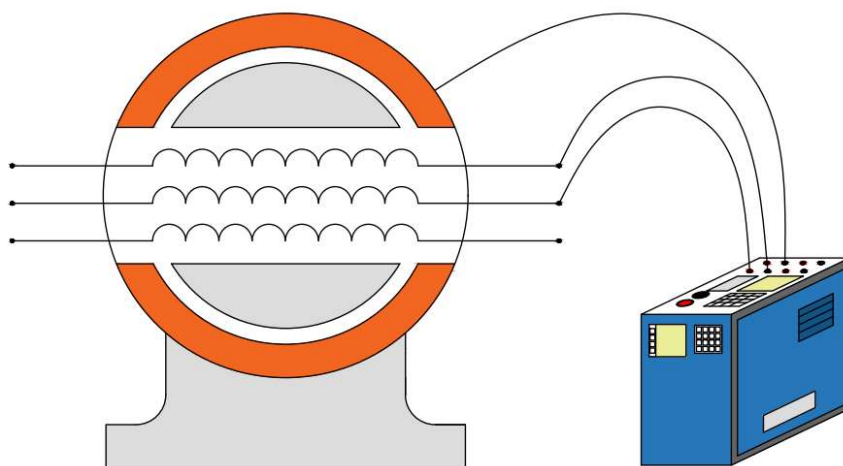


IVICA LOVRIĆ

ISPITIVANJE ELEKTRIČNIH STROJEVA

Nastavni materijal



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Split, 2025.

PREDGOVOR

Nastavni materijal kolegija *Ispitivanje električnih strojeva* namijenjen je studentima Elektroenergetike Sveučilišnog odjela za stručne studije Sveučilišta u Splitu. Program kolegija obuhvaća najčešća standardna, ali i određena specijalna ispitivanja koja se provode na transformatorima, te na sinkronim, asinkronim i istosmjernim strojevima.

Materijal također obrađuje najčešće dijagnostičke metode, dok je upoznavanje s temeljnim električnim mjerenjima izostavljeno jer su ista obuhvaćena kolegijem *Električna mjerenja*. Osnovna funkcionalna ispitivanja električnih strojeva opisana su sažeto, budući da su detaljno obrađena u kolegijima *Električni strojevi I* i *Električni strojevi II*.

Ispitivanje električnih strojeva u ovom materijalu usredotočeno je na same strojeve, dok se ispitivanje njihovih zaštitnih i upravljačkih sustava provodi u sklopu laboratorijskih vježbi. Nastavni materijal je u najvećoj mjeri prilagođen praktičnom pristupu ispitivanja električnih strojeva, te uz laboratorijske vježbe pokriva program navedenog kolegija.

Autor

ISPITIVANJE ELEKTRIČNIH STROJEVA

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. REGULATIVA ZA ISPITIVANJE ELEKTRIČNIH STROJEVA	2
2.1. Interni pravilnik o ispitivanju i održavanju elektropostrojenja.....	2
2.2. Zakonski propisi i pravilnici	4
2.3. Norme	6
2.3.1. Normizacija.....	7
2.3.2. Razine normizacije.....	9
2.3.3. Međunarodne organizacije za normizaciju	10
2.3.4. Načini pretraživanja normi	12
3. ISPITIVANJE I ODRŽAVANJE TEHNIČKIH SUSTAVA	16
3.1. Ispitivanje tehničkih sustava	16
3.2. Općenito o održavanju tehničkih sustava	19
3.3. Električno preventivno održavanje	24
4. IZOLACIJA ELEKTRIČNIH STROJEVA.....	26
4.1. Općenito o dielektricima.....	26
4.2. Izolacijski sustav električnih strojeva	29
4.3. Vrste izolacijskih materijala	31
4.4. Zagrijavanje izolacije električnih strojeva.....	32
5. UVOD U METODE ISPITIVANJA ELEKTRIČNIH STROJEVA.....	34
5.1. Ispitivanje izolacije električnih strojeva	34
5.1.1. Ispitivanje istosmjernim naponom.....	37
5.1.2. Ispitivanje izmjeničnim i udarnim naponom	39
5.2. Mjerenje temperature električnih strojeva	40
5.3. Vibracijska dijagnostika.....	42
5.4. Akustička ispitivanja.....	46
5.5. Spektralna analiza struje	47
5.6. Magnetska mjerenja	48
6. ISPITIVANJE TRANSFORMATORA.....	50
6.1. Ispitivanje namota i željezne jezgre transformatora	51
6.1.1. Identifikacija stezaljki.....	51
6.1.2. Ispitivanje grupe spoja	52
6.1.3. Određivanje prijenosnog omjera.....	53

6.1.4. Mjerenje otpora namota transformatora.....	54
6.1.5. Ispitivanje deformacije namota mjerenjem rasipnih induktiviteta.....	56
6.1.6. Ispitivanje deformacije namota metodom frekvencijskog odziva	57
6.1.7. Mjerenje struje magnetiziranja	57
6.2. Ispitivanje izolacije namota transformatora.....	57
6.2.1. Mjerenje otpora izolacije	58
6.2.2. Određivanje indeksa polarizacije	59
6.2.3. Određivanje faktora dielektričnih gubitaka	60
6.2.4. Ispitivanje izolacije metodom obnovljenog napona	61
6.3. Ispitivanje izolacijskog ulja transformatora.....	62
6.3.1. Fizikalno-kemijska analiza ulja	62
6.3.2. Kromatografska analiza plinova otopljenih u ulju.....	62
6.3.3. Ispitivanje stupanja polimerizacije papira	63
6.4. Funkcionalna ispitivanja transformatora.....	63
6.4.1. Pokus praznog hoda	63
6.4.2. Pokus kratkog spoja	64
7. ISPITIVANJE SINKRONIH STROJEVA.....	66
7.1. Ispitivanje sinkronog generatora pri gradnji.....	67
7.2. Ispitivanje namota i željezne jezgre sinkronog generator.....	67
7.2.1. Mjerenje otpora namota	67
7.2.2. Ispitivanje željezne jezgre statora indukcijom	68
7.3. Ispitivanje izolacije namota sinkronog generatora	69
7.3.1. Mjerenje otpora izolacije namota.....	69
7.3.2. Mjerenje odvodne struje - ramp test	70
7.3.3. Određivanje faktora dielektričnih gubitaka	70
7.3.4. Detekcija parcijalnih izbijanja	71
7.3.5. Ispitivanje udarnim naponom	72
7.3.6. Ispitivanje visokim naponom.....	72
7.4. Ispitivanje sinkronog generatora u pogonu.....	73
7.4.1. Mjerenje vibracija	73
7.4.2. Mjerenje opletanja vratila	74
7.4.3. Mjerenje napona vratila	75
7.4.4. Mjerenje rasipnih magnetskih polja.....	75
7.5. Funkcionalna ispitivanja sinkronog generatora	76
7.5.1. Pokus praznog hoda	76

7.5.2. Pokus kratkog spoja	77
7.6. Ispitivanja sinkronog stroja pri radu na mreži	78
7.6.1. Krivulje regulacije	78
7.6.2. V krivulje	79
7.6.3. Kut opterećenja	80
7.6.4. Pogonska karta	81
7.6.5. Tropolni udarni kratki spoj	82
7.7. Remont hidrogenatora.....	83
7.7.1. Značajke hidrogenatora u HE Dale.....	85
7.7.2. Izvedba remonta hidrogenatora	87
7.7.3. Demontaža generator	87
7.7.4. Pregledi i ispitivanja	88
7.7.5. Montaža generatora.....	90
7.7.6. Puštanje generatora u prvi pogon.....	91
8. ISPITIVANJE ASINKRONIH STROJEVA	93
8.1. Ispitivanje asinkronog motora pri gradnji.....	93
8.2. Ispitivanje namota asinkronog motora.....	94
8.2.1. Identifikacija stezaljki	94
8.2.2. Mjerenje otpora namota	95
8.3. Ispitivanje izolacije namota asinkronog motora	96
8.3.1. Mjerenje otpora izolacije namota.....	96
8.3.2. Određivanje faktora dielektričnih gubitaka	96
8.3.3. Ispitivanje udarnim naponom	96
8.3.4. Pokus visokim naponom	97
8.4. Ispitivanja asinkronog motora u pogonu.....	97
8.4.1. Mjerenje napona osovine	97
8.4.2. Pokus vitlanja.....	97
8.4.3. Mjerenje vibracija	98
8.5. Funkcionalna ispitivanja asinkronog motora	98
8.5.1. Pokus praznog hoda	98
8.5.2. Pokus kratkog spoja	99
8.5.3. Snimanje karakteristika opterećenja	100
8.5.4. Mjerenje klizanja	102
8.5.5. Mjerenje momenta	102
8.5.6. Snimanje karakteristike momenta.....	103

8.5.7. Pokus zagrijavanja	104
9. ISPITIVANJE ISTOSMJERNIH STROJEVA.....	106
9.1. Određivanje oznaka stezaljki	106
9.2. Mjerenje otpora namota	109
9.3. Mjerenje otpora izolacije namota.....	109
9.4. Podešavanje neutralne zone	109
9.5. Snimanje karakteristika regulacije	110
9.6. Ispitivanje komutacije	111
10. NADZOR I DIJAGNOSTIKA ELEKTRIČNIH STROJEVA	113
10.1. Nadzor tehničkih sustava	113
10.2. Sustav nadzor transformatora	114
10.3. Sustav nadzora rotacijskih strojeva.....	115
10.4. Senzori za trajni nadzor električnih strojeva.....	116
10.5. Dijagnostički sustavi.....	116
10.6. Automatizirana dijagnostika	121
10.7. Baze podataka	123
10.8. Informacijski sustav	123
11. ISPITNA DOKUMENTACIJA	125
LITERATURA	129

1. UVOD

Ljudi su oduvijek težili istraživanju i razumijevanju sebe i svijeta oko sebe, vođeni sposobnošću racionalnog razmišljanja koja je jedinstvena za ljudsku vrstu. Taj urođeni nagon za postavljanjem pitanja poput zašto, kako, gdje i što, tjerao ih je da neprestano traže odgovore i objašnjenja. Još su praljudi analizirali svoje okruženje kako bi pronašli najbolje predjele za lov, učinkovitije pratili tragove životinja i odabrali optimalna mjesta za naseljavanje. Ova sklonost istraživanju i analiziranju oblikovala je razvoj ljudske civilizacije, omogućujući napredak i prilagodbu kroz milenije.

U suvremenom svijetu, analiziranje je postalo neizostavna metoda za razumijevanje i unapređenje različitih aspekata života. Svaki ozbiljniji pristup bilo kojem problemu uključuje temeljita istraživanja i analize kako bi se pronašla odgovarajuća rješenja. Na primjer, liječnici pomno analiziraju zdravstveno stanje svojih pacijenata kako bi postavili precizne dijagnoze i dali optimalne terapije. Trgovački lanci prate i proučavaju navike svojih kupaca s ciljem boljeg prilagođavanja ponude njihovim potrebama. Google kontinuirano analizira ponašanje korisnika kako bi poboljšao svoje usluge i pružio relevantne rezultate internet pretraživanja, dok političari istražuju stavove i interese birača kako bi oblikovali svoje kampanje i politike. Kroz ovakve analitičke pristupe, nastoji se bolje razumjeti probleme i pružiti kvalitetnija rješenja.

Da bi se dobila potpuna slika o nekom događaju, pojavi ili objektu, potrebno je izvršiti temeljito ispitivanje i analizu, odnosno prikupiti i obraditi relevantne podatke. Sve što nas okružuje, poput planina, rijeka, mora, građevina, strojeva, životinja, ljudi, predstavlja potencijalni izvor informacija. Prikupljanjem korisnih podataka i njihovom detaljnom analizom mogu se dobiti važne informacije koje omogućuju donošenje preciznih procjena i odluka s visokim stupnjem sigurnosti.

U prošlosti su se ljudi za prikupljanje podataka oslanjali isključivo na svoja osjetila, no s razvojem tehnologije, unapređenjem raznovrsnih ispitnih metoda i primjenom procesorske tehnike, proces prikupljanja i analize podataka značajno je napredovao. Kroz ispravnu i sistematsku obradu tih podataka dolazi se do novih spoznaja koje omogućuju dobivanje globalne slike stanja. Na taj način sustavi koji su prethodno bili skriveni postaju jasno vidljivi, što rezultira potpunijim i detaljnijim uvidom u njih.

Ispitivanje, koje se definira kao niz postupaka za utvrđivanje svojstava materijala ili provjeru usklađenosti proizvoda i njegove funkcionalnosti s postavljenim normama, u ovom kolegiju detaljno je razrađeno u okviru specifičnog područja elektrotehnike. Konkretno, fokus je na ispitivanju električnih strojeva koji obuhvaćaju transformatore te sinkrone, asinkrone i istosmjerne strojeva. Proces ispitivanja ovih električnih strojeva provodi se prema strogim propisima, pravilnicima i normama kako bi se osigurala njihova ispravnost i pouzdanost u radu.

2. REGULATIVA ZA ISPITIVANJE ELEKTRIČNIH STROJEVA

Regulativa za ispitivanje električnih strojeva obuhvaća skup pravila, zakona i normi koji su namijenjeni za osiguravanje sigurnosti, funkcionalnosti i usklađenosti električnih strojeva s traženim zahtjevima.

Njena važnost proizlazi iz sljedećih razloga:

- Sigurnost radnika i korisnika

Električni strojevi mogu predstavljati ozbiljan rizik od električnih udara, požara ili drugih opasnosti ako nisu pravilno ispitani i održavani. Regulativa postavlja standarde za minimalne sigurnosne zahtjeve kako bi se zaštitili radnici i korisnici koji su u doticaju s električnim strojevima.

- Očuvanje imovine

Ispitivanje električnih strojeva pomaže u očuvanju imovine tako što smanjuje rizik od kvarova, šteta i nenadanih troškova popravaka ili zamjene.

- Sukladnost s zakonodavstvom

Svaka organizacija mora poštovati zakonske propise koji se odnose na električne instalacije i opremu. Regulativa za ispitivanje električnih strojeva pruža smjernice o tome kako izvoditi ispitivanje i održavanje u skladu s tim zakonima.

- Poboljšanje funkcionalnosti

Redovito ispitivanje može pomoći u identifikaciji potencijalnih problema ili nedostataka kod električnih strojeva, što može doprinijeti poboljšanju njihove funkcionalnosti i produženju životnog vijeka.

- Standardizacija praksi

Regulativa često uključuje primjenu međunarodnih normi i praksi, čime se osigurava da se isti sigurnosni standardi primjenjuju na globalnoj razini, što je posebno važno u multinacionalnim kompanijama.

2.1. Interni pravilnik o ispitivanju i održavanju elektropostrojenja

Interni pravilnik o ispitivanju i održavanju elektropostrojenja važan je dokument za osiguranje sigurnosti, pouzdanosti i dugovječnosti električnih uređaja i strojeva u elektropostrojenjima određenih organizacija. Njegova dosljedna primjena pomaže u sprječavanju nezgoda, štiti osoblje i imovinu organizacije te osigurava usklađenost s relevantnim regulatornim zahtjevima.

Interni pravilnik o ispitivanju i održavanju elektropostrojenja obično obuhvaća sljedeće stavke:

- Opseg primjene

Pravilnik treba jasno definirati koje vrste električnih strojeva ili opreme obuhvaća.

- Periodičnost ispitivanja

Određuje se koliko često se trebaju provoditi pregledi i ispitivanja električnih strojeva. Obično se periodičnost određuje prema vrsti opreme, njezinoj kritičnosti i uvjetima rada.

- Metodologija ispitivanja

Pravilnik precizira koje metode i postupci ispitivanja trebaju biti korišteni. To se može odnositi na vizualne preglede, testiranja funkcionalnosti, mjerenje električnih parametara, ispitivanje izolacije, ispitivanje uzemljenja i sl.

- Odgovornosti i ovlaštenja

Definira se tko je odgovoran za provođenje ispitivanja (npr. električari, specijalizirane tvrtke) te koji su zahtjevi za obuku i certifikaciju osoba koje provode ispitivanja.

- Mjere održavanja i popravaka

Pravilnik treba sadržavati smjernice o provođenju održavanja te postupanje s uređajima koji ne prođu ispitivanje ili koji zahtijevaju popravak. To može uključivati privremene obustave rada, označavanje kao neispravno ili označavanje kao isključeno iz upotrebe dok se ne izvrši popravak.

- Sigurnosni aspekti

Naglašavaju se sigurnosni aspekti vezani uz ispitivanje, uključujući mjere zaštite od električnih udara, požara i drugih opasnosti koje se mogu pojaviti tijekom ispitivanja.

- Dokumentiranje rezultata

Propisuju se zahtjevi o dokumentiranju rezultata ispitivanja, uključujući evidenciju o izvršenim ispitivanjima, zabilješke o eventualnim nedostacima ili potrebnim popravcima te rokove za njihovo rješavanje.

- Pravila za izmjene i nadogradnje

Pravilnik treba definirati postupke za ažuriranje pravilnika te obavezne revizije, npr. za slučaj promjene normi ili uvođenja novih pravila.

Pri izradi internog pravilnika o ispitivanju i održavanju elektropostrojenja treba uzeti u obzir niz faktora kako bi se osigurala sigurnost, usklađenost s propisima i optimalno funkcioniranje opreme. Interni pravilnik treba biti u skladu s zakonskim propisima i pravilnicima, pravilima struke, uputama proizvođača opreme te poslovnom politikom organizacije kojoj pripada elektropostrojenje. Na slici 2.1 su prikazani zahtjevi za izradu internog pravilnika o ispitivanju i održavanju elektropostrojenja.



Slika 2.1. Zahtjevi za izradu internog pravilnika o ispitivanju i održavanju elektropostrojenja

Interni pravilnik treba biti usklađen s nacionalnim zakonodavstvom i propisima koji se odnose na sigurnost elektropostrojenja, radna okruženja, zaštitu na radu, zaštitu okoliša i sl. Ovi propisi obično postavljaju minimalne zahtjeve za ispitivanje, održavanje i sigurnost elektropostrojenja.

Specifična stručna pravila i preporuke važna su jer se temelje na iskustvu i najboljim praksama struke. Primjerice, preporuke inženjerskih ili elektrotehničkih udruženja mogu detaljnije definirati norme za ispitivanje, mjerenja, i održavanje elektropostrojenja.

Proizvođači elektroopreme često daju specifične smjernice za redovno održavanje, ispitivanje i upotrebu svojih proizvoda kako bi se osigurala sigurnost i produžio radni vijek opreme. Ove upute treba uključiti u pravilnik kako bi se osigurala usklađenost s preporučenim praksama proizvođača.

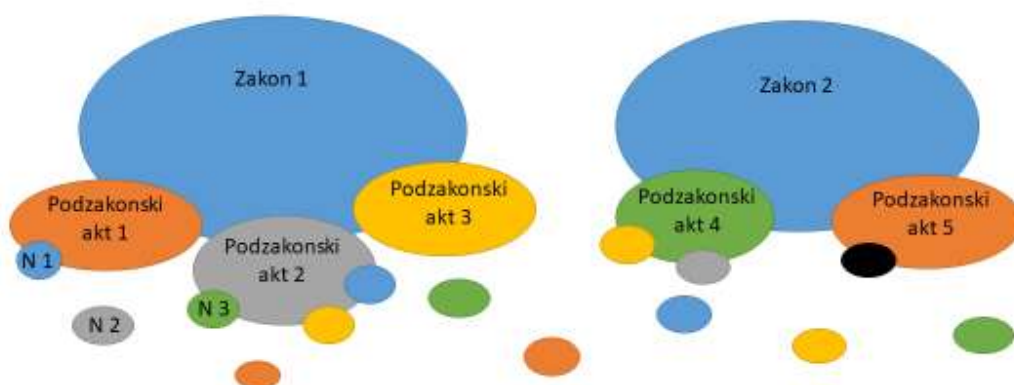
Interni pravilnik bi trebao biti i u skladu s poslovnom politikom organizacije, uključujući financijske prioritete, ciljeve učinkovitosti, planove održavanja i sigurnosne standarde koji su specifični za organizaciju.

Pravilnik treba biti dinamičan dokument koji se redovito revidira kako bi se osigurala usklađenost s promjenama zakona, tehnološkim napretkom, novim saznanjima o sigurnosnim rizicima te promjenama u poslovnoj politici i tehnološkim potrebama organizacije.

Uvažavanje navedenih elemenata osigurava da interni pravilnik o ispitivanju i održavanju elektropostrojenja bude sveobuhvatan, praktičan i u skladu sa svim relevantnim aspektima koji su bitni za sigurno i efikasno funkcioniranje elektropostrojenja.

2.2. Zakonski propisi i pravilnici

Zakonski propisi i pravilnici za ispitivanje elektropostrojenja obuhvaćaju nekoliko različitih vrsta pravnih akata koji zajedno čine strukturu zakonske regulative, a to su zakoni, podzakonski akti i obavezne norme. Struktura navedene zakonske regulative je prikazana na slici 2.2.



Slika 2.2. Struktura zakonske regulative

Zakoni su najviši pravni akti koji se odnose na reguliranje ispitivanja elektropostrojenja. Oni obično uspostavljaju osnovne zahtjeve, ciljeve i opće principe koji se primjenjuju na sve aspekte ispitivanja, sigurnosti i upravljanja elektropostrojenjem. Pisani su u pravnoj formi i uglavnom se bave širim pravnim i društvenim pitanjima.

Podzakonski akti su pravni propisi koji se donose na temelju ovlasti iz zakona radi detaljnijeg uređenja specifičnih aspekata, u ovom slučaju ispitivanja elektropostrojenja. To mogu biti

uredbe, pravilnici, upute, smjernice ili drugi podzakonski akti koji preciziraju tehničke standarde, procedure ispitivanja, obavezne dokumentacije, rokove izvršenja, itd. Oni ulaze dublje u tehničke detalje i specifičnosti primjene zakona. Pisani su obično u suradnji pravnika i stručnjaka iz odgovarajućeg područja.

Obavezne norme su tehnički dokumenti koji definiraju specifične zahtjeve i smjernice za proizvode, usluge ili procese. U kontekstu ispitivanja elektropostrojenja, to uključuje različite norme kao što su norme za sigurnost električnih instalacija, norme za ispitivanje električne opreme, norme za zaštitu od električnih udara, zaštitu od požara i slično. Norme pišu stručnjaci iz odgovarajućih strukovnih udruženja ili organizacija za normizaciju.

Zakoni usmjeravaju donošenje podzakonskih akata, odnosno daju okvir i ovlasti za detaljniju regulaciju. Podzakonski akti zatim specificiraju tehničke detalje i operativne zahtjeve, dok norme služe kao konkretne smjernice za izvedbu i provedbu tehničkih zahtjeva u praksi. Dakle, zakoni upućuju na podzakonske akte, a podzakonski akti dalje upućuju na norme koje se trebaju primjenjivati.

U Republici Hrvatskoj, ispitivanje i održavanje elektropostrojenja regulirano je nizom zakonskih propisa i podzakonskih akata. U nastavku je naveden pregled odgovarajućih zakona te su izdvojeni određeni podzakonski akti i norme relevantni za ovo područje:

- Zakoni

1. Zakon o zaštiti na radu; propisuje opće zahtjeve za zaštitu zdravlja i sigurnosti radnika na radu, uključujući mjere koje se odnose na rad s električnom energijom.
2. Zakon o energiji; regulira sve aspekte proizvodnje, distribucije i korištenja energije u Republici Hrvatskoj, uključujući i sigurnosne aspekte električnih instalacija.
3. Zakon o prostornom uređenju i gradnji; definira pravila i procedure za gradnju objekata, uključujući elektroenergetska postrojenja i infrastrukturu.

- Podzakonski akti

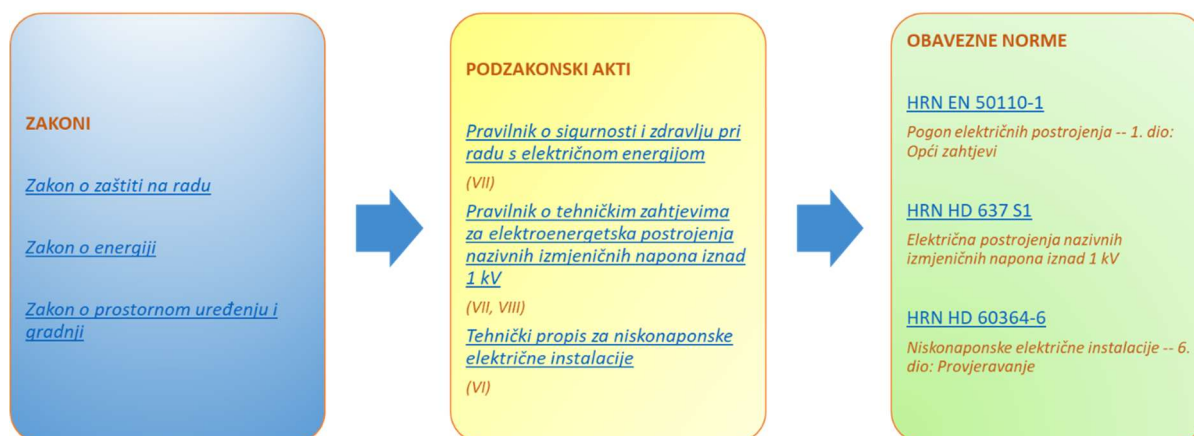
1. Pravilnik o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom; precizira specifične zahtjeve za sigurnost i zdravlje pri radu s električnom energijom, uključujući postupke ispitivanja, zaštitu od električnih udara i slično.
2. Pravilnik o tehničkim zahtjevima za elektroenergetska postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV; propisuje tehničke zahtjeve i norme za elektroenergetska postrojenja s nazivnim naponom iznad 1 kV, uključujući i postupke ispitivanja.
3. Tehnički propisi za niskonaponske električne instalacije; definiraju specifične tehničke zahtjeve i norme za niskonaponske električne instalacije, koje uključuju i zahtjeve za ispitivanje.

- Obavezne norme

Od mnogobrojnih normi vezanih za ispitivanje elektropostrojenja, za primjer su izdvojene sljedeće norme: HRN EN 50110-1:2013 Pogon električnih postrojenja, HRN HD 637 S1:2002 Električna postrojenja nazivnih napona iznad 1 kV, HRN HD 60364-6:2016 Niskonaponske električne instalacije.

Svi ovi zakoni, podzakonski akti i norme zajedno stvaraju pravni okvir koji organizacijama omogućava da provode ispitivanja i održavanje elektropostrojenja na siguran, učinkovit i

pravno usklađen način. Važno je da organizacije redovito prate izmjene i dopune ovih regulativa kako bi osigurale kontinuiranu usklađenost s najnovijim zahtjevima i normama. Na slici 2.3 su izdvojeni zakoni i pravilnici koji se odnose na ispitivanje i održavanje elektropostrojenja.



Slika 2.3. Izdvojeni zakoni i pravilnici koji se odnose na ispitivanje i održavanje elektropostrojenja

Ispitivanja većih i složenijih električnih strojeva mogu doprinositi sigurnosti i usklađenosti građevina s zahtijevanim tehničkim standardima. U tom slučaju Zakon o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje zahtijeva da ovlašteni stručnjaci provode poslove ispitivanja, te upućuje na primjenu norme HRN EN ISO/IEC 17025 koja se odnosi na kompetenciju laboratorija za ispitivanje i kalibraciju. Time se jamči kvaliteta ispitivanja i sigurnost građevinskih objekata u skladu sa zakonskim propisima.

2.3. Norme

Norma (engl. *standard*) je dokument koji sadrži pravila, upute ili značajke za određene aktivnosti ili njihove rezultate. Donosi ga priznato tijelo uz konsenzus, kako bi se postigla najbolja moguća uređenost u određenom području. Norme bi trebale biti zasnovane na provjerenim znanstvenim, tehničkim i iskustvenim rezultatima te usmjerene na promicanje najboljih prednosti za društvo.

Bez normi, mnoge stvari na međunarodnoj razini ne bi mogle efikasno funkcionirati ili bi se suočavale s velikim poteškoćama. U nastavku je navedeno nekoliko konkretnih primjera koji pokazuju važnost normi:

- Telekomunikacije i internet

Norme vezane za TCP/IP protokole, IEEE 802.11 norme za bežične mreže (Wi-Fi), i druge međunarodne norme omogućavaju kompatibilnost među različitim mrežnim uređajima i sustavima. Zahvaljujući tim normama, korisnici mogu komunicirati putem interneta, razmjenjivati podatke i pristupati globalnim servisima bez obzira na to gdje se nalaze.

- Transport i logistika

ISO norme za kontejnere tereta, npr. ISO 6346, osiguravaju da kontejneri mogu biti jednako korišteni u svim svjetskim lukama i transportnim sustavima. To pojednostavljuje procese transporta, smanjuje vrijeme pretovara i poboljšava efikasnost logističkih radnji.

- **Financijske usluge**

EMV norme za bankovne kartice osiguravaju da kartice izdane u jednoj banci mogu biti prihvaćene i korištene u bankomatima i trgovinama diljem svijeta. To pruža korisnicima jednostavan pristup njihovim financijskim sredstvima bez obzira na to gdje se nalaze ili koju banku koriste.

- **Električna energija**

Međunarodne norme, poput norme IEC 60038 za nazivne napone, osiguravaju da elektroenergetski sustavi u različitim državama budu međusobno usklađeni. To je nužno za sigurnost i stabilnost električnih mreža te omogućava globalnu trgovinu električnom energijom.

- **Zdravstvena industrija**

Norme kao što su ISO 13485 za upravljanje kvalitetom medicinskih uređaja osiguravaju da proizvođači medicinskih uređaja poštuju visoke standarde sigurnosti i učinkovitosti, što je bitno za zaštitu pacijenata i međunarodno priznanje medicinskih proizvoda.

Svi ovi primjeri pokazuju da su norme važne za usklađivanje i standardizaciju različitih aspekata života i rada na globalnoj razini. One omogućavaju međunarodnu trgovinu, olakšavaju komunikaciju, osiguravaju kompatibilnost te poboljšavaju sigurnost, učinkovitost i kvalitetu proizvoda i usluga diljem svijeta.

Vrste normi

Postoji više vrsta normi, svaka s posebnom funkcijom i primjenom:

- Osnovna norma; pokriva široko područje ili daje opće odredbe za specifično područje,
- Terminološka norma; utvrđuje nazive, definicije i objašnjenja, ponekad s crtežima ili primjerima,
- Norma za ispitivanje; odnosi se na metode ispitivanja, uključujući uzorkovanje, redoslijed ispitivanja i sl.,
- Norma za proizvod; definira zahtjeve koje proizvod ili skupina proizvoda mora zadovoljiti,
- Norma za proces; postavlja zahtjeve koje proces mora ispuniti,
- Norma za uslugu; definira zahtjeve koje usluga mora zadovoljiti,
- Norma za sučelje; odnosi se na spojivost proizvoda ili sustava na njihovim spojnim točkama,
- Norma o potrebnim podacima; sadrži popis značajki za opis proizvoda, procesa ili usluge.

2.3.1. Normizacija

Normizacija je aktivnost uspostavljanja pravila za opću uporabu koja se odnosi na postojeće ili moguće probleme, kako bi se postigla najbolja uređenost u određenom području. Normizacija se prvenstveno sastoji od oblikovanja, izdavanja i primjene normi. Prednosti normizacije

odnose se na bolju prikladnost proizvoda, procesa i usluga njihovoj svrsi, te olakšavanje trgovine i tehničke suradnje.

Ciljevi normizacije su osigurati da određeni proizvod, proces ili usluga ispunjava svoju namjenu, ograničiti raznolikost odabirom optimalnog broja tipova ili veličina, postići kompatibilnost različitih proizvoda te zaštititi zdravlje, sigurnost i okoliš.

Normizacija se provodi prema sljedećim načelima:

- **Konsenzus**

Osnovno načelo normizacije je konsenzus, što znači opće slaganje bez značajnog protivljenja među interesnim skupinama. U procesu se uzimaju u obzir mišljenja svih zainteresiranih strana i nastoje se uskladiti različita stajališta. Konsenzus ne mora značiti jednoglasnost.

- **Uključivanje svih zainteresiranih strana**

Demokratski postupak pripreme normi uključuje sve zainteresirane strane, koje imaju pravo sudjelovati i doprinijeti izradi normi kako bi ih kasnije primijenili.

- **Javnost rada**

Postupak pripreme normi treba biti javan u smislu dostupnosti informacija o početku pripreme norme, tijelu koje je priprema, predmetnoj dokumentaciji i fazama pripreme.

- **Stupanj razvoja tehnike**

Norma definira stupanj razvoja tehnike u trenutku izdavanja norme, temeljen na provjerenim znanstvenim, tehničkim i iskustvenim spoznajama.

- **Koherentnost zbirke normi**

Zbirka normi mora biti koherentna, što znači da norme ne smiju biti proturječne. Donošenjem nove norme za određeni predmet, stara norma se povlači.

Norme izrađuju tehnički odbori tijela i organizacija za normizaciju postupkom od šest faza:

1. faza: Poticaj
2. faza: Pripremna faza
3. faza: Nacrt odbora
4. faza: Javna rasprava
5. faza: Odobravanje
6. faza: Objava

Donošenje normi provodi se kroz tehničke odbore i pododbore koji su iz usko specijaliziranog područja u kojem se donosi norma.

2.3.2. Razine normizacije

Normizacija se može provoditi na različitim razinama: nacionalnoj, regionalnoj i međunarodnoj, slika 2.4.



Slika 2.4. Razine normizacije

Nacionalna normizacija

Poznatija nacionalna normirna tijela su:

- Hrvatski zavod za norme – HZN
- Deutsches Institut für Normung – DIN
- American National Standards Institute – ANSI
- Association Française de Normalisation - AFNOR
- British Standards Institution - BSI
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI
- Österreichisches Normungsinstitut - ON
- Slovenski Institut za Normizaciju – SIST

Poznatije nacionalne organizacije koje doprinose razvoju normi:

- Verband Deutscher Elektrotechniker - VDE
- National Electrical Manufacturers Association (USA) – NEMA
- Comitato Elettrotecnico Italiano – CEI

Regionalna normizacija

Najpoznatije europske organizacije za normizaciju su:

- Europski odbor za normizaciju - European Committee for Standardization – CEN
- Europski odbor za elektrotehničku normizaciju - European Committee for Electrotechnical Standardization – CENELEC
- Europski institut za telekomunikacijske norme - European Telecommunications Standards Institute – ETSI

Međunarodna normizacija

Najpoznatije međunarodne organizacije za normizaciju su:

- Međunarodna organizacija za normizaciju - International Organization for Standardization – ISO

- Međunarodno elektrotehničko povjerenstvo - International Electrotechnical Commission – IEC

Poznatije međunarodne organizacije koje doprinose razvoju normi su:

- Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE
- Underwriters' Laboratories - UL

Hrvatski zavod za norme

Nacionalno normirno tijelo u Republici Hrvatskoj je Hrvatski zavod za norme HZN.

