konstrukcije što rezultira ne kondenzatorom i kondenzatorom stupnjevane čahure. Za nazivne napone koriste se čahure kondenzatora preko 50 kV, dok su nekondenzatorske izolacije poželjne za niže naponske primjene. Papirnata traka koja se koristi u čahurama obično je smola vezana uz papir, papir impregniran uljem ili papir impregniran smolom.

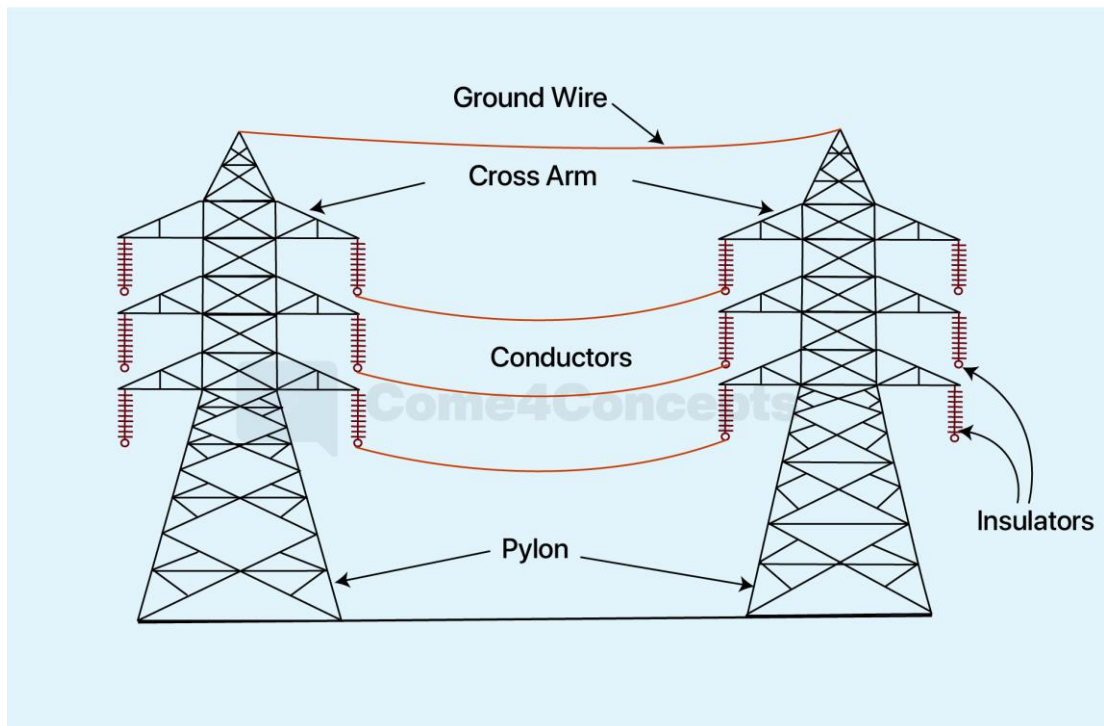


**Slika 9-Presjek čahure**

Izvor: <https://www.savree.com/en/encyclopedia/electrical-bushings>

### 2.3.5 Nadzemni vodovi

Nadzemni električni vodovi koriste porculan, staklo, termoreaktivnu smolu i zrak kao glavna izolacija gdje su vodiči spojeni preko izolatorskih lanaca s tornjevima. Izolatori se izrađuju od porculana ili tvrdog stakla. Također se koriste plastični izolatorski lanci koji koriste staklena vlakna i lijevane smole. Premaz od vulkanizirane gume na sobnoj temperaturi (RTV) se također koristi za poboljšanje učinka keramičkih izolatora u zagađenim okruženjima.



**Slika 10-Nadzemni vodovi**

Izvor: <https://come4concepts.com/components-of-overhead-transmission-lines/>

### 2.3.6 Plinom izolirani sklopni uređaji

Plinom izolirani sklopni uređaji (ili GIS) koriste SF<sub>6</sub> plin, termo reaktivne smole i porculan kao glavni izolacijski materijal. U konstrukciji GIS-a nalaze se različite komponente kao što su sabirnice, prekidači i uzemljivači u susjednim cilindričnim odjeljcima koji su hermetički zatvoreni, zapečaćeni i sadrže komprimirani SF<sub>6</sub> plin kao izolacijski medij. Unutarnji vodiči pod naponom odvojeni su, u pravilnim razmacima, od uzemljenog kućišta izolacijskim odstojećima od epoksidnih smola.

### 2.3.7. Odvodnik prenapona i zaštitni otvori

Odvodnici munje ili prenapona i zaštitni otvori koji se sastoje uglavnom od zraka, SF<sub>6</sub> plina, porculanski i otpornici od metalnih oksida koriste se za ograničavanje prijelaza prenapona uzrokovanog munjama ili radnjama sklopki u visokonaponskim sustavima. U najjednostavnijem obliku koriste se zračno izolirani razmaci preko čahura, izolatorskih lanaca, završetaka kabela ili vodiča pod naponom, itd. Alternativno koriste se, nelinearni otpornici izrađeni od metalnog oksida (kao što je cink oksid) sa ili bez serijskih iskrišta. U najnovijim

dizajnima, metal-oksidni odvodnici prenapona (MOA) koriste se bez serijskog iskrišta. Kućište od keramike ili porculana služi za mehaničku potporu i zaštitu od izloženosti okolini.

### **2.3.8 Energetski kondenzatori**

Moderni energetski kondenzatori sastoje se od metaliziranog polipropilenskog filma, aluminijske folije i polipropilenskog filma ili elektroda od metaliziranog papira i polipropilenski ili drugi film i tekućina za impregnaciju. Metalizirane folije predstavljaju kapacitivnost, tekućina smanjuje šupljine, povećava dielektričnu čvrstoću, a ponekad i kapacitivnost putem svoje dielektrične konstante. Tekućine koje se koriste posljednjih godina su izopropilbifenil, fenilksililetan i silikonski tekući impregnant. Cijeli sklop je smješten unutar sklopa, a spremnik s odgovarajućim terminalima ili čahurama vani.

### **2.3.9. Rotirajući strojevi**

Generatori koriste sustav trake od tinjca na vodičima impregniranim bilo kojim epoksidnim ili poliesterskim smolama. Drugi izolacijski materijali koji se obično koriste u rotirajućim strojevima su polivinil acetal, poliester emajl ili vezana vlakna staklo za izolaciju između zavoja; bakelizirana tkanina, staklo od epoksidnih vlakana, liskun staklena ploča, tinjac impregnirani epoksidom i lakirano staklo za izolaciju među zavojnicama ili faza-zemlja; i bakelizirana tkanina ili staklo od epoksidnih vlakana za zatvaranje proreza. Tretman impregnacije obično se sastoji od alkidni fenol estermid ili lakovi na bazi epoksida.

### **3. ISPITIVANJE IZOLACIJE**

Ispitivanje izolacije vrši se na električnoj opremi prije nego ista izađe iz tvornice, tako zvani tvornički testovi. Zatim neposredno nakon same ugradnje električne opreme provodi se ispitivanje električne izolacije da se vidi je li došlo do oštećenje prilikom transporta ili ugradnje. Nadalje izolacija na električkoj opremi i uređajima ispituje se preventivno kako bi se utvrdilo njeno stanje ili nakon kvara sustava kako bi se ustvrdila razina oštećenja. U nastavku rada opisati će se ispitivanja električne izolacije na pojedinim dijelovima elektroenergetskog sustava.

#### **3.1. ISPITIVANJE IZLOACIJE ROTIRAJUĆIH STROJEVA**

Ispitivanje dielektrika dio je ispitivanja kvalitete i program preventivnog održavanja izolacije. Pomaže u određivanju stvarnog stanje izolacije rotirajućeg stroja i njegove komponente. Testiranje omogućuje korisnicima način da spriječe gubitke zbog nepredviđene ili neotkrivene greške. Dielektrični testovi mogu provjeriti učinkovitost korektivnih mjera kao što su postupci čišćenja i sušenja kao i mjere popravka. Dielektrično ispitivanje uključuje analizu dielektričnog odziva, faktor gubitka i mjerenje kapaciteta, analiza količine harmoničkih gubitaka i snimanje uzorka djelomičnog pražnjenja.

Izolacija rotirajućih strojeva izložena je raznim naprezanjima, toplinska naprezanja, električna naprezanja i mehanička naprezanja što za posljedicu ima lokalnu i globalnu promjenu dielektrika ili izolacijskih svojstava što općenito možemo nazvati staranjem.

Složena priroda izolacijskog sustava rotirajućih strojeva kao što su:

- kompozitni materijali, organske smole, polimeri itd.
- mnoštvo konstrukcija, mehanička fiksacija, klin

zahtijevaju niz (dielektričnih) ispitnih metoda. Dielektrične ispitne metode su neinvazivne i konstruktivne. One su dio alata za inspekciju koji sadrži on-line i off-line nadzor uređaja:

- Vibracijsku analizu
- Nadziranje laminacije i pregrijavanje jezgre
- Ultraljubičasta zračenja i ultrazvučna pražnjenja
- Vizualne i mehaničke inspekcije
- Praćenje ozona i dušikovih oksida, koji utječu na električna pražnjenja, rotor i problem s proklizavanjem prstena

Često su problemi s kvarom izolacije i vidljivim starenjem uzrokovani neelektrični procesima, kao što su pregrijane magnetske jezgre ili nedostaci u mehaničkoj potpornoj konstrukciji. Izolacijski problemi najčešće nisu uzrok nego rezultat istih problema. Stoga su dielektrične veličine općenito pokazatelji takvih procesa. [2]

### **3.1.1. Ispitivanje istosmjernom strujom**

Analiza odziva dielektrika je zapravo analiza polarizacije i depolarizacije istosmjerne struje. Karakteristike vremenske konstante, oblik krivulje parametara su uzrokovane kretanjem iona i dipola koje su usko povezane sa starenjem i trošenjem uslijed korištenja.