Hrvatski zavod za norme HZN je član:

- Međunarodne organizacije za normizaciju - ISO
- Međunarodnog elektrotehničkog povjerenstva - IEC
- Europskog odbora za normizaciju - CEN
- Europskog odbora za elektrotehničku normizaciju - CENELEC
- Europskog instituta za telekomunikacijske norme – ETSI

Hrvatski zavod za norme svojim članstvom u međunarodnim i europskim organizacijama osigurava stalnu dostupnost međunarodnih i europskih normi u Republici Hrvatskoj. Također, omogućuje prihvaćanje tih normi na nacionalnoj razini te nudi hrvatskim predstavnicima sudjelovanje u izradi normi na međunarodnoj i europskoj razini.

2.3.3. Međunarodne organizacije za normizaciju

Međunarodna organizacija za normizaciju ISO

Međunarodna organizacija za normizaciju (engl. *International Organization for Standardization* ISO) je neovisna, nevladina međunarodna organizacija s članstvom od 172 nacionalna tijela za norme. Osnovana je 1946. godine.

Njezin zadatak je izrada i izdavanje normi te obavljanje povezanih aktivnosti u cilju olakšanja svjetske razmjene roba i usluga te razvoja suradnje. Kao nevladina organizacija, ISO nema zakonske ovlasti za nametanje svojih normi; stoga je njihova primjena dobrovoljna. Međutim, mnoge ISO norme iz područja zdravlja, sigurnosti i zaštite okoliša priznate su u nekim zemljama kao dio zakonodavnog okvira.

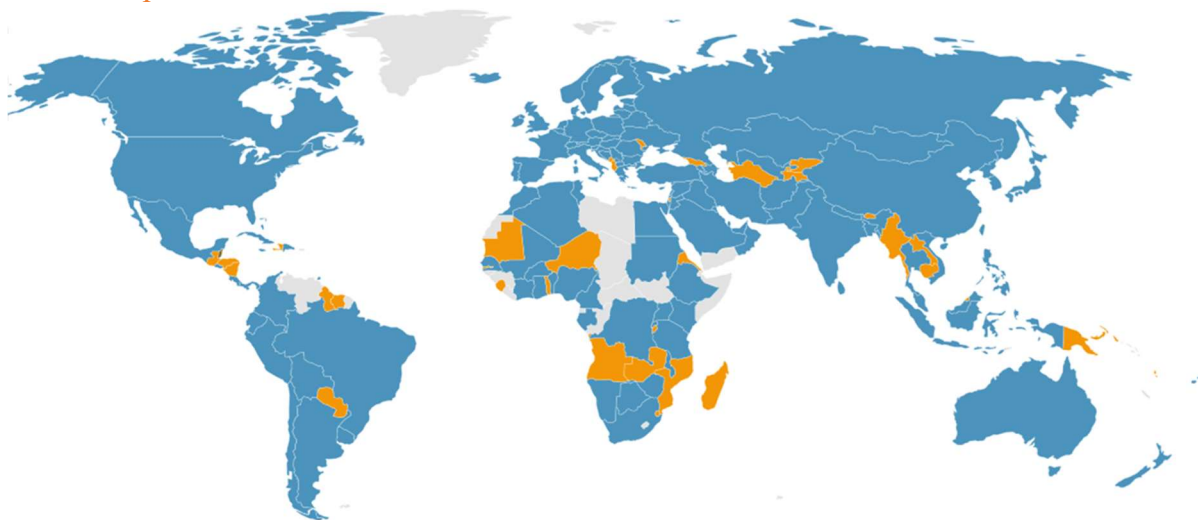
ISO razvija norme za sva tehnička područja osim elektrotehnike i elektronike, za što je odgovoran IEC.

Za donošenje normi na polju informacijske tehnologije ISO i IEC su osnovali zajednički tehnički odbor (engl. *ISO and IEC Joint Technical Committee* - JTC 1).

Na području telekomunikacija, koje je usko povezano s informacijskom tehnologijom, ISO i IEC surađuju s Međunarodnim savezom za telekomunikacije (engl. *International Telecommunication Union* – ITU).

Na slici 2.5 su prikazane zemlje članice Međunarodne organizacije za normizaciju ISO

- Punopravne članice
- Dopisne članice



Slika 2.5. Zemlje članice Međunarodne organizacije za normizaciju ISO

ISO norme su razvijene za širok spektar područja i industrija, a neke od njih su posebno prepoznatljive i široko primjenjivane.

U nastavku je popis nekoliko najpoznatijih ISO normi:

- ISO 9001 - Upravljanje kvalitetom
- ISO 14001 - Upravljanje okolišem
- ISO 45001 - Upravljanje zdravljem i sigurnošću na radu
- ISO/IEC 27001 - Upravljanje sigurnošću informacija
- ISO 22000 - Upravljanje sigurnošću hrane
- ISO 50001 - Upravljanje energijom

ISO 9000ff (engl. *full family*) je niz normi koje se odnose na sustave upravljanja kvalitetom. Najvažnije norme u obitelji ISO 9000 su:

- ISO 9000 – Sustavi upravljanja kvalitetom – Temeljna načela i terminološki rječnik
- **ISO 9001 - Sustavi upravljanja kvalitetom – Zahtjevi**
- ISO 9004 - Upravljanje u svrhu trajne uspješnosti organizacije - Pristup upravljanju kvalitetom
- ISO 19011 - Smjernice za provođenje audita sustava upravljanja

Međunarodno elektrotehničko povjerenstvo IEC

Međunarodno elektrotehničko povjerenstvo (engl. *International Electrotechnical Commission* IEC) je organizacija za razvoj i promociju međunarodnih normi u oblasti elektrotehnike i elektronike. Njihove norme obuhvaćaju širok spektar tehnologija, od osnovnih električnih uređaja do složenih sustava i tehnologija.

Osim što pomaže u usklađivanju proizvoda i sustava na globalnom nivou, IEC također doprinosi sigurnosti, efikasnosti i usklađenosti tehnologija koje se koriste širom svijeta. Kroz svoje norme, IEC omogućava tvrtkama da razvijaju proizvode koji zadovoljavaju međunarodne zahtjeve te olakšava međunarodnu trgovinu i saradnju.

Organizacija okuplja stručnjake iz različitih oblasti koji rade na kreiranju, pregledavanju i ažuriranju normi kako bi one ostale relevantne te prilagođene novim tehnologijama i izazovima.

IEC norme pokrivaju sve elektrotehničke tehnologije, uključujući elektroniku, magnetizam, elektroakustiku, telekomunikacije, te proizvodnju i distribuciju električne energije. Također obuhvaćaju opća područja poput terminologije, mjerenja, pouzdanosti, projektiranja, razvoja, sigurnosti i zaštite okoliša.

Glavni zadatak IEC-a je razvoj i izdavanje međunarodnih normi koje služe kao osnova za nacionalne norme te za olakšano međunarodno poslovanje.

Ustroj IEC-a uključuje stotine tehničkih odbora, pododbora i radnih grupa. Tehnički odbori su organizirani prema specijaliziranim područjima, te predlažu norme za svoja specifična polja.

Označavanje IEC normi sastoji se od oznake "IEC" i jedinstvenog broja norme. Nakon 1997. godine, uveden je novi sustav numeracije gdje sve IEC norme imaju brojeve koji počinju od 60000 pa nadalje. Na primjer, IEC 60034 označava normu za rotacijske električne strojeve.

Kako bi korisnici bili sigurni da su proizvodi koje kupuju proizvedeni po IEC normama, postoje potvrde (certifikati) kojima se to potvrđuje.

Najpoznatiji IEC certifikati su:

- IECQ (engl. *IEC Quality Assessment System for Electronic Components*) certifikat je usmjeren na elektroničke komponente, materijale i procese, osiguravajući da su u skladu s IEC normama,
- IECEE-CB (engl. *IEC System of Conformity Assessment Schemes for Electrotechnical Equipment and Components Certification Body*) certifikat potvrđuje da je električna oprema proizvedena i testirana u skladu s IEC normama, omogućujući globalno priznavanje,
- IECEx (engl. *IEC System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Explosive Atmospheres*) certifikat potvrđuje da je oprema namijenjena za upotrebu u eksplozivnim sredinama u skladu s relevantnim IEC normama za sigurnost i kvalitetu.

2.3.4. Načini pretraživanja normi

Pretraživanje normi treba biti što jednostavnije zbog njihovog velikog broja i raznolikosti. Pretraživanje treba omogućiti brz i učinkovit pristup relevantnim informacijama. Na taj način se osigurava primjena najnovijih i najtočnijih normi, što je važno za kvalitetu i usklađenost u različitim aktivnostima.

Oznake normi

Oznake hrvatskih normi sastoje se od predmetka, rednog broja i godine izdanja. Uz predmetak HRN može se nalaziti oznaka: ISO što znači da je norma preuzeta od ISO-a, IEC preuzeta od IEC-a, EN preuzeta od CEN/CENELEC-a, ETS preuzeta od ETSI-a, DIN preuzeta od DIN-a itd. U slučaju da je predmetak HRN bez dodatne oznake, norma je izvorna hrvatska norma.

U nastavku je naveden primjer označavanja normi:

HRN EN 60034-2-1:2014

- HRN EN - predmetak označava norme koje su izdane od HZN-a, a preuzete iz normizacijskog sustava CENELEC-a,
- 60034 – redni broj norme (rotacijski električni strojevi),
- 2-1 - dio norme (normirane metode određivanja gubitaka i korisnosti ispitivanjima),
- 2014 - godina izdavanja norme.

Norme mogu imati i dodatne oznake kao u primjeru:

HRN EN 60034-2-1:2014 2. izd. pr. (en) 90 str. (N) TO E 2

- 2. izd. – broj izdanja norme (norme se pregledavaju u roku ne dužem od pet godina, a svako pregledavanje predstavlja novo izdanje norme),
- pr. – način nastajanja norme (pr- preuzimanje),
- (en) - jezik norme (en - engleski) (HRN norme mogu biti na jeziku na kojem je izvorna norma ili se mogu prevesti na hrvatski jezik),
- 90 str. - broj stranica norme,
- (N) – cjenovni razred,
- TO E 2 - tehnički odbor koji je odgovoran za prihvatanje i održavanje norme (rotacijski strojevi),
- te u nastavku može biti naveden i naziv norme.

Međunarodna razredba normi ICS

Međunarodna razredba normi (engl. *International Classification for Standards ICS*) predstavlja hijerarhijski sustav klasifikacije koji se sastoji od tri razine. Ovaj sustav omogućuje lakše pretraživanje i organizaciju kataloga normi, čime se olakšava pronalaženje i identifikacija specifičnih normi unutar različitih područja i disciplina.

U nastavku je prikazan primjer u ICS hijerarhijskom ustroju.

ICS oznaka 29.160.01 sastavljena je od tri razine i to:

- Šire područje:
 - 29 Elektrotehnika
 - Uže područje:
 - 29.160 Rotacijski strojevi
 - Usko specijalizirano područje:
 - 29.160.01 Opće značajke rotacijskih strojeva

Ova struktura pokazuje kako se ICS oznaka 29.160.01 formira unutar hijerarhijskog sustava klasifikacije, gdje svaki broj dodaje razinu specifičnosti, počevši od širokog područja elektrotehnike, prelazeći na rotacijske strojeve, i na kraju fokusirajući se na opće značajke tih strojeva.

U tablici 2.1 naveden je primjer međunarodne razdiobe normi ICS dostupan na stranicama HZN-a.

Tablica 2.1. Primjer međunarodne razdiobe normi ICS dostupan na stranicama HZN-a

HZN - Hrvatski zavod za norme	
▶	21 MEHANIČKI SUSTAVI I SASTAVNI DIJELOVI ZA OPĆU UPOTREBU
▶	23 HIDRAULIČNI I PNEUMATSKI SUSTAVI I SASTAVNI DIJELOVI ZA OPĆU UPOTREBU
▶	25 PROIZVODNA TEHNIKA
▶	27 TEHNIKA PRIJENOSA ENERGIJE I TOPLINE
▼	29 ELEKTROTEHNIKA
▶	29 ELEKTROTEHNIKA
▶	29.020 Elektrotehnika općenito
▶	29.030 Magnetni materijali
▶	29.035 Izolacijski materijali
▶	29.040 Izolacijski fluidi
▶	29.045 Poluvodički materijali
▶	29.050 Supravodljivost i vodljivi materijali
▶	29.060 Električne žice i kabeli
▶	29.080 Izolacija
▶	29.100 Sastavni dijelovi za električnu opremu
▶	29.120 Električni pribor
▶	29.130 Rasklopni i upravljački uređaji
▶	29.140 Svjetiljke i pripadajuća oprema
▼	29.160 Rotacijski strojevi
	29.160.40 Električni agregati
	29.160.20 Generatori
	29.160.30 Motori
	29.160.99 Ostale norme koje se odnose na rotacijske strojeve

Pretraživanje normi

Norme se mogu pretraživati u katalozima različitih organizacija za normizaciju upisivanjem točne oznake norme ili korištenjem ICS klasifikacije. Tablica 2.2 prikazuje način pretraživanja kataloga hrvatskih normi.

Tablica 2.2. Pretraživanje kataloga hrvatskih normi

HZN - Hrvatski zavod za norme		
PRETRAŽIVANJE KATALOGA HRVATSKIH NORMA I PROJEKATA		
KRITERIJ ZA PRETRAŽIVANJE:		
Oznaka norme:		npr. HRN EN ISO 2
Broj norme:		npr. 9000-9004
Naslov:		npr. tehnički crteži
ICS:		npr. 29.160
Tehnički odbor/pododbor:		npr. TO 145/PO 2
Tehnički odbor sa svim pododborima:		npr. TO 25
Faza:		npr. 40.10
Jezik:		npr. en
Direktiva/Uredba:		npr. 2000/95/EC
Oznaka izvornika:		npr. 643:2001
Ustanova izvornika:		npr. CEN
PODRUČJE PRETRAŽIVANJA:	PRIKAZ REZULTATA PRETRAŽIVANJA PO:	
☒ Norme	☒ Broju hrvatske norme	
☐ Program rada	☐ ICS-u	
☐ Povučene norme	☐ Tehničkom odboru	
	☐ Fazi pripreme norme	
☐ PRIKAŽI	☐ Međunarodnim i europskim normama	
	☐ Direktivi/Uredbi	

Primjer normi koje su zanimljive za ispitivanje električnih strojeva

Transformatori - IEC 60076

- IEC 60076-11

Suhi transformatori (poglavlje 14 TEST)

(ICS 29.180)

- IEC 60076-3

Energetski transformatori -- 3. dio: Izolacijske razine, dielektrična ispitivanja i vanjski razmaci u zraku

(ICS 29.180)

Elektromotori - IEC 60034

- IEC 60034-1

Rotacijski električni strojevi -- 1. dio: Nazivne vrijednosti i radna svojstva

(ICS 29.160.01)

- IEC 60034-27-4

Rotacijski električni strojevi -- Dio 27-4: Mjerenje otpora izolacije i indeksa polarizacije na izolaciji namota rotacijskih električnih strojeva

(ICS 29.160.01)

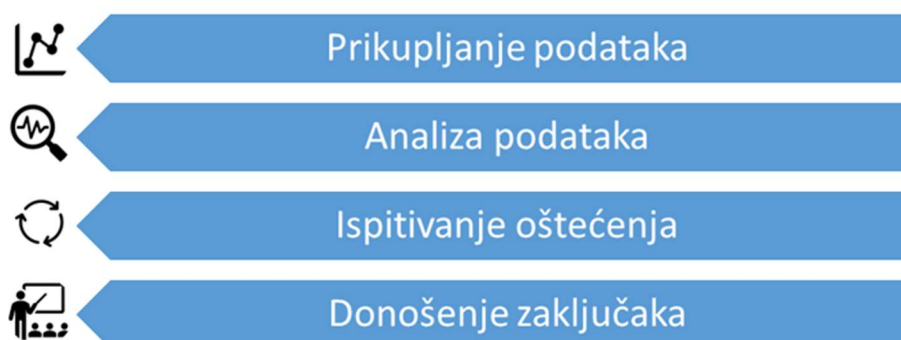
3. ISPITIVANJE I ODRŽAVANJE TEHNIČKIH SUSTAVA

Električni strojevi čine kapitalnu opremu u proizvodnji i prijenosu električne energije, kao i u radu mnogih industrijskih pogona. Njihova funkcionalnost izravno utječe na učinkovitost i kontinuitet opskrbe električne energije. Zastoji u radu ovih strojeva mogu prouzročiti značajne gubitke, bilo u obliku neisporučene energije ili smanjenja proizvodnje, što može imati direktne i indirektne ekonomske posljedice. Stoga postoji stalna potreba za povećanjem pouzdanosti i raspoloživosti električnih strojeva. To dovodi do razvoja naprednih metoda dijagnostike, detekcije kvarova, nadzora i zaštite, koji omogućavaju pravovremeno otkrivanje i rješavanje problema, čime se smanjuju potencijalni gubici i povećava učinkovitost sustava.

Ispitivanje i održavanje električnih strojeva provodi se u skladu s općim pravilima koja vrijede za ispitivanje i održavanje tehničkih sustava. Ta opća pravila dopunjena su dodatnim smjernicama koje se odnose na specifičnosti određenih električnih strojeva, kako bi se osigurala njihova optimalna funkcionalnost i sigurnost u radu.

3.1. Ispitivanje tehničkih sustava

Općenito ispitivanje, pa tako i ispitivanje tehničkih sustava, obuhvaća nekoliko faza. Na slici 3.1 prikazane su četiri osnovne faze prema kojima se provodi ispitivanje tehničkih sustava.



Slika 3.1. Osnovne faze ispitivanja tehničkih sustava

Prva faza je prikupljanje podataka o radu sustava i stanju njegovih komponenata, kao što su npr. napon, struja, temperatura, vibracije i sl..

Dalje, ovi podaci čine osnovu za analizu, gdje se koriste različite metode, poput statističke i spektralne analize, za identifikaciju obrazaca i potencijalnih problema.

Sljedeći korak je ispitivanje oštećenja, koje uključuje detaljne provjere i mjerenja, vizualne inspekcije te upotrebu posebnih instrumenata za potvrdu i istraživanje uzroka problema.

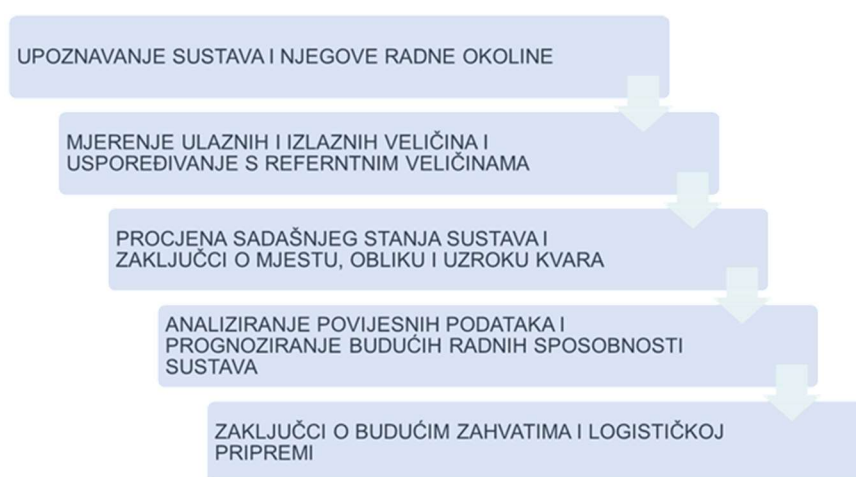
Na kraju, donošenje zaključaka na osnovu kojih stručnjaci daju preporuke za popravke, održavanje ili poboljšanje procedura kako bi se spriječili budući problemi. Ovaj proces bitan je za održavanje dugotrajne i pouzdane funkcionalnosti tehničkih sustava.

Ako ispitivanje uključuje temeljito prikupljanje i ekspertnu analizu podataka uz donošenje relevantnih zaključaka, tada se govori o tehničkoj dijagnostici.

Tehnička dijagnostika

Tehnička dijagnostika, inspirirana medicinskom dijagnozom, koja potječe od grčke riječi "diagnosis" što znači prepoznavanje ili ocjenjivanje, razvija se posljednjih desetljeća kao važna znanstvena i stručna grana. Ona obuhvaća sve aktivnosti usmjerene na utvrđivanje trenutnog stanja tehničkog sustava te predviđanje njegove buduće radne sposobnosti. Kroz primjenu dostupnih mjernih metoda, procedura i ekspertnih znanja, tehnička dijagnostika omogućava detaljnu analizu i ocjenu tehničkog sustava, čime doprinosi njegovoj pouzdanosti i dugotrajnosti.

Tehnička dijagnostika obuhvaća nekoliko faza koje osiguravaju sveobuhvatno razumijevanje i održavanje tehničkih sustava. Osnovne faze tehničke dijagnostike prikazane su na slici 3.2.



Slika 3.2. Osnovne faze tehničke dijagnostike

Prva faza, upoznavanje sustava i njegove radne okoline, uključuje proučavanje tehničkih specifikacija, operativnih uvjeta i povijesti sustava kako bi se steklo temeljito razumijevanje rada sustava i okruženja u kojem djeluje.

Sljedeća faza, mjerenje ulaznih i izlaznih veličina i uspoređivanje s referentnim veličinama, uključuje prikupljanje podataka o naponu, struji, temperaturi itd. te njihovu usporedbu s normalnim ili optimalnim vrijednostima kako bi se prepoznala odstupanja i potencijalni problemi.

Treća faza se fokusira na procjenu sadašnjeg stanja sustava, gdje se na temelju prikupljenih podataka donose zaključci o eventualnom mjestu, obliku i uzroku kvarova. Ova procjena omogućava ciljani popravak i intervenciju.

Analiziranje povijesnih podataka o radu sustava omogućava prognoziranje budućih radnih sposobnosti i prepoznavanje potencijalnih rizika.

Na kraju, zaključci o budućim zahvatima i logističkoj pripremi uključuju izdavanje preporuka za održavanje, popravke ili zamjenu dijelova te planiranje logističkih aktivnosti potrebnih za provedbu tih zahvata.

Dijagnostičke metode mogu se klasificirati u dvije glavne kategorije: subjektivne metode, koje se oslanjaju na ljudska osjetila kao što su vid, sluh i dodir, te objektivne metode, koje koriste mjerne instrumente za precizno prikupljanje podataka. Subjektivne metode omogućuju brzo

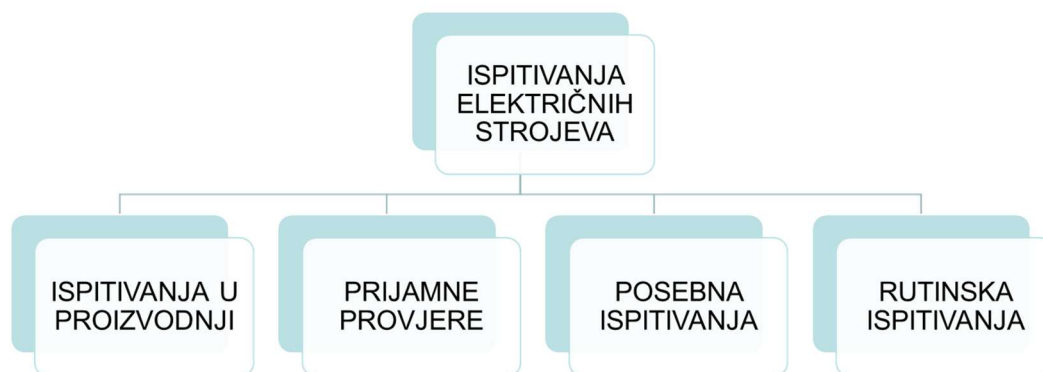
prepoznavanje očiglednih problema, dok objektivne metode pružaju kvantitativne podatke koji su bitni za detaljnu analizu i točnu dijagnostiku.

Dijagnostička oprema može se podijeliti u tri glavne kategorije s obzirom na njenu primjenu i mobilnosti. Stacionirana oprema koristi se za laboratorijska ispitivanja tijekom proizvodnje u specijaliziranim ispitnim stanicama, omogućavajući detaljnu analizu i testiranje u kontroliranim uvjetima. Prijenosna oprema omogućava terenska ispitivanja na mjestu ugradnje sustava, pružajući fleksibilnost u prikupljanju podataka i dijagnosticiranju problema izravno na lokaciji gdje se sustav koristi. Ugrađena oprema nudi stalni nadzor i automatiziranu dijagnostiku unutar samog sustava, što omogućava kontinuirano praćenje i brzu reakciju na potencijalne kvarove ili nepravilnosti.

Tehnička dijagnostika igra važnu ulogu u preventivnom održavanju temeljenom po stanju, poznatom i kao prediktivno održavanje. Ova metoda oslanja se na pravovremeno prikupljanje i analizu podataka kako bi se predvidjeli budući problemi i omogućilo planiranje intervencija prije nego što dođe do ozbiljnih kvarova. Korištenjem dijagnostičke opreme za praćenje stanja sustava u sklopu preventivnog održavanja može se značajno povećati pouzdanost i učinkovitost tehničkih sustava, smanjujući tako rizik od neočekivanih zastoja i produžujući vijek trajanja opreme.

Podjela ispitivanja tehničkih sustava

Ispitivanja tehničkih sustava možemo podijeliti na ispitivanja u proizvodnji, prijamne provjere, posebna ispitivanja i rutinska ispitivanja. Na slici 3.3 prikazana navedena podjela za slučaj ispitivanja električnih strojeva.



Slika 3.3. Podjela ispitivanja električnih strojeva

Kontrola i ispitivanje u proizvodnji

Kontrola i ispitivanje u proizvodnji temelji se na sustavu kvalitete prema seriji normi ISO 9000, koja je bitna za izgradnju povjerenja između kupca i proizvođača. Ove norme definiraju smjernice za dokazivanje usklađenosti proizvoda s ugovorenim svojstvima, a posebno norma ISO 9001 osigurava visoku kvalitetu u svim fazama – od projektiranja i razvoja do proizvodnje, ugradnje i servisiranja. Kontrola kvalitete obuhvaća širi proces praćenja i osiguranja kvalitete tijekom proizvodnog procesa, dok se pojam ispitivanje odnosi na provjeru određenih svojstava proizvoda. Obje aktivnosti su bitne komponente sustava upravljanja kvalitetom, osiguravajući da proizvodi ispunjavaju potrebne norme i specifikacije.

Kontrola proizvoda provodi se tijekom cijelog proizvodnog procesa i obuhvaća tri glavne faze:

- ulaznu kontrolu kvalitete,
- međufaznu kontrolu kvalitete,
- završnu kontrolu kvalitete.

Ulazna kontrola kvalitete provodi provjeru kvalitete ulaznih materijala, poluproizvoda i proizvoda kako bi se osiguralo da svi sastavni dijelovi zadovoljavaju potrebne norme prije početka proizvodnje. Međufazna kontrola kvalitete fokusira se na provjeru proizvoda u određenim fazama proizvodnje, osiguravajući da se svi koraci proizvodnog procesa odvijaju u skladu s definiranim specifikacijama i normama. Na kraju, završna kontrola kvalitete uključuje provjeru gotovog proizvoda kroz završna ispitivanja i mjerenja, čime se potvrđuje usklađenost proizvoda s ugovorenim zahtjevima prije primopredaje kupcu.

Prijamna provjera

Prijamna provjera obuhvaća ispitivanje nove opreme pri preuzimanju ili nakon montaže, često u sklopu primopredajne procedure za veće sustave. Ova ispitivanja prije puštanja u prvi pogon uključuju utvrđivanje usklađenosti opreme sa specifikacijama, te provjeru da je oprema pravilno instalirana i bez oštećenja. Tijekom puštanja u prvi pogon, provodi se utvrđivanje ispravnosti rada opreme i određivanje kriterija za buduća ispitivanja. Također, u ovu grupu provjera često spadaju ispitivanja koja se obavljaju u garancijskom roku radi potvrde ispravnosti rada opreme.

Posebna ispitivanja

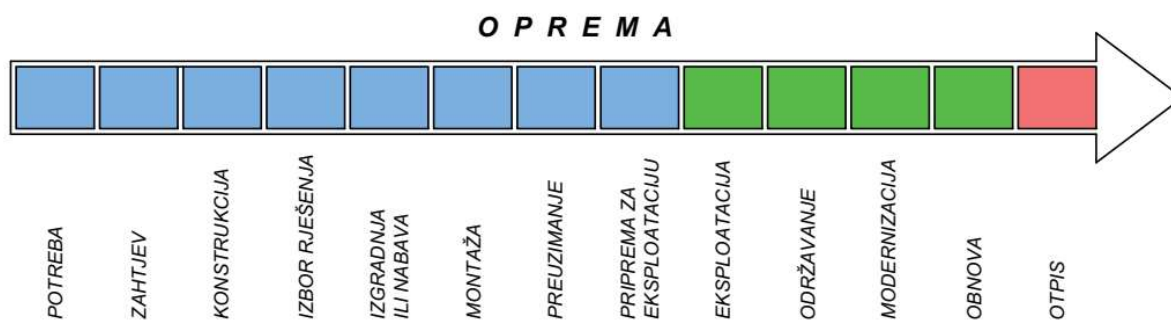
Posebna ispitivanja provode se na opremi koja je u kvaru, oštećena ili bila izložena nepovoljnim uvjetima koji su mogli utjecati na njenu funkcionalnost. Ova ispitivanja imaju za cilj utvrđivanje razloga i uzroka kvara ili oštećenja, kako bi se izvršio popravak te razumjeli problemi koji su nastali. Nakon popravka ili drugih zahvata, obavlja se dodatno ispitivanje kojim se provjerava ispravnost rada opreme. Ispitivanja se prilagođavaju svakom pojedinačnom slučaju, uzimajući u obzir specifičnosti zahvata te stanje opreme.

Rutinska ispitivanja

Rutinska ispitivanja provode se u redovitim intervalima tijekom cijelog životnog vijeka opreme i predstavljaju važan dio električnog preventivnog održavanja. Ova ispitivanja omogućuju praćenje i analizu rezultata što pomaže u predviđanju mogućih kvarova, ocjeni stanja opreme, određivanju vremena zamjene kritičnih dijelova te planiranju potrebnih aktivnosti. Rutinska ispitivanja igraju bitnu ulogu u unapređenju održavanja opreme, osiguravajući njezinu pouzdanost, učinkovitost i dugotrajnost.

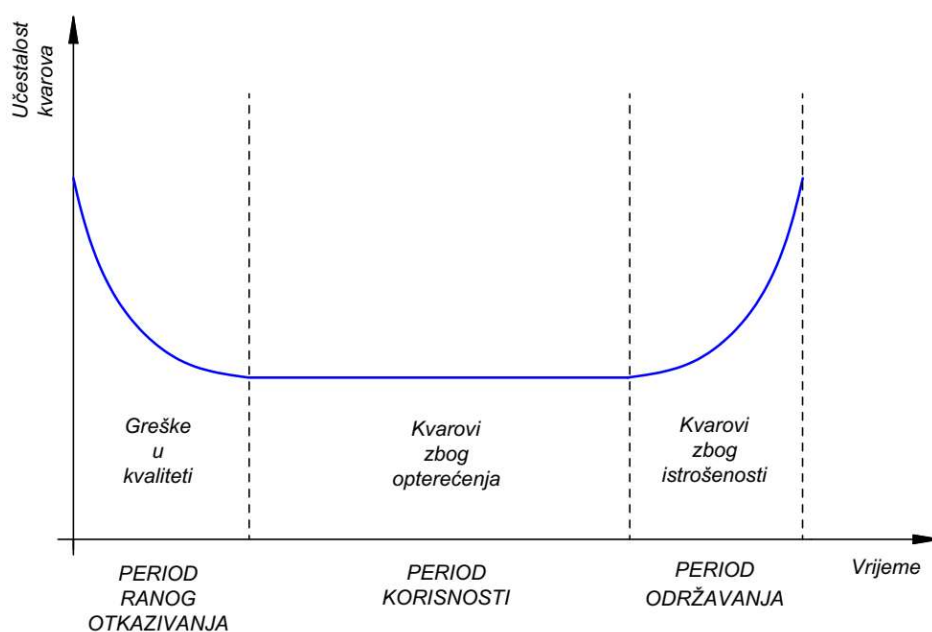
3.2. Općenito o održavanju tehničkih sustava

Životni vijek opreme može se prikazati kroz veći broj faza, koje se ukratko mogu navesti kao projektiranje, izgradnja, montaža, korištenje, održavanje i otpis. Faze kroz životni vijek opreme detaljnije su prikazane na slici 3.4.



Slika 3.4. Faze životnog vijeka opreme

Na početku životnog vijeka opreme, kvarovi se povezuju s proizvodnim greškama i taj period se naziva period ranog otkazivanja. Poslije toga nastupa period korisnosti kada je učestalost kvarova najniža. Kako oprema stari, dolazi do trošenja dijelova i povećanja broja kvarova. U posljednjoj fazi životnog vijeka, učestalost kvarova značajno se povećava, što često dovodi do potrebe za intenzivnijim održavanjem ili zamjenom opreme. Na slici 3.5 prikazan je odnos učestalosti kvarova s obzirom na pojedine periode u životnom vijeku opreme.



Slika 3.5. Odnos učestalosti kvarova s obzirom na pojedine periode u životnom vijeku opreme

Da bi se produžio životni vijek opreme i osiguralo njeno pravilno funkcioniranje u skladu s namjenom, potrebno je redovito vršiti održavanje.

U nastavku su definirani osnovni pojmovi vezani za proces održavanja.

- Održavanje

Skup svih tehničkih, administrativnih i menadžerskih aktivnosti koje se provode tijekom životnog vijeka sustava kako bi se osiguralo njegovo funkcioniranje u skladu s predviđenim zahtjevima.

- Preventivno održavanje

Planirane aktivnosti održavanja koje se izvode prema unaprijed definiranim intervalima ili kriterijima, s ciljem smanjenja vjerojatnosti kvara ili pogoršanja karakteristika sustava.

- Pouzdanost

Vjerojatnost da će sustav izvršavati zahtijevanu funkciju na zadani način u zadanom vremenskom razdoblju.

- Raspoloživost

Sposobnost sustava da je u stanju izvršavati zahtijevanu funkciju na zadani način u zadanom vremenskom razdoblju.

- Kritična mjesta

Pozicije, komponente ili podsustavi u kojima se kvarovi javljaju češće nego što je uobičajeno.

- Oštećenje

Promjena u stanju podsustava koja može dovesti do kvara.

- Kvar

Stanje u kojem sustav ne može ispravno obavljati svoju funkciju prema zadanim specifikacijama. Posljedica kvara može biti nepoželjna promjena parametara, što onemogućava pravilno funkcioniranje sustava ili dovodi do trajnog gubitka njegove sposobnosti za obavljanje funkcije.

- Ekspertiza

Procjena stanja sustava uz pružanje mišljenja i preporuka za potrebne korektivne mjere, na temelju provedenih dijagnostičkih ispitivanja i specijalističkog znanja.

Najčešći uzroci kvarova su:

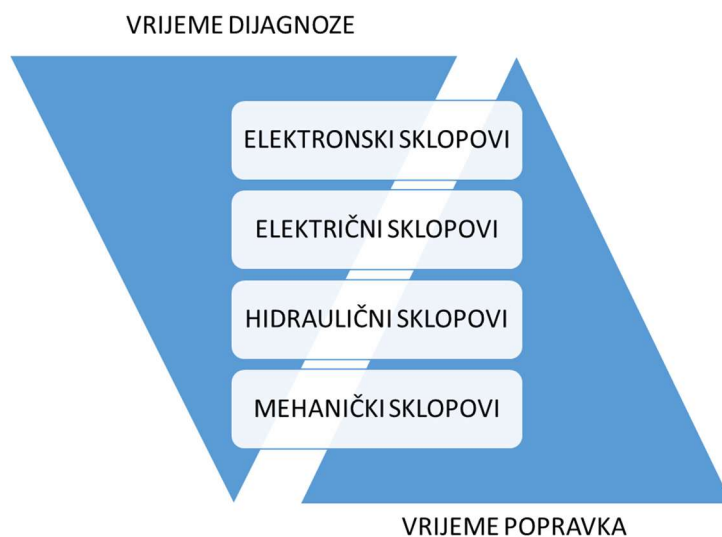
- Trošenje – proces postupne degradacije materijala zbog dugotrajne upotrebe, uključujući koroziju, habanje, starenje i zamor materijala,
- Preopterećenje – nastaje kada sustav ili njegova komponenta bude izložena naprezanjima koja prelaze konstrukcijska ograničenja opreme,
- Vanjska djelovanja – utjecaji iz okoline kao što su nepovoljni vremenski uvjeti ili nepredvidive vanjske sile koje mogu uzrokovati kvarove,
- Loš nadzor i održavanje – neadekvatno praćenje i održavanje sustava koje može dovesti do nepravilnog funkcioniranja i kvarova.

Na slici 3.6 su prikazane aktivnosti koje se provode tijekom određene intervencije održavanja.



Slika 3.6. Aktivnosti pri intervenciji održavanja

Na slici 3.7 je prikazan odnos vremena dijagnoze i popravka kvara za različite vrste sklopova.



Slika 3.7. Odnos vremena dijagnoze i popravka kvara za različite sklopove

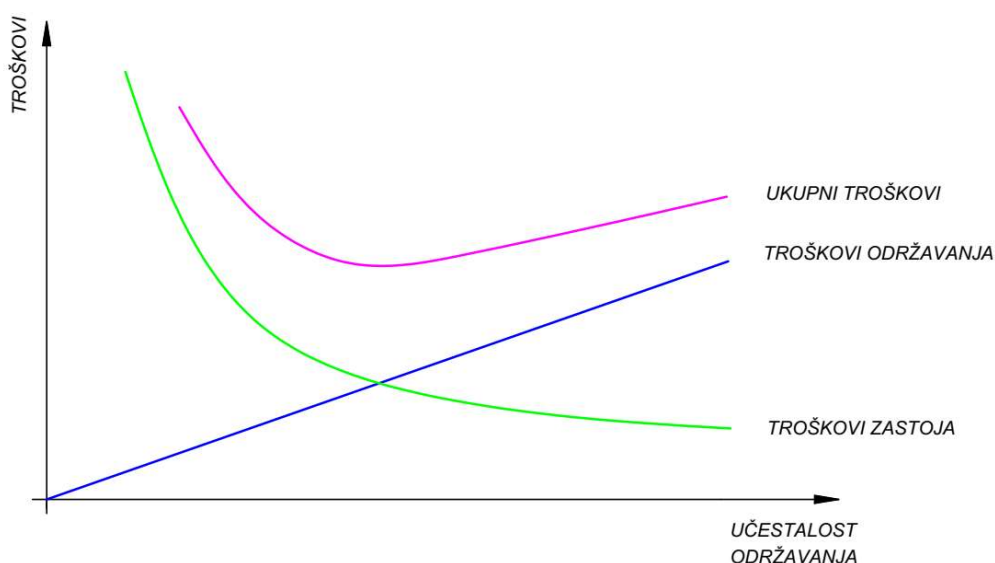
Dugoročni ciljevi održavanja su:

- Visoka pouzdanost sustava – osiguranje da sustav funkcionira s visokim stupnjem pouzdanosti,
- Visoka raspoloživost sustava – povećanje sposobnosti sustava da bude operativan i dostupan kada je potrebno,
- Povećanje učinkovitosti sustava – unapređenje radnih karakteristika i produktivnosti sustava,
- Planiranje zastoja – organizacija i optimizacija planiranih prekida u radu radi održavanja i popravaka,

- Skraćenje vremena trajanja remonta – smanjenje trajanja popravaka kako bi se minimiziralo vrijeme kada sustav nije u funkciji,
- Produženje međuremontnog perioda – produženje razdoblja između dva velika remonta,
- Smanjenje troškova održavanja – optimizacija troškova povezanih s održavanjem kako bi se postigla financijska ušteda,
- Ekološka prihvatljivost – odabir održavanja koje minimizira negativan utjecaj na okoliš.

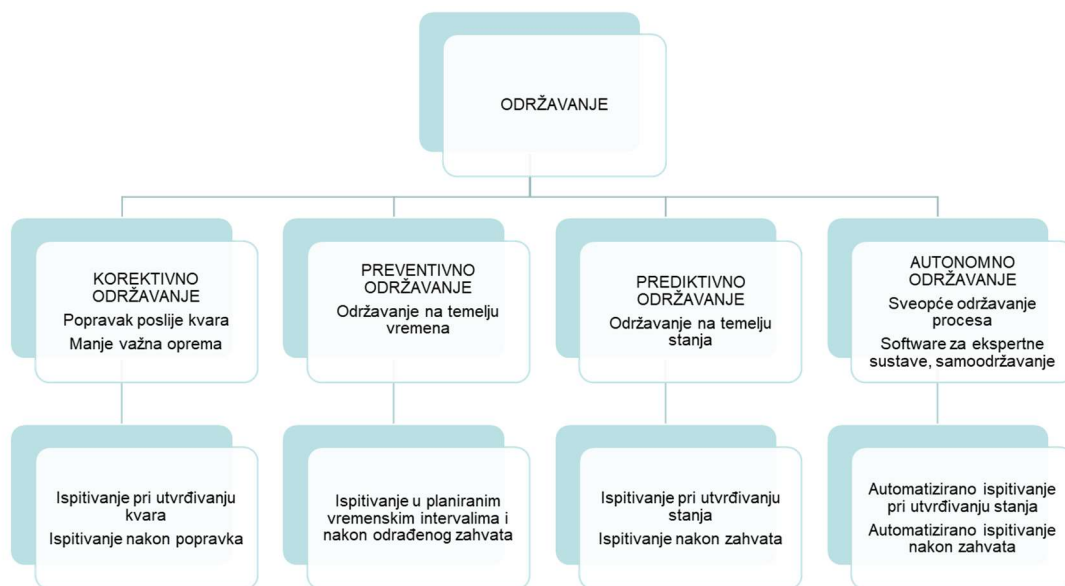
Ekonomičnost održavanja nužna je za većinu tehničkih sustava, gdje se traži postizanje visoke raspoloživosti i pouzdanosti uz minimiziranje troškova pogona i održavanja. Ovi zahtjevi često su u suprotnosti, što znači da je potrebno pronaći optimalnu ravnotežu između njih. Loše održavanje može dovesti do prečestih zastoja u proizvodnji, dok kvalitetnije održavanje obično povećava troškove održavanja. Stoga, ekonomično održavanje podrazumijeva postizanje najnižeg mogućeg zbroja troškova zastoja i troškova održavanja. Odabir modela održavanja ovisi o važnosti procesa i opreme koja se održava, kao i o poslovnoj politici organizacije.

Na slici 3.8 prikazan je odnos troškova i učestalosti održavanja.



Slika 3.8. Odnos troškova i učestalosti održavanja

Postoji više vrsta održavanja, a koja se mogu kategorizirati kao korektivno, preventivno, prediktivno i autonomno održavanje. Na slici 3.9 navedene su pojedine vrste održavanja, uz kratki opis i pripadajuća ispitivanja.



Slika 3.9. Vrste održavanja i pripadajuća ispitivanja

3.3. Električno preventivno održavanje

Električno preventivno održavanje (engl. *Electrical Preventive Maintenance EPM*) je vrsta održavanja koji se često koristi za održavanje elektropostrojenja. Usmjereno je na minimiziranje broja kvarova i smanjenje rizika po život i zdravlje ljudi koji može nastati zbog kvarova električne opreme. Budući da je trošenje električne opreme normalna pojava koja može dovesti do zastoja ili nepravilnog rada, važno je uspostaviti učinkovit program održavanja i ispitivanja. Preventivno održavanje može biti organizirano prema vremenskim ciklusima, stanju opreme, pouzdanosti ili riziku. Glavni cilj je prepoznati i otkloniti uzroke koji bi mogli dovesti do potencijalnih kvarova. Osnovno pravilo u preventivnom održavanju je da se oprema održava suhom, hladnom, čistom i dobro pričvršćenom kako bi se osigurala njezina pouzdanost i dugovječnost.

Na izbor EPM-a utječu različiti faktori, uključujući nekoliko aspekata. Prvo je potrebno sagledati utjecaj kvara na sigurnost te pažljivo razmotriti kako bi se minimizirao rizik za ljude i okoliš. Također, utjecaj kvara na produktivnost i profitabilnost igra značajnu ulogu, jer česti kvarovi mogu smanjiti proizvodne kapacitete i utjecati na financijske rezultate. Troškovi preventivnog održavanja također su važan faktor, budući da je potrebno uravnotežiti troškove održavanja s koristima koje ono donosi. Predvidivost kvara, koja može biti temeljena na vremenu rada, ciklusima rada ili očiglednim indicijama, pomaže u planiranju učinkovitog održavanja. Učestalost kvarova i očekivani vijek trajanja opreme također utječu na odluku, jer češći kvarovi mogu zahtijevati intenzivnije održavanje. Vjerojatnost oštećenja opreme tijekom održavanja i tehnička razina osoblja za održavanje su povezani s obzirom da visoka razina stručnosti može smanjiti rizik od dodatnih oštećenja. Konačno, raspoloživost podataka o pouzdanosti opreme omogućava primjenu održavanja koje je usmjereno na pouzdanost, čime se dodatno optimizira učinkovitost održavanja.

Postupci pri intervenciji u održavanju obuhvaćaju niz pažljivo planiranih koraka kako bi se osiguralo učinkovito rješavanje problema. Proces započinje redovitim pregledima,

ispitivanjima i mjerenjima u svrhu uočavanja mogućih problema. Kada se sumnja na oštećenje ili kvar, slijedi ispitivanje kojim se dobivaju podaci potrebni za utvrđivanje razloga nastanka problema. Na temelju obrađenih podataka, donosi se odluka o potrebnom zahvatu u svrhu otklanjanja oštećenja ili kvara. Sljedeći korak uključuje provođenje tih zahvata i vraćanje sustava u funkcionalnost. Nakon provedene intervencije, vrši se ispitivanje ispravnosti rada kako bi se provjerilo da je problem riješen i sustav ponovno ispravan. Analiziraju se podaci prethodnih ispitivanja i provodi se sistematska analiza kvara u svrhu boljeg bolje razumijevanja uzroka. U konačnici, slijedi istraživanje uzroka i otklanjanje istog kako bi se spriječilo ponavljanje problema i osigurala dugoročna pouzdanost sustava. Znači cilj održavanja je otkloniti razlog i uzrok kvara.

Služba održavanja može se organizirati na različite načine kako bi se učinkovitije upravljalo procesima održavanja. Centralizirana služba održavanja koncentrira sve aktivnosti i resurse na jednom mjestu, što omogućava bolju koordinaciju i kontrolu. Decentralizirana služba raspoređuje održavanje na različite lokacije ili odjele, što može povećati fleksibilnost i brzinu reakcije na lokalne potrebe. Mješovita služba kombinira elemente centraliziranog i decentraliziranog pristupa, omogućujući optimizaciju resursa i reagiranje na specifične zahtjeve. Specijalizirana služba fokusira se na određene vrste održavanja ili specifične tehnologije, pružajući visoku stručnost i detaljno znanje u određenom području.

Kvalifikacije osoblja za električno održavanje razlikuju se ovisno o složenosti zadataka. Za nezahtjevno električno održavanje, koje uključuje definirane procedure i jasne kriterije, odgovorni su operateri u pogonu koji obavljaju rutinske zadatke prema standardiziranim uputama. S druge strane, za unutarnje inspekcije, ispitivanja, kalibracije i sl., potrebno je angažirati obučene i iskusne tehničare za električno održavanje. Ovi stručnjaci posjeduju potrebne vještine i iskustvo za obavljanje složenih i specijaliziranih zadataka koji zahtijevaju detaljno razumijevanje električnih sustava i opreme.

Inženjerska potpora električnom održavanju obuhvaća niz aktivnosti koje osiguravaju učinkovitost i kvalitetu održavanja. Ova potpora uključuje razvijanje i kontrolu procedura održavanja, čime se uspostavljaju standardi i protokoli za provedbu održavanja. Također, uključuje nadgledanje i nadogradnju prakse održavanja, što omogućava kontinuirano poboljšanje i prilagodbu metodologija u skladu s novim saznanjima i tehnologijama. Izrada smjernica za obuku osoblja osigurava da zaposlenici imaju potrebne vještine i znanja za obavljanje svojih zadataka na visokom nivou. Sakupljanje, praćenje i analiza podataka važni su za razumijevanje karakteristika opreme i identifikaciju potencijalnih problema. Analiza uzroka kvarova omogućava otkrivanje osnovnih problema i razvoj rješenja za njihovo otklanjanje. Konačno, sistematsko praćenje stanja opreme pomaže u pravovremenom zapažanju promjena i održavanju opreme u optimalnom stanju.

Pri razvijanju programa električnog preventivnog održavanja važno je uzeti u obzir nekoliko čimbenika. Prvo su tehnički zahtjevi koji trebaju biti zadovoljeni u pogledu funkcionalnosti, te usklađenost s normama i specifikacijama opreme. Drugi bitan aspekt su ekonomski zahtjevi, koji uključuju optimizaciju troškova održavanja i osiguranje da program donosi financijsku korist. Također, potrebno je uzeti u obzir zahtjeve uprave, koja se često opire ulaganju sredstava za poboljšanje održavanja zbog percepcije da uložena sredstva ne donose neposredan povratak sredstava. U konačnici, program EPM trebao bi obuhvatiti preventivno održavanje sustava, ispitivanje, popravke sustava, analizu kvarova, te praćenje podataka o održavanju i ispitivanju.

4. IZOLACIJA ELEKTRIČNIH STROJEVA

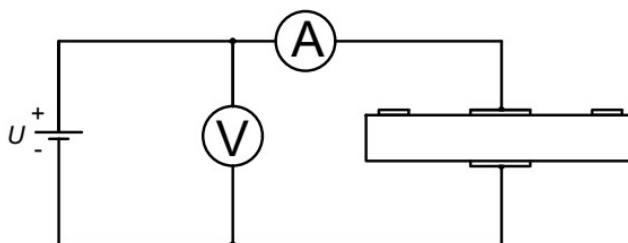
Izolacija, kao neizostavan i osjetljiv dio električnih strojeva, od presudne je važnosti za njihov dugotrajan i ispravan rad. Tijekom životnog vijeka stroja, izolacija je izložena različitim naprežanjima, uključujući termička, mehanička i električna opterećenja, što može dovesti do degradacije njezinih svojstava. Posljedice oštećene izolacije mogu uključivati kratke spojeve, smanjenje učinkovitosti, povećanje rizika od požara i skupe popravke. Zbog toga se posebna pažnja posvećuje redovitom ispitivanju i održavanju izolacije, kako bi se osigurala pouzdanost i učinkovitost, te spriječili kvarovi koji mogu značajno utjecati na rad i sigurnost električnih strojeva. Izolaciju električnih strojeva možemo promatrati kao dielektrik.

4.1. Općenito o dielektrcima

Dielektrici su izolatori, odnosno materijali/mediji koji ne vode električnu struju, ali pokazuju električna svojstva. Sadrže zanemarivo mali broj slobodnih elektrona i iona koji se pod utjecajem vanjskog električnog polja mogu gibati. Njihova električna otpornost veća je od $10^8 \Omega\text{m}$.

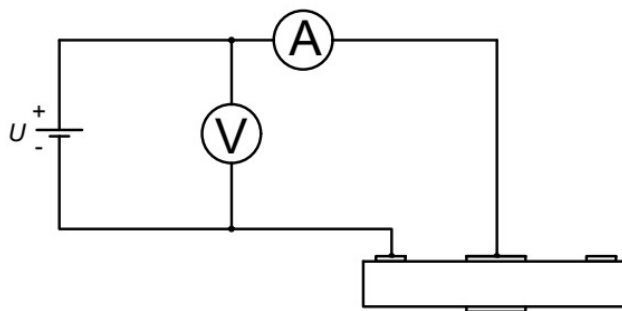
Svojstva dielektričnih materijala su osim volumne električne otpornosti, još i površinska električna otpornost, dielektrična permitivnost, dielektrični gubitci, polarizacija, dielektrična čvrstoća i dr.

Volumna električna otpornost se odnosi na električnu otpornost dielektričnog materijala kroz njegov volumen. Na slici 4.1 prikazan je način mjerenja volumne električne otpornosti.



Slika 4.1. Prikaz U-I postupka za mjerenje volumne električne otpornosti

Za razliku od volumne električne otpornosti, površinska električna otpornost odnosi se na električnu otpornost površine dielektrika. Na slici 4.2 prikazan je način mjerenja površinske električne otpornosti.



Slika 4.2. Prikaz U-I postupka za mjerenje površinske električne otpornosti

Dielektrična permitivnost ϵ (apsolutna dielektrična konstanta) je fizikalna veličina koja opisuje utjecaj dielektrika na međudjelovanje električnih naboja. Dielektrična konstanta vakuumu ϵ_0 iznosi $8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m.

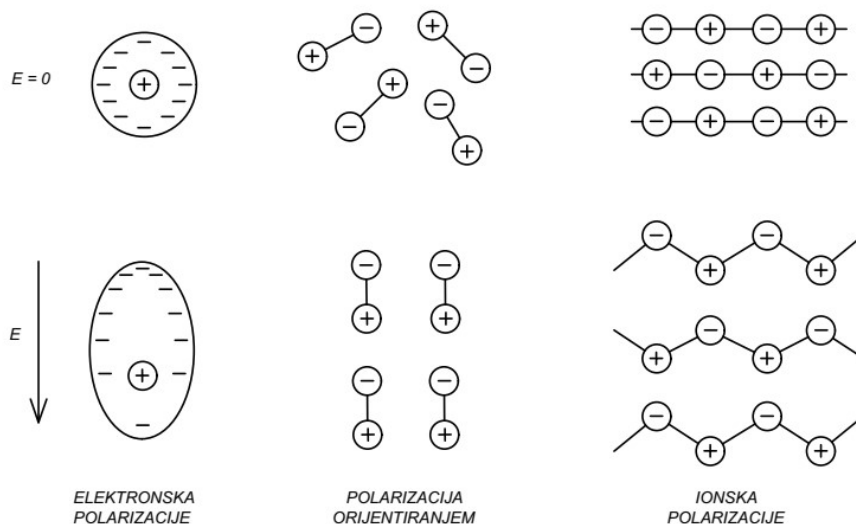
Dielektričnost ϵ_r (relativna dielektrična konstanta) je fizikalna veličina koja definira električnu propusnost tvari u odnosu na dielektričnu permitivnost vakuumu. Predstavlja omjer dielektrične permitivnosti tvari ϵ i dielektrične permitivnosti vakuumu ϵ_0 , tj. $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$. Relativna dielektrična konstanta vakuumu je 1.

Dielektrični gubici električne energije nastaju kada se dielektrik nalazi u vanjskom električnom polju zbog više razloga, a najvećim dijelom zbog električne vodljivosti, ionizacije i polarizacije dielektrika.

Kada se dielektrici izlože električnom polju, ne dolazi do razdvajanja naboja, već se javlja pomak u razmještanju naboja unutar atoma ili molekula. Ovaj pomak uzrokuje formiranje električnih dipola i rezultira polarizacijom dielektrika.

Polarizacija dielektrika predstavlja proces nastajanja induciranih dipola ili usmjeravanja permanentnih dipola, a ovisno o vrsti dielektrika. S obzirom na to, polarizacija na mikroskopskoj razini može biti:

- Elektronska – kada dolazi do pomaka elektronskog omotača i jezgre atoma u suprotnim smjerovima zbog djelovanja vanjskog električnog polja,
- Orijentacijska – kada vanjsko električno polje zakreće molekule, koje su električni dipoli,
- Ionska – kada dolazi do pomicanja iona dielektrika zbog utjecaja vanjskog električnog polja.



Slika 4.3. Vrste polarizacije

Kada se ukloni vanjsko električno polje, polarizacija nestaje, a dielektrik se vraća u svoje prvobitno stanje. Međutim, ako se izloži vrlo jakom električnom polju, može doći do trajne promjene; elektroni mogu biti istrgani iz svojih matičnih molekula, što uzrokuje gubitak dielektričnih svojstava i materijal postaje vodljiv. Ova pojava poznata je kao proboj dielektrika.

Dielektrična čvrstoća se odnosi na izdržljivost dielektrika na povećanje jakosti električnog polja. Ako jakost električnog polja prijeđe graničnu vrijednost, dolazi do električnog proboja dielektrika. Plinoviti i tekući dielektrici se regeneriraju nakon električnog proboja, dok se čvrsti ne regeneriraju.

Kada je dielektrik izložen stalnom električnom polju, unutar njega dolazi do pomaka pozitivnih i negativnih naboja. Ovaj pomak traje dok se ne završi proces polarizacije, pri čemu se stvaraju električni dipoli unutar dielektrika. Tijekom ovog procesa, osim polarizacije, može se pojaviti struja vođenja zbog prisutnosti slobodnih nositelja naboja u materijalu. Nakon što se polarizacija potpuno završi, preostala struja će se odnositi isključivo na struju vođenja. U čvrstim i tekućim dielektričnim materijalima, struja vođenja se sastoji od volumne komponente, koja je prisutna unutar volumena materijala, i površinske komponente, koja se javlja na površini materijala.

U promjenjivom električnom polju, polarizacija dielektrika će se ponašati različito ovisno o vrsti polarizacije. Elektronska polarizacija reagira vrlo brzo na promjene u električnom polju, jer se elektroni lako prilagođavaju brzim promjenama. S druge strane, orijentacijska polarizacija, koja uključuje pomicanje cijelih molekula, reagira sporije jer molekule trebaju više vremena za prilagodbu promjenama u polju. Elektronska polarizacija prestaje pri ultraljubičastim frekvencijama, dok ionska pri infracrvenim. Orijentacijska polarizacija prestaje već pri relativno niskim frekvencijama.

4.2. Izolacijski sustav električnih strojeva

Pojam izolacija često se koristi za opisivanje izolacijskog sustava električnih strojeva. Izolacija je važan dio električnog stroja. Ona omogućuje njegovo ispravno funkcioniranje odvajanjem različitih dijelova stroja između kojih postoji električni napon. Izolacija može biti izrađena od krutih, tekućih ili plinovitih materijala. Vrsta i kvaliteta izolacije značajno utječu na pouzdanost, učinkovitost i sigurnost električnih strojeva. Također, izolaciji se pridaje velika pažnja pri projektiranju nazivne snage stroja. Znatan dio kvarova električnih strojeva posljedica je nepravilnosti u izolaciji. Stoga je vrlo važno pažljivo birati, redovito ispitivati i održavati izolacijske materijale kako bi se osigurao dugotrajan i siguran rad električnih strojeva.

Izolacijski sustav električnih strojeva sastoji se od pet glavnih podsustava, od kojih svaki ima specifičnu funkciju i važnost za cjelokupni rad stroja.

Prvi podsustav, međuzavojna izolacija, smještena je između žica pojedinih zavoja namota. Ova izolacija obično je izrađena od izolacijskog laka, dok se u posebnim slučajevima koristi staklena glazura za dodatnu otpornost.

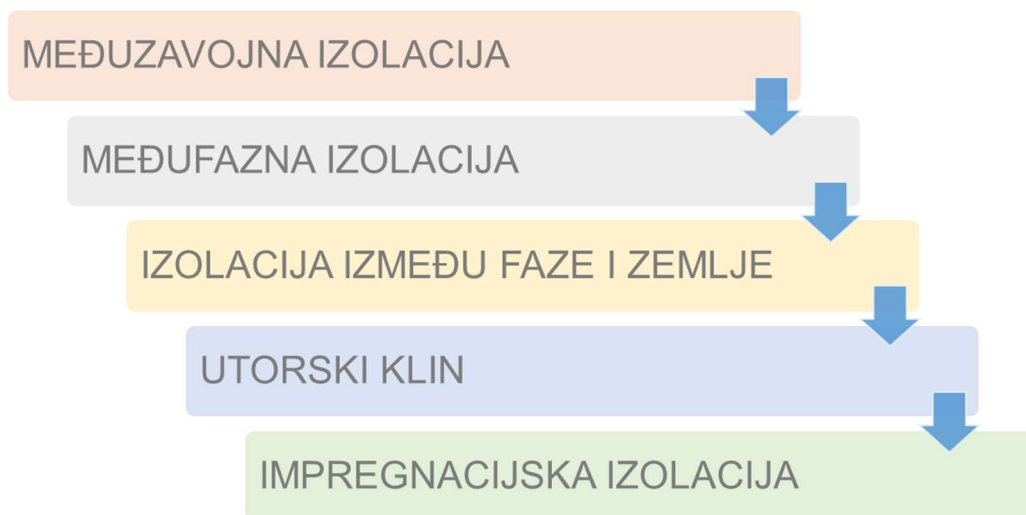
Drugi podsustav, međufazna izolacija, nalazi se između namota susjednih faza. Ona sprječava električne prijelaze između pojedinih faza.

Treći podsustav, izolacija između faze i zemlje, predstavlja izolaciju namota prema kućištu stroja i smještena je u utorima. Ova izolacija osigurava da električni napon ne prelazi na metalne dijelove stroja, čime se sprječava potencijalna opasnost.

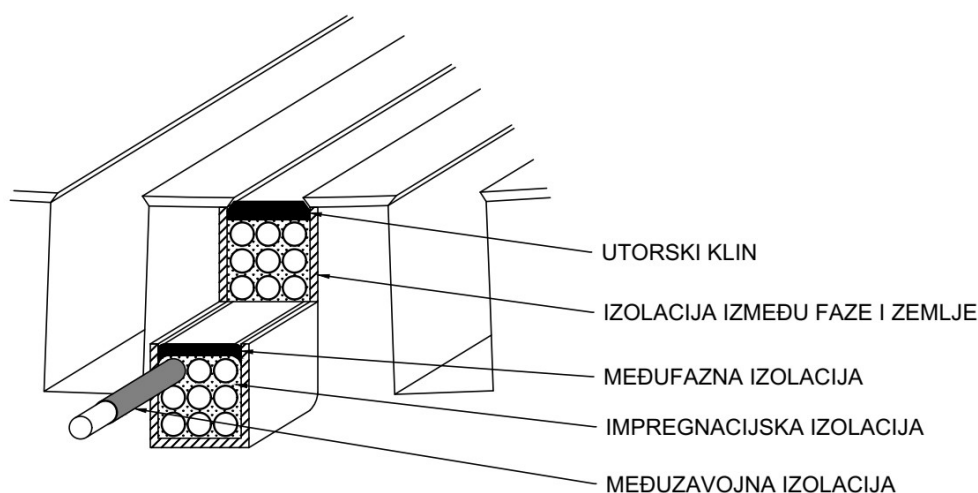
Četvrti podsustav izolacije je utorski klin, koji učvršćuje vodiče unutar utora i također je izrađen od izolacijskog materijala. Ovaj element osigurava mehaničku stabilnost vodiča unutar stroja.

Posljednji, peti podsustav, impregnacijska izolacija, povezuje sve komponente zajedno i ispunjava prazne prostore u utorima. Impregnacijska izolacija pruža dodatnu čvrstoću i zaštitu, osiguravajući dugotrajnost i pouzdanost cijelog sustava.

Na slici 4.4 navedene su glavne komponente izolacijskog sustava, a na slici 4.5 primjer izolacije električnog stroja.



Slika 4.4. Glavne komponente izolacijskog sustava električnog stroja



Slika 4.5. Primjer izolacijskog sustava električnog stroja

Najvažniji faktor o kojem ovisi životni vijek izolacije je toplinska degradacija. Ostali značajni čimbenici uključuju prisutnost vlage, zagađenje izolacijskih materijala, naponske udare, stupanj opterećenja stroja, mehaničke vibracije te sile koje se pojavljuju tijekom rada. Također, vrsta i kvaliteta održavanja igraju bitnu ulogu u dugovječnosti izolacije. Svi ovi čimbenici zajedno imaju značajan utjecaj na radne karakteristike i dugotrajnost izolacijskih materijala.

S obzirom da je izolacija bitna komponenta električnih strojeva važno je da posjeduje što bolje karakteristike kako bi osigurala dugotrajan i pouzdan rad strojeva. Stoga izolacija treba imati izvrsnu električnu otpornost, što omogućuje učinkovito sprečavanje prolaska struje kroz nju. Također je bitno da ima dobru toplinsku vodljivost kako bi se toplina učinkovito provodila u okoliš. Dobra površinska električna otpornost pomaže u sprječavanju vodljivosti površinom izolacije, dok otpornost na vlagu, kemikalije, ulja i druge zagađivače štiti izolacijski materijal od smanjivanja izolacijskih svojstava. Konačno, dobra mehanička svojstva osiguravaju da izolacija izdrži fizička opterećenja tijekom rada.

4.3. Vrste izolacijskih materijala

Izolacijski materijal čine značajnu skupinu elektrotehničkih materijala. Mogu se podijeliti u tri grupe, odnosno na plinovite, tekuće i čvrste. Svaka od ovih grupa ima specifične karakteristike i prednosti koje ih čine prikladnima za odgovarajuće primjene u elektroenergetskim i elektroničkim sustavima. Na slici 4.6 prikazana je osnovna podjela izolacijskih materijala.



Slika 4.6. Osnovna podjela izolacijskih materijala

Plinoviti izolacijski materijali

Zrak, kao najčešće korišteni plinoviti izolator, ima nisku dielektričnu konstantu, što pomaže u smanjenju dielektričnih gubitaka. Njegova prisutnost u okolini čini ga ekonomičnim rješenjem za osnovnu izolaciju. Međutim, zrak ima manju dielektričnu čvrstoću u usporedbi s specijaliziranim plinovima, što ga ograničava u primjenama visokog napona.

Heksafluorid sumpora (elektrotehnički plin) SF₆ je najpoznatiji plin u elektrotehničkoj primjeni zbog svoje izuzetne dielektričke čvrstoće i sposobnosti gašenja električnog luka, čineći ga idealnim za visokonaponske transformatore i prekidače. SF₆, iako izuzetno učinkovit, ima visok utjecaj na globalno zagrijavanje, što ograničava njegovu upotrebu i potiče razvoj ekološki prihvatljivijih alternativa.

Tekući izolacijski materijali

Tekući izolacijski materijali uključuju mineralna ulja, silikonska ulja i estere, svaki s vlastitim prednostima i nedostacima. Mineralna ulja su najšire korištena zbog svoje visoke dielektrične čvrstoće, dobre toplinske vodljivosti i sposobnost hlađenja. Kao transformatorsko ulje, mineralno ulje nudi povoljnu cijenu, ali ima nedostatak, zapaljivost, što može predstavljati sigurnosni rizik. Silikonska ulja pružaju bolju stabilnost pri visokim temperaturama i niže dielektrične gubitke u odnosu na mineralna ulja, ali su skuplja i imaju ograničenu sposobnost hlađenja. Esterski izolatori nude ekološki prihvatljivu alternativu s dobrom dielektričnom čvrstoćom, visokom točkom zapaljivosti, ali njihovi troškovi proizvodnje su viši od mineralnih ulja.

Čvrsti izolacijski materijali

Čvrsti izolacijski materijali neizostavni su za osiguranje dugotrajne i pouzdane izolacije u električnim strojevima. Tinjac se široko koristio za elektroizolaciju, često u obliku listića ili praha pomiješanog s vezivima, dok je danas njegova upotreba manja. Parafin se upotrebljava za impregniranje papira, tkanina, te za popunjavanje izolacijom malih transformatora i

zavojnica. Papir, impregniran tekućim izolacijskim materijalima poput parafina, služi za izolaciju transformatora. Bitumen i smola primjenjuju se u izradi elektroizolacijskih lakova i kao masa za izolaciju električnih uređaja. Poliesterske tkanine, nakon impregnacije, koriste se za izolaciju namota električnih strojeva, pružajući dodatnu zaštitu i dugovječnost. Ovi materijali nude visoku otpornost na električne, toplinske i kemijske utjecaje te osiguravaju stabilnost i pouzdanost u radnim uvjetima.

U novije vrijeme kao izolacijski materijali električnih strojeva koriste se i epoksidna smola, silikonska guma te različiti kompoziti, koji nude izvrsnu kombinaciju dielektrične čvrstoće, toplinske otpornosti, otpornosti na vlagu i kemikalije te mehaničke čvrstoće. Zahvaljujući svojim svojstvima, omogućuju proizvodnju manjih, lakših i učinkovitijih električnih strojeva, pridonoseći tako energetskej učinkovitosti i pouzdanosti.

Čvrsti izolacijski materijali također uključuju staklo, keramiku, gumu i plastiku. Staklo i keramika nude otpornost na visoke temperature i kemijske tvari, ali su krhki. Guma i plastika pružaju fleksibilnost i dobra dielektrična svojstva, ali su manje otporni na visoke temperature i kemijske utjecaje. Čvrsti materijali često se koriste u kombinaciji s plinovitim ili tekućim izolacijskim materijalima za optimalnu zaštitu i učinkovitost električnih strojeva.

U tablici 4.1 je prikaz okvirnih vrijednosti dielektričnih svojstava za različite izolacijske materijale.