Stanje električne izolacije okarakterizirano je izolacijskim otporom nakon 1 minute ili nakon 10 minuta provođenja ispitivanja istosmjernog testa i polarizacijskog indeksa. Ovaj koncept međutim ne uzima u obzir fizičko stanje ispitanog sustava. Ovaj model u obzir uzima [2]:

- Struju koja teče krajnjim namotajem izoliranog rotirajućeg stroja (površinska disperzija struje)
- Struju koja teče kroz ravne dijelove primarne izolacije

### **3.1.2 Ispitivanje izmjeničnim naponom**

Faktor gubitaka, kapacitivnost, analiza uzroka djelomičnog pražnjenja i harmonički gubici uzimaju se u obzir i izračunavaju prilikom testa izmjeničnom strujom pri visokom naponu. Harmonički gubici usko su povezani s starenjem izolacijskog materijala. Analiza uzorka djelomičnog pražnjenja koristi se za određivanje tipa i stanje kvara te se može primijeniti prilikom on-line ili off-line testa.

Za ove testove koriste se visokonaponski izvori energetske frekvencije. Klasični paralelni rezonantni strujni krugovi omogućuju dovoljno reaktivnu snagu. Djelomično pražnjenje postiže se spajanjem kondenzatora i obrađuje se digitalnim sustavima snimanja koji nam omogućuju statistički prikaz frekvencije pulsa djelomičnog pražnjenja u odnosu na fazu ispitnog napona i njihove amplitude. Faktor gubitaka, kapacitivnost i harmonička analiza struje punjenja izvode se izravno preko digitaliziranog sistema što omogućuje rad bez mosta odnosno bez kontakta.

## **3.2. ISPITIVANJE IZOLACIJE KABELA**

Jedan od parametara koji ima velik utjecaj na radne karakteristike kabela, je kvaliteta izolacije (kontinuitet, vanjska i unutarnja geometrija, kemijski spojevi). Tijekom proizvodnje kabelskih proizvoda potrebno je osigurati kontinuiranu kontrolu ovog parametra radi pravovremene korekcije tehnološkog režima i smanjenja masovnog kvarenja proizvoda. Danas se uglavnom koriste dvije metode kontrole tijekom proizvodnje kabela [3]:

- Elektro-kapacitivna metoda kontrole
- Impulsna metoda

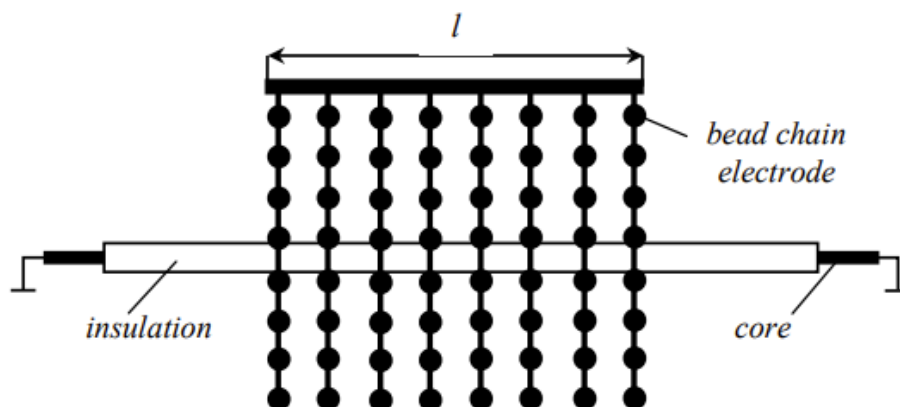
Prilikom ispitivanja kapaciteta kabela, kabel prolazi kroz cilindričnu elektrodu te se kroz njega propušta niski napon kako bi se izvršilo mjerenje. Kako bi se omogućio električni kontakt između površine izolacije kabela i elektrode kabel uranjamo u hladnu vodenu kupku. Vrijednost linearnog kapaciteta se mijenja ukoliko se na ispitanom dijelu nalazi oštećenje izolacije.

Impulsna metoda izvodi se elektrodom kroz koju je se dovodi impuls visokog napon na površinu izolacije. Ukoliko imamo oštećenje na ispitanom dijelu kabela dolazi do električnog sloma koji automatika prepoznaje. Ova metoda ne prepoznaje sve vrste kvarova stoga možemo reći da nije baš pouzdana. Kako bi se povećala pouzdanost kontrole izolacije kabela ove dvije metode mogu se iskombinirati u jednu složenu metodu.

### **3.2.1. Složena metoda ispitivanja izolacije kabela**

Složena metoda ispitivanje kvalitete izolacije kabela sastoji se od mjerenja električnog kapaciteta po metru tijekom impulsne metode ispitivanja.

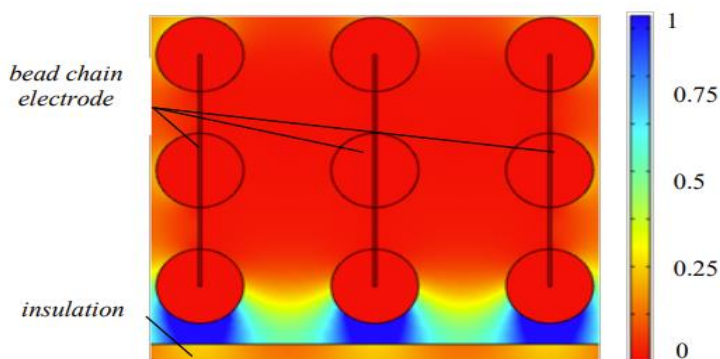
Kako bi se omogućilo pouzdano mjerenje električnog kapaciteta potrebno je primijeniti ispitni napon na cijelu površinu kontroliranog područja, a ne samo do točke kontakta elektrode i izolacije. Takav postupak je složen jer se provodi koristeći visoki napon. Elektroda je predstavljena kao skup lanaca (Slika 3.1.) stoga je električno polje u kontroliranom području nejednolično.



**Slika 11-Teorijski model složene metode upravljanja**

Izvor: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/671/1/012056/pdf>

Na slici 3.2. prikazan je dijagram distribucije električnog polja u kontroliranoj zoni na početku primjene ispitnog napona prije pojave ionizacije. Iz slike možemo zaključiti da komponenta normale električnog polja dominira nad tangencijalnom komponentom električnog polja. Prevladavanje komponente normalne dovodi do toplinske ionizacije što olakšava proces električnog pražnjenja.



**Slika 12-Distribucija električnog polja između lančane elektrode i izolacijske površine kabela**

Izvor: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/671/1/012056/pdf>

U prisutnosti električnog polja javlja se klizno pražnjenje na koje utječe više čimbenika kao što su materijali izolacije kabela, stanje površine izolacije, vrsta i vrijednost ispitnog napona.



Duljina kliznog pražnjenja može se izračunati empirijski Teplerovom formulom:

$$l_{sd} = k \cdot C^2 \cdot U^5 \cdot \frac{dU^{1/4}}{dt} \quad (3.1)$$

Gdje je:

k - empirijski koeficijent,

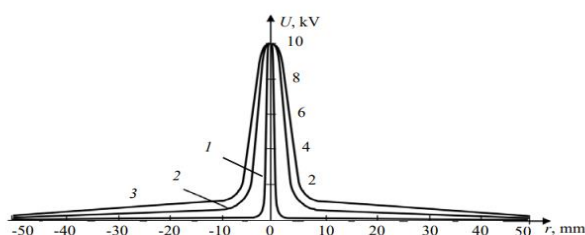
C - specifični površinski kapacitet,

U - napon.

Pritom prema Teplerovoj formuli, vrijednost napona i specifični površinski kapacitet imaju značajan utjecaj na duljinu širenja kliznog pražnjenja.

U nastavku je prikazan test kojeg je proveo „Fond za potporu malim inovativnim poduzećima u znanosti i tehnologiji“ (engl. Fund for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology) kako bi se bolje istražila distribucija ispitnog napona duž izolacijske površine kabela.

Potrebe testa iziskuju uređaj za primjenu i mjerenje signala stoga se oprema za primjenu signala sastoji od generatora signala, pojačivača snage i visokonaponskog transformatora, dok se oprema za mjerenje signala sastoji od osciloskopskog djelitelja i digitalnog osciloskopa. Za primjenu i mjerenje korištene su prstenaste elektrode. U testu primijenjen je ispitni napon do nulte koordinatne točke i definirana je raspodjela potencijala po površini kablenskog proizvoda s mjernim uređajem. Nakon testa dobivene su ovisnosti raspodjele ispitnog napona duž izolacijske površine iz parametara ispitnog napona dobiven je i grafički prikaz.



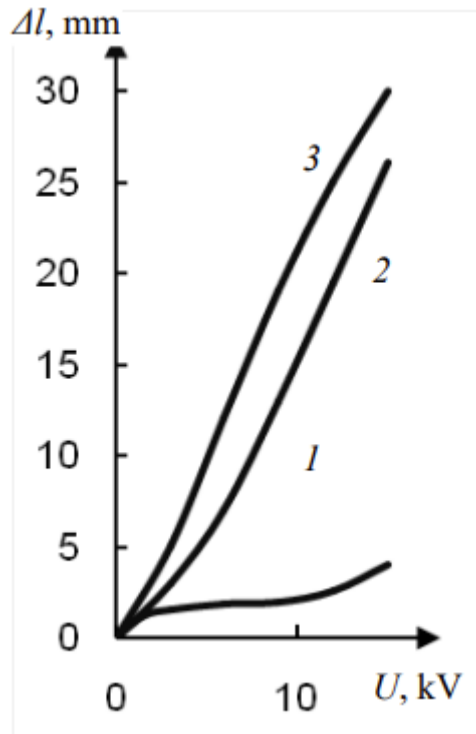
**Slika 13-Raspodjela ispitnog napona duž površine izolacije**

Izvor: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/671/1/012056/pdf>

Ovisnosti prikazane na slici 3.3. dobivene su s vrijednošću ispitnog napona od 10 kV. Analizirane su dobivene ovisnosti za ispitne napone s vrijednostima 3, 10 i 15 kV. Kao rezultat moguće je zaključiti da zamjetnu raspodjelu potencijala predstavlja samo alternativni napon.

Pojavljuje se zbog specifičnog površinskog kapaciteta izolacijskog materijala, što potvrđuju Teplerovu formula. U slučaju istosmjernog napona, specifični površinski kapacitet ne utječe na širenje pražnjenja. Pražnjenje je slično pražnjenju u zračnom rasporu za ovaj slučaj.