Tablica 4.1. Vrijednosti dielektričnih svojstava različitih izolacijskih materijala

Svojstvo	Zrak	Plin SF6	Mineralno ulje	Impregnirani papir
Električna otpornost δ [Ωm]	$\sim 10^{16}$	$\sim 10^{16}$	$\sim 10^{13}$	$\sim 10^{14}$
Relativna dielektrična konstanta ϵ_r	1.00059	1.002	2.2-2.3	2.5-3.5
Dielektrična čvrstoća E_{pr} [kV/mm]	~ 3	$\sim 8-9$	10-15	15-20
Faktor dielektričnih gubitaka $\text{tg } \delta$	~ 0.0001	~ 0.0003	~ 0.001	~ 0.02

4.4. Zagrijavanje izolacije električnih strojeva

Zagrijavanje izolacije električnih strojeva predstavlja važan aspekt u projektiranju i radu ovih strojeva, jer pravilno uspostavljen odnos između zagrijavanja stroja pri nominalnom opterećenju i dozvoljenog zagrijavanja izolacije može značajno utjecati na dugovječnost i učinkovitost stroja. Izolacijski materijali su izrazito osjetljivi na porast temperature, a njihova sposobnost očuvanja svojstava znatno se smanjuje kada su izloženi višim temperaturama. U uvjetima povećane temperature, dolazi do degradacije izolacije, što može skratiti vijek trajanja stroja. Konkretno, pri graničnim temperaturama za određenu klasu izolacije, čak i blago povećanje temperature može drastično utjecati na vijek trajanja izolacije. Stoga je od esencijalne važnosti postići da zagrijavanje stroja ne prelazi dopuštene granice kako bi se osigurala dugotrajna i pouzdana funkcionalnost električnih strojeva.

Glavni uzroci zagrijavanja izolacije električnih strojeva odnose se na prekomjerno opterećenje, koje povećava toplinske gubitke te neadekvatno hlađenje. Također, kvarovi i oštećenja, poput kratkog spoja i loših električnih spojeva, mogu izazvati prekomjerno zagrijavanje. Ovom

problemu dodatno doprinosi i starenje izolacije. Svi ovi faktori mogu značajno skratiti vijek trajanja izolacije i smanjiti učinkovitost stroja.

Temperatura namota izravno utječe na zagrijavanje izolacije i ograničena je temperaturnom klasom izolacijskog materijala. Apsolutna temperatura namota predstavlja zbroj temperature okoline i temperaturnog porasta uzrokovanog zagrijavanjem namota.

$$\vartheta = \vartheta_o + \Theta \quad (4.1)$$

- ϑ = temperatura namota (apsolutna temperatura)
- ϑ_o = temperatura okoline
- Θ = porast temperature (relativna temperatura)

Prema IEC normama su definirana dozvoljena povišenja temperature izolacije u skladu s klasom upotrijebljene izolacije. Proračunska (nominalna) temperatura okoline se uzima:

$$\vartheta_{onom} = 40\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.2)$$

U tablici 4.2 su navedene oznake klase izolacije i pripadajuće granične temperature.

Tablica 4.2. Temperaturne klase izolacije

Klasa	Granična temperatura
Y	90 °C
A	105 °C
E	120 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C
C	> 180 °C

Tako npr. za strojeve s klasom izolacije E, maksimalno dozvoljeno zagrijavanje iznad temperature okoline iznosi 80 °C.

$$\Theta = \vartheta - \vartheta_o = 80\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.3)$$

Jedan od ključnih parametara za određivanje nazivne snage stroja je dozvoljeno zagrijavanje namota, odnosno izolacije. Preopterećenja stroja su dopuštena samo nakratko kako bi se spriječilo prekoračenje dozvoljenog porasta temperature.

5. UVOD U METODE ISPITIVANJA ELEKTRIČNIH STROJEVA

Ispitivanja električnih strojeva općenito se provode na glavnim komponentama električnih strojeva, kao što su namotaji, izolacija, željezna jezgra i sl., koje su od presudne važnosti za njihovu pouzdanost i učinkovitost. Opća ispitivanja, poput mjerenja izolacijskog otpora i termografska ispitivanja, primjenjiva su na sve vrste električnih strojeva, tj. na transformatore, elektromotore i generatore. Međutim, postoje i specifična ispitivanja koja se izvode samo na određenim vrstama strojeva, kao što je npr. ispitivanje prijenosnog omjera i kontrola grupe spoja kod transformatora ili mjerenje momenta kod elektromotora.

Ispitivanja električnih strojeva obuhvaćaju i provjeru opreme koja je neophodna za njihovo sigurno i učinkovito funkcioniranje, uključujući zaštitne uređaje, upravljačke sustave, senzore, aktuatore i druge elemente.

Ovakav pristup osigurava da se svaki stroj ispita na način koji najbolje odgovara njegovim specifičnostima i operativnim zahtjevima.

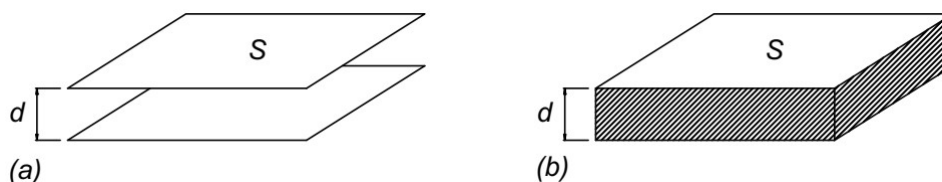
Neka od češćih ispitivanja električnih strojeva su:

- Snimanje i analiza električnih veličina,
- Određivanje izolacijskog otpora namota i indeksa polarizacije,
- Određivanje faktora dielektričnih gubitaka,
- Mjerenje temperature,
- Mjerenje i analiza vibracija i buke,
- Snimanje karakteristika praznog hoda, kratkog spoja i opterećenja.

Mjerenja električnih veličina predstavljaju osnovu ispitivanja električnih strojeva i važan su dio pri utvrđivanju njihovih stanja i radnih karakteristika. Osnovna električna mjerenja obuhvaćaju mjerenje struje, napona, snage, otpora, frekvencije, induktiviteta, kapaciteta itd. i često se provode u okviru općih i specifičnih ispitivanja.

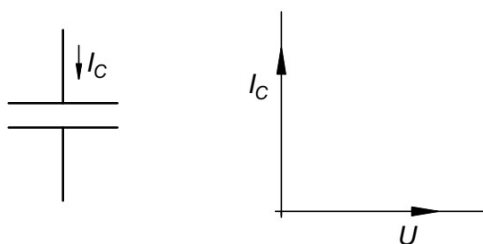
5.1. Ispitivanje izolacije električnih strojeva

Prilikom ispitivanja i analize izolacije električnih strojeva, izolacija se može promatrati kao kondenzator, što je najjasnije prikazano na primjeru pločastog kondenzatora na slici 5.1. Naboj kondenzatora Q proporcionalan je naponu U i kapacitetu C prema izrazu $Q = CU$. Kapacitet pločastog kondenzatora, koji predstavlja sposobnost materijala da pohranjuje električnu energiju, može se izračunati pomoću formule $C = \epsilon S/d$, gdje je ϵ dielektrična permitivnost materijala, S površina kondenzatorskih ploča, a d udaljenost između njih.



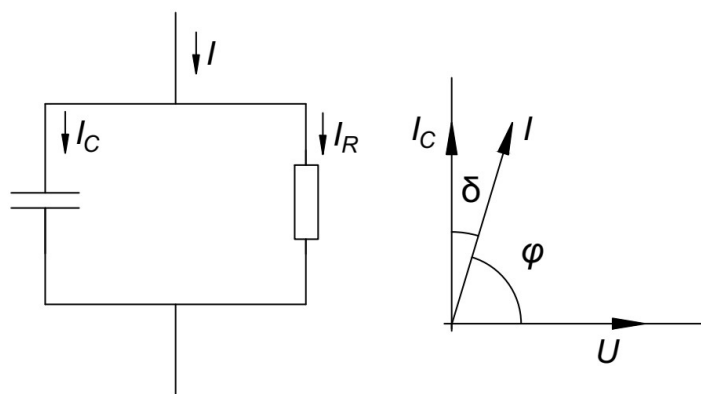
Slika 5.1. Pločasti kondenzator; (a) zrak kao dielektrik, (b) dielektrični materijal

Savršena izolacija bi imala samo kapacitivnu komponentu struje. Na slici 5.2 prikazana je nadomjesna shema savršene izolacije u obliku savršenog kondenzatora.



Slika 5.2. Nadomjesna shema idealne izolacije

Kako realna izolacija osim kapacitivne komponente struje ima i radnu komponentu, može se nadomjestiti shemom kondenzatora i paralelno spojenog malog otpornika prikazano na slici 5.3.



Slika 5.3. Nadomjesna shema realne izolacije

Ispitivanja izolacije se provode kako bi se odredili parametri vezani za pojedina svojstva izolacije, koja su važna za izbor i dizajn izolacijskih materijala u različitim primjenama, uključujući i primjenu kod električnih strojeva. Pomoću ovih ispitivanja se određuju opća svojstva dielektričnih materijala i pojedina specifična svojstva koja su bitna za izolacijske sustave.

Bitna svojstva izolacije uključuju dielektričnu permitivnost (ϵ), koja predstavlja sposobnost materijala da pohranjuje električnu energiju kada se nalazi u električnom polju.

Dielektrična apsorpcija je pojava koja se javlja u izolacijskim materijalima pod utjecajem istosmjernog napona, pri čemu dolazi do pomaka pozitivnog i negativnog naboja unutar materijala.

Dielektrični gubici (P) [W] odnose se na energiju koja se gubi kao toplina u izolacijskom materijalu kada je izložen električnom polju.

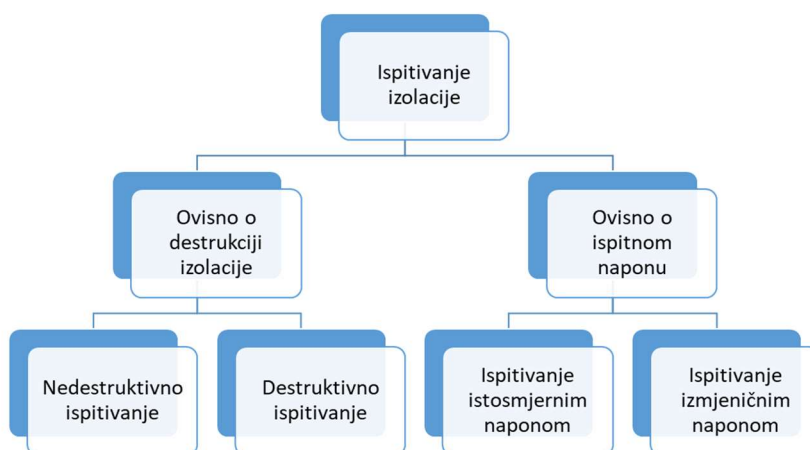
Dielektrični faktor snage ($\cos \varphi = P/S$) izražava odnos između stvarne snage (P) i prividne snage (S) u sustavu.

Faktor dielektričnih gubitaka ($\tan \delta$) predstavlja tangens kuta δ ($\delta = 90^\circ - \varphi$), ukazujući na odnos između izgubljene i pohranjene energije.

Dielektrična čvrstoća predstavlja maksimalnu jakost električnog polja, odnosno maksimalni napon po jedinici duljine koji izolacijski materijal može izdržati prije nego što dođe do proboja i gubitka izolacijskih svojstava, a izražava se u voltima po metru [V/m].

Probojni napon je minimalni napon koji je potreban da bi se izazvao električni proboj u materijalu određene debljine, a izražava se u voltima [V].

Izolacija je veoma bitan dio električnih strojeva. Stoga se ispitivanju izolacije pridaje velika pozornost. Na slici 5.4 je prikazana podjela ispitivanja izolacije.



Slika 5.4. Podjela ispitivanja izolacije

Ispitivanje izolacije električnih strojeva nedestruktivnim metodama važno je za očuvanje dugotrajnosti i pouzdanosti električnih strojeva. Navedene metode omogućuju pravovremeno otkrivanje potencijalnih problema bez oštećenja izolacijskog materijala.

Ovim ispitivanjima najčešće se određuju sljedeća svojstva izolacije električnih strojeva:

- DC i AC otpor
- DC dielektričnu apsorpciju
- Faktor dielektričnih gubitaka ($\tan \delta$)
- Kapacitet...

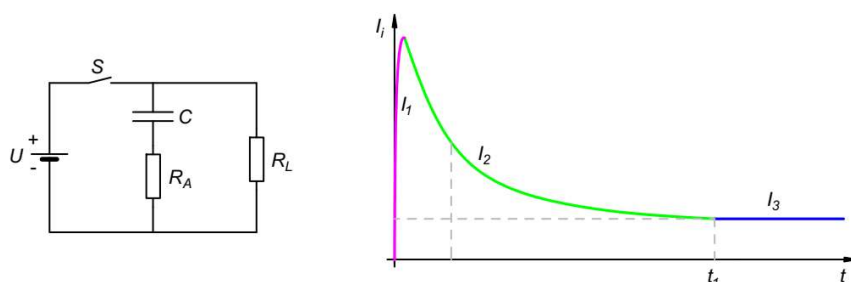
Destruktivna ispitivanja izolacije primjenjuju metode koje mogu trajno oštetiti izolacijske materijale kako bi se utvrdile njihove granične vrijednosti. Takvi testovi, poput probojnih ispitivanja, primjenjuju sve veći napon do točke proboja, određujući maksimalnu dielektričnu čvrstoću. Oprema koja ne prođe ispitivanje postaje neupotrebljiva.

Kada se narine napon na izolaciju, ukupna struja koja teče kroz izolaciju predstavlja vektorski zbroj kapacitivne komponente i radne komponente struje. Prethodno je izolacija predstavljena nadomjesnom shemom kao paralelni spoj kondenzatora i otpornika, što znači da će se vođenje struje kroz izolaciju razlikovati ovisno o tome je li primijenjen istosmjerni ili izmjenični napon.

5.1.1. Ispitivanje istosmjernim naponom

Ukupna struja kod ispitivanja izolacije istosmjernim naponom sastoji se od nekoliko komponenti. Prva komponenta je kapacitivna struja nabijanja, koja se javlja pri uključanju istosmjernog napona i nije bitna za ovo ispitivanje. Rezultati testa se uzimaju kada se ova struja smanji na zadovoljavajuću nisku vrijednost. Druga komponenta je struja apsorpcije, koja se može podijeliti na reverzibilnu i nereverzibilnu, pri čemu je nereverzibilna manja i predstavlja gubitke. Treća komponenta, struja vođenja, najvažnija je za ocjenjivanje stanja izolacije.

Na slici 5.5 nalazi se nadomjesna shema izolacije koja detaljnije prikazuje stanje u izolaciji pri narinutom istosmjernom naponu te grafički prikaz struje pri uključivanju sklopke S. Na grafu je vidljivo da u početnom vremenu dominira struja nabijanja I_1 , zatim struja apsorpcije I_2 , te nakon vremena t_1 ostaje samo struja vođenja I_3 .



Slika 5.5. Nadomjesna shema izolacije pri primjeni istosmjernog napona te grafički prikaz struje koja se javlja kroz izolaciju

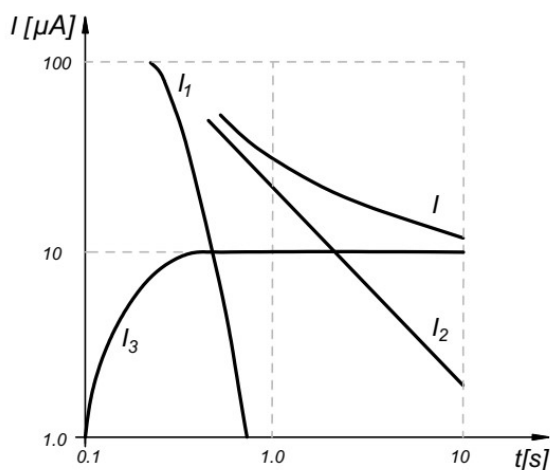
I_1 - Struja početnog nabijanja kapaciteta (C)

I_2 - Struja apsorpcije (R_A)

I_3 - Struja vođenja (R_L)

t_1 - 60 sek.

Na slici 5.6 prikazana je ukupna struja I njene komponente pri uključivanju istosmjernog napona na izolacijski sustav. Može se zaključiti da struja nabijanja I_1 jako brzo opada, struja apsorpcije I_2 nešto sporije, te na kraju ostaje samo struja vođenja I_3 .



Slika 5.6. Prikaz ukupne struje i njenih komponenta pri primjeni istosmjernog napona na izolacijski sustav

Ispitivanje izolacije istosmjernim naponom odnosi se na:

- Ispitivanje otpora izolacije (engl. *Insulation Resistance*)
- Ispitivanje omjera dielektrične apsorpcije (engl. *Dielectric Absorption Ratio, DAR*)
- Ispitivanje indeksa polarizacije (engl. *Polarization Index, i.p.*)
- Ispitivanje visokim naponom (engl. *Hi-pot*)

Ispitivanje otpora izolacije izvodi se naponom u rasponu od 100 do 15000 V. Tijekom ispitivanja važno je primijeniti temperaturnu korekciju. Za razliku od mjerenja otpora namota, koji ovisi samo o temperaturi, otpor izolacije značajno ovisi o više čimbenika, uključujući temperaturu, vlagu, trajanje mjerenja, mjerni napon, debljinu izolacijskog materijala i dr. Iz tih razloga se mjerenju i ocjeni otpora izolacije pristupa s više aspekata.

Kratkoročna očitavanja otpora izolacije odnose se na mjerenja u kraćim vremenskim periodima, obično 30 ili 60 sekundi. Očitavanje omogućuje samo grubu procjenu stanja izolacije, pri čemu je usporedba s prethodnim mjernim vrijednostima preporučljiva. Stalni opadajući trend može ukazivati na pogoršanje izolacije. Za pravilno tumačenje rezultata, sve vrijednosti koje se uspoređuju trebaju biti preračunate na 20 °C.

Omjer dielektrične apsorpcije DAR predstavlja omjer vrijednosti otpora izolacije nakon 60 sekundi i 30 sekundi mjerenja. Dobar sustav izolacije pokazuje rast vrijednosti otpora tijekom mjerenja, dok kontaminirana izolacija ima manji porast otpora. DAR ispod 1,25 ukazuje na potrebu za daljnjim ispitivanjem i mogućim intervencijama.

Indeksa polarizacije i.p. je omjer struja ili otpora izmjerenih u različitim vremenskim intervalima tijekom procesa polarizacije dielektrika. Ako nije drugačije specificirano uzima se kao omjer otpora izolacije nakon 10 minuta i 1 minute mjerenja. Ako je i.p. manji od 1, to ukazuje na pogoršanje izolacije.

Ispitivanje na različitim naponskim razinama se vrši postupnim povećavanjem napona narinutog na izolaciju kako bi se otkrile slabosti koje nisu vidljive pri nižim naponima. Ova metoda može otkriti kontaminaciju i oštećenje izolacije, a posebno je korisna kada se redovito provodi. Vlažnost i nečistoće mogu se otkriti pri nižim razinama napona, dok se pri višim naponima mogu utvrditi fizička oštećenja i starenje izolacije.

Pri ispitivanju istosmjernim visokim naponom (Hi-pot) primjenjuje se napon vrijednosti iznad istosmjerne ekvivalentne vrijednosti vršnog nazivnog napona. Može se izvesti kao test napona u koracima, gdje se napon postupno povećava i drži na svakoj razini određeno vrijeme. Mjeri se vođenje struje ili otpor izolacije na svakom koraku. Rezultati se mogu prikazati grafički te se na taj način analizira stanje izolacijskog sustava.

Test dielektrične apsorpcije izvodi se pri znatno višim naponima od standardnih testova, a koji mogu doseći preko 100 kV. Napon se održava dulje vrijeme, obično od 5 do 15 minuta, uz povremeno mjerenje otpora izolacije ili vođenja struje. Procjena se temelji na izmjerenom otporu izolacije. Ako je izolacija u dobrom stanju, tijekom testa će otpor izolacije rasti. Ovo ispitivanje predstavlja proširenje Hi-pot testa.

5.1.2. Ispitivanje izmjeničnim i udarnim naponom

Ukupna struja kroz izolaciju kod ispitivanja izmjeničnim naponom sastoji se od nekoliko komponenti. Prva komponenta je kapacitivna struja, koja se odnosi na punjenje i pražnjenje kapaciteta izolacije. Druga komponenta je struja dielektrične apsorpcije, pri čemu se dipolne molekule okreću u smjeru električnog polja. Treća komponenta je kontinuirano vođenje, koje nastaje zbog prisutnosti onečišćenja i vode u izolaciji. Kod viših napona može doći do korone, gdje se u zračnim prazninama unutar izolacije razgrađuje zrak u ozon i formiraju ioni.

Ispitivanje izolacije električnih strojeva izmjeničnim naponom je važno za procjenu dielektričnih svojstava izolacijskih materijala i identificiranje potencijalnih slabih točaka koje mogu dovesti do kvarova. Ova ispitivanja dobro simuliraju stvarna naponska opterećenja koja se događaju u pogonu. Provođenjem ispitivanja kao što su visokonaponsko ispitivanje, ispitivanje dielektrične otpornosti, određivanje faktora dielektričnih gubitaka i ispitivanje parcijalnih pražnjenja omogućuje sveobuhvatnu procjenu izolacije. Rezultati ovih ispitivanja pružaju važne informacije za održavanje i planiranje preventivnih mjera, čime se osigurava dugotrajan i siguran rad električnih strojeva.

Visokonaponska ispitivanja uključuju pokus stranim naponom, kojim se ispituje izolacija između pojedinih namota i mase, te pokus induciranim naponom, kojim se testira izolacija između zavoja namota. Rezultati ispitivanja su najprecizniji kada se provode u toplom stanju stroja, što omogućava bolje simuliranje stvarnih radnih uvjeta.

Ispitivanje izolacije izmjeničnim i udarnim naponom odnosi se na:

- Određivanje faktora dielektričnih gubitaka (engl. *Dissipation Factor*) / dielektričnog faktora snage (engl. *Power Factor*)
- Ispitivanje dielektrične čvrstoće (engl. *Dielectric Strength*)
- Ispitivanje otpornosti na naponske udare (engl. *Impulse Withstand Strength*)
- Ispitivanje parcijalnih pražnjenja (engl. *Partial Discharges*)

Pomoću faktora dielektričnih gubitaka i dielektričnog faktora snage mjere se gubici energije u izolaciji. Faktor dielektričnih gubitaka specifično procjenjuje koliko se energije gubi zbog disipacije topline unutar materijala. Navedena ispitivanja učinkovito otkrivaju slabosti u električnoj izolaciji, mjereći dielektrične gubitke, kapacitivnost i AC otpornost. Omogućuju praćenje degradacije izolacije pod normalnim frekvencijama (50-60 Hz) bez preopterećenja izolacije, pružajući uvid u njezino ukupno stanje.

Dielektrična čvrstoća odnosi se na sposobnost izolacijskog materijala da izdrži visoki izmjenični napon bez proboja. Ovo ispitivanje, poznato kao visokonaponsko ispitivanje, provodi se primjenom napona znatno višeg od nazivnog radnog napona kako bi se testirala otpornost izolacije na ekstremne uvjete.

Otpornost na naponske udare testira se ispitivanjem udarnim naponom, simulirajući uvjete naponskih udara, poput udara groma, primjenom kratkih, visokih naponskih impulsa na izolaciju.

Ispitivanje visokonaponskim impulsom koristi se za otkrivanje početnih oštećenja koja standardne metode možda ne mogu otkriti. Ova metoda simulira brze naponske promjene, kao što su prenaponi iz mreže, te obuhvaća sve fazne namote kod trofaznih strojeva. Tijekom

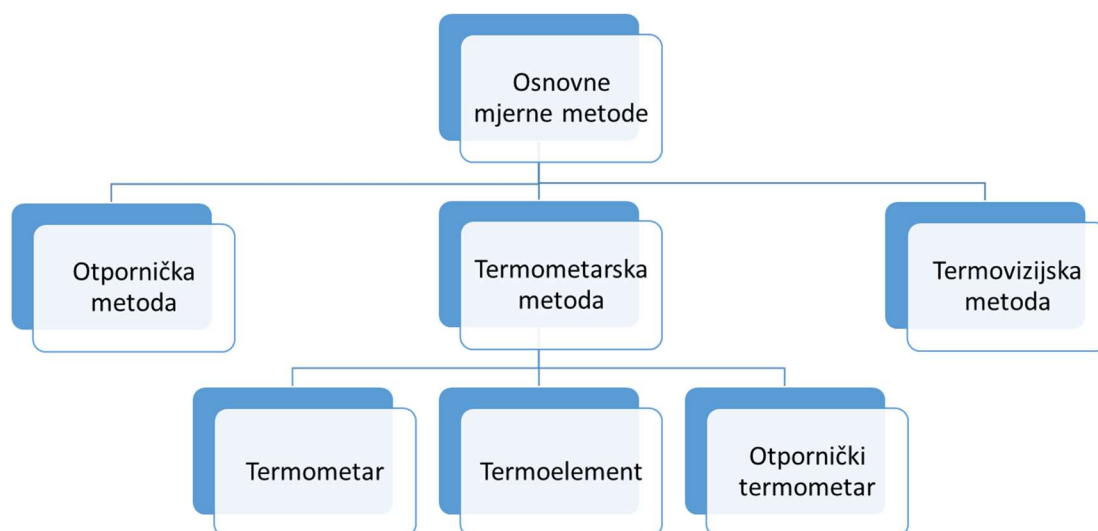
ispitivanja, analizom valnog oblika odziva identificiraju se potencijalne slabosti i proboji unutar izolacije.

Parcijalna pražnjenja se otkrivaju putem specijaliziranih ispitivanja koja analiziraju male električne impulse koje uzrokuju upravo ova pražnjenja. Ova ispitivanja se obično provode pod visokim naponom, a signali parcijalnih pražnjenja se detektiraju osjetljivim senzorima.

5.2. Mjerenje temperature električnih strojeva

Mjerenje temperature električnih strojeva pomaže u prevenciji prekomjernog zagrijavanja koje može uzrokovati oštećenje izolacije, smanjenje učinkovitosti i skraćanje vijeka trajanja stroja. Temperatura se najčešće mjeri u namotima, ležajevima, rashladnom mediju, kućištu i sl. Ova mjerenja omogućavaju pravovremenu intervenciju i održavanje optimalnih radnih uvjeta stroja.

Mjerenje temperature može se provoditi različitim metodama. Osnovne mjerne metode prikazane su na slici 5.7.



Slika 5.7. Podjela metoda za mjerenje temperature

Otpornička metoda temelji se na mjerenju promjene otpora namota pri zagrijavanju primjenom U-I metode, čime se utvrđuje srednja ukupna temperatura namota. Ova metoda omogućuje precizno određivanje srednje vrijednosti temperature namota pomoću formule:

$$R_{\vartheta} = R_{\vartheta 0} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta\vartheta) \quad (5.1)$$

$$\Delta\vartheta = \frac{1}{\alpha_{Cu}} \cdot \left(\frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta 0}} - 1 \right) \quad (5.2)$$

gdje je:

$R_{\vartheta 0}$ – otpor izmjeren na stezaljkama stroja prije početka rada (otpor na temperaturi okoline),

R_{θ} – otpor izmjeren na stezaljkama stroja nakon rada,

α_{Cu} – temperaturni koeficijent materijala namota (bakar),

$\Delta\theta$ – povišenje temperature namota u odnosu na temperaturu okoline.

Termometarska metoda zasniva se na direktnom mjerenju temperature pomoću ugrađenog mjernog člana, koji može biti:

- termometar,
- termoelement,
- otpornički termometar.

Termometri se obično ugrađuju u velike strojeve radi izravnog mjerenja temperature rashladnog zraka i vode, ulja u ležajevima, a postavljaju na pristupačnim dijelovima stroja. Najčešće se koriste alkoholni ili živini termometri.

Termoelementi (termopar) koriste se za mjerenje lokalne temperature, posebno u slučajevima gdje su potrebne brze reakcije, jer imaju malu temperaturnu vremensku konstantu. Djeluju na principu termoelektričnog efekta, gdje kod spojenih dvaju različitih metala nastaje napon ovisan o temperaturi i materijalu. Uobičajeni termoelementi su bakar-konstantan i željezo-konstantan.

Otpornički termometri obično se ugrađuju za mjerenje temperature u namotima stroja. Kod većih strojeva ugrađuje se više ovih elemenata, a postavljaju se u statorsche limove i utore. Ako stroj ima dvoslojne namote, termometri se smještaju između slojeva, jer je temperatura tamo najbliža stvarnoj temperaturi bakra. Kod mjerenja temperature pomoću otporničkih termometara postoje uređaji koji pretvaraju otpor ovih elemenata u temperaturu.

Od otporničkih termometara se često koriste RTD senzori. To su senzori otpora na bazi platine (npr. PT100) koji mijenjaju otpor s promjenom temperature. PT100 senzori su vrlo pouzdani i stabilni te se koriste za precizna mjerenja u industriji, a imaju linearnu promjenu otpora po stupnju Celzija.

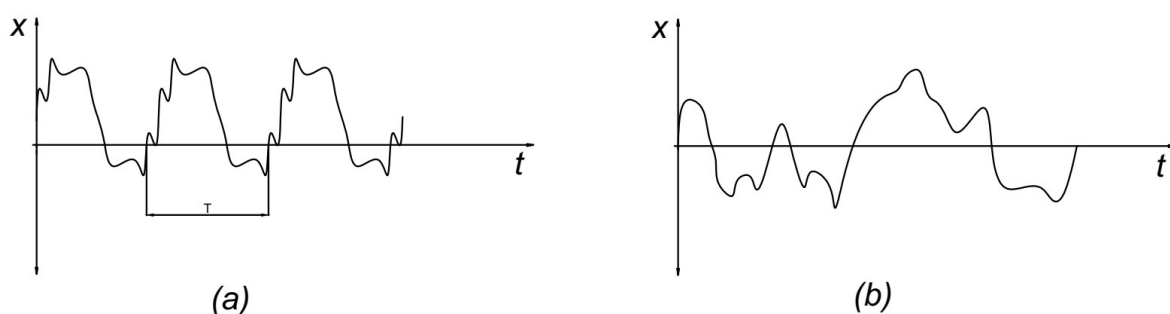
Na sličan način rade i termistori, koji također mijenjaju svoj električni otpor u ovisnosti o temperaturi, samo što oni koriste poluvodičke materijale koji imaju znatno nelinearniji odziv na promjenu temperature. Postoje dva tipa termistora; NTC (negativni temperaturni koeficijent), kod kojih otpor opada s porastom temperature, i PTC (pozitivni temperaturni koeficijent), kod kojih otpor raste s porastom temperature. Termistori se često koriste zbog brzog odziva i preciznog mjerenja.

Termovizijsko ispitivanje je metoda beskontaktnog mjerenja površinskih temperatura koja se temelji na emisiji infracrvenog zračenja od strane svih tijela s temperaturom iznad apsolutne nule. Ovo toplinsko zračenje nastaje zbog kaotičnog termičkog gibanja molekula unutar materijala. Ispitivanje se provodi kamerom opremljenom senzorom koji detektira infracrveno zračenje koje objekt emitira. Dobiveni podaci pretvaraju se u električne signale i obrađuju unutar računala kamere, prikazujući na monitoru sliku objekta s različitim temperaturnim raspodjelama u obliku različitih boja.

5.3. Vibracijska dijagnostika

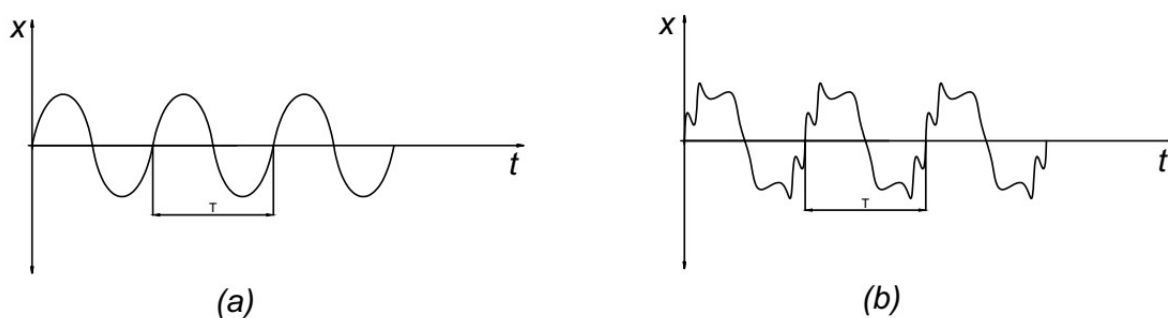
Vibracije su mehaničke oscilacije sustava oko ravnotežnog položaja, obično s malim amplitudama. U većini slučajeva vibracije su nepoželjne i štetne jer mogu izazvati poremećaje u radu, lomove dijelova te nepotrebno trošenje mehaničke energije.

Vibracije mogu biti podijeljene na periodične i neperiodične. Periodične vibracije, poznate i kao determinističke vibracije, ponavljaju se u pravilnim intervalima. Neperiodične vibracije, poznate kao stohastičke vibracije, javljaju se bez određenog oblika koji se ponavlja i imaju nasumičnu prirodu. Na slici 5.8 su prikazani primjeri periodičnih i neperiodičnih vibracija.



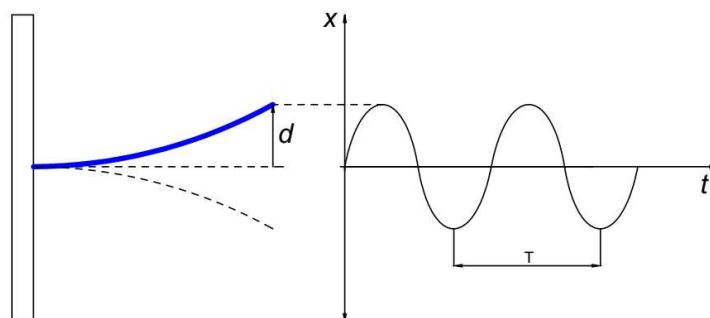
Slika 5.8. a) Periodične – determinističke vibracije, b) Neperiodične – stohastičke vibracije

Periodične vibracije mogu se dodatno klasificirati na harmonijske i neharmonijske. Harmonijske vibracije su periodične vibracije koje se odvijaju prema sinusoidnom zakonu. S druge strane, neharmonijske vibracije uključuju složenije oblike oscilacija koji ne slijede sinusoidni obrazac. Na slici 5.9 su grafički prikazani primjeri harmonijskih i neharmonijskih vibracija.