Na temelju dobivenih ovisnosti raspodjele napona, ovisnost izduženja elektrode iz vrste i vrijednosti napona je teoretski pronađen (slika 3.4.). [3]



**Slika 14-Ovisnost elektrode istežanje**

Izvor: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/671/1/012056/pdf>

#### **4. KONTROLA I NADZOR IZOLACIJA**

Kako smo već spomenuli, starenjem se kvaliteta izolacije smanjuje se i rizik od kvara zbog izolacije raste. Za održavanje sigurnog, pouzdanog sustava opskrbe električnom energijom, uz postizanje maksimalnog životnog vijeka postrojenja, znanje o stanju izolacije je

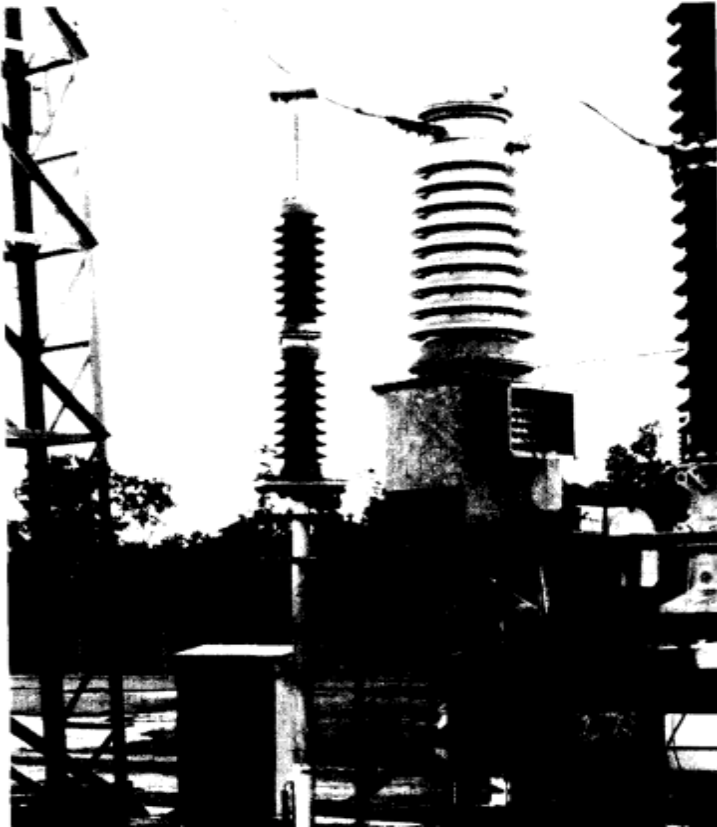
bitno. Za maksimiziranje radnog vijeka bez ugrožavanja osoblja ili ugrožavanja sigurnosti sustava, potrebno je pažljivo praćenje stare izolacije. Konvencionalni testovi često su nepraktični i zahtijevaju isključivanje postrojenja. Na ovoj premisi, razvijene su tehnike on-line praćenja za korištenje na VN sustavima.

#### **4.1. ON-LINE MJERENJE DJELOMIČNOG PRAŽNENJA**

Izvorni sustav za izvođenje on-line mjerenja djelomičnog pražnjenja, sada se intenzivno koristi unutar prijenosnog sustava za provjeru djelomičnog pražnjenja unutar mjernih transformatora u uporabi. Uglavnom se koristi kao alat za provjeru i otkrivanje, no postoje i složenije i skuplje izvedbe koje mogu provoditi analizu plina u nafti. Tri glavna elementa sustava su visokonaponska kapacitivna sonda, par usklađenih pretvarača, od kojih je jedan uređaj za spajanje i elektronička detekcijska jedinica.

##### **4.1.1. Visokonaponska sonda**

Visokonaponska sonda, koja se sastoji od laganog sloja kondenzatora film/SF<sub>6</sub> i serijskog otpornika, podiže se pneumatskim dizalicom da dođe u kontakt s vodičem pod naponom ili sabirnicom, kao što je prikazano na slici 4.1. Sklop je montiran na kolica koja se relativno lako mogu premještati po skretnici. Otpornik je dizajniran za ograničavanje struje tijekom operacija. Infracrveni prekidač za daljinsko upravljanje unutar glave sonde omogućuje kratko spajanje otpornika nakon što je sonda u kontaktu s visokonaponskim vodičem.



**Slika 15-Visokonaponska sonda u uporabi na trafostanici 110kV**

Izvor: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=142722>

#### **4.1.2. Pretvarači**

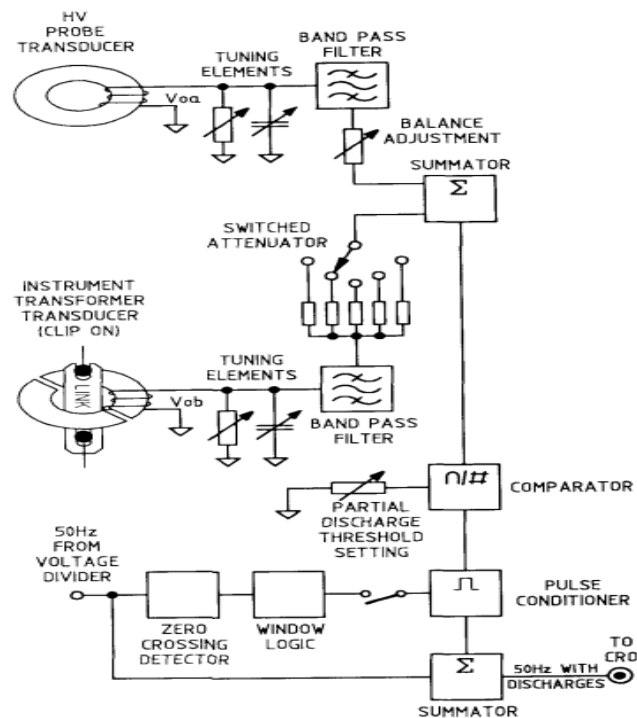
Par usklađenih pretvarača, dizajnirani su za proizvodnju rezonantnog signala proporcionalnog magnitudi djelomičnog pražnjenja na frekvenciji od 300 kHz. Jedan pretvarač, dizajniran je kao uređaj koji se pričvršćuje, nalazi se kraj uređaja za mjerenje kuta dielektričnih gubitaka ili uzemljenje transformatora koji se ispituje, dok je drugi montiran oko uzemljenja visokonaponske sonde.

#### **4.1.3. Elektronička detekcijska jedinica**

Jedinica za otkrivanje sastoji se od prilagođenog skupa krugova koji uključuju napajanje, pojasne filtre, komparator, digitalnu obradu i sklopove za odabir zaslona. Također se koristi zajedno s digitalnim osciloskopom za prikaz djelomičnog pražnjenja uzorka superponiranog na 50 Hz signal.

#### 4.1.4. Princip rada

Kao što je prikazano na slici 4.2., izlazi sa pretvarača se prosljeđuju kroz usklađene pojasne filtre. U ovoj konfiguraciji, struje će teći kroz oba pretvarača. Visokofrekventne struje izvan ispitnog kruga se odbijaju dok se unutarnje struje djelomičnog pražnjenja detektiraju. Kao većina vanjske razine buke u visokonaponskim trafostanicama (od nosača dalekovoda i radiostanice) su redovi veličina veći nego razine djelomičnog propadanja koje se mjere, sofisticirani sustav filtara, diferencijalnih pojačala i logičkih sklopova je uključen.



**Slika 16-Blok dijagram strujnog kruga za obradu signala za mjerenje djelomičnog pražnjenja**

Izvor: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=142722>

Strujni krug koji se koristi za otkrivanje poništava većinu buke trafostanice koju treba eliminirati i postiže osjetljivost razine laboratorijskim uvjetima koje treba postići. Oprema za detekciju ima niz značajki koje pomažu u prepoznavanju djelomičnog propadanja. Prvo, pojedinačni signali iz mjernog transformatora i sonda se može ispitati i superponirati. Drugo, mogu se kombinirati i prikazati magnituda i faza prema naponu sustava od 50 Hz. Treće, bilo koji neželjeni impulsi mogu biti isključeni. Konačno mjerenje veličine djelomičnog propadanja određuje se iz kalibrirane postavke brojčanika. [4

## **4.2 ON-LINE MJERENJE KUTA DILEKTRIČNIH GUBITAKA**

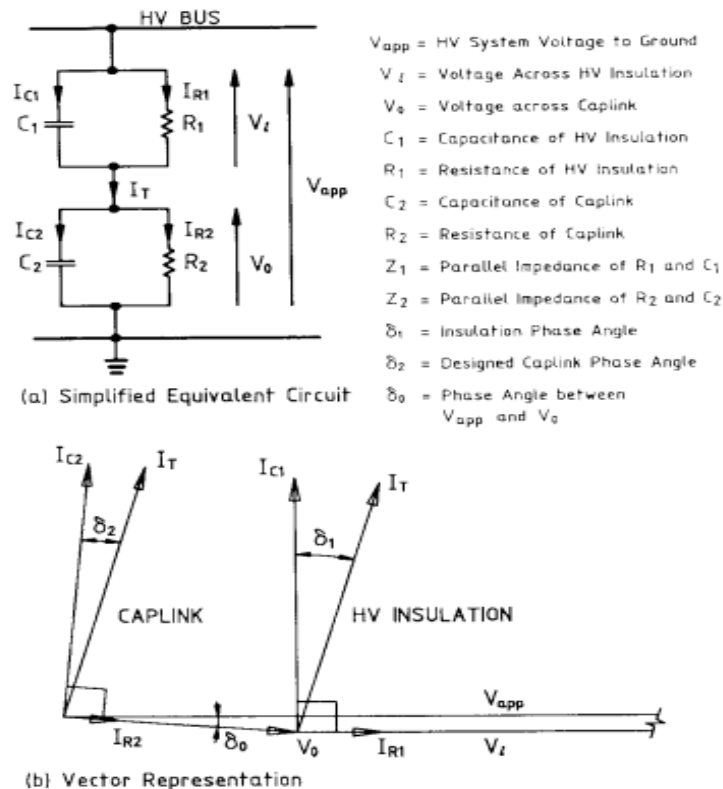
Kako bi se pružila sveobuhvatnija indikacija stanja izolacije, razvijen je sustav on-line mjerenja kuta dielektričnog gubitka. Ovaj sustav omogućuje on-line mjerenje razine djelomičnog propadanja i kuta dielektričnih gubitaka koji se provodi pri ispitivanju strujnih transformatora. Korištenjem visokonaponske sonde kao reference, relativna fazna razlika ili kut dielektričnog gubitka, uslijed slabljenja izolacije, između visokonaponske sonde i dijela postrojenja koje se testira može se odrediti on-line. Glavni dijelovi sustava su visokonaponska sonda, dva usklađena pretvarača, dva fazna enkodera i čitač signala.