Slika 5.9. a) Harmonijske vibracije, b) Neharmonijske vibracije

Period vibracija, označen kao T , predstavlja vrijeme potrebno za jedno potpuno oscilacijsko kretanje. Amplituda, označena kao d_{max} , je maksimalni pomak od ravnotežnog položaja i predstavlja najveću udaljenost koju sustav postiže tijekom vibracija. Na slici 5.10 su prikazane navedene veličine.

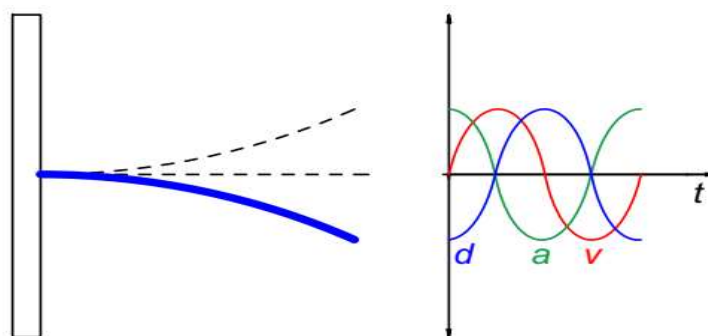


Slika 5.10. Prikaz perioda i amplitude vibracija

- $T = \text{period}$
- $d_{\max} = \text{amplituda (max. pomak)}$

Temeljne veličine vibracija uključuju vibracijski pomak d , vibracijsku brzinu v i vibracijsko ubrzanje a . Vibracijski pomak je udaljenost koju sustav postiže od ravnotežnog položaja, vibracijska brzina mjeri koliko brzo se pomak mijenja u vremenu, dok vibracijsko ubrzanje opisuje promjenu vibracijske brzine.

Na slici 5.11 je prikazan odnos vibracijskog pomaka, brzine i akceleracije.

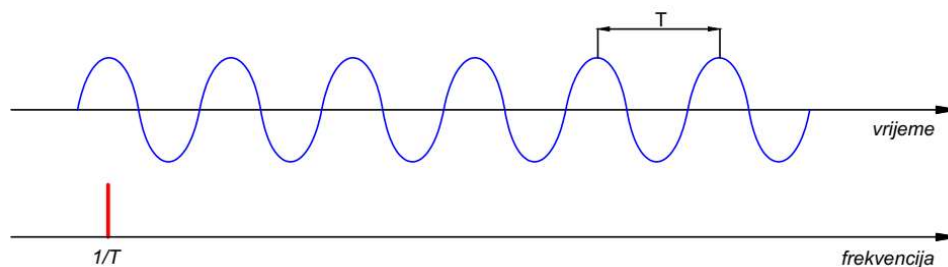


Slika 5.11. Prikaz temeljnih veličina vibracija

- $d = \text{vibracijski pomak [mm]}$
- $v = \text{vibracijska brzina [mm/s]}$
- $a = \text{vibracijsko ubrzanje [mm/s}^2\text{]}$

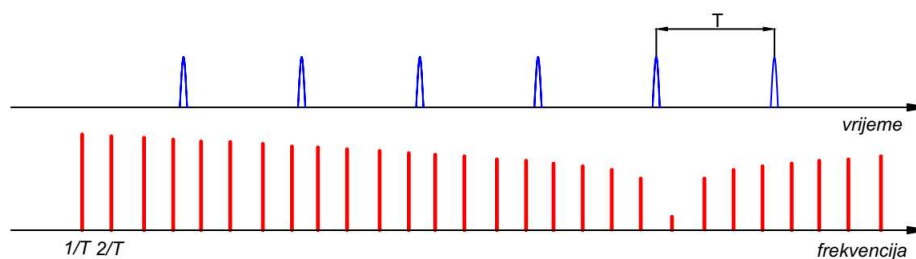
Vibracije se mogu analizirati u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. Najčešća i jedna od najpouzdanijih metoda za opis i analizu dinamičkih pojava je frekvencijska analiza, koja prikazuje vibracije kao funkciju frekvencije, tj. u frekvencijskoj domeni. Analizom spektra moguće je razložiti kompleksni valni oblik i prikazati ga na dijagramu s frekvencijom na x-osi i amplitudom na y-osi, što se u ovom slučaju naziva vibracijski spektar. Ova analiza je vrlo učinkovita za dijagnosticiranje različitih kvarova. U vremenskoj domeni vidimo valni oblik koji predstavlja zbir svih pojedinačnih frekvencija, dok u frekvencijskoj domeni možemo vidjeti frekvencije i amplitude svake komponente. Pretvorba iz vremenske u frekvencijsku domenu postiže se Fourierovom transformacijom, koja omogućuje prikaz bilo koje periodične krivulje, bez obzira na njenu složenost, kao niz sinusoidnih krivulja različitih frekvencija i amplitude.

Na slici 5.12 prikaz je harmonijskih vibracija frekvencije $1/T$ u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.



Slika 5.12. Prikaz harmonijskih vibracija u vremenskoj i frekvencijskoj domeni

Na slici 5.13 vidljivo je periodično udarno opterećenje koje sadrži više harmonike prikazano u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.



Slika 5.13. Prikaz periodično udarnog opterećenja u vremenskoj i frekvencijskoj domeni

Mjerenje i analiza vibracija

Prilikom mjerenja i analize vibracija važno je odrediti frekvencijsko područje i primijeniti odgovarajuće veličine za to područje. Vibracijski pomak se najčešće mjeri u rasponu od 0 Hz do 10 kHz, vibracijska brzina u rasponu od 10 Hz do 10 kHz, dok vibracijsko ubrzanje obuhvaća frekvencije od 1 kHz pa naviše, često do preko 100 kHz. To znači da su više frekvencije izraženije u dijagramima ubrzanja, dok u dijagramima pomaka mogu biti gotovo neprimjetne. Za razliku od navedenoga, pri nižim frekvencijama je pogodnije mjeriti vibracijski pomak i brzinu. Ovim je omogućeno precizno praćenje i analiza vibracija prema specifičnim frekvencijskim područjima i potrebama.

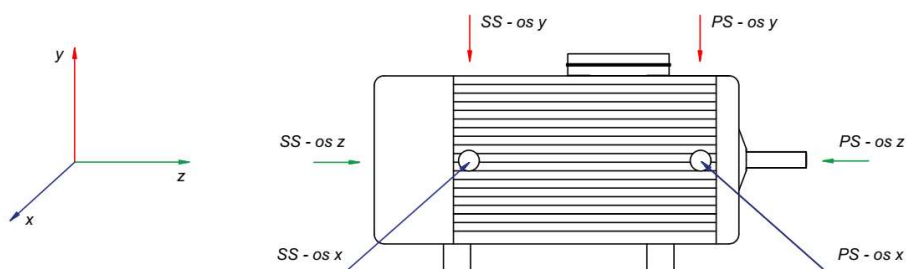
Svaki vibracijski sustav ima jednu ili više vlastitih frekvencija. Vlastita frekvencija sustava predstavlja frekvenciju pri kojoj sustav prirodno oscilira kada nije pod utjecajem vanjskih sila. Vlastite frekvencije su jedan od najčešćih uzroka vibracijskih problema jer realni sustav u pravilu posjeduje nekoliko izraženih vlastitih frekvencija.

Kada frekvencija uzbude dođe blizu ili se poklopi s vlastitom frekvencijom sustava, dolazi do nekontroliranog povećanja vibracija. U tom slučaju javlja se rezonancija te nastanak pojave rastitravanja. Primjer rastitravanja može se uočiti kod kritične brzine rotacijskih strojeva. To se događa kada stroj ubrzava, te se na određenoj brzini javljaju najveće vibracije. Kada bi uzbuda ostala na toj rezonantnoj frekvenciji, rastitravanje sustava bilo bi još izraženije, a mogućnost oštećenja veća.

Mjerenje i analiza vibracija u električnim strojevima predstavlja važnu metodu za procjenu stanja stroja i identifikaciju potencijalnih kvarova. Vibracije električnih strojeva mogu se pojaviti zbog neuravnoteženosti rotora, oštećenja ležaja, pogrešne montaže, oštećenja temelja, lokalne rezonancije konstrukcijskih dijelova, slučajnog dodirivanja rotirajućih i mirujućih dijelova, te električnih i magnetskih nesimetrija. Kod jedinica veće snage vibracijska dijagnostika postaje još važnija jer može spriječiti ozbiljne kvarove. Čovjek opipom osjeća pomake iznosa 0,01 mm, a za preciznija mjerenja i analizu vibracija potrebno je provesti detaljnu dijagnostiku vibracija kako bi se pravovremeno identificirali i otklonili uzroci vibracijskih problema.

Instrumenti za mjerenje vibracija koriste se za precizno praćenje vibriranja pojedinih dijelova električnih strojeva. Senzori za mjerenje vibracija postavljaju se na određene točke stroja, kao što su ležajevi, kućišta i temelji. Pravilno postavljanje senzora, uz odgovarajuće pričvršćivanje i orijentaciju, nužno je za točne rezultate i dijagnozu stanja stroja.

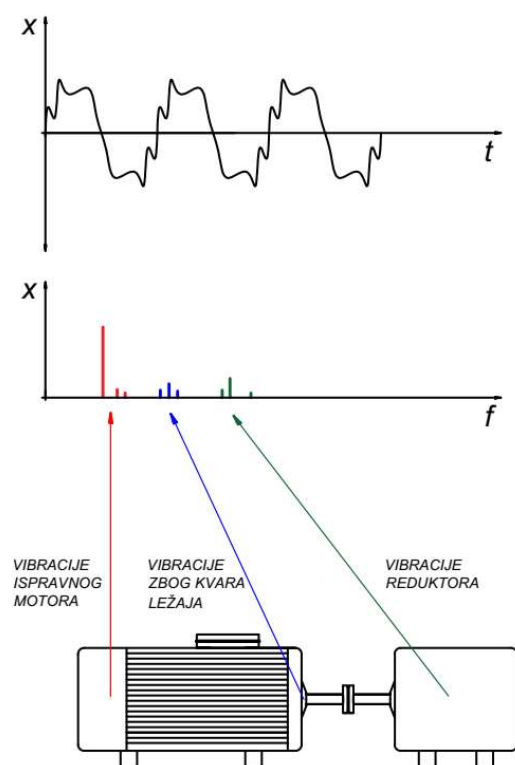
Pozicije postavljanja senzora za mjerenje vibracija električnih strojeva prikazano je na slici 5.14.



Slika 5.14. Pozicije mjerenja vibracija na električnom stroju

Analiza vibracija u strojevima temelji se na snimljenim signalima koji su rezultat miješanja vibracija iz različitih izvora, odnosno elemenata stroja, što otežava preciznu interpretaciju stupnja oštećenja određenog elementa. Izdvajanjem frekvencijskih signala specifičnih elemenata omogućuje se ne samo lokaliziranje kvarova, već i kontinuirano praćenje stanja i procjene oštećenja svakog pojedinog elementa. Periodične vremenske funkcije mogu se rastaviti na harmonijske (sinusne) komponente, za koje je moguće odrediti amplitudu pomaka (izraženo u μm) i fazni pomak (izraženo u stupnjevima) u odnosu na referentnu točku, čime se dobiva detaljna analiza vibracijskog stanja stroja.

Primjer analize vibracija elektromotora prikazan je na slici 5.15 gdje su vibracije iz tri različita izvora sumirane na vremenskom dijagramu, te potom razložene na frekvencijskom dijagramu.



Slika 5.15. Prikaz vibracija iz tri različita izvora u vremenskoj i frekvencijskoj domeni

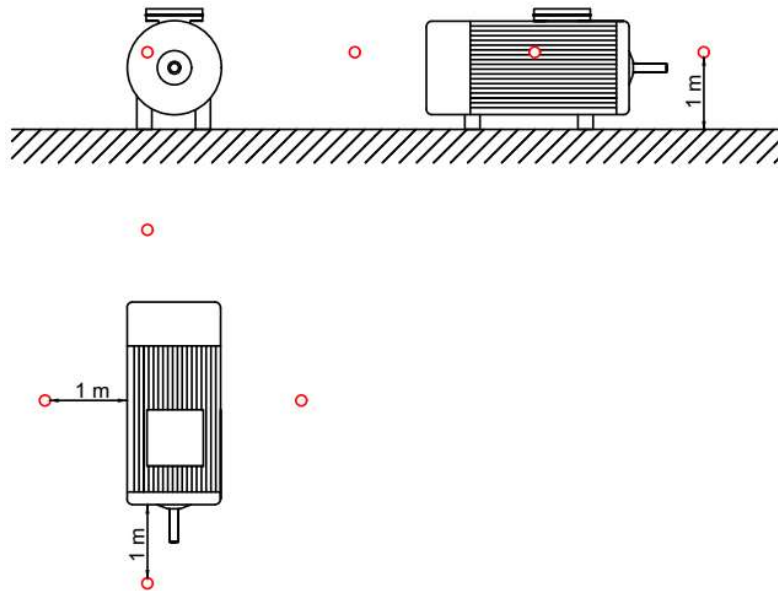
Metode mjerenja vibracija dijele se na kontaktne, koje zahtijevaju fizički kontakt s objektom, i beskontaktna, koje to ne zahtijevaju. Vibracije se mogu pratiti trajno putem on-line nadzora ili povremeno, kod manjih jedinica, koristeći prenosive instrumente. Značajnu ulogu u mjerenju i analizi vibracija imaju piezoelektrični mjerni davači, koji su precizni i pouzdani senzori za mjerenje vibracija.

Analiza vibracija nudi brojne prednosti u ispitivanju strojeva, uključujući detektiranje širokog spektra mogućih kvarova. Ova metoda omogućuje rano otkrivanje problema prije nego što postanu ozbiljni, čime se sprječavaju skupi popravci i produžuje vijek trajanja opreme. Štoviše, analiza se može provoditi dok je stroj u pogonu, što znači da se rad ne mora zaustaviti, a metoda je nerazorna i ne ometa operacije. S obzirom na relativno niske cijene mjernih pretvornika i mogućnost primjene različitih stupnjeva sofisticiranosti instrumenata, analiza vibracija predstavlja pristupačnu i fleksibilnu opciju za učinkovito ispitivanje, održavanje i upravljanje strojevima.

5.4. Akustička ispitivanja

Svaki električni stroj u radu predstavlja i izvor buke. Buka se općenito kod električnih strojeva može podijeliti u tri kategorije: mehanička, aerodinamička i magnetska. Mehaničku buku uzrokuju rotacijski dijelovi stroja pri vrtnji kao što su ležajevi, klizni koluti i sl. Aerodinamička buka se stvara zbog strujanja rashladnog medija, a ovisna je o izvedbi samoga hlađenja stroja. Magnetska buka nastaje zbog magnetskih stanja u stroju. Ukupna buka stroja predstavlja sumu svih navedenih buka.

Kako se najčešće stroj na kojem se mjeri buka nalazi u okolini drugih strojeva i pogona, buka okoline u pravilu ometa pravilno mjerenje. Buka stroja najtočnije se može izmjeriti u gluhim komorama u koje ne prodire buka okoline. Ako se mjerenje buke treba vršiti u postrojenju gdje je prisutna buka okoline, potrebno je vršiti korekciju izmjerenih vrijednosti. Mjerenje se provodi pomoću mikrofona koji se postavljaju u blizini stroja. Na slici 5.16 prikazan je primjer postavljanja mikrofona kod asinkronog motora pri mjerenju buke.



Slika 5.16. Pozicije senzora za mjerenje buke električnog motora, pogled sa strane i odozgo

Mjerenje buke provodi se kako bi se odredila razina buke, a to je u prvom redu važno iz razloga što prevelika razina buke može štetno utjecati na psihofizičko stanje ljudi te uzrokovati oštećenje sluha. Dozvoljene razine buke za rotacijske električne strojeve određene su normom IEC 60034-9.

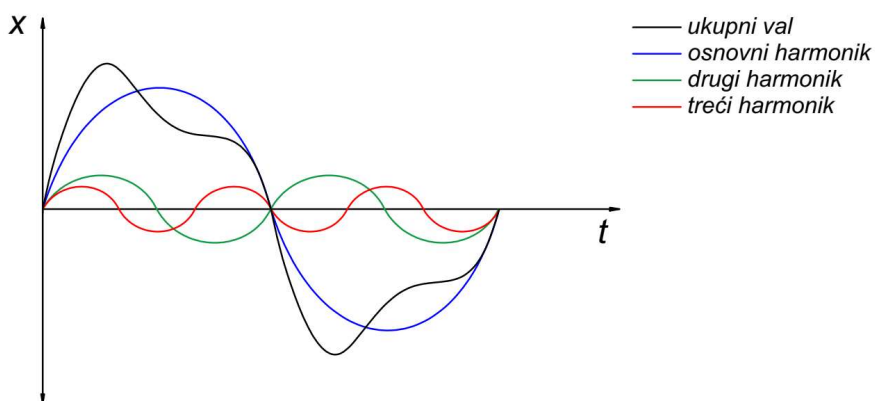
Osim zbog zdravstvenih razloga, akustička ispitivanja sve se više koriste kod ispitivanja i prediktivnog načina održavanja električnih strojeva. Mjerenjem i analiziranjem buke stroja može se utvrditi njegovo stanje i odrediti potencijalni kvarovi. Snimljeni signal buke obrađuje se u računalu korištenjem različitih matematičkih rješenja kako bi se izvukla korisna informacija, tj. razdvojili signali koji predstavljaju buku u normalnom radu stroja i signali zvukova koji mogu predstavljati potencijalne kvarove. U tu svrhu se često koristi brza Fourierova transformacija FFT. Nakon što se snimi buka stroja u različitim režimima rada, te signal obradi, dobije se prikaz pojedinih harmonika za različita stanja stroja. Na osnovu tih informacija stvaraju se baze podataka koje se kasnije koriste za usporedbe i analiziranja kod budućih ispitivanja.

5.5. Spektralna analiza struje

Spektralna analiza struje omogućuje detaljnu procjenu stanja električnih strojeva kroz duboku analizu mjernog signala struje. Kada se vrijednost struje mora dodatno istražiti, signal iz strujnog mjernog transformatora prosljeđuje se na spektralni analizator, koji koristi Fourierovu transformaciju FFT za dobivanje frekvencijskog spektra. Ovaj spektar se zatim prenosi u

računalo, koje analizira podatke i dijagnosticira stanje stroja. Spektralna analiza struje omogućava detekciju kvarova namota i mnogih drugih nepravilnosti u stroju, kao što su nesimetrija, ekscentričnost, neravnoteža, te odstupanja u odnosu na prethodna mjerenja ili ispravna stanja.

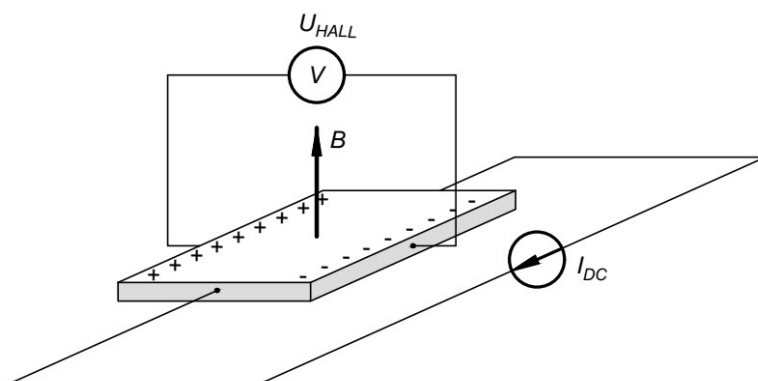
Slika 5.17 prikazuje primjer Fourierove transformacije za signal koji se sastoji od osnovnog (prvog) harmonika i viših harmonika.



Slika 5.17. Prikaz razlaganja ukupnog vala na harmonike

5.6. Magnetska mjerenja

Magnetska mjerenja predstavljaju jedna od važnijih mjerenja pri ispitivanju željezne jezgre, ali i namota te zračnih raspoređivanja električnih strojeva. Ona se provode najčešće upotrebom Hallove sonde. Hallova sonda ili senzor temelji se na Hallovom efektu, fenomenu koji se javlja u tankoj metalnoj ili poluvodičkoj pločici kroz koju teče električna struja, a koja se nalazi pod utjecajem okomitog magnetskog polja. Ovaj efekt rezultira stvaranjem električnog napona u poprečnom smjeru pločice, pri čemu je taj napon proporcionalan magnetskoj indukciji. Hallova sonda je dizajnirana s četiri kontakta; dva strujna kroz koja teče struja i dva naponska na kojima se mjeri naponski signal, što omogućuje precizno mjerenje magnetske indukcije u željeznoj jezgri električnog stroja. Na slici 5.18 prikazan je princip mjerenja magnetske indukcije pomoću Hallove sonde.



Slika 5.18. Princip mjerenja magnetske indukcije pomoću Hallove sonde

Analizom magnetskog polja u zračnom rasporu električnog stroja moguće je izvući važne zaključke o njegovom stanju. Postavljanjem Hallove sonde u zračni raspor, dobiva se raspodjela magnetske indukcije koja se može analizirati za različite točke unutar stroja, omogućujući uvid u promjene magnetskog polja. Mjerenje se može provoditi na ispravnom i kvarnom stroju, što omogućuje usporedbu podataka i identifikaciju odstupanja. Za pouzdanu detekciju kvara važno je pratiti promjene amplituda valnog oblika, provesti frekvencijsku analizu te analizirati harmonike. Poremećaji u magnetskom polju, poput onih uzrokovanih međuzavojnim kratkim spojem, manifestiraju se kao lokalizirani poremećaji i rezultiraju promjenama u broju i amplitudama harmoničkih članova analiziranog valnog oblika magnetske indukcije.

6. ISPITIVANJE TRANSFORMATORA

Ispitivanje energetskih transformatora predstavlja neizostavnu aktivnost u održavanju pouzdanosti i sigurnosti kako samih transformatora tako i cijelog elektroenergetskog sustava. Za osiguranje optimalne funkcionalnosti i dugovječnosti transformatora, nužno je provoditi redovito održavanje uz periodična ispitivanja i nadzor stanja. U skladu s vrstom transformatora, koji mogu biti suhi ili uljni, metode ispitivanja se specifično prilagođavaju njihovoj vrsti. Suhi transformatori zahtijevaju testiranje usmjereno na otpornost izolacije i kontrolu termalne stabilnosti, dok uljni transformatori zahtijevaju dodatna ispitivanja poput analize fizičko-kemijskih svojstava izolacijskog ulja, praćenja stanja ulja te ispitivanja na prisutnost plinova zbog potencijalnih problema s izolacijom. Stalni nadzor uključuje praćenje bitnih parametara poput temperature, napona i struje, što omogućava pravovremenu detekciju nepravilnosti i prevenciju mogućih kvarova.

Prije izvođenja bilo kakvih aktivnosti na transformatoru važno je prvo proučiti nazivne podatke navedene na natpisnoj pločici transformatora. Ovi podaci pružaju osnovne informacije o tehničkim specifikacijama i radnim parametrima transformatora, što je neophodno za pravilno planiranje i izvođenje svih operacija na njima.

Svaki električni stroj, pa tako i transformator, ima natpisnu pločicu s osnovnim podacima. Ova pločica pruža generalne informacije o tipu transformatora, dok podaci za konkretni transformator mogu varirati unutar granica određenim propisima (npr. IEC normama). Natpisna pločica služi za osnovno upoznavanje s transformatorom, dok točni parametri moraju biti potvrđeni mjerenjem. Svaka planirana promjena bitnih parametara mora se zabilježiti na natpisnoj pločici.

Natpisna pločica transformatora treba sadržavati naziv proizvođača, tip i tvornički broj, godinu proizvodnje, nazivne vrijednosti napona i struje primarnog i sekundarnog namota, nazivnu snagu, nazivnu frekvenciju, oznaku spoja, napon kratkog spoja, struju i dozvoljeno vrijeme trajanja kratkog spoja, stupanj izolacije, podatke o hlađenju te masu transformatora.

Na slici 6.1 prikazan je primjer natpisne pločice transformatora.

KONČAR D&ST				TRANSFORMATOR	
Položaj				Tip	
20 10				3TBNv0 250-24x/B	
①	+5%	21000	10500	Broj	CT1562-605109
②	+2.5%	20500	10250	God.	2012
③	Nazivni napon	20000	10000	Snaga	250 kVA
④	-2.5%	19500	9750	Spaj	Dyn5
⑤	-5%	19000	9500	Standard	IEC 60076
				Frekv.	50 Hz
				Hlađenje	ONAN
				Br. faza	3
Nazivne struje				20kV	4.0 %
7.2 14.4 361 A				10kV	4.0 %
Stupanj izolacije				Masa ulja	180 kg
LI125 AC50 LI75 AC28 AC3				Ukupna masa	925 kg
MADE IN CROATIA					

Slika 6.1. Primjer natpisne pločice transformatora

6.1. Ispitivanje namota i željezne jezgre transformatora

6.1.1. Identifikacija stezaljki

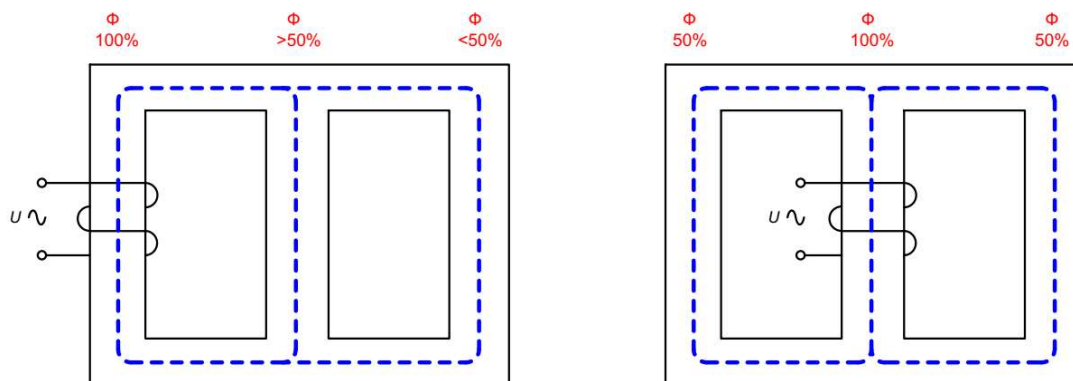
Stezaljke transformatora mogu biti iz različitih razloga neoznačene, što zahtijeva njihovu točnu identifikaciju. Trofazni transformator ima tri stupa željezne jezgre, pri čemu je na svakom stupu smješten po jedan primarni i jedan sekundarni namot. Identifikacija stezaljki uključuje određivanje njihove pripadnosti primarnom ili sekundarnom namotu, povezivanje s odgovarajućim stupom jezgre te utvrđivanje početka i završetka svakog namota u odnosu na smjer namatanja.

Primarne i sekundarne stezaljke, koje se odnose na visokonaponske i niskonaponske priključke transformatora, mogu se lako razlikovati prema fizičkim karakteristikama, kao što su presjek izvoda i veličina izolatora. Veći presjek izvoda odgovara niskonaponskim stezaljkama, a robusniji izolatori pripadaju visokonaponskim stezaljkama.

Kako bi se točno odredila pripadnost pojedinih stezaljki odgovarajućim namotima, vrši se mjerenje otpora i provjera galvanke povezanosti između pojedinih stezaljki, čime se može utvrditi koji su izvodi međusobno povezani te predstavljaju izvode istog namota.

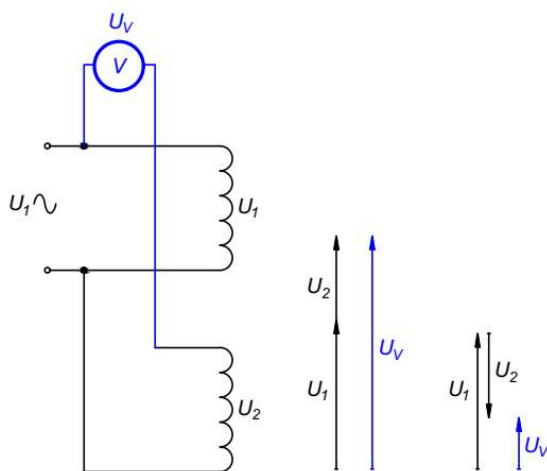
Da bi se odredilo kojem stupu jezgre pripada određeni namot, koristi se metoda analize raspodjele magnetskog toka. Priključivanjem jednofaznog napona na referentni namot na krajnjem stupu, inducira se magnetski tok koji se zatim raspodjeljuje na ostale stupove jezgre

u omjeru njihovih magnetskih otpora (slika 6.2). Analizom visine induciranih napona u svakom namotu, jednoznačno se može odrediti pripadnost namota određenom stupu jezgre.



Slika 6.2. Raspodjela magnetskog toka pri priključivanju ispitnog napona na namot smješten na krajnji i srednji stup

Za određivanje smjera namatanja potrebno je odrediti početke i krajeve namota. Način određivanja smjera namatanja prikazan je na slici 6.3. Na referentni namot na krajnjem stupu dovodi se jednofazni napon U_1 . Zatim je potrebno spojiti kraj referentnog namota, koji je proizvoljno odabran, s jednom stezaljkom ispitivanog namota i mjeriti razliku napona između preostalih stezaljki. Ako voltmetar pokazuje povećavanje napona u odnosu na referentni napon $U_V = U_1 + U_2$, stezaljka ispitivanog namota spojena na voltmetar predstavlja kraj namota, a ako voltmetar pokazuje smanjenje $U_V = U_1 - U_2$, navedena stezaljka predstavlja početak namota.



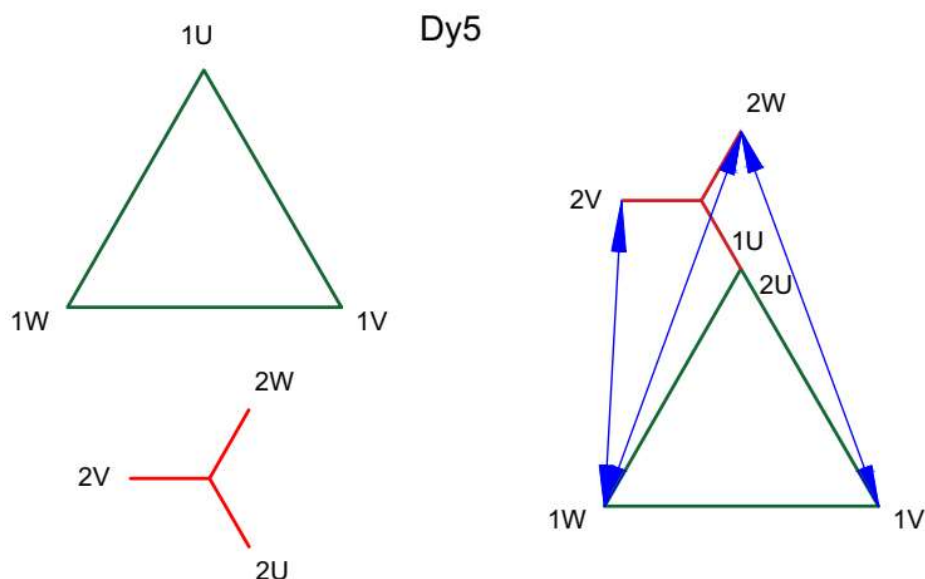
Slika 6.3. Način određivanja smjera namatanja namota

6.1.2. Ispitivanje grupe spoja

Pri ispitivanju grupe spoja transformatora potrebno je provjeriti ispravnost spoja primarnog i sekundarnog namota, izvršiti mjerenja te usporediti vrijednosti s vektorskom slikom za određenu grupu spoja.

Ispitivanje se provodi tako da se stezaljke najčešće U_1 i U_2 spoje ukratko te se na primar narine smanjeni napon uz kontrolu struje u sve tri faze. Potom se vrši mjerenje napona između svih

stezaljki transformatora. Uspoređivanjem izmjerenih napona s naponima koji su određeni iz vektorske slike za odgovarajuću grupu spoja može se utvrditi ispravnost grupe spoja transformatora. Na slici 6.4 prikazan je vektorski dijagram za kontrolu grupe spoja Dy5.



Slika 6.4. Vektorski dijagram za kontrolu grupe spoja Dy5

6.1.3. Određivanje prijenosnog omjera

Prijenosni omjer transformatora predstavlja omjer nazivnih napona bez kraćenja razlomka, a njegova vrijednost ne smije odstupati više od 0,5% od nazivnog prijenosnog omjera. Točno mjerenje prijenosnog omjera je bitno, posebno u paralelnom radu transformatora, jer i male razlike mogu uzrokovati značajne struje izjednačenja.

Prijenosni omjer transformatora k računa se prema sljedećoj formuli:

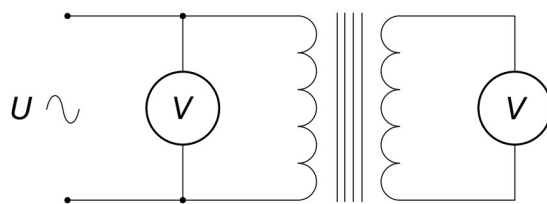
$$k = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad (6.1)$$

gdje je:

- U_{1n} – ulazni nazivni napon,
- U_{2n} – izlazni nazivni napon (napon pri ulaznom nazivnom naponu neopterećenog transformatora).

Za određivanje prijenosnog omjera transformatora koriste se različite metode, a najjednostavnija je metoda s dva voltmetra. Zbog male tolerancije dozvoljenog odstupanja prijenosnog omjera, voltmetri moraju biti visoke klase točnosti, a mjerenje se vrši istovremenim očitavanjem napona na oba voltmetra.

Slika 6.5 prikazuje shemu spajanja voltmetara na transformator pri određivanju prijenosnog omjera.



Slika 6.5. Shema spajanja voltmetera pri određivanju prijenosnog omjera transformatora

6.1.4. Mjerenje otpora namota transformatora

Određivanje otpora namota U-I metodom s istosmjernim naponom izvodi se mjerenjem struje i napona te se otpor izračuna prema Ohmovom zakonu:

$$R_x = \frac{U_v}{I} \quad (6.2)$$

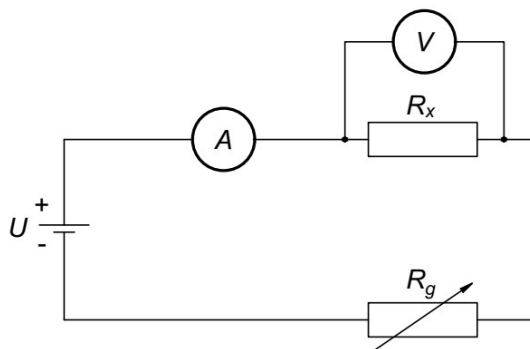
gdje je:

R_x - otpor namota,

U_v – pad napona na namotu,

I – struja kroz namot.

Mjerenje se izvodi prema shemi na slici 6.6. Otpor R_x predstavlja otpor namota koji se želi odrediti, a otpor R_g je regulacijski otpor za podešavanje mjerne struje.