### **4.2.1 Visokonaponska sonda**

Visokonaponska sonda se koristi za dobivanje referentne faze u odnosu na fazu izolacijske struje dijela sustava koji se testira. To se postiže konfiguriranom sondom na isti način kao i za testiranje djelomičnog propadanja. Sonda je kalibrirano u laboratorijskim uvjetima.

### **4.2.2. Pretvarači**

Uobičajena je praksa postaviti mjerni kondenzator na ispitnoj točki visokonaponskog izolatora ili strujnog transformatora za stvaranje razdjelnika napona za mjerenje napona sustava. Dva takva usklađena pretvarača, nazvana caplinks, pružiti informacije o fazi od sonde i od izolacija koja se ispituje. Caplink je u osnovi mjerni kondenzator kompaktnog dizajna koji se može ugraditi na ispitnoj točki mjernog transformatora ili izolatora transformatora. Kako bi se uklonio fazni pomak zbog svakog caplink-a, oni se usklađuju odabirom odgovarajućih vrijednosti kapacitivnosti i otpora. Fazna razlika izvedena iz izlaznih napona dvaju usklađenih caplinkova predstavlja razliku u kutu prividnog gubitka između visokonaponske izolacije dviju stavki postrojenja.



**Slika 17-Pojednostavljeni ekvivalentni krug i vektorski dijagram za izolaciju**

Izvor: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=142722>

Slika 4.3. prikazuje pojednostavljeni ekvivalentni krug i pridružene vektorske dijagrame za visokonaponsku izolaciju i caplink. Iz ovoga se može pokazati da se napon razvio preko spojnice postavljene na čahuru ili se može koristiti strujni transformator za određivanje kuta dielektričnih gubitaka visokonaponske izolacije u odnosu na poznatu referencu.

#### 4.2.3. Fazni enkoderi

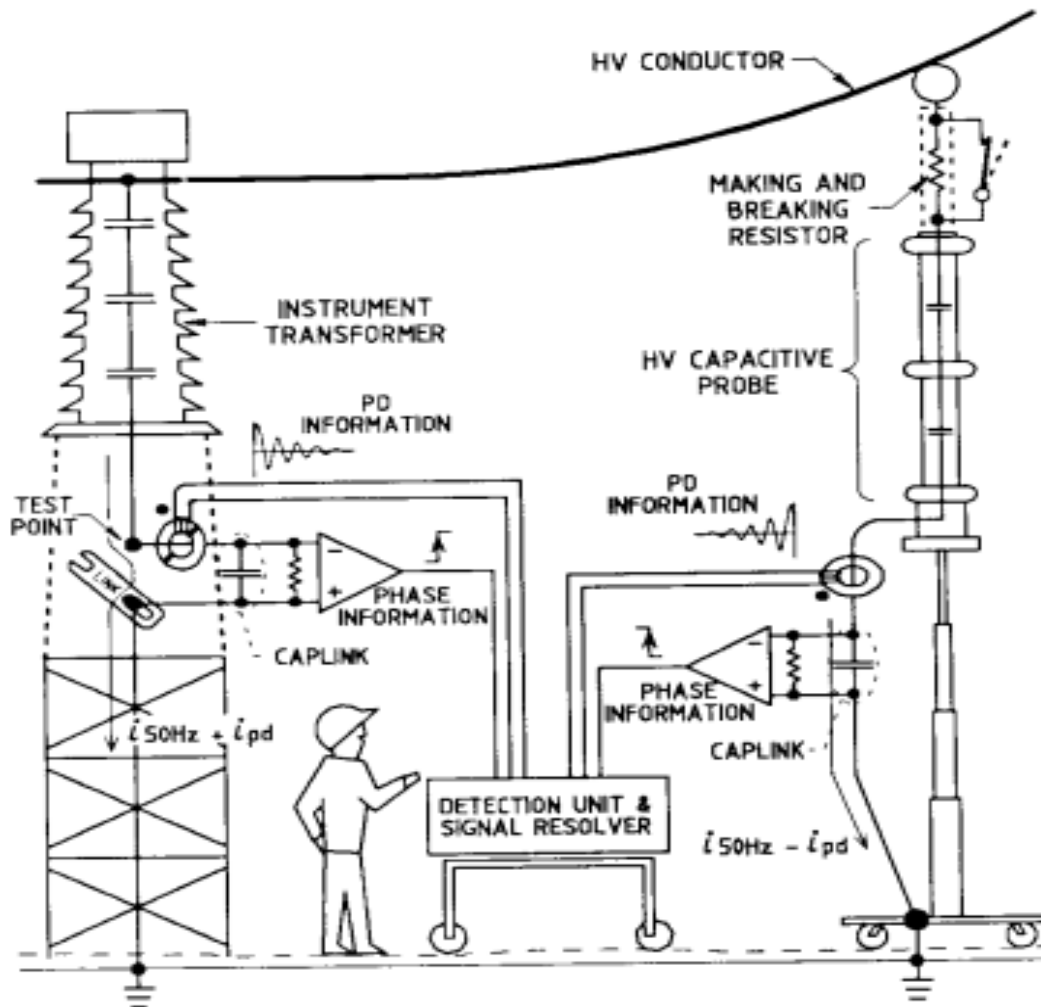
Izlaz svakog caplink-a prenosi se na fazu enkodera za pretvorbu iz sinusnog napona od 50 Hz u digitalni signal. Strujni krug je dizajniran da izvrši prijelaz stanja pri nultoj struji. Zapravo radi kao detektor prelaska nule.

#### 4.2.4. Čitač signalap

Čitač signala određuje kut dielektričnog gubitka korištenjem logičkih vrata i brojača velike brzine. Rezultat je prikazan digitalno u stvarnom vremenu s rezolucijom od 0,1 miliradian

#### 4.2.5. Princip rada

Za izvođenje on-line mjerenja kuta dielektričnog gubitka, oprema se postavlja u kontakt s visokonaponskim sustavom, sa strujnim transformatorom u radu, kao što je prikazano na slici 4.4. Jedan caplink je postavljen na donjem kraju visokonaponske kapacitivne sonde za osiguranje referentnog signala od 50 Hz.



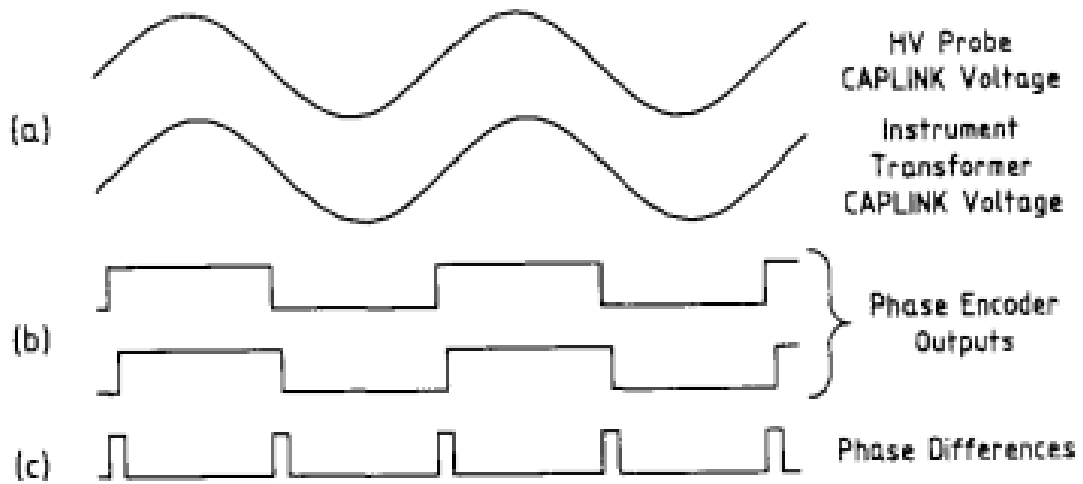
**Slika 18-Prikaz sustava za istovremeno mjerenje djelomičnog pražnjenja i kuta dielektričnih gubitaka**

Izvor: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=142722>

Suparenim caplinkom postavljenom na ispitnu točku strujnog transformatora ili čahura koja se ispituje, dobivaju se izlazi, kao što je prikazano na slici 4.5(a). Signal iz svakog caplinka se pretvara u digitalni oblik s prijelazima koji se događaju na trenutnoj nuli, Slika 4.5(b). Čitač



signala određuje vremensku razliku između nultih prijelaza dvaju signala korištenjem brojač velike brzine. Izlaz je prikazan na slici 4.5(c). Ovo se pretvara i prikazuje kao ekvivalentna vrijednost u miliradijanimi na digitalnom zaslonu. Tijekom testiranja operater promatra pozitivne i negativne prijelaze na osciloskopu kako bi potvrdio očitavanje. [4]



**Slika 19-Funkcionalni valni oblici sustava mjerenja kuta dielektričnog gubitka**

Izvor: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=142722>

## **5. ELEKTRIČNA IZOLACIJA U BRODSKIM SUSTAVIMA**

Kontinuiranim razvojem brodogradnje, inteligentnih brodova, inteligentnih strojarnica i drugih naprednih koncepata koji se stalno primjenjuju u području broda, zahtijevaju viši standard za moderni brodski elektroenergetski sustav. Kako brodovi rade u uvjetima visoke vlažnosti sa visokim sadržajem soli u zraku, stopa kvarova izolacije brodskog elektroenergetskog sustava je visoka. Brzo otkrivanje i lociranje kvara brodske električne izolacije povezana je sa sigurnošću rada broda.

Brodski elektroenergetski sustav je složen i energetska opterećenje često se sastoji od raznih vrsta opreme. Slučajni nestanak struje često uzrokuje teške incidente, značajne žrtve, oštećenja uređaja i gubitak novca. Postoje neki problemi s tradicionalnim metodama mjerenja i nadzora kao što je slaba pouzdanost zbog slabljenja kapaciteta, mali raspon mjerenja i niska točnost mjerenja.