Slika 6.6. Shema spoja za mjerenje otpora namota transformatora U-I metodom

Mjerenje otpora namota se vrši mjernom strujom iznosa do 10% nazivne struje namota kako ne bi dolazilo do znatnijeg zagrijavanja te utjecaja na iznos otpora. Kako su otpori namota u pravilu relativno malog iznosa, pad napona na namotu će biti također mali pa je potrebno koristiti osjetljivi voltmeter. Kod mjerenja otpora napona potrebno je koristiti naponski spoj kako bi se smanjila pogreška mjerenja.

S obzirom da namot ima velik induktivitet, koji uzrokuje spor rast struje, može doći do netočnih rezultata ako se očitavanje napravi odmah nakon uključenja napona. Da bi se dobio točan otpor, potrebno je pričekati da se struja stabilizira.

Mjerenje otpora namota mora se provoditi pri poznatoj temperaturi, što je važno za precizno preračunavanje otpora na referentnu temperaturu. Vrijednosti otpora mogu se uspoređivati samo s vrijednostima izmjerenim u istom mjernom spoju i pri referentnoj temperaturi od 20 °C.

Izmjerene vrijednosti otpora preračunavaju se na referentnu temperaturu pomoću sljedeće formule:

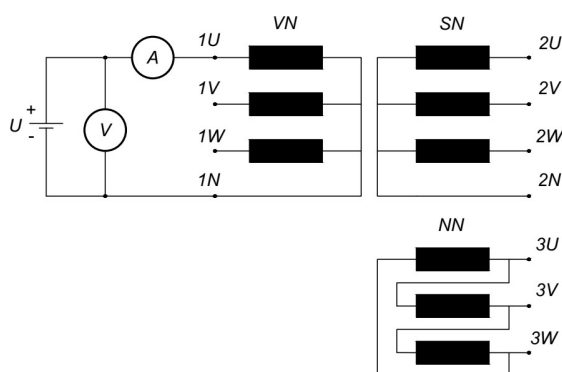
$$R_{20} = R_T \cdot \frac{k + 20}{k + T} \quad (6.3)$$

gdje je:

- R_{20} – otpor pri referentnoj temperaturi 20 °C
- R_T – otpor pri temperaturi T
- T – temperatura namota pri mjerenju
- k – konstanta (bakar 235, aluminij 225)

Izmjerene vrijednosti često se preračunavaju i na pogonsko toplo stanje za koje se uzima temperatura 75 °C.

Mjerenje otpora trofaznog transformatora provodi se na sve tri faze prema shemi na slici 6.7.



Slika 6.7. Shema mjerenja otpora jedne faze VN namota

Stanje namota može se ocijeniti prema dva kriterija.

Prvi kriterij uključuje usporedbu izmjerenih vrijednosti s referentnim vrijednostima, koje mogu biti tvorničke ili dobivene pri puštanju transformatora u pogon.

Drugi kriterij zahtijeva da vrijednosti otpora na sve tri faze budu približno jednake. Razlika otpora između pojedinih faza računa se prema sljedećem izrazu:

$$\Delta R_{namota} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} \cdot 100 [\%] \quad (6.4)$$

gdje se R_{max} i R_{min} odnose na fazu s najvišom i najnižom vrijednost otpora. Razlika otpora između pojedinih faza iznad 3-5% zahtjeva dodatna ispitivanja. Jedan od razloga povećanog otpora mogu biti loši električni spojevi.

Mjerenje se izvodi u svim položajima regulacijske sklopke tako da se ovom metodom vrši provjera: namota, regulacijske sklopke te električnih spojeva.

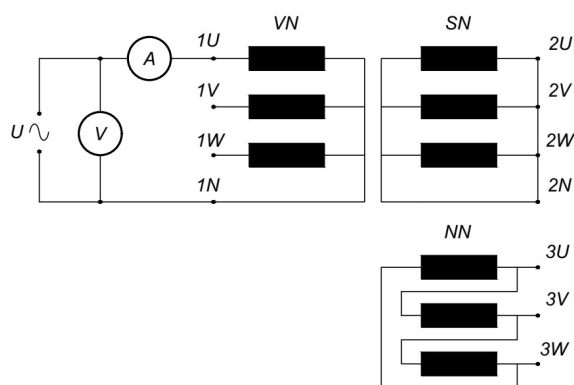
6.1.5. Ispitivanje deformacije namota mjerenjem rasipnih induktiviteta

U slučaju kratkog spoja transformatora dolazi do velikih dinamičkih sila u namotu koje ga mogu deformirati tako da dođe do izbacivanja zavoja ili pomaka cijelog namota. U tom slučaju dolazi do promjene rasipnog induktiviteta i kapaciteta. Upravo mjerenjem rasipnog induktiviteta moguće je utvrditi da li je došlo do deformacije namota transformatora.

U-I metoda, prikazana na slici 6.8, često se koristi za mjerenje rasipnog induktiviteta. Izmjenični naponski izvor priključuje se na namot, a potom se mjere potrebne električne veličine i unose u izraz za izračunavanje rasipne reaktancije X_L i rasipnog induktiviteta L_X .

$$X_L = \sqrt{\frac{U_i^2}{I^2} - R^2} \quad (6.5)$$

$$L_X = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (6.6)$$



Slika 6.8. Shema mjerenja rasipnog induktiviteta jedne faze VN namota

Promjena stanja geometrije namota može se odrediti s obzirom na promjenu rasipnog induktiviteta prema sljedećem izrazu:

$$\Delta L_X = \frac{L_X - L_{Xref}}{L_{Xref}} \cdot 100 [\%] \quad (6.7)$$

gdje L_X predstavlja vrijednost rasipnog induktiviteta zadnjeg mjerenja, a L_{Xref} vrijednost rasipnog induktiviteta prethodnog referentnog mjerenja. Promjena rasipnog induktiviteta do 2.5% smatra se prihvatljivom.

6.1.6. Ispitivanje deformacije namota metodom frekvencijskog odziva

Metoda mjerenja frekvencijskog odziva (FRA) detektira kvarove transformatora koji utječu na promjenu induktiviteta ili kapaciteta namota. Budući da je komparativna, FRA metoda uspoređuje izmjerene rezultate s referentnim vrijednostima, s istim tipovima transformatora ili se uspoređuju mjerenja između različitih faza.

Tijekom FRA mjerenja transformator se pobuđuje sinusnim naponima promjenjive frekvencije, a zatim se ulazni signal i odziv analiziraju pomoću brze Fourierove transformacije. FRA metoda posebno je korisna za otkrivanje pomaka i deformacija namota, a koristi se kao dodatna potvrda u slučaju da rezultati mjerenja rasipnih induktiviteta upućuju na promjenu geometrije namota.

6.1.7. Mjerenje struje magnetiziranja

Mjerenje struje magnetiziranja transformatora koristi se za procjenu stanja jezgre i namota, pri čemu struja magnetiziranja služi kao ključni pokazatelj stanja magnetskog kruga.

Postupak uključuje priključivanje primarnog namota na izmjenični naponski izvor, dok sekundarni namot ostaje otvoren, a mjerenje struje se vrši na primarnoj strani.

Usporedbom izmjerenih vrijednosti s referentnim podacima, zabilježenim u tvornici ili pri ranijim mjerenjima, moguće je procijeniti stanje jezgre. Povećana struja magnetiziranja može ukazivati na oštećenje jezgre, kratke spojeve u namotu ili druge nepravilnosti u magnetskom krugu.

6.2. Ispitivanje izolacije namota transformatora

Većina transformatora koristi izolacijski sustav koji se sastoji od izolacijskog ulja i izolacijskog papira. Iako se ulje može periodično mijenjati, papir ostaje nepromijenjen tijekom cijelog radnog vijeka transformatora. Zbog toga je dugovječnost transformatora izravno povezana s trajnošću izolacijskog papira.

Budući da je izolacija namota transformatora od značajne važnosti, njenom ispitivanju pridaje se posebna pažnja. Ispitivanje se može provoditi korištenjem istosmjernog i izmjeničnog napona.

6.2.1. Mjerenje otpora izolacije

Pri mjerenju otpora izolacije primjenjuje se istosmjerni napon. Mjerenje se vrši U-I metodom, a otpor se određuje Ohmovim zakonom:

$$R_X = \frac{U_i}{I} \quad (6.8)$$

gdje je:

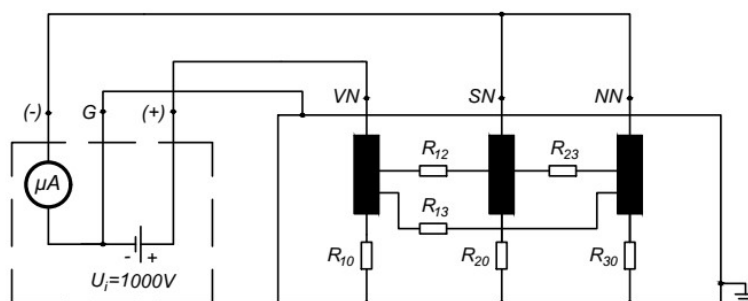
R_X - otpor izolacije namota,

U_i – ispitni napon,

I – struja kroz izolaciju.

Mjerenje otpora izolacije provodi se između namota međusobno, kao i između namota i mase transformatora. Ova mjerenja se obično izvode uređajima megaohmmetrima koji imaju skalu baždarenu u $M\Omega$, a generiraju ispitni istosmjerni napon od 250, 500 ili 1000 V te induktorskim megaohmmetrima koji generiraju napon i do 2500 ili 5000V.

Slika 6.9 prikazuje shemu mjerenja otpora izolacije VN namota transformatora prema namotima SN i NN (otpori R_{12} i R_{13}) pomoću instrumenta za mjerenje izolacije. Stezaljka G (engl. *guard*) na instrumentu služi kako bi se u ovom slučaju otklonio utjecaj otpora izolacije prema masi (otpor R_{10}). Različitim načinom spajanja mogu se izmjeriti svi prikazani otpori izolacije transformatora.



Slika 6.9. Shema mjerenja otpora izolacije VN namota tronamotnog transformatora

Kako bi se stanje izolacije što preciznije analiziralo, prilikom mjerenja otpora izolacije potrebno je očitavati vrijednosti u različitim vremenskim intervalima. Za određivanje otpora izolacije obično se uzima očitana vrijednost nakon 10 minuta mjerenja, jer se tada smatra da je proces polarizacije u najvećoj mjeri završen.

Pošto otpor izolacije ovisi o temperaturi, izmjerene vrijednosti je potrebno preračunati na vrijednost pri referentnoj temperaturi od 20 °C pomoću sljedeće formule:

$$R_{20} = R_T \cdot e^{0.06244(T-20)} \quad (6.9)$$

gdje je:

R_{20} – otpor izolacije pri temperaturi 20°C,

R_T – otpor izolacije pri temperaturi T ,

T – temperatura pri mjerenju otpora izolacije.

Preračunavanjem vrijednosti otpora izolacije na vrijednosti pri 20 °C može se vršiti usporedba s referentnim vrijednostima te na osnovu toga dati ocjena stanja izolacije.

Granične vrijednosti otpora izolacije tronamotnog transformatora nazivnog napona 110 kV kreću se prema tablici 6.1.

Tablica 6.1. Granične vrijednosti otpora izolacije tronamotnog transformatora

Un [kV]	R _{10'} [MΩ] pri 20 °C	
110	VN → SN+NN	VN → M
	1200	1100
	NN → SN+VN	NN → M
	800	500

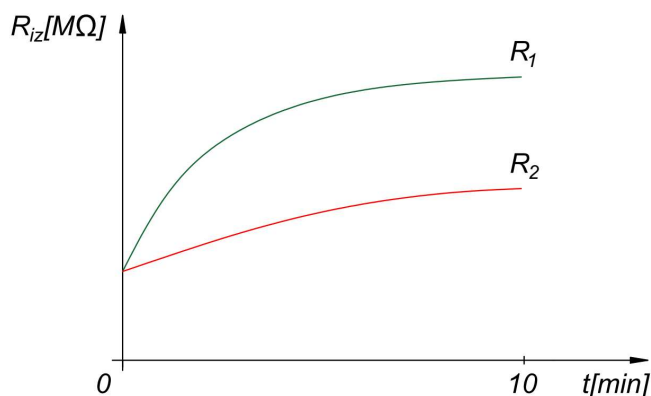
VN - višenaponski namot

SN – srednjenaponski namot

NN – niženaponski namot

M – uzemljeno kućište

Slika 6.10. prikazuje krivulje porasta otpora izolacije; R_1 za slučaj dobre izolacije, R_2 za slučaj loše izolacije u 10 minutnom intervalu mjerenja.



Slika 6.10. Krivulje porasta otpora izolacije; R_1 za slučaj dobre izolacije, R_2 za slučaj loše izolacije

6.2.2. Određivanje indeksa polarizacije

Sljedeći bitan podatak pri ispitivanju izolacije je indeks polarizacije, koji predstavlja omjer otpora izolacije nakon 60 sek. i 15 sek. mjerenja:

$$i.p. = \frac{I_{15''}}{I_{60''}} = \frac{R_{60''}}{R_{15''}} \quad (6.10)$$

gdje je:

$i.p.$ – indeks polarizacije,

$I_{15''}$ – vrijednost struje nakon 15 sek. mjerenja,

$I_{60''}$ – vrijednost struje nakon 60 sek. mjerenja,

$R_{15''}$ – vrijednost otpora nakon 15 sek. mjerenja,

$R_{60''}$ – vrijednost otpora nakon 60 sek. mjerenja.

Indeks polarizacije nije temperaturno ovisan, a odnosi se na vlažnost izolacije. U načelu nije mjerodavan za ocjenu vlažnosti i starosti izolacije, već predstavlja okvirni pokazatelj stanja izolacije. U tablici 6.2 su navedene granične vrijednosti $i.p.$ pri kojima se izolacija transformatora smatra suhom, dok vrijednosti $i.p.$ manje od 1 predstavljaju nezadovoljavajuće stanje izolacije.

Tablica 6.2. Granične vrijednosti $i.p.$ transformatora

Un [kV]	$i.p.$
< 110	≥ 1.3
110, 220	≥ 1.5

Indeks polarizacije se tradicionalno određuje kao omjer otpora R_{10min} i R_{1min} , dok se za modernije izolacijske materijale, kod kojih apsorpcijska struja kraće traje, uzima se omjer otpora R_{60sek} i R_{15sek} . S obzirom na to da današnji izolacijski materijali znatno manje upijaju vlagu, značaj indeksa polarizacije je manji u odnosu na prijašnja vremena.

6.2.3. Određivanje faktora dielektričnih gubitaka

Transformatori su tijekom rada izloženi toplinskim i mehaničkim naprezanjima, što uzrokuje promjene u njihovoj izolaciji. Različite kemijske reakcije koje se odvijaju unutar izolacijskog sustava, kao i prisutnost onečišćenja i vlage, pogoršavaju dielektrična svojstva izolacije, smanjujući njezinu učinkovitost i dugovječnost.

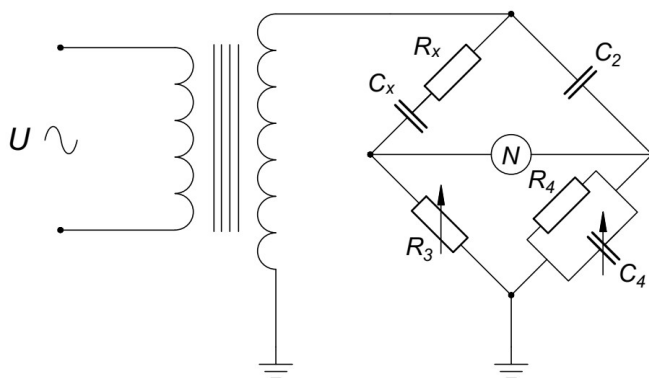
Faktor dielektričnih gubitaka $tg \delta$ dobar je pokazatelj stanja izolacije s obzirom na vlagu i onečišćenje. On ne ukazuje na lokalne slabosti, već pruža pregled općeg stanja izolacije ispitivanog transformatora. Povećavanjem faktora dielektričnih gubitaka dolazi do daljnjeg zagrijavanja izolacije i njene dodatne degradacije. Važna informacija pri interpretaciji rezultata mjerenja je promjena vrijednosti faktora dielektričnih gubitaka tijekom vremena.

Faktor dielektričnih gubitaka ovisi o kapacitetu, otporu i frekvenciji. Mjerenja kapaciteta i faktora dielektričnih gubitaka izolacije transformatora izvode se mjernim uređajem na principu Scheringovog mosta prikazanog na slici 6.11 korištenjem izmjeničnog napona 1-10 kV, 50 Hz.

Nakon što se most dovede u ravnotežno stanje, kapacitet C_x i faktor dielektričnih gubitaka $\tan \delta$ izolacije se računaju prema izrazima:

$$C_x = C_2 \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (6.11)$$

$$\tan \delta = \omega \cdot C_4 \cdot R_4 \quad (6.12)$$



Slika 6.11. Prikaz sheme mosta za mjerenje kapaciteta i faktora dielektričnih gubitaka

Faktor dielektričnih gubitaka je ovisan o temperaturi te ga je potrebno preračunati na vrijednost pri referentnoj temperaturi od 20°C ($\tan \delta_{20}$).

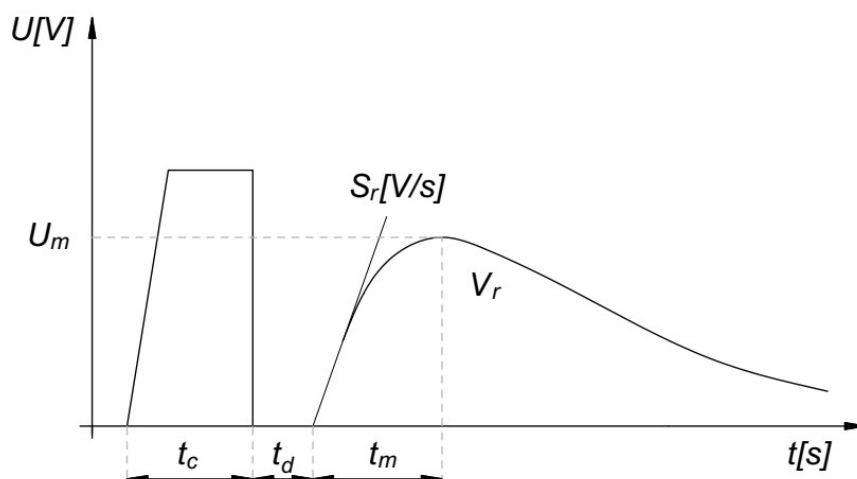
6.2.4. Ispitivanje izolacije metodom obnovljenog napona

Metodom obnovljenog napona određuje se stupanj vlažnosti papirne izolacije transformatora s uljno papirnom izolacijom bez uzimanja uzorka papira. Uređaj koji koristi ovu metodu za ispitivanje vlažnosti izolacije sastoji se od istosmjernog izvora, dviju sklopki, voltmetra i mikroprocesora.

Postupak ispitivanja je takav da se prvo uključi napon u trajanju vremena nabijanja t_c gdje dolazi do polarizacije izolacije. Zatim se stezaljke spajaju ukratko u trajanju vremena izbijanja t_d te dolazi do djelomične depolarizacije izolacije. Potom se prekida spoj između stezaljki te se priključuje voltmetar koji očitava vrijednost obnovljenog napona.

Mikroprocesor upravlja potrebnim radnjama te bilježi vrijednosti obnovljenog napona V_r , strminu S_r i vrijeme postizanja maksimalnog obnovljenog napona t_m na osnovu kojih se određuje stupanj vlažnosti izolacije.

Na slici 6.12 je prikazan dijagram napona pri ispitivanju izolacije metodom obnovljenog napona.



Slika 6.12. Dijagram napona pri ispitivanju izolacije metodom obnovljenog napona

6.3. Ispitivanje izolacijskog ulja transformatora

6.3.1. Fizikalno-kemijska analiza ulja

Fizikalno-kemijska analiza ulja procjenjuje stanje ulja s obzirom na kemijsku degradaciju, prisutnost onečišćenja, sadržaj vode i ponašanje ulja u električnom polju. Mjerenja uključuju određivanje probojnog napona, faktora dielektričnih gubitaka, specifičnog električnog otpora, te neutralizacijskog broja, odnosno količine kiselih sastojaka. Loši rezultati zahtijevaju mjere poput filtriranja ili zamjene ulja. Promjene u boji, čistoći i neutralizacijskom broju ukazuju na starenje ulja. Analiza također uključuje određivanje preostalog vijeka ulja putem laboratorijskih testova ubrzanog starenja.

Instrument za mjerenje probojnog napona transformatorskog ulja ima posudu s elektrodama u koju se stavlja ulje. Zatim se napon na elektrodama postupno povećava dok ne dođe do proboja, čime se određuje probojni napon ulja. Ispitivanja se provode prema normi IEC 60156.

6.3.2. Kromatografska analiza plinova otopljenih u ulju

Kromatografija je skup laboratorijskih tehnika koje služe za razdvajanje smjese. Temelji se na kretanju smjese, pri čemu se njezini sastojci razdvajaju, izoliraju i potom analiziraju te kvantitativno određuju.

Kromatografska analiza plinova otopljenih u ulju je pouzdana dijagnostička metoda za procjenu stanja izolacijskog sustava transformatora. U normalnim uvjetima plinovi u ulju dolaze iz zraka i zbog procesa starenja izolacije, dok se u nenormalnim uvjetima stvaraju zbog prekomjernog električnog ili toplinskog naprežavanja. Plinovi poput vodika, metana, acetilena, etilena i etana ukazuju na razaranje ulja, dok ugljični monoksid i dioksid ukazuju na razaranje celuloze.

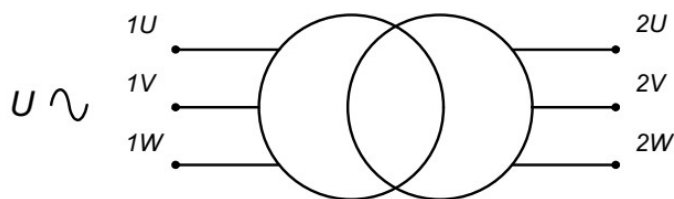
6.3.3. Ispitivanje stupanja polimerizacije papira

Stupanj polimerizacije (DP) izolacijskog papira u transformatorima mjeri duljinu molekulskih lanaca celuloze, koja je važna za ocjenu stanja izolacije. Visok stupanj polimerizacije ukazuje na duge molekulske lance, što znači da papir zadržava svoja izvorna mehanička i dielektrična svojstva. Međutim, tijekom vremena, pod utjecajem faktora poput topline, vlage i prisutnosti kisika, dolazi do degradacije celuloze, pri čemu se lanci skraćuju, a DP opada. Ovaj pad stupnja polimerizacije dovodi do slabljenja izolacijskih svojstava papira, što može ugroziti pouzdanost i sigurnost transformatora. Praćenje DP-a je stoga važno za procjenu preostalog vijeka trajanja izolacije i planiranje održavanja.

6.4. Funkcionalna ispitivanja transformatora

6.4.1. Pokus praznog hoda

Pokus praznog hoda izvodi se tako da se stezaljke jedne strane transformatora priključe na izvor napajanja, a s druge strane ostave otvorene (slika 6.13). Pri ovom ispitivanju potrebno je snimiti karakteristike praznog hoda transformatora $I_0 = f(U_0)$, $P_0 = f(U_0)$ u području $0.8 - 1.1 U_n$ te odrediti struju magnetiziranja i gubitke u željezu za nazivni napon.

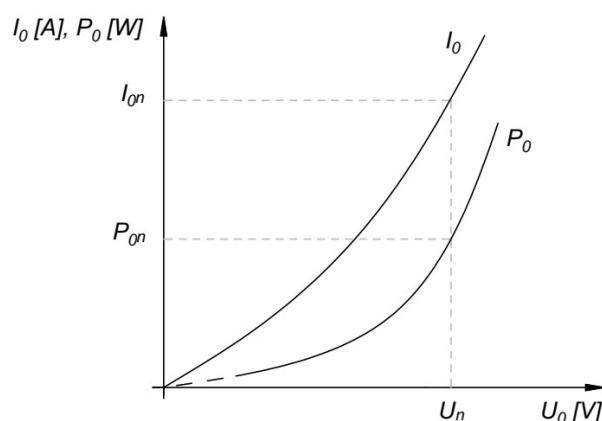


Slika 6.13. Način spajanja transformatorskih stezaljki pri pokusu praznog hoda

Struja praznog hoda se sastoji najvećim dijelom od jalove komponente za magnetiziranje jezgre, od male komponente koja je u fazi s naponom, a odnosi se na pokrivanje gubitaka, i male komponente zbog nabijanja namota.

Gubici praznog hoda nastaju zbog histereze i vrtložnih struja u jezgri, te u manjoj mjeri zbog dodatnih gubitaka kao što su: gubici u bakru, gubici u konstrukcijskim dijelovima zbog vrtložnih struja, te dielektrični gubici u izolaciji.

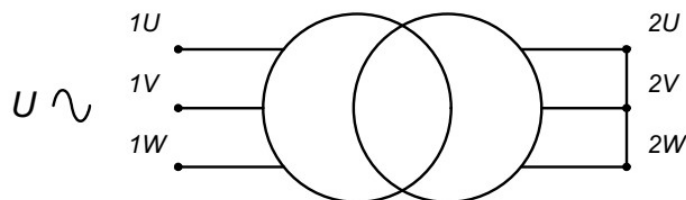
Na slici 6.14 je prikazana ovisnost struje magnetiziranja o naponu i gubici praznog hoda transformatora.



Slika 6.14. Ovisnost struje magnetiziranja o naponu i gubici praznog hoda transformatora

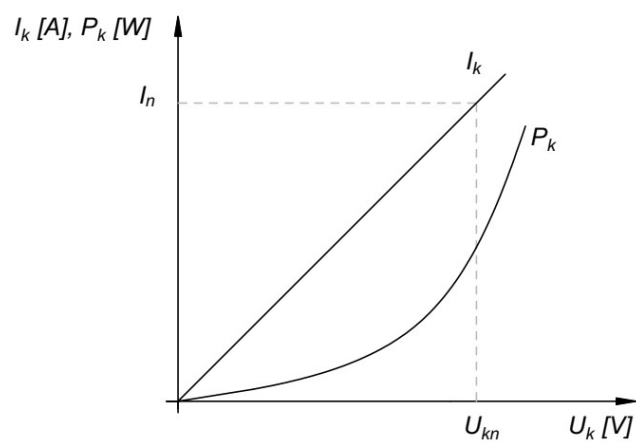
6.4.2. Pokus kratkog spoja

Pri izvođenju pokusa kratkog spoja, stezaljke primara se priključe na izvor napajanja, dok su stezaljke sekundara kratko spojene (slika 6.15). Napon izvora se postepeno povećava uz istovremeno mjerenje struje. Napon kratkog spoja pri kojem teče nazivna struja u pravilu iznosi nekoliko postotaka nazivnog napona.



Slika 6.15. Način spajanja transformatorskih stezaljki pri pokusu kratkog spoja

Ispitivanjem transformatora u pokusu kratkog spoja snimaju se karakteristike $I_k = f(U_k)$, $P_k = f(U_k)$ u području $0.8 - 1.1 I_n$ te se određuju podaci o impedanciji kratkog spoja Z_k , ukupnoj rasipnoj reaktanciji X_k te o ukupnim gubicima P_k pri nazivnoj struji. Ukupni gubici P_k se sastoje najvećim dijelom od gubitaka strujne topline zbog omskih otpora namota, te manjim dijelom od dodatnih gubitaka prouzrokovanih vrtložnim strujama u namotima, te zbog potiskivanja struje. Na slici 6.16 prikazana je ovisnost struje o naponu pri kratkom spoju i gubici kratkog spoja transformatora.



Slika 6.16. Ovisnost struje o naponu pri kratkom spoju i gubici kratkog spoja transformatora

7. ISPITIVANJE SINKRONIH STROJEVA

U ovom poglavlju bit će detaljno razmotrene metode i postupci ispitivanja sinkronih strojeva s naglaskom na sinkrone generatore kao najdominantnije predstavnike ove grupe strojeva. Sinkroni generatori su važne komponente elektroenergetskog sustava, te stoga zahtijevaju iznimnu pažnju tijekom projektiranja, izgradnje, rada i održavanja. Njihova složena konstrukcija, značajne dimenzije i velika snaga čine ih kritičnim elementima sustava, zbog čega su zahtjevna ispitivanja i sustavno održavanje neophodni za osiguranje njihove pouzdanosti, sigurnosti i dugotrajnosti.

Natpisna pločica sinkronog stroja sadrži bitne tehničke podatke koji su od vitalnog značaja za pravilnu upotrebu i održavanje stroja. Na njoj su standardno navedeni podaci kao što su nazivni napon, nazivna struja, nazivna snaga, tip napajanja uzbude (nezavisna, samouzbudna, kompaundna), struja uzbude, napon uzbude, brzina vrtnje, faktor snage, klasa izolacije pojedinih namota, vrsta zaštite, vrsta pogona, radni režim, godina proizvodnje, tvornički broj, tip i vrsta izvedbe, te naziv proizvođača. Ovi podaci pružaju osnovne informacije o konstrukciji stroja i njegovim operativnim mogućnostima, osiguravajući sigurno i efikasno korištenje. Na slici z.1 prikazan je primjer natpisne pločice sinkronog generatora.

Synchronous generator			
TYPE	GDH6529S-14	FREQUENCY	60 Hz
OUTPUT	15000 / 17250 kVA	POLES	28
VOLTAGE	13800 V	PHASES	3
CURRENT	628 / 722 A	RATING	CONT.
POWER FACTOR	0.85	INSUL. CLASS	F
SPEED	257 rpm	TEMP. RISE ST75/90 RT 80/100°C	
EX. VOLTAGE	230V	AMB. TEMP.	40 °C
EX. CURRENT	585 / 640 A	SERIAL.NO	KC69655L1
STANDARD	ANSI C50. 12-1982		
FUJI ELECTRIC		MANUFACTURED 1994	

Slika 7.1. Primjer natpisne pločice sinkronog generatora

Natpisna pločica ima i važnu ulogu pri održavanju stroja. Mjerenja i ispitivanja se provode u skladu s podacima navedenim na natpisnoj pločici. Svaka značajnija intervencija, poput prematanja namota, promjene načina hlađenja ili druga bitna modifikacija, zahtijeva ažuriranje natpisne pločice. U takvim slučajevima, nužno je dodati ili izmijeniti potrebne informacije, uz obavezno navođenje imena izvođača tih promjena, čime se osigurava praćenje povijesti rada i održavanja stroja.

7.1. Ispitivanje sinkronog generatora pri gradnji

Pri gradnji sinkronih strojeva, osobito onih velike snage, provode se opsežna ispitivanja kako bi se osigurala njihova kvaliteta i sigurnost. Ova ispitivanja su definirana normama i ugovorima, a često se provode uz prisustvo inspektora. Ispitivanja se dijele na dvije glavne skupine; ulaznu kontrolu i provjeru tehnoloških postupaka.

Ulazna kontrola obuhvaća ispitivanje bakra, izolacije, magnetskih i konstrukcijskih materijala, te provjeru njihovih električnih, magnetskih i mehaničkih svojstava.

Provjera tehnoloških postupaka uključuje kontrolu varova, provjeru paketa limova, kontrolu kvalitete izolacije namota, te ispitivanje sklopova gdje se između ostalog provodi provjera simetričnosti rotora i pokus vitlanja.

Rotor mora biti precizno izbalansiran kako bi se izbjegle centrifugalne sile uzrokovane viškom mase, dok se pokus vitlanja koristi za testiranje mehaničke čvrstoće rotora pri velikim brzinama vrtnje, koje se mogu pojaviti npr. kod hidrogenatora kada turbina ostane bez tereta.

Nakon montaže, dodatnim ispitivanjima se provjeravaju osnovne funkcije stroja, pouzdanost, sigurnost, zagrijavanje, sustavi hlađenja, provode se naponski pokusi izolacije i sl.

7.2. Ispitivanje namota i željezne jezgre sinkronog generator

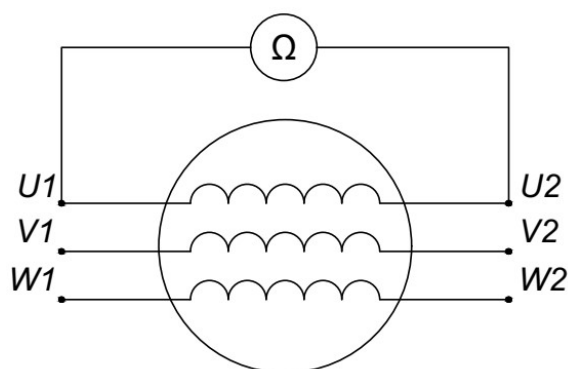
7.2.1. Mjerenje otpora namota

Namot statora velikih sinkronih generatora izveden je često od bakrenih štapova koji se postavljaju u utore te povezuju po obodu statora. Pri radu generatora javljaju se sile između vodiča kojima protječe struja što uzrokuje mehanička naprezanja i vibracije. Zbog toga može doći do oštećenja, odnosno pukotina upravo na spojnim mjestima namota po obodu statora.

Također se mogu pojaviti međuzavojni kratki spojevi između pojedinih vodiča iste faze. Svaki loš električni spoj ili svako smanjenje presjeka vodiča dovodi do stvaranja vrućih mjesta (engl. *hot spot*) koja se mogu razvit u veće kvarove, ako se na vrijeme ne otkriju. Sve dosad navedeno dovodi do promjene otpora namotaja ili potpunog prekida.

Mjerenje otpora namota provodi se kako bi se utvrdilo da li je došlo do promjene otpora u odnosu na vrijednosti mjerene pri puštanju generatora u pogon. Otpori u sve tri faze trebaju biti jednaki ili približno jednaki, a posebna pažnja posvećuje se temperaturnoj korekciji vrijednosti izmjerenih otpora kako bi se mogla vršiti usporedba s drugim mjerenjima. Promjena otpora ukazuje na moguća fizička oštećenja, poput smanjenja presjeka vodiča ili pukotina.

Na slici 7.2 prikazano je mjerenje otpora faze U namota statora.



Slika 7.2. Prikaz mjerenja otpora faze U namota statora

Promjene otpora na rotorskom namotu također treba pazljivo pratiti jer direktno utječu na nesimetriju magnetskog rotorskog polja te direktno uzrokuju vibracije vratila, napon vratila, nesimetriju faznih struja i sl. Namot rotora s istaknutim polovima tvori serijski spoj namota svih polova tako da se u tom slučaju magnetske nesimetrije mogu otkriti uspoređivanjem otpora namota pojedinih polova. Nepravilnosti se mogu ustanoviti i usporedbom padova napona na međupolnim vezama rotora.

Za mjerenje otpora namota potrebno je koristiti mjerne instrumente koji mjere male vrijednosti otpora. Mjerenje se najčešće provodi U-I metodom, pri čemu je bitno da mjerna struja ne prelazi 10% nazivne struje namota kako bi se izbjeglo povećanje otpora zbog zagrijavanja. Detalji mjerenja otpora namota su navedeni u prethodnim poglavljima.

7.2.2. Ispitivanje željezne jezgre statora indukcijom

Problem pregrijavanja željezne jezgre statora sinkronog generatora nastaje, između ostalog, i zbog velikih gubitaka topline u magnetskom krugu. Kako bi se spriječile vrtložne struje i prekomjerno zagrijavanje, jezgra se izrađuje od tankih izoliranih limova. Ispravnost jezgre provjerava se traženjem vrućih mjesta pomoću termovizijske kamera ili mjerenjem napona uzrokovanog vrtložnim strujama. Oštećenja izolacije između limova mogu biti prouzročena ulazom stranih tijela, vibracijama, starenjem izolacije, neadekvatnim rukovanjem tijekom održavanja i sl. Redovitim pritezanjem željezne jezgre, sprječavaju se vibracije, a samim tim i njena oštećenja.

Pri ispitivanju metodom koja koristi termovizijsku kameru za otkrivanje oštećenja izolacije između željeznih limova, potrebno je stvoriti izmjenični magnetski tok koji će podići temperaturu na oštećenim mjestima za barem 5 °C iznad temperature statorske jezgre. To se postiže provlačenjem oko jezgre nekoliko zavoja napajanih vanjskim izmjeničnim izvorom veće snage. Nakon što se stvori izmjenični magnetski tok, vrši se snimanje termovizijskom kamerom što omogućava detekciju vrućih mjesta koja ukazuju na kvar ili proboj izolacije između limova.

Drugi pristup za detekciju oštećenja izolacije željeznih limova jezgre koristi mjerenje struja i napona putem specijalne zavojnice za detekciju vrtložnih struja (engl. *Chattock coil*). Ova

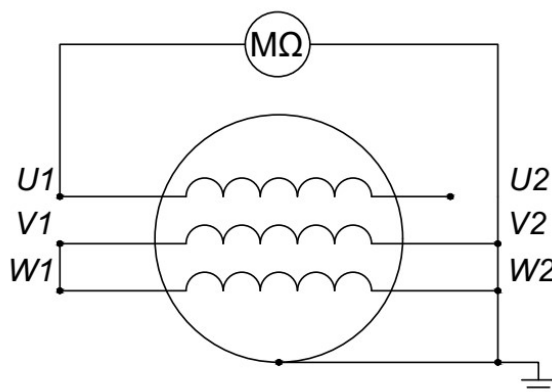
metoda također zahtijeva izmjenični magnetski tok kroz jezgru statora, no umjesto termovizijske kamere, koristi se ručni uređaj koji detektira vrtložne struje na mjestima gdje je izolacija oštećena. Ova tehnika (engl. *Electromagnetic Core Imperfection Detector* - EL CID), zahtijeva znatno slabiji magnetski tok, oko 3-4% nazivnog, te omogućuje preciznu detekciju oštećenja i u dubokim dijelovima jezgre.

7.3. Ispitivanje izolacije namota sinkronog generatora

7.3.1. Mjerenje otpora izolacije namota

Otpor visokonaponske (VN) izolacije definira se kao omjer narinutog istosmjernog napona i izmjerene struje. Ova očitavanja uzimaju se točno 60 sekundi nakon priključenja napona na VN izolaciju.

Izolacijski otpor može se mjeriti između namota jedne faze i mase, kao i između pojedinih faza. Na slici 7.3 je prikazan postupak mjerenja otpora izolacije namota jedne faze, dok su ostali namoti uzemljeni. Nakon mjerenja izolacijskog otpora namot se treba nakratko uzemljiti kako bi se zaostali naboj ispraznio.



Slika 7.3. Prikaz mjerenja otpora izolacije faze U prema ostalim namotima i kućištu stroja

Prema preporuci IEEE Std 43 vrijednosti ispitnih DC napona pri mjerenju otpora izolacije statorskog namota sinkronog generatora i vrijednosti minimalnih izolacijskih otpora iznose prema tablici 7.1.

Tablica 7.1. Vrijednosti ispitnih napona i granični izolacijski otpori

Nazivni napon stroja [V]	Ispitni DC napon [V]	Minimalni izolacijski otpor [MΩ]
<1000	500	>5
1000-2500	500-1000	>100
2501-5000	1000-2500	>100
5001-12000	2500-5000	>100
>12000	5000-10000	>100

Za starije izvedbe strojeva (prije 1970 god.) i određene specifične namotaje minimalni izolacijski otpor se određuje prema izrazu:

$$R_i [M\Omega] = U_n [kV] + 1 \quad (7.1)$$

gdje je U_n nazivni napon namota.

Mjerenje otpora izolacije rotorskog namota sinkronog generatora izvodi se na isti način kao i kod statora uz ispitni napon 500 V DC.

Za mjerenje izolacijskih otpora potrebni su instrumenti koji mjere velike otpore. Opća pravila za mjerenje otpora izolacije navedena su u prethodnim poglavljima.

7.3.2. Mjerenje odvodne struje - ramp test

Upotreba ispitnog napona s različitim frekvencijama pri dijagnostici izolacije statorskog namota koristi se za procjenu stanja izolacije posebno u pogledu vlažnosti. Vlažnost u izolaciji povezana je s dipolnom polarizacijom, koja je spora i detektira se mjerenjima na frekvencijama od 0,1 Hz do 10 kHz. Povećanje polarizacijske komponente struje na niskim frekvencijama ispitnog napona, a opadanje na višim ukazuje na prisutnost vlage u izolaciji. Analizom polarizacijskih karakteristika mogu se otkriti važni detalji o stanju izolacije, a ramp test upravo uključuje polarizacijska istraživanja VN izolacije.

Kod ramp testa se napon povisuje [kV/min], a istovremeno se mjeri odvodna struja [μ A] te se dobije dijagram ovisnosti struje koja teče kroz izolaciju i narinutog napona. Dijagram se koristi za analizu utjecaja pojedinih komponenti struje na ukupnu struju, te za ocjenu stanja izolacije. Ramp test iako se izvodi istosmjernim naponom može se gledati kao metoda s veoma niskom frekvencijom ako se uzme da se povećavanje napona događa u prvoj četvrtini perioda izmjeničnog napona veoma male frekvencije. Ramp test sinkronih generatora se izvodi po IEEE95-2002 preporuci.

7.3.3. Određivanje faktora dielektričnih gubitaka

Na osnovu poznavanja ukupnog radnog otpora R i ukupnog kapaciteta C izolacije te njihovog odnosa može se dati kvalitetna ocjena stanja izolacije u smislu njenog starenja i oštećenja. Za tu svrhu se određuje faktor dielektričnih gubitaka ($\tan \delta$) koji predstavlja omjer radne i kapacitivne komponente struje kroz izolaciju.

Određivanje faktora dielektričnih gubitaka izolacije statorskog namota sinkronog generatora se provodi priključivanjem mjerne opreme na statorski namot. Za ova mjerenja je potreban izmjenični visokonaponski izvor koji je dostupan u sklopu mjerne opreme. Mjerni instrumenti će automatski očitati vrijednost faktora dielektričnih gubitaka ispitivane izolacije. Mjerenje se provodi tako da se odredi kut φ između narinutog napona i struje koja teče kroz izolaciju, a potom je jednostavno odrediti kut δ te $\tan \delta$. Na slici 7.4 se nalazi grafički prikaz kuta dielektričnih gubitaka δ .

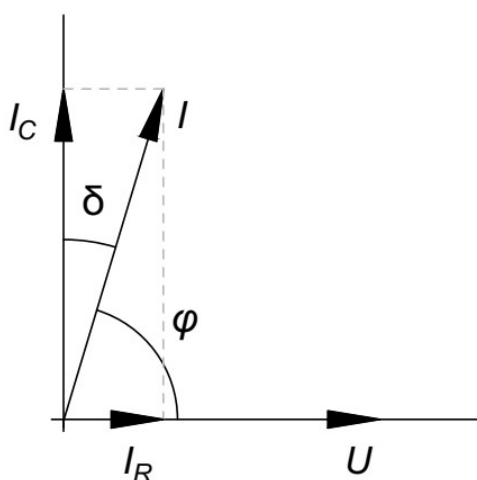
Računski način određivanja faktora dielektričnih gubitaka je naveden u nastavku:

$$I_R = \frac{U}{R_p} \quad (7.2)$$

$$I_C = \omega \cdot C_p \cdot U \quad (7.3)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R_p} \quad (7.4)$$

gdje se R_p i C_p odnose na otpor i kapacitet izolacije.



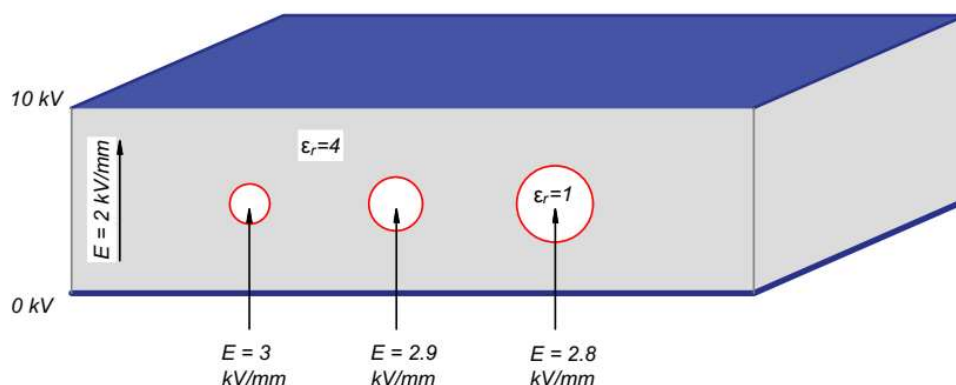
Slika 7.4. Grafički prikaz kuta dielektričnih gubitaka δ

Kapacitet izolacije statorskog namota također je bitan podatak u analiziranju stanja izolacije. Praćenjem kapaciteta pratimo trend starenja izolacije, te posebno stvaranje šupljina u njoj što je povezano s parcijalnim izbijanjima. Promjene kapaciteta mogu ukazivati i na ovlaženost izolacije.

Ispitivanja faktora dielektričnih gubitaka i kapaciteta izolacije sinkronih generator opisana su normama IEEE 286-2000 i IEC 60034-27-3.

7.3.4. Detekcija parcijalnih izbijanja

Ako u izolacijskom sustavu dođe do razvoja šupljina koje su ispunjene zrakom, povećava se mogućnost parcijalnih izbijanja. U slučaju da su šupljine elipsastog ili igličastog oblika, vjerojatnost parcijalnih izbijanja će dodatno porasti. Na slici 7.5 prikazan je primjer izolacije sa šupljinama. Raspodjela električnog polje u navedenom slučaju će biti takva da će električno polje u šupljinama ispunjenim zrakom imati veću jakost od polja u okolnoj izolaciji, te kada polje u šupljinama prijeđe vrijednost dielektrične čvrstoće doći će do parcijalnog izbijanja. Ta izbijanja će vremenom dodatno uništavati izolaciju.



Slika 7.5. Primjer izolacije sa šupljinama

Parcijalna izbijanja šalju signale u okolni prostor koji se mogu registrirati mjernom opremom. Mjerenje parcijalnih izbijanja u sinkronim generatorima vrši se na način da se postave kondenzatori na sabirnice i izvode koji propuštaju navedene signale do mjerne opreme. Ispitivanje parcijalnog izbijanja je opisano normom IEC 60270.

7.3.5. Ispitivanje udarnim naponom

Metode ispitivanja udarnim kao i visokim naponom koriste se za rano otkrivanje razvoja kratkog spoja. One detektiraju promjene u izolaciji koje će se razviti u kratki spoj. Za razliku od prije navedenog mjerenja otpora izolacije namota koje pruža samo trenutnu ocjenu stanja izolacije, ove metode imaju preventivni karakter, omogućujući predviđanje kvarova koji bi se mogli dogoditi u budućnosti. Osim toga, omogućuju provjeru dielektrične čvrstoće visokonaponske izolacije.

Ispitivanje udarnim naponom se provodi tako da se proizvede i dovede udarni naponski val na izolaciju statorskog namota i pomoću osciloskopa snimi se reflektirani val, odnosno odziv. Analiziranjem pobude i odziva dolazi se do procjene stanja izolacije. Donošenje zaključaka je olakšano ako se uspoređuju odzivi dva simetrična namota npr. dvije faze. Ovom metodom se osim statorskog namota može ispitivati i rotorski namot sinkronog generatora.

7.3.6. Ispitivanje visokim naponom

Ispitivanje visokim naponom daje grubu procjenu stanja izolacije na moguće kratke spojeve, a uz ispitivanje udarnim naponom može se dobiti preciznija procjena stanja. Za razliku od ispitivanja udarnim naponom gdje se koristi niži napon, ispitivanje visokim naponom izolaciju podvrgava visokom naponu koji može biti izmjenični ili istosmjerni.

Ispitni visoki izmjenični napon određuje se prema pravilu:

$$U_{isp} = 2 U_n + 1 [kV] \quad (7.5)$$

gdje je:

U_{isp} – ispitni napon [kV]

U_n – nazivni napon namota [kV]

Za visoki istosmjerni napon uzima se istosmjerni napon vrijednosti 1.7 puta veće od efektivne vrijednosti nazivnog napona namota koji se ispituje.

Ispitivanje u oba slučaja izvodi se u trajanju 1 minute. Izolacija statorskog namota se podvrgava visokom naponu, a istovremeno se mjeri mala struja koja protječe kroz izolaciju. Ako tokom jedne minute dođe do naglog povećavanja struje, dielektrična čvrstoća ispitivane izolacije ne zadovoljava. U tom slučaju postoje sitne pukotine u izolaciji koje će se nakon nekog vremena razviti u kratki spoj. Takav generator može i dalje biti u funkciji, ali se smatra da nije pouzdan te da će uskoro doći do kvara.

Osim na statorskoj izolaciji, navedena metoda otkrivanja kratkog spoja u početnoj fazi koristi se i kod rotorskog namota. Posebno je važno kod rotora otkriti potencijalne kratke spojeve zbog nesimetrije magnetskog rotorskog polja koja bi se javila i prouzročila znatne problem u radu generatora.

Ispitivanja visokim naponom su opisana normom IEC 60034-1 kao i drugim normama.

7.4. Ispitivanje sinkronog generatora u pogonu

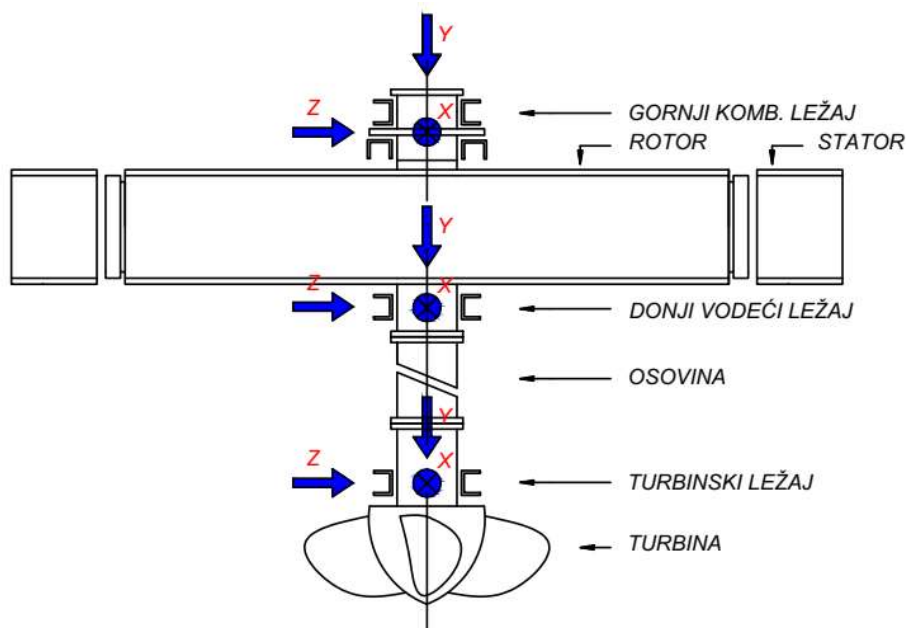
7.4.1. Mjerenje vibracija

Mjerenje vibracija spada u neizostavnu aktivnosti pri praćenju stanja agregata u termoelektranama i hidroelektranama.

Vibracije su važni indikator stanja generatora, a njihov uzrok može biti magnetski disbalans u rotoru, strujna nesimetrija u statoru ili djelovanje sila između faza. Dugotrajne vibracije mogu dovesti do oštećenja izolacije, pucanja vodiča i sabirnica, te oštećenja ležajeva, što može izazvati ozbiljne kvarove generatora.

Vibracije u agregatima mogu nastati ne samo zbog električnih razloga, već i zbog mehaničkih uzroka. Mehanički uzroci vibracija uključuju ekscentricitet i nepravilnosti u komponentama kao što su turbina, vratilo, ležajevi, spojnice te drugi rotirajući dijelovi. Kod vodnih turbina dolazi do vibracija, između ostalog, i zbog hidrauličkog protoka vode.

Vibracije se najčešće mjere akcelerometrima koji su postavljeni na ležajevima i trajno vrše mjerenja. Podaci se zatim obrađuju i analiziraju te se po potrebi vrše intervencije. Na slici 7.6 su pokazane pozicije mjerenja vibracija na hidroagregatu.

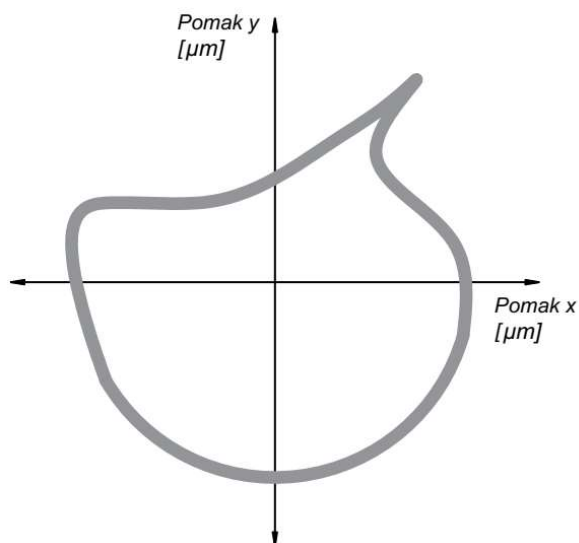


Slika 7.6. Prikaz pozicija mjerenja vibracija na hidroagregatu

7.4.2. Mjerenje opletanja vratila

Opletanje vratila odnosi se na putanju ili trajektoriju koju opisuje vratilo tijekom rotacije. Da bi se opletanje precizno pratilo, potrebna su najmanje dva senzora postavljena pod određenim kutem, što omogućava praćenje vibracija i položaja vratila u dvodimenzionalnoj ravnini. Informacije s jednog senzora ne daju potpunu sliku vibracija vratila, dok kombinacija podataka iz dva senzora omogućava izračunavanje rezultantnog vektora. Ovi rezultantni vektori omogućavaju crtanje krivulje koja prikazuje stvarnu putanju vratila na osnovu koje se može analizirati oblik i veličina opletanja.

Na slici 7.7 prikazan je dijagram opletanja vratila.



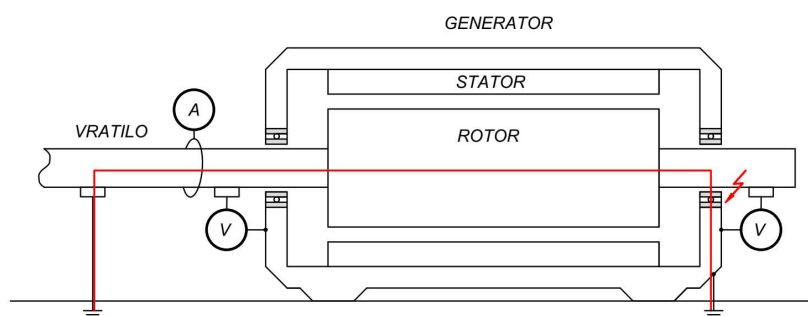
Slika 7.7. Dijagram opletanja vratila

7.4.3. Mjerenje napona vratila

Napon vratila generatora nastaje zbog elektromagnetskih pojava unutar generatora. Kada magnetsko polje unutar generatora nije potpuno simetrično, zbog raznih faktora poput neujednačenog magnetskog toka ili nepravilnosti u konstrukciji, dolazi do indukcije napona duž vratila generatora. Ovaj napon može uzrokovati struju kroz vratilo, ležajeve i kućište generatora, koja može prouzročiti oštećenja ležajeva i drugih komponenti ako nije adekvatno kontrolirana.

Kako bismo spriječili pojavu i štetne efekte napona vratila, potrebno je električno izolirati dijelove vratila blizu ležajeva, kako bi se spriječilo stvaranje strujne petlje. Važno je redovito provjeravati izolaciju na vratilu. Oba kraja vratila ne smiju biti potpuno izolirana od kućišta, jer bi to moglo stvoriti nepoznat električni potencijal na izoliranom dijelu i predstavljati opasnost. Za kontrolu napona vratila koristi se voltmetar, koji mjeri napon između vratila i kućišta na izoliranom dijelu, te ampermetar, koji prati struju na izoliranom dijelu vratila, uz mogućnost aktiviranja prekostrujnog releja za zaštitu stroja.

Na slici 7.8. prikazan je sustav za mjerenje napona vratila i moguća strujna petlja u slučaju kvara izolacije na ležaju.



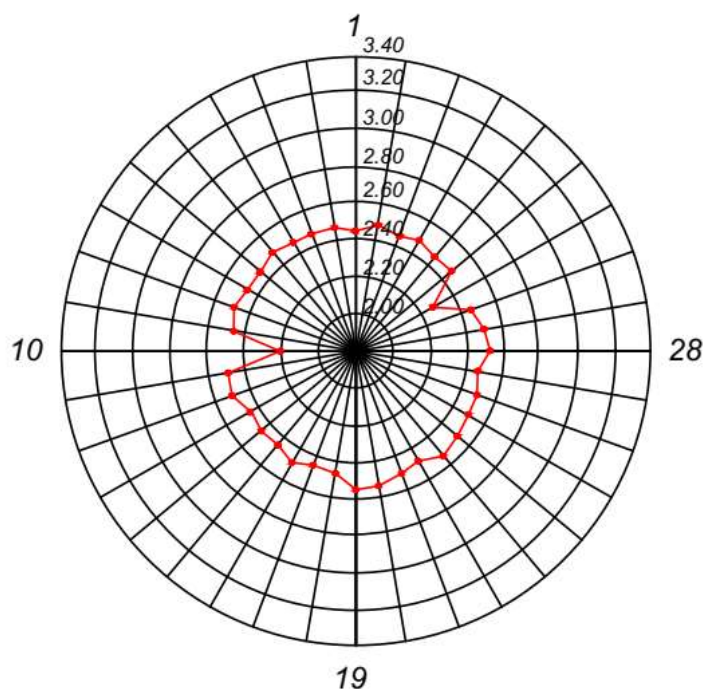
Slika 7.8. Sustav za mjerenje napona vratila i prikaz moguće strujne petlje u slučaju kvara izolacije na ležaju

7.4.4. Mjerenje rasipnih magnetskih polja

Dosadašnja ispitivanja izolacije statorskog i rotorskog namota, te otkrivanje kratkih spojeva provodila su se dok generator nije bio u pogonu. Međutim, ispitivanje rotorskog namota tokom rada generatora je također važno jer rotor tada trpi snažno fizičko naprezanje zbog centrifugalne sile, što može izazvati kratke spojeve koji nisu prisutni u mirovanju. Zbog toga je praćenje rotorskog namota tokom rada izuzetno važno, posebno za otkrivanje međuzavojnih kratkih spojeva, koji mogu dugoročno oštetiti generator.

Kratki spojevi u rotorskom namotu, koji se javljaju tokom vrtnje rotora, otkrivaju se mjerenjem rasipnih magnetskih polja. To se postiže postavljanjem male, plosnate zavojnice u zračni raspored, pričvršćene na sredinu statora, koja mjeri magnetski tok. Inducirani napon u zavojnici proporcionalan je promjeni magnetskog toka u zračnom rasporedu. Kada dođe do kratkog spoja između namota jednog pola rotora, broj efektivnih zavoja se smanjuje, što izaziva magnetsku nesimetriju pod polovima rotora. Ta nesimetrija se registrira mjerenjima pomoću postavljene

zavojnice. Na slici 7.9 prikazan je polarni dijagram rotora s istaknutim polovima i detektiranim kratkim spojem na polu broj 10 i 31.

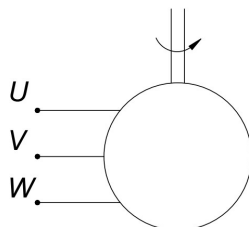


Slika 7.9. Polarni dijagram rotora s istaknutim polovima i detektiranim kratkim spojem na polu broj 10 i 31

7.5. Funkcionalna ispitivanja sinkronog generatora

7.5.1. Pokus praznog hoda

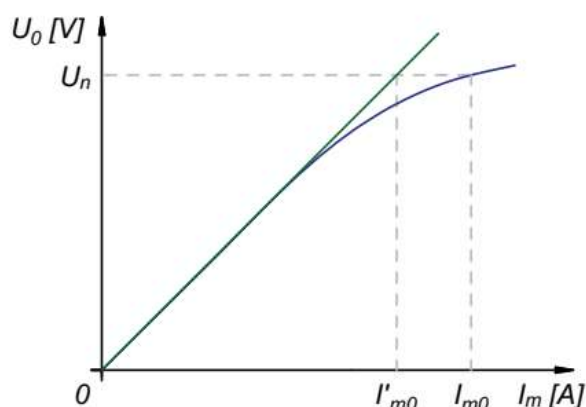
Ispitivanje sinkronog generatora u praznom hodu izvodi se tako da se generator pomoću pogonskog stroja ubrza na sinkronu brzinu uz otvorene armaturne stezaljke. Uzbudna struja se podigne na vrijednost pri kojoj inducirani napon na armaturi iznosi 1.1-1.2 U_n . Potom se uzbuda smanjuje u koracima i pri tom se mjeri inducirani napon armature. Na slici 7.10. je prikazan način spajanja generatorskih stezaljki pri pokusu praznog hoda.



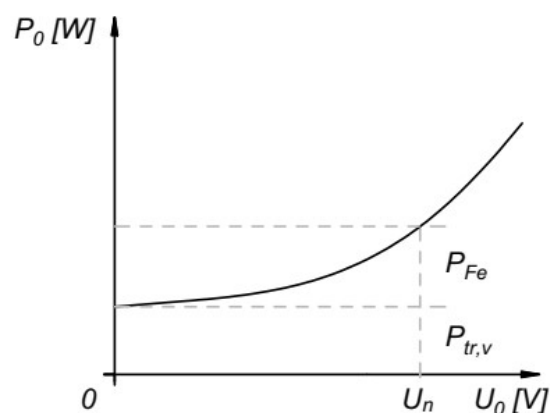
Slika 7.10. Način spajanja generatorskih stezaljki pri pokusu praznog hoda

Ovim ispitivanjem se utvrđuje stanje u magnetskom krugu sinkronog generatora. Snimaju se karakteristike $U_0 = f(I_m)$, $P_0 = f(I_m)$, utvrđuje uzbudna struja praznog hoda I_{m0} za zasićeno

stanje i I'_{m0} za nezasićeno stanje, ukupni gubici praznog hoda P_0 , gubici u željezu P_{Fe} i gubici trenja i ventilacije $P_{tr,v}$ za nazivni napon, te napon remanencije. Na slici 7.11. prikazana je ovisnost napona praznog hoda o struji uzbude, a na slici 7.12. gubici praznog hoda.



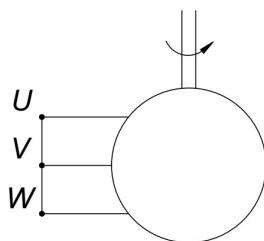
Slika 7.11. Ovisnost napona praznog hoda o struji uzbude



Slika 7.12. Gubici praznog hoda

7.5.2. Pokus kratkog spoja

Pokus kratkog spoja sinkronog generatora izvodi se tako da se armaturni namot generatora nalazi u trolnom kratkom spoju, a generator se pokreće pogonskim strojem sinkronom brzinom. Struja uzbude podiže se dok armaturnim namotom ne proteče struja vrijednosti nešto veće od nazivne struje I_n . Potom se uzbudna struja smanjuje u koracima uz očitavanje struje armature. Na slici 7.13. prikazan je način spajanja generatorskih stezaljki pri pokusu kratkog spoja.



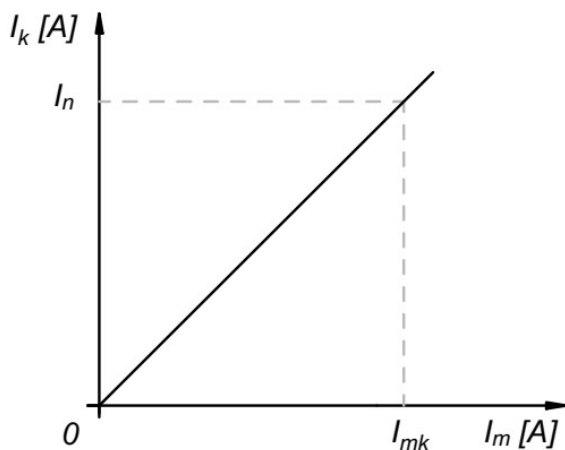
Slika 7.13. Način spajanja generatorskih stezaljki pri pokusu kratkog spoja

Ovim ispitivanjem se snimaju karakteristike $I_k = f(I_m)$ i $P_k = f(I_m)$ (slike 7.14. i 7.15), određuje se nazivna uzbudna struja kratkog spoja I_{mk} , te ukupni gubici kratkoga spoja P_k , gubici trenja i ventilacije $P_{tr,v}$, gubici u bakru P_{Cu} te dodatni gubici P_{dod} .

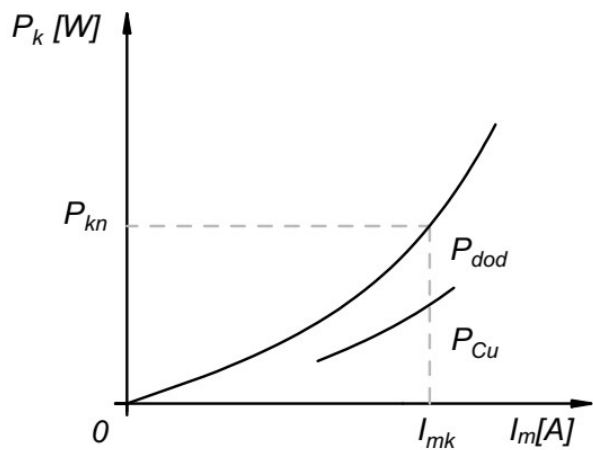
Gubici u bakru se mogu izračunati prema izrazu:

$$P_{Cu} = 1.5 R_{st} I^2 \quad (7.6)$$

gdje R_{st} predstavlja otpor mjeran na armaturnim stezaljkama generatora.



Slika 7.14. Ovisnost struje kratkog spoja o struji uzbude



Slika 7.15. Gubici kratkog spoja

7.6. Ispitivanja sinkronog stroja pri radu na mreži

Analiziranje rada sinkronog stroja na mreži može se vršiti pomoću vektorskog dijagrama. Osim vektorskog dijagrama za ovu svrhu koriste se i drugi dijagrami koji daju jednostavniji i pregledniji prikaz rada stroja na mreži.

Najčešće se koriste sljedeći dijagrami:

- krivulje regulacije
- švedski dijagram
- V krivulje
- kut opterećenja
- pogonska karta

Navedeni dijagrami se odnose općenito na sinkrone strojeve, a u nastavku će u pojedinim slučajevima biti dat naglasak na sinkrone generatore.

7.6.1. Krivulje regulacije

Kod sinkronih strojeva važno je poznavati uzbudnu struju za zadano opterećenje i zadani faktor snage. To se može odrediti iz krivulja regulacije. Svaka pojedina krivulja regulacije daje ovisnost uzbudne struje I_m o armaturnoj struji I uz zadani $\cos \varphi$. Navedene krivulje su bitne i za projektiranje regulatora za automatsku regulaciju napona.

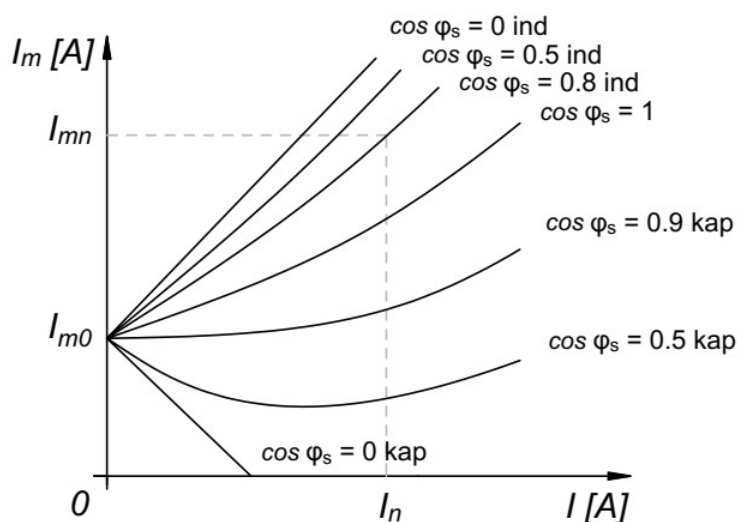
Sinkroni generator se prvo ubrza na nazivni broj okretaja, podesi se uzbuda te se stroj sinkronizira na vanjsku mrežu. Snimanje započinje za krivulju $\cos \varphi = 0$ induktivno kada se namjesti uzbudna struja pri kojoj je armaturna struja $I = 1.2 I_n$. Zatim se smanjiva opterećenje na vratio, a samim tim i armaturna struja. Istovremeno se promjenom uzbudne struje $\cos \varphi$ održava konstantnim, te se potom vrši očitavanje podešene uzbudne struje. Postupak se zatim ponavlja za sljedeći $\cos \varphi$. Na slici 7.16 prikazane su krivulje regulacije sinkronog stroja.

$$I_m = f(I)$$

$$\cos \varphi = \text{konst.}$$

$$U = U_n = \text{konst.}$$

$$n = n_n = \text{konst.}$$



Slika 7.16. Krivulje regulacije sinkronog stroja

Snimanje krivulja regulacije mjerenjem izvodi se u pravilu za generatore manjih snaga. Za generatore većih snaga su potrebni i pogonski strojevi većih snaga koji nisu uvijek na raspolaganju pa se u tom slučaju uzbuđne struje za različita opterećenja mogu odrediti pomoću švedskog dijagrama koji se konstruira na osnovu karakteristika praznog hoda i kratkog spoja.