Kako bi brod mogao zaploviti potrebno je odobrenje od odgovarajućeg klasifikacijskog društva. Klasifikacijsko društvo provjerava sve brodske sustave pa tako i električnu izolaciju. Ukoliko električna izolacija ne zadovoljava uvjete klasifikacijskog društva brod ne može dobiti plovidbenu dozvolu. U nastavku ćete vidjeti koje uvjete i inspekcije mora proći električna izolacija na brodu kako bi brod bio ispravan za eksploataciju.

### **5.1. STANDARDI I PRAVILA KLASIFIKACIJSKOG DRUŠTVA ZA ELEKTRIČNU IZOLACIJU NA BRODU**

Na svijetu postoje razna klasifikacijska društva koja se međunarodno priznata i ovlaštena za pregled i inspekciju brodskih sustava po međunarodnim regulativama, a sve u cilju unapređenja sigurnosti života i imovine na moru. Pa tako postoje [6]:

- Lloyd's Register of Shipping (LR)
- Bureau Veritas (BV)
- Registro Italiana Navale e Aeronautica (RINA)
- Det Norske Veritas (DNV)
- Germanischer Lloyd (GL)
- American Bureau of Shipping (ABS)
- Taikoku Kaiji Kyokai (NS)
- China Classification Society (CCS)
- Hrvatski Registar Brodova (HRB)

Det Norske Veritas (DNV) i Germanischer Lloyd (GL) su se 2013. godine spojile u jednu organizaciju. U nastavku će biti riječ o standardima i pravilima vezanim za električnu izolaciju koje su propisali Det Norske Veritas-a i Germanischer Lloyd-a.

Izolacijski materijali opće namjene za vodiče moraju izdržati temperature kojima će vjerojatno biti izloženi. To je temperatura okoline plus toplina samog vodiča tijekom punog opterećenja.

Toplinska klasifikacija u skladu s IEC 60085 mora se dodijeliti izolacijskom sustavu kada se koristi u strojevima. Korištene klase prikazane su u tablici 1, s maksimalnim temperaturama izloženosti (uključujući ambijent) prikazan u desnom stupcu.

Izolacijski materijali moraju biti barem otporni na plamen. Za kabele pogledajte zahtjeve u Sec.9. [7]

Izolacijski materijali moraju imati praćeni otpor u skladu s IEC 60112. Indeks praćenja od najmanje 175V potreban je za niskonaponsku opremu. Za visokonaponsku opremu indeks praćenja mora biti najmanje 300 V. Vidi Odjeljak 1 Tablica 4 u vezi s indeksom praćenja. [7]

"Indeks praćenja" ili "otpornost na praćenje" je pokazatelj koliko dobro izolacijski materijal podnosi određena opterećenja na svojoj površini. Još općenitije rečeno, otpornost na praćenje pokazatelj je koliko je materijal otporan na utjecaje okoliša.

**Tablica 2-Općenita klasa izolacije**

Izolacijska klasa (temperaturna klasa)	Maksimalna temperatura °C]
A	105
B	130
E	120
F	155
H	180
220	220

Izvor: Izradio student iz literature [7]

### 5.1.1. Ispitivanje i testiranje

Ispitivanje i testiranje električne izolacije određeno je prema Det Norske Veritas-u i Gemanisher LLoyd-u.

Zahtjevi za pregled i ispitivanje električne opreme navedeni su u primjenjivim odjeljcima u ovim pravilima.

Za opremu koja mora biti odobrena tipom, moraju se provesti tipska ispitivanja navedena u tablicama od 2 do 4 prema primjeni.

Potrebne razine otpornosti na vibracije za opremu težu od 100 kg propisane su vrijednosti upola manje od onih navedenih vrijednosti u tablici 2. Za težu opremu, ispitivanje vibracija optimizira se zavisno od slučaja do slučaja i/ili dokumentirane mjere vibracija. [7]

**Tablica 3-Testovi tipa okoliša**

Parametri	Lokacija	Minimalna specifikacija opreme	Ispitna referenca
Temperatura	Unutar plovila	Temperatura okruženja: +0°C do +45°C	IEC 60068-2-2 (test suhe topline)
	Izvan plovila	Temperatura okruženja: -25°C do +45°C	IEC 60068-2-2 (test suhe topline)  IEC 60068-2-1 (hladni test)
Vlažnost	Sve lokacije	Relativna vlažnost do 95 % na svim relevantnim temperaturama.	IEC 60068-2-30 test Db
Vibracija	Sve lokacije	Frekvencijski raspon: 5-50 Hz,  Brzina: 20mm/s (amplituda)	IEC 60068-2-6 test Fc ili  IEC 60068-2-6  Test Fh (makimalno 10 puta pojačan)

Izvor: Izradio student iz literature [7]

**Tablica 4-Električna EMC ispitivanja tipa**

Parametri	Lokacija definirana u IEC 60533	Minimalna specifikacija opreme	Ispitna referenca

Izolacija	Sve lokacije	Otpor izolacije		
	Sve lokacije	Jednominutni visokonaponski test		
	Sve lokacije	Impulsni naponski test IEC 61439-1 ili IEC 62271-200		
EMC	Sve lokacije	Imunitet	Niska frekvencija IEC 6533	IEC 61000-4-16 Kriterij izvedbe A
			Električni brzi prijelaz/udar IEC 61000-6-2	IEC 61000-4-4 Kriterij izvedbe B
			Radio frekvencija IEC 61000-6-2	IEC 61000-4-6 Kriterij izvedbe A
			Radijacijsko elektromagnetsko polje IEC 61000-6-2	IEC 61000-4-3 Kriterij izvedbe A
			Elektrostatsko pražnjenje IEC 61000-6-2	IEC 61000-4-2 Kriterij izvedbe B
			Električni spori prijelaz/udar IEC 61000-6-2	IEC 61000-4-5 Kriterij izvedbe B
	General power distribution zone	Emisija	Zračeno IEC 61000-6-4	CISPR 16
			Provedeno IEC 61000-6-4	CISPR 16
	Komandni most i otvorene palube	Emisija	Zračeno IEC 60945	CISPR 16
			Provedeno IEC 60945	CISPR 16
	1) Ako je oprema pokrivena IEC standardom za proizvode, koristit će se standard za proizvode.			

Izvor: Izradio student iz literature [7]

**Tablica 5-Tipska ispitivanja za kućišta**

Parametri	Lokacija	Minimalna specifikacija opreme	Ispitna referenca
Zaštita od prodora	Sve lokacije		IEC 60529
Požarni integritet	Sve lokacije	Otpor na plamen	IEC 60092-101
Površinska temperatura	Sve lokacije	Maksimum 95°C,	
Otpor na koroziju	Vani	IACS UR E10 (stavka 12)	IEC 60068-2-52, slana magla, test Kb, ozbiljnost 1.
Otpor na UV zračenja	Vani	IEC 60068-2-5	IEC 60068-2-5, test C za 80 sati

Izvor: Izradio student iz literature [7]

### 5.1.2. Ispitivanje brodova upisanih u Registar

Pregledi brodova upisanih u registar obavezni su kao što je obavezno pregledavati električnu opremu na kopnu. Testovi na brodu razlikuju se ovisno o vrsti broda, njegovoj namjeni i starosti. Ovakvim ispitivanjima od strane Registra brodu se produžuju ili ne produžuju odgovarajuće brodske isprave ovisno o rezultatima ispitivanja, a sve u svrhu sigurnosti ljudskih života, broda, imovine, tereta i zaštite mora i morskog okoliša.

Pravila Registra detaljno propisuju koji pregledi se vrše , u kojem vremenskom roku, iz kojeg razloga. Također pravila Registra propisuju na koji način će se pregledi provesti, na kojoj opremi i na kojim dijelovima broda. Ova pravila vrijede za sve pomorske brodove i brodove unutrašnje plovidbe.

Općenito pregledi su podijeljeni na: [12]

- Osnovni pregledi
- Redoviti pregledi
- Izvanredni pregledi.

Osnovni pregled je obavezan te se njime utvrđuje ispravnost svih stavki brodske isprave po odgovarajućim Pravilima Registra. Pregled se vrši prilikom: [12]

- Upisa broda u Upisnik brodova
- Promjena namjene ili područja plovidbe ili ostalih elemenata na koje se primjenjuju odredbe Pravila.

Redoviti pregledi za brodove koji su već upisani u Registar mora se provesti u točno određenim vremenskim razmacima, te se u ove preglede uvrštava: [12]

- Obnovni pregled
- Međupregledi (kontrolni pregledi)
- Godišnji pregledi.

Izvanredni pregled ili prigodni pregled obavezan je te se primjenjuje na brodove upisane u Registar u sljedećim slučajevima: [12]

- Nakon pretrpljene nezgode (havarije) ili utvrđenih nedostataka koji su od utjecaja na plovidbu
- U prigodi većih popravaka ili obnavljanja dijela broda
- U prigodi stavljanja broda u raspremu
- Kao dodatak redovitim pregledima, kad to zahtijeva Registar.

Brodski električni uređaji čine manji dio brodske opreme i pregledavaju se ili kao sastavni dijelovi mnogih strojnih uređaja, opreme i automatizacije na brodu (npr. pregled opreme za sidrenje i vez, pregled kormilarskog uređaja, provjera funkcionalnosti za sprječavanje buke, ispitivanje protupožarnih pumpi itd.) koji podliježu navedenim pregledima, ili pak kao samostalni dijelovi.

Najčešći pregledi brodskih električnih uređaja jesu: [12]

1. Pregled izvora električne energije koji se sastoji od:
  - Vizualnog pregleda
  - Mjerenja otpora izolacije
  - Provjere funkcionalnosti
  - Pregleda u rastavljenom stanju osnovnog i osovinskog generatora i generatora za slučaj nužde (ako je potrebno).
2. Pregled električnog porivnog sustava sastoji se od vizualnog pregleda dok je rastavljen, mjerenja izolacijskog otpora i provjere funkcionalnosti na:

- Generatorima i motorima EPS
- Ventilatorima za hlađenje poluvodičkih pretvornika
- Upravljačkim i regulacijskim uređajima.

3. Pregled sustava razdiobe električne energije koji obuhvaća:

- Pregled GSP i njenih sastavnih elemenata, mjerenje otpora izolacije, kontrolu funkcionalnosti, provjeru paralelnog rada i zaštite
- Pregled sklopne ploče za slučaj nužnosti i njenih elemenata uz mjerenje otpora izolacije, kontrolu funkcionalnosti i automatike prebacivanja zaštite
- Pregled razdjelnika navigacijsko – signalnih svjetala te ostalih razdjelnika, a sastoji se od vizualnog pregleda, mjerenja otpora izolacije i provjere funkcionalnosti
- Pregled kabela između pojedinih generatora i GSP, te kabela za napajanje važnih trošila, sastoji se od mjerenja otpora izolacije, vizualnog pregleda plašta, kabelskih staza, prolaza i među spojeva.

4. Pregled elektromotornih pogona obuhvaća vizualni pregled, mjerenje otpora izolacije i kontrolu funkcionalnosti, a za elektromotore za pogon važnih trošila primjerice sidrenog vitla, kormilarskog stroja, pumpe kaljužna i protupožarna i dodatna ispitivanja prema Pravilima Registra.

5. Pregled rasvjetnih armatura i izvora svjetla za:

- Rasvjeta u slučaju nužde
- Rasvjeta u prostorijama bitnim za brodsku službu.

6. Pregled uređaja i instalacija za eksplozivno ugroženim prostorima koji se odnosi:

- Na kontrolu uzemljenja, stanja kabelskih plašteva, uvodnica, spojnih kutija, ekspanzijskih spojeva i kabelskih prolaza kroz pregrade
- Na provjeravanje rada uređaja za provjeru stanja izolacije mreže, te mjerenje otpora izolacije mreže u inertiziranom stanju
- Na ispitivanje sustava protueksplozijske zaštite s alarmiranjem i blokiranjem.

7. Pregled uređaja za signalizaciju, alarm i zaštitu obuhvaća kontrolu funkcionalnosti:

- Sustava glavnog porivnog stroja



- Sustava glavnog izvora električne energije i izvora električne energije u slučaju nužde
- Sustava kormilarskog stroja i brodskog vijka sa zakretnim krilcima
- Uređaja za kontrolu stanja izolacije mreže
- Alarma vodonepropusnih vrata.

8. Pregled automatizacije strojnog uređaja koji, između ostalog obuhvaća:

- Provjeru automatike brodske centrale i brodske mreže
- Provjeru postupnog uključivanja važnih trošila nakon ispadanja generatora sa mreže
- Kontrolu alarmnog sustava.

9. Pregled ostalih brodskih električnih uređaja kao primjerice:

- Vizualnu kontrolu i ispitivanje otpora izolacije instalacija za električno grijanje
- Provjeru funkcionalnosti unutarnjih veza brodskog električnog telegrafa i sustava uređaja za spaljivanje otpadaka
- Kontrolu pričuvnih dijelova koji se prema propisima moraju nalaziti na brodu.

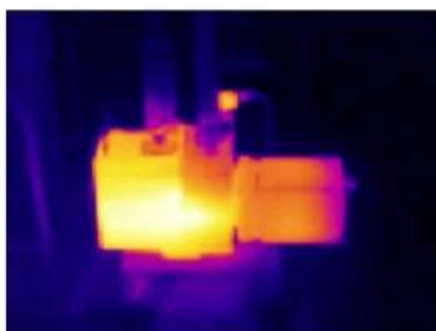
### **5.1.3. Ispitivanje brodske električne izolacije uporabom termovizije**

Infracrvena termografija može se najjednostavnije opisati kao beskontaktno promatranje nekog predmeta, objekta ili sustava kako bi se vidjela i/ili izmjerila njegova zračena toplina uz pomoć toplinskog uređaja. Takav toplinski uređaj očitava emitiranu toplinsku energiju ispitnog objekta te se na ekranu toplinskog uređaja prikazuje distribucija temperature ispitnog objekta. Toplinski uređaj koji koristimo za ovakva ispitivanja nazivamo termovizijska kamera, a slika koja se prikazuje na ekranu termovizijske kamere nazivamo termogram. Termogramima možemo vidjeti predmete koji proizvode toplinu koja nije vidljiva golim okom. Ovakav način promatranja određenog predmeta, objekta ili sustava primjenom termovizijskih kamera vrlo je važan i učinkovit alat prilikom nadzora, ispitivanja ili testiranja u raznim djelatnostima kao što su medicina, pomorstvo, industrija, tehnološke djelatnosti i u znanstvenim područjima.

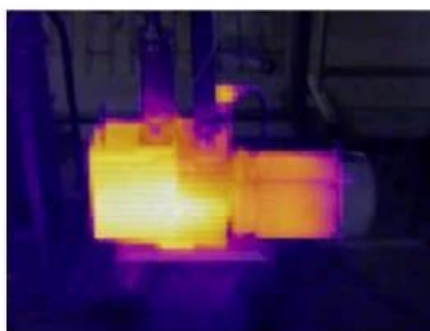


**Slika 20-Termovizijska kamera**

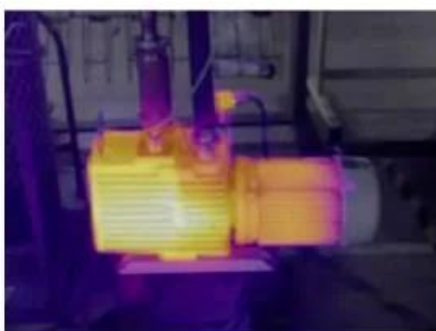
Izvor: <https://www.conrad.hr/p/fluke-flk-tis20-max-9hz-termalna-kamera-20-do-400-c-9-hz-2317391>



Vollständiges Wärmebild\*



75 % überblendetes Bild\*



50 % überblendetes Bild\*



Vollständiges Sichtbild

**Slika 21-Termogrammi**

Izvor: <https://www.conrad.hr/p/fluke-flk-tis20-max-9hz-termalna-kamera-20-do-400-c-9-hz-2317391>



**Slika 22-Primjer nadzora sustava termovizijskom kamerom**

Izvor <https://www.conrad.hr/p/fluke-flk-tis20-max-9hz-termalna-kamera-20-do-400-c-9-hz-2317391>

U pomorstvu termovizijske kamere možemo koristiti u razne svrhe inspekcije kao što su:  
[8]

- Praćenje električnih i mehaničkih stanja motora
- Pregledi ležaja (nenormalno trenje ležaja)
- Praćenje stanja električne izolacije izolacije

Primarni cilj infracrvene termografije je potvrditi da strojevi rade normalno i otkriti abnormalne obrasce topline unutar stroja, koji ukazuju na neučinkovitost i nedostatke. Provjera mehaničke opreme pomoću infracrvene termografije velika je prednost za upravitelje imovine zadužene za praćenje stanja. Iako su infracrveni slikovni uređaji jednostavni za korištenje, tumačenje podataka koje proizvode može biti malo veći izazov za razbijanje. Važno je ne samo imati radno znanje o tome kako infracrveni slikovni uređaji rade, već i osnovno znanje o radiometriji i procesima prijenosa topline.

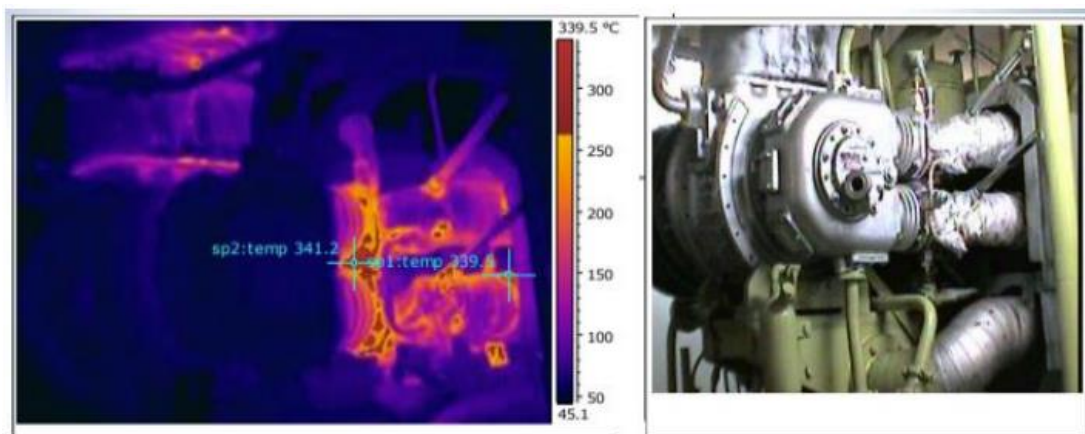
Kao što je već spomenuto termovizijske kamere koriste se za ispitivanje električne izolacije na brodu. Ispitivanja možemo podijeliti u dvije kategorije a to su: [8]

- Ispitivanje visokonaponskih instalacija
- Ispitivanje niskonaponskih instalacija.

Možemo reći da je toplina jedan od značajnih faktora u visokonaponskim instalacijama odnosno protokom električne struje kroz element otpora stvara se toplina. Analogno tome možemo zaključiti da se povećanjem otpornosti povećava i toplina. Tijekom životnog vijeka broda u eksploataciji zbog starenja i utjecaja okoliša (uvjeti visoke vlažnosti sa visokim sadržajem soli u zraku) dolazi do pojave korozije na određenim mjestima što za posljedicu ima povećanje otpora električnih spojeva. Nadalje uslijed pojave korozije na komponentama električnog sustava može doći do prekomjernog porasta temperature odnosno kvara komponente ili cijelog sustava zbog proboja struje i napona. Zbog sigurnosti sustava, imovine i ljudskih života na brodu važno je takve spojeve na vrijeme detektirati kako ne bi došlo do taljena ili čak požara na brodu uslijed prekomjernog povećanja temperature.

Primjeri najčešćih kvarova brodskih visokonaponskih instalacija koji se mogu izbjeći i detektirati primjenom termovizijskih kamera su: [8]

- Oksidacija visokonaponskih sklopki
- Pregrijavanje veza i spojeva
- Nepravilno osigurani spojevi
- Kvarovi i greške na električnoj izolaciji



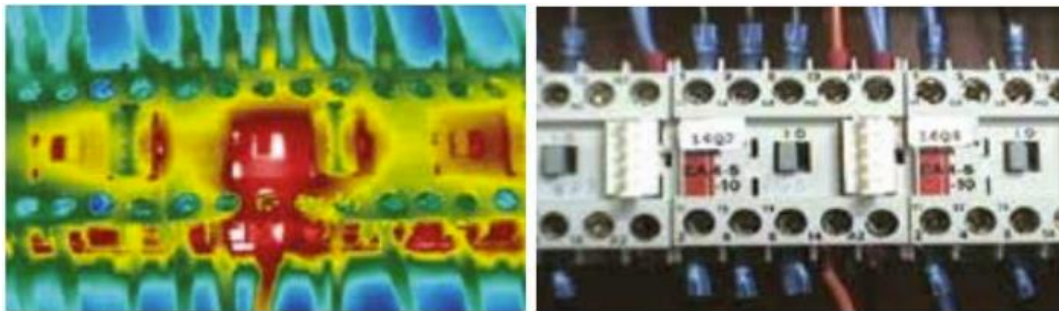
**Slika 23-Termogram preoptrećenja izolacije razvodnika**

Izvor: <https://www.transam.gr/paradeigmata>

Termovizijske kamere imaju širok spektar primjene pa se tako primjerice koriste za pregled i inspekciju razvodnih ormara i kontrolnih jedinica motora. Najčešći problem su olabavljeni priključci uslijed uvjeta plovidbe i vibracija, no također električnim sustavima na brodu problem stvara neravnomjerna raspodjela opterećenja, korozija i povećavanje električne impedancije.

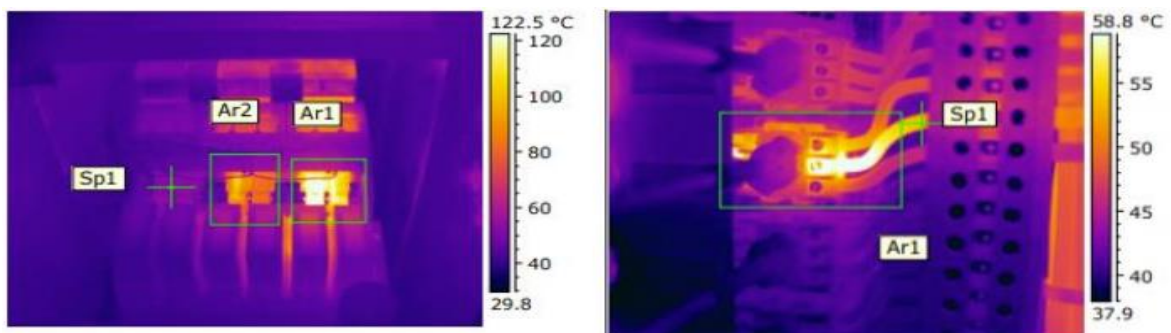
Primjeri najčešćih kvarova brodskih niskonaponskih instalacija koji se mogu izbjeći i detektirati primjenom termovizijskih kamera su: [8]

- Spojevi velikog otpora
- Korozija na vezama i spojevima
- Oštećenja unutar osigurača
- Greške unutar prekidača
- Loši spojevi i unutarnja oštećenja



**Slika 24-Termogram osigurača u kratkom spoju**

Izvor: [http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264\\_EN.pdf](http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_EN.pdf)



**Slika 25-Termogrami loših ili prljavih spojeva**

Izvor:

[https://www.pixelthermographics.co.uk/\\_literature\\_142048/Electrical\\_Marine\\_Thermal\\_Imaging\\_Survey\\_Sample\\_Report](https://www.pixelthermographics.co.uk/_literature_142048/Electrical_Marine_Thermal_Imaging_Survey_Sample_Report)



### 5.1.4. IEC - Internacional Electrotechnical commission

Međunarodna elektrotehnička komisija (IEC eng. Internacional Electrotechnical commission), sa sjedištem u Genevi u Švicarskoj, organizacija je koja priprema i objavljuje međunarodne standarde za sve električne, elektroničke i srodne tehnologije. IEC je globalna, neprofitna članska organizacija čiji rad podupire infrastrukturu kvalitete i međunarodnu trgovinu električnom i elektroničkom robom. Njihov rad olakšava tehničke inovacije, pristupačan razvoj infrastrukture, učinkovit i održiv pristup energiji, pametnu urbanizaciju i transportne sustave, ublažavanje klimatskih promjena i povećava sigurnost ljudi i okoliša. IEC okuplja više od 170 zemalja i pruža globalnu, neutralnu i neovisnu standardizacijsku platformu za 20 000 stručnjaka diljem svijeta. Administrira 4 sustava ocjenjivanja sukladnosti čiji članovi potvrđuju da uređaji, sustavi, instalacije, usluge i ljudi rade kako je potrebno.

IEC pruža standardizirani pristup testiranju i certificiranju. IEC testiranje objedinjuje dogovoreni skup pravila, specifikacija i terminologije koji proizvođačima omogućuju da testiraju svoje uređaje na sukladnost. [9]



**Slika 26-Primjer IEC standarda**

Izvor: <https://www.vde-verlag.de/iec-normen/213369/iec-60068-2-1-2007.html>

Također postoji i ISO (eng. the International Organization for Standardization) međunarodna organizacija za standarde. ISO je neovisno tijelo koje osigurava standarde koje organizacije trebaju slijediti. Pojam 'standardi' uključuje kvalitetu, sigurnost i učinkovitost proizvoda ili usluga koje pružaju poduzeća.

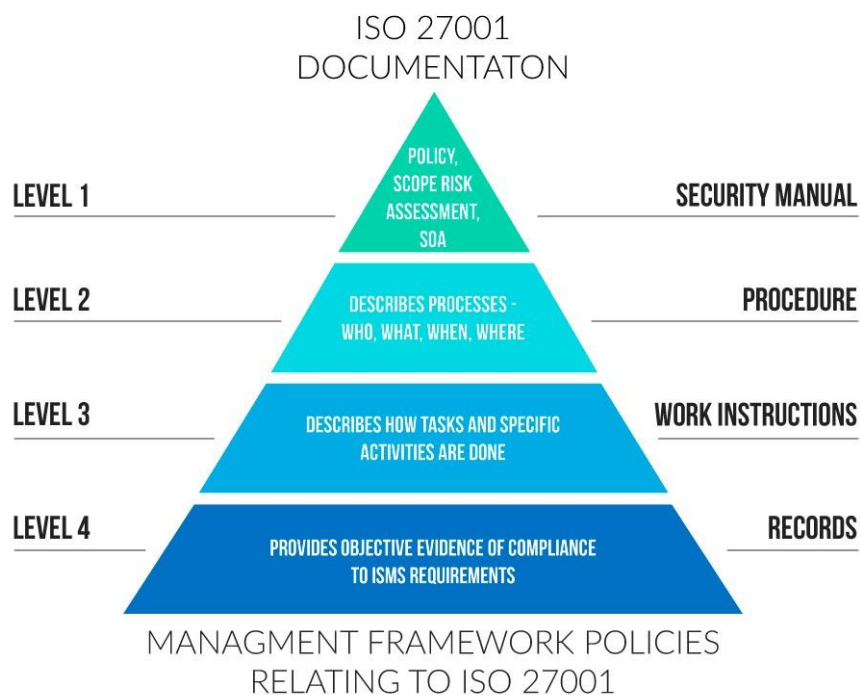
ISO se fokusira na standarde za sustave upravljanja kvalitetom, standarde proizvoda, materijala i konstrukcije, dok se IEC uglavnom fokusira na sve međunarodne standarde za električne, elektroničke i srodne tehnologije. Ove su organizacije zajedno objavile ISO/IEC 27001.

ISO 27001 (službeno poznat kao ISO/IEC 27001:2005) je specifikacija za sustav upravljanja sigurnošću informacija (ISMS). ISMS je okvir politika i postupaka koji uključuje sve pravne, fizičke i tehničke kontrole uključene u procese upravljanja informacijskim rizikom organizacije. [10]



**Slika 27-Vizualni prikaz koraka usklađenosti sa ISO/IEC 27001 standardima**

Izvor: [https://www.davydych.com/p/blog-page\\_2464.html](https://www.davydych.com/p/blog-page_2464.html)



**Slika 28-Piramida okvirne politike upravljanja prema ISO/IEC 27001**

Izvor: [https://www.davydych.com/p/blog-page\\_2464.html](https://www.davydych.com/p/blog-page_2464.html)

## 5.2. INOVACIJE I BUDUĆNOST U BRODSKOM ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU

Kao u svakoj djelatnosti pa tako i u pomorstvu svakim danom se teži ka poboljšanjima i okreće se novim tehnologijama u cilju poboljšanja kvaliteta i sigurnosti broda, imovine, okoliša i ljudskih života. Stoga je plan za budućnost napraviti brod koji je kompletno elektrificiran i pogonjen električnom energijom. Takva ideja iziskuje poboljšanja u svim dijelovima i komponentama elektroenergetskog sustava na brodu.

Sustav broda na električni pogon je identificiran od strane IEEE (eng. Institute of Electrical and Electronics Engineers) Technical Activities Board (TAB) kao jedan od 10 novih tehnoloških izazova koji presijecaju područja više IEEE društava, kao i inženjerskih društava izvan IEEE-a. Cilj ove integrirane inicijative je poboljšati korištenje tehnološkog napretka za sve povezane aplikacije kombiniranjem naprednih istraživačkih i razvojnih postignuća na sveučilištima i istraživačkim laboratorijima s dobro uspostavljenom inženjerskom praksom i industrijskim standardima. Za promicanje ove inicijative; uspostavljen je dvogodišnji Simpozij o tehnologiji električnih brodova. Istovremeno, društva IEEE Industry Applications, Power Engineering i Power Electronics sponzorirala su formiranje radnih skupina za ubrzanje revizije postojećih i razvoj novih IEEE standarda za tehnologije električnih brodova. IEEE PES



formirao je novi Odbor za pomorske sustave (MARSYS) za koordinaciju aktivnosti u razvoju novih standarda za pomorsku industriju.

Prvi simpozij ESTS 2005. susponsoriralo je šest IEEE društava: PES (Power Engineering Society), PELS (Power Electronics Society), IAS (Industry Applications Society), OES (Ocean Engineering Society), DEIS (Dielectrics and Electrical Insulation Society) i VTS ((Vehicular Technology Society). ASNE (American Society of Naval Engineers) i IMarEST ((Institute of Marine Engineering, Science and Technology) također su bili tehnički kosponzori. The ESTS 2007. podržala su još dva IEEE međudruštvena ko-sponzora: IEEE Systems Council i IEEE Sensors Council. ESTS 2009 u travnju 2009. imaju sve iste sponzore i susponzore. Miješanjem tradicionalnih usmenih referata s pozvani predavači i panel rasprave, ESTS simpozija uspostavio stalni forum za razmjena širokog spektra gledišta za cijela znanstvena i tehnička zajednica koja radi u polje diljem svijeta. Simpoziji su se fokusirali na napredak i budućnost električnih brodova u sljedećim područjima: [11]

- Integrirani elektroenergetski sustavi
- Specifikacije sustava i komponenti
- Alati za dizajn za analizu, sintezu, modeliranje i simulaciju
- Električni pogon (strojevi, pogoni, propulzori)
- Pretvorba, distribucija i skladištenje električne energije
- Kvaliteta električne energije i impulsna snaga
- Zaštita, rekonfiguracija i mogućnost preživljavanja
- Testovi, evaluacija i certifikacija
- Standardi za električne brodove

Plenarne sjednice s pozvanim stručnjacima bile su otvoreni dijalozi o temama kao što su: [11]

- Tehnologije industrijskih električnih brodova i standardi danas:
- Dijalog s korisnicima Electric Ship Technologies
- Inženjering cjelokupnog sustava za električne brodove
- Istosmjerni sustavi napajanja

Svi zbornici radova ESTS simpozija dostupni su na IEEEExplore internet stranici.

Budućnost nam je sve bliže stoga moramo biti spremni na učenje i razvoj novih tehnologija kako bi ostali u korak s vremenom te kako bi mogli prihvatiti nove tehnologije kao poboljšanja i nešto što će nam olakšati svakodnevne poslove.

## **6. ZAKLJUČAK**

Normalna je pojava da se električna oprema troši i taj proces počinje odmah pri ugradnji. Analogno tome troši se i električna izolacija. Ako se istrošenost električne opreme i električne izolacije ne provjerava može doći do raznih kvarova i nepravilnosti u radu. Stoga je od velike važnosti preventivno održavanje i testiranje električnog sustava i opreme kako bi se ustanovilo stanje i osiguralo njihovo ispravljanje u slučaju odstupanja vrijednosti od zadanih parametara. Neispravna oprema također ima utjecaj na ljudsku sigurnost i sigurnost sustava. Ispravnim održavanjem smanjuje se vrijeme obustave rade sustava zbog većih kvarova.

Program održavanja elektroenergetske mreže trebao bi se sastojati od rutinskih pregleda, testiranja, popravaka i servisa pri čemu bi se trebali održavati svi dijelovi sustava kao što su transformatori, sklopna postrojenja, kabeli, prekidači i slično skupa sa pripadajućom opremom, zaštitni uređaji i releji, ožičenja, mjerna oprema, nadzorna oprema i oprema koja ukazuje na kvar. Ukoliko je program održavanja dobro organiziran i implementiran smanjuje se broj nesreća i neplaniranih prekida opskrbe, a povećava se srednje vrijeme između kvarova električne opreme.

Električna izolacija sastavni je dio svakog električnog sklopa i za nju se smatra da ne provodi struju dok struja teče unutra sklopa. Stoga bi električna izolacija trebala imati veliki otpor prema protoku električne struje, veliku snagu kako bi izdržala električni udar i dobra svojstva provođenja topline. U elektroenergetskom sustavu postoje tri osnovna električna kruga, a to su strujni krug, dielektrični krug i magnetski krug. Sva tri električna kruga vode se po Ohmovom zakonu i u mnogočemu su analogna.

Stoga je ispitivanje kvalitete električne izolacije sustava jedno od ključnih čimbenika za ispravan rad cijelog elektroenergetskog sustava jer kvar na električnoj izolaciji može izazvati veliku štetu kako za ljudski život tako i za sam elektroenergetski sustav općenito. Pravilno i pravovremeno ispitivanje kvalitete električne izolacije i njen nadzor smanjuje vjerojatnost kvara i povećava sigurnost kompletnog elektroenergetskog sustava.

## LITERATURA

- [1] Malik, (1998). *Electrical Insulation in Power Systems* (1st ed.). CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9780203758816>
- [2] R. Goffaux, B. Comte, M. Cottet and B. Fruth, "Quality assurance of generator and motor insulation system," *Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075)*, 2000, pp. 512-515, doi: 10.1109/ELINSL.2000.845560.
- [3] Starikova, Nadezhda Sergeevna, Vitaliy Vladimirovich Redko, and Galina Vasilievna Vavilova. "Control of cable insulation quality by changing of electrical capacitance per unit during high voltage testing." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 671. No. 1. IOP Publishing, 2016.
- [4] D. Allan, M. Blundell, K. Boyd and D. Hinde, "New techniques for monitoring the insulation quality of in-service HV apparatus," in *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 27, no. 3, pp. 578-585, June 1992, doi: 10.1109/14.142722.
- [5]  
[https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/UVOD\\_U\\_ODRZAVANJE\\_I\\_TESTIRANJE\\_ELEKTRICNE\\_OPREME\[1\].pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/UVOD_U_ODRZAVANJE_I_TESTIRANJE_ELEKTRICNE_OPREME[1].pdf) (2.9.2022.)
- [6] [https://hr.wiki5.ru/wiki/Ship\\_classification\\_society](https://hr.wiki5.ru/wiki/Ship_classification_society) (10.9.2022)
- [7] Rules for classification: Ships — DNV-RU-SHIP Pt.4 Ch.8. Edition July 2022
- [8] Svi FLIR SYSTEMS katalogi i tehničke brošure (directindustry.com) (12.9.2022.)
- [9] <https://iec.ch/who-we-are> (12.9.2022.)
- [10] <https://www.iso.org/about-us.html> (12.9.2022.)
- [11] Y. Khersonsky, N. Hingorani and K. L. Peterson, "IEEE Electric Ship Technologies initiative," *2009 Record of Conference Papers - Industry Applications Society 56th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, 2009, pp. 1-10, doi: 10.1109/PCICON.2009.5297177.
- [12] B. SKALICKI, J. GRILEC.: „Brodski električni uređaji“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2000.

## **KAZALO KRATICA**

SF<sub>6</sub> - Sulfur hexafluoride  
PVC - Polyvinyl chloride  
PE - Polyethylene  
XLPE - Cross-linked polyethylene  
EPR - Ethylene Propylene Rubber  
RTV - room-temperature-vulcanizing silicone  
GIS - gas-insulated switchgear  
MOA - metal oxide surge arrester  
LR - Lloyd's Register of Shipping  
BV - Bureau Veritas  
RINA - Registro Italiana Navale e Aeronautica  
DNV - Det Norske Veritas  
GL - Germanischer Lloyd  
ABS - American Bureau of Shipping  
NS - Taikoku Kaiji Kyokai  
CCS - China Classification Society  
HRB - Hrvatski Registar Brodova  
IEC - Internacional Electrotehnicl commission  
EPS - Electric Power Steering  
GSP – Glavna sklopna/rasklopna ploča  
ISO - International Organization for Standardization  
IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers  
ESTS - Electric Ship Technology Symposium

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1-(a) Paralelni ekvivalentni krug dielektričnog materijala i (b) odgovarajući fazorski dijagram .....</b>	<b>7</b>
<b>Slika 2-Presjek kabela s komprimiranim plinom u svojstvu električne izolacije.....</b>	<b>10</b>
<b>Slika 3-Primjer vakuuma kao električne izolacije .....</b>	<b>10</b>
<b>Slika 4-Primjer čahure izrađene od keramike.....</b>	<b>12</b>
<b>Slika 5-Primjer korištenja krutina kao izolacijskog materijala za električne kabele .....</b>	<b>13</b>
<b>Slika 6-Primjer izolacije transformatora .....</b>	<b>14</b>
<b>Slika 7-Vakumski prekidač .....</b>	<b>15</b>
<b>Slika 8-Električna izolacija kabela za napajanje.....</b>	<b>16</b>
<b>Slika 9-Presjek čahure .....</b>	<b>17</b>
<b>Slika 10-Nadzemni vodovi .....</b>	<b>18</b>
<b>Slika 11-Teorijski model složene metode upravljanja .....</b>	<b>23</b>
<b>Slika 12-Distribucija električnog polja između lančane elektrode i izolacijske površine kabela.....</b>	<b>23</b>
<b>Slika 13-Raspodjela ispitnog napona duž površine izolacije.....</b>	<b>24</b>
<b>Slika 14-Ovisnost elektrode istežanje .....</b>	<b>25</b>
<b>Slika 15-Visokonaponska sonda u uporabi na trafostanici 110kV .....</b>	<b>27</b>
<b>Slika 16-Blok dijagram strujnog kruga za obradu signala za mjerenje djelomičnog pražnjenja .....</b>	<b>28</b>
<b>Slika 17-Pojednostavljeni ekvivalentni krug i vektorski dijagram za izolaciju .....</b>	<b>30</b>
<b>Slika 18-Prikaz sustava za istovremeno mjerenje djelomičnog pražnjenja i kuta dielektričnih gubitaka .....</b>	<b>31</b>
<b>Slika 19-Funkcionalni valni oblici sustava mjerenja kuta dielektričnog gubitka .....</b>	<b>32</b>
<b>Slika 20-Termovizijska kamera .....</b>	<b>41</b>
<b>Slika 21-Termogrami .....</b>	<b>41</b>
<b>Slika 22-Primjer nadzora sustava termovizijskom kamerom.....</b>	<b>42</b>
<b>Slika 23-Termogram preopterećenja izolacije razvodnika .....</b>	<b>43</b>
<b>Slika 24-Termogram osigurača u kratkom spoju .....</b>	<b>44</b>
<b>Slika 25-Termogrami loših ili prljavih spojeva .....</b>	<b>44</b>
<b>Slika 26-Primjer IEC standarda .....</b>	<b>45</b>
<b>Slika 27-Vizualni prikaz koraka usklađenosti sa ISO/IEC 27001 standardima .....</b>	<b>46</b>
<b>Slika 28-Piramida okvirne politike upravljanja prema ISO/IEC 27001 .....</b>	<b>47</b>

## **POPIS TABLICA**

<b>Tablica 1 Svojstva različitih vrsta ulja koja se koriste kao sredstva električne izolacije</b>	<b>11</b>
<b>Tablica 2-Općenita klasa izolacije .....</b>	<b>34</b>
<b>Tablica 3-Testovi tipa okoliša.....</b>	<b>35</b>
<b>Tablica 4-Električna EMC ispitivanja tipa.....</b>	<b>35</b>
<b>Tablica 5-Tipska ispitivanja za kućišta .....</b>	<b>37</b>