7.6.2. V krivulje

V krivulje prikazuju ovisnost armaturne struje I o uzbuđnoj struji I_m za različite faktore snaga, uz konstantni napon armature U , frekvencije f i radne snage P_r . Na dijagramu su snimljene četiri V krivulje za četiri različite radne snage ($P_{r0} < P_{r1} < P_{r2} < P_{r3}$). Minimumi krivulja se nalaze u točki gdje je $\cos \varphi = 1$. U ove dijagrame se često unose i granice zagrijavanja statorskog i rotorskog namote te granica stabilnosti.

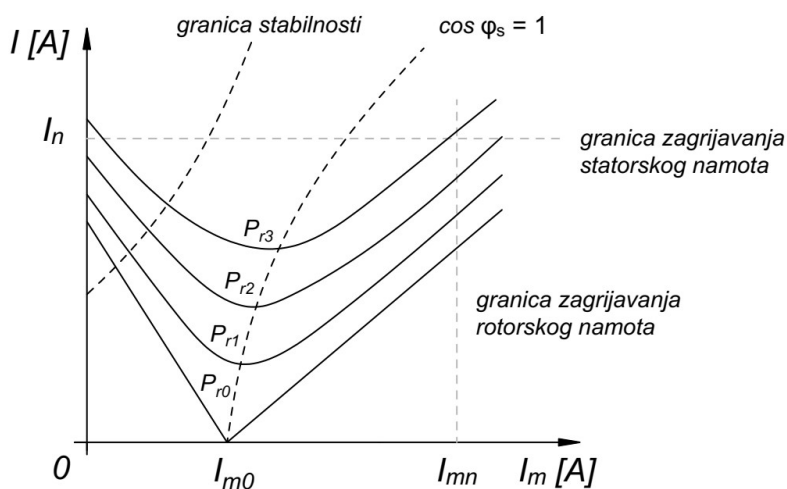
Snimanje počinje u induktivnom području s opterećenjem $P_r = 0$ i uzbuđnoj struji pri kojoj je armaturna struja $I = 1.2 I_n$. Potom se struja uzbuđne smanjuje u koracima, očitava se struja armature, a radna snaga se održava konstantnom. U kapacitivnom području vrši se snimanje krivulje dok struja uzbuđne ne bude nula ili dok ne dođe do ispada stroja iz sinkronizma. Na slici 7.17. prikazane su V krivulje sinkronog stroja.

$$I = f(I_m)$$

$$P_r = \text{konst.}$$

$$U = U_n = \text{konst.}$$

$$n = n_n = \text{konst.}$$



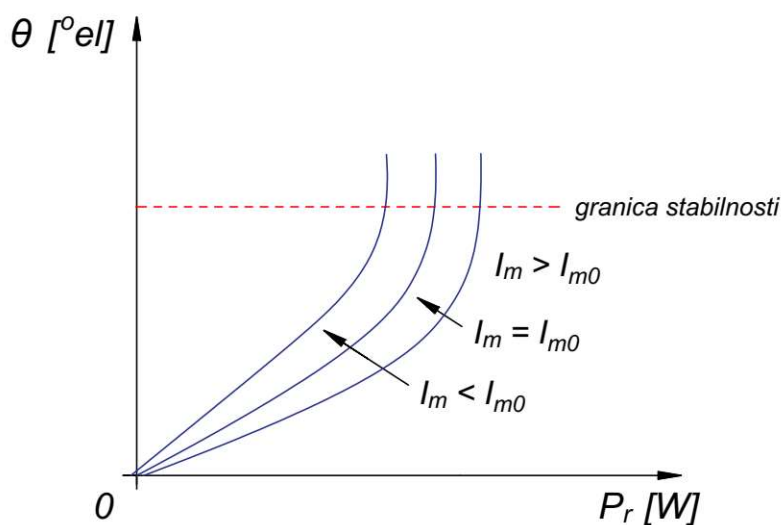
Slika 7.17. V krivulje sinkronog stroja

7.6.3. Kut opterećenja

Kut opterećenja predstavlja kut zakreta rotora opterećenog stroja u odnosu na rotor neopterećenog stroja. Maksimalni kut opterećenja predstavlja granicu stabilnosti poslije koje dolazi do ispada stroja iz sinkronizma. Maksimalni kut opterećenja za hidrogeneratore iznosi između 50° i 90° , a za turbogeneratore 90° .

Mjerenje kuta opterećenja provodi se pomoću stroboskopske svjetiljke. Na rotor se postavi oznaka koja se osvjetljava ovom bljeskalicom sinkronizirano s frekvencijom napona generatora. Bljeskovi osvjetljavaju oznaku uvijek u istom položaju, pa se čini da oznaka stoji mirno. Kada se stroj okreće u praznom hodu označi se referentna točka na statoru koja je poravnata s oznakom na rotoru, što predstavlja kut opterećenja nula. Ako se stroj optereti, kut opterećenja se povećava, i oznaka na rotoru počinje se pomicati u odnosu na referentnu točku na statoru, što omogućava mjerenje tog kuta.

Na slici 7.18 prikazana je ovisnost kuta opterećenja o radnoj snazi za različite struje uzbude.



Slika 7.18. Ovisnost kuta opterećenja o radnoj snazi za različite struje uzbude

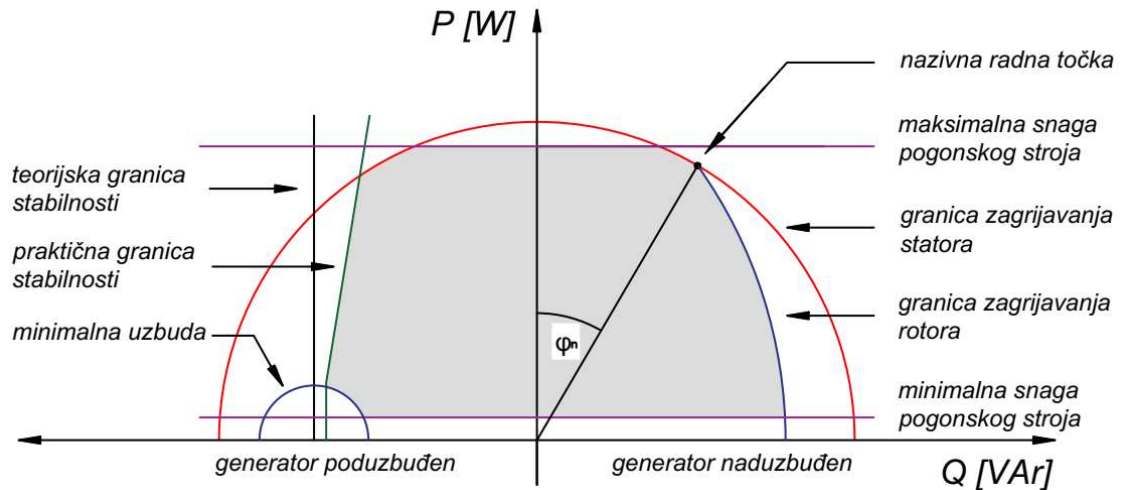
7.6.4. Pogonska karta

Pogonska karta određuje moguće i dozvoljeno područje rada sinkronog stroja. Pogonska karta se izrađuje na osnovu nazivnih podataka i rezultata ispitivanja rada sinkronog stroja na mreži.

Područje rada prikazano na pogonskoj karti je ograničeno sljedećim stavkama:

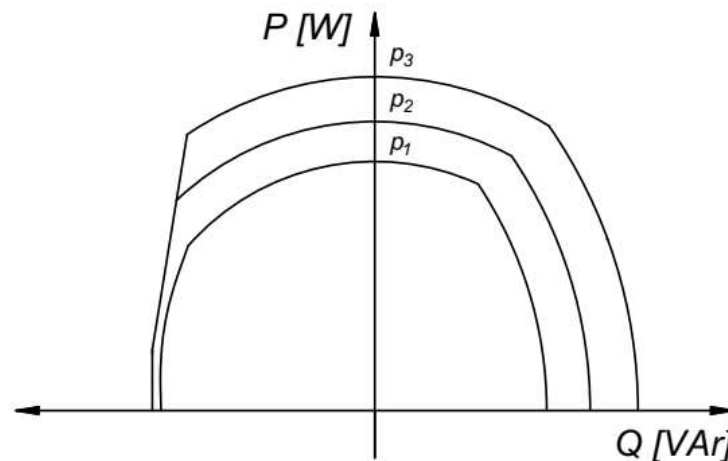
- zagrijavanje statorskog namota; struja armaturnog namota ne smije biti veća od maksimalnog dozvoljenog iznosa,
- zagrijavanje rotorskog namota; struja uzbudnog namota ne smije biti veća od maksimalnog dozvoljenog iznosa,
- granica stabilnosti; određena prema maksimalnom kutu opterećenja, praktična granica stabilnosti određuje se tako da se od teorijske granice stabilnosti predvidi rezerva od 10% aktivne snage,
- minimalna uzbudna struja; struja uzbude ne smije biti manja od minimalno dozvoljenog iznosa, što štiti generator od gubitka stabilnosti,
- maksimalna snaga turbine; opterećenje turbine ne smije biti veće od maksimalnog dozvoljenog iznosa,
- minimalna snaga turbine; opterećenje turbine ne smije biti manje od propisanog tehničkog minimuma.

Na slici 7.19 prikazana je pogonska karta sinkronog generatora.



Slika 7.19. Pogonska karta sinkronog generatora

Velik dio ograničenja odnosi se na zagrijavanje pojedinih dijelova stroja, tako da se boljim i učinkovitijim hlađenjem može proširiti područje rada te se u tom slučaju unose promjene u pogonsku kartu. Na slici 7.20 prikazana je pogonska karta turbogeneratora hlađenog vodikom uz različite tlakove vodika.

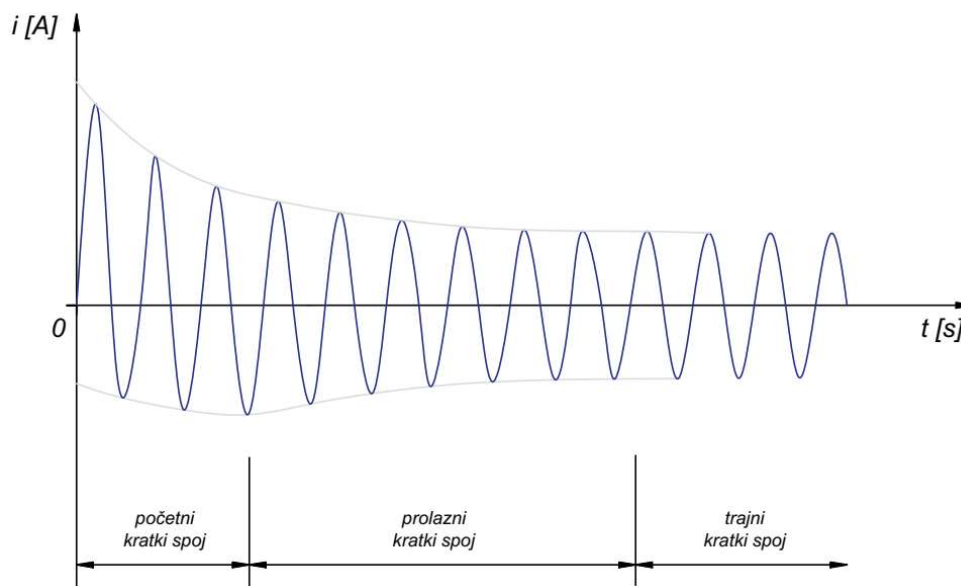


Slika 7.20. Pogonska karta turbogeneratora hlađenog vodikom s obzirom na tlak vodika p ; $p_1 < p_2 < p_3$

7.6.5. Tropolni udarni kratki spoj

Pokus tropolnog udarnog kratkog spoja vrši se tako da se stezaljke armaturnog namota sinkronog generatora, koji radi u praznom hodu, kratko spoje, te se snimi armaturna struja generatora. Ovo ispitivanje se najčešće izvodi kod prototipnog ispitivanja generatora. Kod udarnog kratkog spoja generator trpi veliko opterećenje, poglavito zbog mehaničkih i toplinskih naprezanja, te je potrebno ispitati da li će generator izdržati bez oštećenja s obzirom da je u realnom pogonu također moguće da se dogodi kratki spoj. Ovo ispitivanje je bitno za projektiranje samog generatora kao i njegovih zaštita. Na osnovu ovog pokusa se određuju i parametri sinkronog stroja vezani za udarni kratki spoj.

Na slici 7.21 prikazana je struja jedne faze pri trofaznom udarnom kratkom spoju gdje je naznačena početna (subtranzijentna), prolazna (tranzijentna) i trajna faza kratkog spoja, odnosno nagli skok struje, njeno smanjivanje i na kraju stabilizacija. Analizom struje iz oscilograma mogu se odrediti vrijednosti početnih, prijelaznih i trajnih reaktancija. Oblik i veličina struje ovisi i o položaju rotora u odnosu na promatranu fazu statorskog namota u trenutku nastanka kratkog spoja.



Slika 7.21. Prikaz struje jedne faze kod trofaznog udarnog kratkog spoja

Postupak za izvođenje pokusa trofaznog udarnog kratkog spoja je takav da se prvo generator ubrza na sinkronu brzinu te se uključi sklopka koja radi kratki spoj istovremeno na sve tri faze pri uzbudnoj struji jednakoj nuli. Zatim se uzbudna struja podiže dok armaturna struja ne postigne potrebnu vrijednost, obično $0.5 I_n$ ili I_n . Sada kada su namješteni svi parametri za izvođenje ovog pokusa, sklopka za kratki spoj se otvori i pričekava se da nastupi stacionarno stanje. Potom se sklopka ponovo zatvori i snimi se oscilogram struja trofaznog udarnog kratkog spoja.

7.7. Remont hidrogenatora

Hidrogenatori imaju značajnu ulogu u proizvodnji električne energije u elektroenergetskim sustavima gdje se u većoj mjeri koristi hidroenergija. S obzirom na njihovu složenost i strateški značaj, pravilno održavanje i redovita ispitivanja ovih strojeva su od esencijalne važnosti. Ovi generatori ne samo da moraju raditi s visokom efikasnošću i pouzdanošću, već su također bitni za dugoročno očuvanje stabilnosti elektroenergetskog sustava. Kroz aktivno održavanje, moguće je minimizirati rizike od kvarova, produžiti životni vijek opreme i osigurati kontinuiranu isporuku električne energije, čime se doprinosi ukupnoj pouzdanosti i održivosti energetskog sustava.

U tablici 7.2 naveden je pregled programa održavanja hidrogeneratora prema HEP-ovom pravilniku, a u skladu s preporukama proizvođača hidrogeneratora tvrtke Končar. Navedene aktivnosti odnose se na održavanje samog generatora u užem smislu te na održavanje sustava kao što su rashladni sustav generatora, ležajevi, sustav brtvljenja i podmazivanja ležajeva te kočni sustav.

Tablica 7.2. Pregled programa održavanja hidrogeneratora

Br.	Popis aktivnosti	Preg.	Ispit.	Rev.	Rem.
1.	Vizualni pregled svih dostupnih dijelova generatora			1g	6g
2.	Čišćenje svih dostupnih dijelova generatora			1g	
3.	Ispitivanje i analiza stanja generator pomoću online nadzora		1g		
4.	Zamjena polariteta na četkicama rotora	6mj			
5.	Obrada površine na kliznim kolutima	6mj			
6.	Pregled mjernih i kontrolnih uređaja			1g	
7.	Mjerenje otpora izolacije statorskog namota			1g	
8.	Mjerenje odvodne struje izolacije			3g	
9.	Mjerenje faktora dielektričnih gubitaka i kapaciteta izolacije statora			3g	
10.	Mjerenje parcijalnih pražnjenja statora			3g	
11.	Provjera statorskog namota visokim naponom				6g
12.	Mjerenje omskog otpora namota na statoru			3g	
13.	Mjerenje otpora izolacije namota na rotoru			1g	
14.	Provjera izolacije između zavoja rotorskog namota			3g	
15.	Provjera rotorskog namota visokim naponom				6g
16.	Mjerenje padova napona na međupolnim vezama rotora			6g	
17.	Mjerenje impedancije namota na rotoru			3g	
18.	Mjerenje omskog otpora namota na rotoru			3g	
19.	Provjera grijača i termosondi			3g	
20.	Ispitivanje vibracija, opletanja, zagrijavanja nakon revizije			1g	
21.	Vađenje rotora				6g
22.	Čišćenje, pranje i sušenje namota				6g
23.	Lakiranje namota izolacijskim lakom				6g
24.	Provjera učvršćenosti namota na statoru				6g
25.	Preklinjavanje namota na statoru				pst
26.	Pregled i zamjena dotrajalih dijelova kočnica				6g
27.	Obrada kliznih površina ležajeva				6g
28.	Ispitivanje statorskog paketa				6g
29.	Ispitivanje kritičnih mjesta metodom bez razaranja				6g
30.	Mjerenje veličina zračnosti između rotirajućih i statičnih dijelova				6g
31.	Centriranje generatorskog vratila				6g
32.	Ispitivanje vibracija, opletanja vratila, zagrijavanja, napona osovine				6g

7.7.1. Značajke hidrogeneratora u HE Đale

HE Đale je protočna niskotlačna pribranska hidroelektrana s dnevnom akumulacijom. Sadrži dva agregata koji se sastoje od sinkronog generatora i Kaplanove turbine. Svaki generator ima snagu 20,4 MW, a ukupna srednja godišnja proizvodnja električne energije HE Đale je 128 GWh. Hidroelektrana je povezana s elektroenergetskom mrežom putem 110 kV dalekovoda.

U tablici 7.3 navedeni su nazivni podaci generatora u HE Đale.

Tablica 7.3. Nazivni podaci generatora u HE Đale

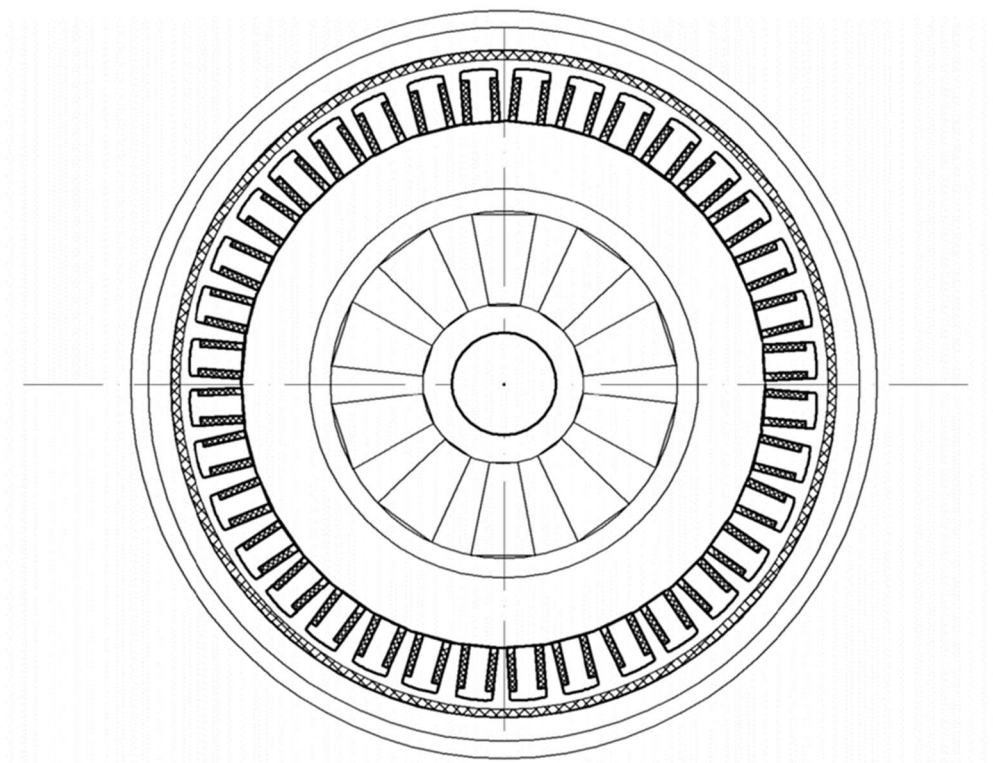
Generator	S6624-36
Hidroelektrana	“Đale”
Proizvođač	“Rade Končar”
Nazivna prividna snaga	24000 kVA
Nazivni napon	10500±5% V
Nazivna struja	1320±5% A
Nazivni faktor snage	cos φ 0.85
Frekvencija	50 Hz
Brzina vrtnje	166.6 min ⁻¹
Brzina vrtnje pri pobjegu	440 min ⁻¹
Zamašni moment GD ²	2000tm ²
Smjer vrtnje	u smjeru kazaljke na satu
Snaga uzbude za nazivne uvjete	122.6 kW
Napon uzbude	211 V
Struja uzbude	581 A
Korisnost (100% teret)	97.42%
(75% teret)	97.39%
(50% teret)	96.85%

Kako bi se dočarala veličina poduhvata demontaže generatora u HE Đale, u tablici 7.4 navedene su mase njegovih pojedinih dijelova.

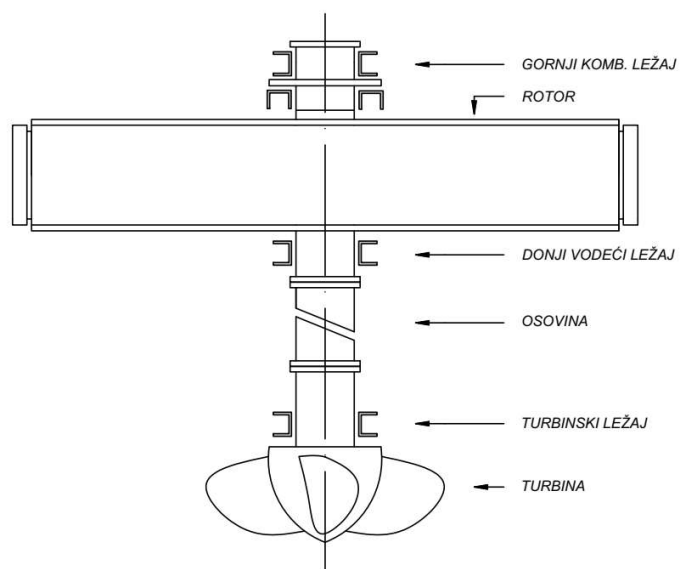
Tablica 7.4. Podaci za ukupnu masu generatora i mase pojedinih komponenti generatora

Generator	247 t
Stator	66.5 t
Rotor	91 t
Zvijezda rotora	12.6 t
Lančani prsten	45.5 t
Pol rotora	0.76 t
Gornji nosač	23.2 t
Donji nosač	12.9 t
Zvono ležaja	6.6 t
Segment kombiniranog nosivog ležaja	0.154 t
Segment kombiniranog vodećeg ležaja	0.025 t
Segment donjeg vodećeg ležaja	0.025 t
Hladnjak ulja kombiniranog ležaja	0.324 t
Hladnjak zraka generatora	0.44 t

Slika 7.22 prikazuje stator i rotor s polovima pogled odozgo, dok slika 7.23 prikazuje rotirajući dio agregata.



Slika 7.22. Prikaz statora i rotora s polovima odozgo



Slika 7.23. Prikaz rotirajućeg dijela hidroagregata

7.7.2. Izvedba remonta hidrogeneratora

Remont je sveobuhvatan proces koji uključuje pregled, popravak, obnovu i optimizaciju tehničke opreme ili sustava, s ciljem vraćanja njegove funkcionalnosti, efikasnosti i pouzdanosti.

Remont hidrogeneratora se provodi prema sljedećim fazama:

- Priprema remonta
- Demontaža generatora
- Pregledi i ispitivanja
- Popravci i zamjene dijelova
- Montaža generatora
- Puštanje u prvi pogon
- Izrada izvještaja
- Predaja sustava

Remont hidrogeneratora će biti opisan kroz primjer remonta generatora u HE Đale.

7.7.3. Demontaža generator

Demontaža generatora tijekom remontnih radova predstavlja složen postupak koji se izvodi prema precizno definiranim koracima, uz strogo pridržavanje propisanih pravila. Potpuna demontaža generatora izvodi se u situacijama kada je potrebno osloboditi prolaz kroz provrt generatorske jame, kao i pri radovima na statoru, rotoru ili samoj turbini. Ovaj proces također pruža priliku za obavljanje svih potrebnih ispitivanja, provjera, čišćenja, popravaka i zamjena dijelova koji nisu mogući dok je generator montiran.

Postupak demontaže započinje podizanjem rotora za 2-3 mm uz pomoć sustava za kočenje i podizanje. Zatim se rotor fiksira pomoću nosivih matica, kako bi se rasteretile kočnice. Sljedeći korak je podlaganje turbinske osovine, čime se osigurava da ona ostane stabilna nakon odvajanja od rotora. Nakon ovoga, pristupa se skidanju uređaja i gornjih dijelova generatora. Kada se odspoje dovodi polnog namota, može se nastaviti s uklanjanjem kliznih koluta s osovine.

Demontaža ležajeva

Sljedeći korak u procesu demontaže uključuje uklanjanje ležajeva i pripadajućih uređaja. Nakon ispuštanja ulja iz gornjeg kombiniranog ležaja i uljnih hladnjaka, skidaju se termometri i uređaj za visokotlačno podmazivanje kombiniranog ležaja. Potom se pristupa uklanjanju vodećih segmenata i njihovih nosača. Svaki segment mora biti označen kako bi se prilikom ponovne montaže vratio na svoju originalnu poziciju, čime se izbjegavaju nepravilnosti koje mogu nastati uslijed različite istrošenosti segmenata.

Nakon demontaže kombiniranog ležaja, prelazi se na skidanje donjeg vodećeg ležaja. Demontaža donjeg ležaja jednostavnija je u odnosu na kombinirani ležaj, budući da je donji ležaj jednostavnije konstrukcije i opremljen je manjim brojem sustava. Naime, donji ležaj ne sadrži sustav za visokotlačno podmazivanje niti sustav za hlađenje, jer se hlađenje ostvaruje

prirodnom konvekcijom topline. Konstrukcija donjeg ležaja ograničena je isključivo na vodeću funkciju, što značajno pojednostavljuje njegov dizajn.

Demontaža rotora

Pri vađenju rotora, važno je imati na umu da zbog njegove velike mase i dimenzija svaki nekontrolirani pomak može izazvati ozbiljna oštećenja generatora. Prvo, potrebno je postaviti napravu za nošenje rotora i pažljivo je podesiti tako da bude točno u centru rotora, čime se osigurava ravnoteža i sigurnost tijekom podizanja. U zračni razmak između rotora i statora treba postaviti najmanje četiri drvene letve koje će održavati odgovarajući razmak prilikom vađenja rotora i spriječiti kontakt s statorom. Rotor se podiže polako i ravnomjerno, s posebnom pažnjom kako bi letve uvijek ostale slobodne. Ako se neka letva zaglavi, podizanje treba odmah zaustaviti, rotor centrirati i nastaviti postupak. Nakon što je rotor uspješno izvučen, pažljivo se prenosi na pripremljenu podlogu. Završetkom ovih radova omogućuje se pristup kompletnom statoru, čime se otvara prostor za daljnje inspekcije, popravke i održavanje.

7.7.4. Pregledi i ispitivanja

Ispitivanje statora

Nakon što je demontaža generatora završena, može se pristupiti potrebnim pregledima i ispitivanjima statora. S obzirom na to da je rotor izvađen, stator je sada dostupan za temeljitu inspekciju.

Prvi korak je temeljito čišćenje i pranje statora. Nakon toga, potrebno je provjeriti sve spojne vodove na statoru i, ako treba, dodatno ih zategnuti. Vizualno se pregledava statorski namot, pri čemu treba obratiti pozornost na moguće pukotine u izolaciji ili druga oštećenja. Također, treba provjeriti učvršćenje namota u utorima, a u slučaju potrebe, izraditi nove izolacijske klinove i izvršiti preklinjavanje namota. Namot je u svakom utoru učvršćen s tri klina koji ne smiju biti labavi. Glave namota također moraju biti dobro učvršćene.

Sljedeći korak je vizualni pregled statorskog paketa kako bi se utvrdilo ima li oštećenja te jesu li krajnji i diobeni paketi labavi. U svrhu provjere magnetskog kruga, statorski paket treba ispitati magnetiziranjem. Uzbudni namot s potrebnim presjekom i odgovarajućim brojem zavoja postavlja se oko statora, čime se vrši magnetiziranje statorskog paketa, a magnetska indukcija pri tom procesu treba biti približno jednaka nazivnoj indukciji. Prolaskom struje kroz namot, stvara se magnetsko polje unutar statora, što uzrokuje stvaranje malih vrtložnih struja i zagrijavanje statora. Zagrijavanje se nadzire pomoću termovizijske kamere, s početnim mjerenjem u hladnom stanju, a potom ponovljenim mjerenjima nakon 30 i 60 minuta. Potom se za svako mjerenje izračunava prosječna temperatura i lokalna odstupanja, koja se uspoređuju s očekivanim vrijednostima. Ako dođe do prekomjernog zagrijavanja na određenim mjestima, to može ukazivati na moguće kvarove ili kratke spojeve između pojedinih lameliranih limova statora.

Nakon ispitivanja statorskog paketa, prelazi se na ispitivanje namota. Jedno od osnovnih ispitivanja je mjerenje omskog otpora svih triju faza U-I metodom. Mjerna struja postavlja se na razinu do 10% nazivne struje kako bi se spriječilo zagrijavanje vodiča koje bi moglo utjecati

na točnost mjerenja. S obzirom da namot ima određeni induktivitet, vrijednost mjerne struje postepeno će se povećavati dok ne dosegne konačni iznos, te se potom vrši očitavanje mjernih vrijednosti. Nakon određivanja otpora potrebno je uzeti u obzir trenutnu temperaturu namota i preračunati otpor na vrijednost pri 20 °C.

Otpor izolacije namota također se temeljito ispituje. Mjeri se otpor izolacije svake faze prema drugim fazama i prema masi stroja, uzimajući u obzir vremenske intervale mjerenja od 15 i 60 sekundi. Mjerenje se provodi ispitnim naponom od 1000 V, a poslije svakog mjerenja je potrebno uzemljiti namot na kojem se vršilo mjerenje kako bi se ispraznio zaostali kapacitivni naboj. Na temelju ovih mjerenja izračunava se indeks polarizacije.

U slučaju da otpor izolacije nije zadovoljavajući, što može biti uzrokovano vlagom u izolaciji, provodi se sušenje namota. Ako otpor i nakon sušenja ostane nizak, to može ukazivati na oštećenja izolacije ili slabija izolacijska svojstva. Podaci o otporu i indeksu polarizacije uspoređuju se s dopuštenim vrijednostima kako bi se ocijenilo stanje izolacije.

Sljedeće ispitivanje koje se provodi odnosi se na mjerenje odvodne struje izolacije. Ispitivanje se izvodi s različitim naponskim razinama u desetominutnom trajanju svake naponske razine. Zabilježeni podaci se zatim prikazuju grafički i analiziraju.

Nadalje je potrebno na statorskom namotu odrediti faktor dielektričnih gubitaka $\tan \delta$. Za ovo mjerenje postoji više metoda, a sve su bazirane na mosnoj metodi za izmjenične struje.

Osim toga, potrebno je izvršiti mjerenje parcijalnih pražnjenja kako bi se detektirali problemi u izolaciji koji mogu uzrokovati buduće kvarove. Parcijalno pražnjenje se ispituje visokofrekventnim generatorom koji šalje impulse kroz namot, a pomoću osciloskopa bilježe se impulsi koji ukazuju na potencijalne slabosti u izolaciji. Ova metoda omogućuje otkrivanje oštećenja prije nego što dođe do potpunog proboja izolacije.

Ispitivanje rotora

Nakon što je rotor izvađen i odložen na postolje, potrebno je izvršiti temeljit pregled svih njegovih dijelova i obaviti potrebna ispitivanja. Prvi korak je temeljito čišćenje rotora, nakon čega slijedi vizualni pregled svih njegovih komponenti. Posebnu pažnju treba posvetiti izolaciji polnog namota kako bi se utvrdila eventualna oštećenja. Također, potrebno je provjeriti učvršćenje namota i stanje klinova koji učvršćuju polove rotora. Sva spojna mjesta također treba pregledati i, ukoliko je potrebno, dodatno ih zategnuti.

Za grubu procjenu stanja polnog namota i međupolnih veza provode se mjerenja omskog otpora rotorskog namota, kako ukupnog tako i po polu. Mjerenje otpora rotorskog namota najčešće se izvodi U-I metodom. Obično se provodi nekoliko mjerenja s različitim vrijednostima struje, a konačni otpor izračunava se kao prosječna vrijednost svih rezultata. Otpor svakog pola rotora mora biti ujednačen i unutar dopuštenih granica.

Pored mjerenja otpora, potrebno je izvršiti i mjerenje padova napona na međupolnim vezama. Ovo mjerenje provodi se tako da se struja održava konstantna, dok se mjere padovi napona u milivoltima. Pomoću ovih mjerenja može se otkriti postojanje loših spojeva ili oštećenja na namotu, kao i odrediti gubici i zagrijavanje namota pri određenoj struji.

Za ispitivanje impedancije ukupnog rotorskog namota, najčešće se koristi izmjenična U-I metoda. U pravilu se izvodi nekoliko mjerenja s različitim vrijednostima struje. Kao konačna vrijednost impedancije uzima se prosjek svih rezultata. Isto se mjerenje koristi za određivanje

impedancije svakog pojedinačnog pola, pri čemu impedancije svih polova trebaju biti ujednačene. Mjerenje impedancije ukupnog rotorskog namota i svakog pojedinačnog pola provodi se kako bi se ispitala međuzavojna izolacija, odnosno kako bi se detektirali mogući međuzavojni spojevi.

Također je potrebno izvršiti mjerenje otpora izolacije rotorskog namota. Iako se izolaciji rotorskog namota pridaje manja pozornost u odnosu na statorski namot zbog nižeg nazivnog napona i struje, ona mora biti u ispravnom stanju. Otpor izolacije mjeri se uz primjenu ispitnog napona od 500 V. Mjerenja se provode u vremenskim intervalima od 15 i 60 sekundi, nakon čega se izračunava indeks polarizacije. Na temelju tih podataka, vrši se procjena stanja izolacije rotorskog namota.

Ispitivanje ležajeva

Generatorski ležajevi obuhvaćaju gornji kombinirani ležaj i donji vodeći ležaj. Ovi ležajevi se moraju nakon demontaže temeljito očistiti i vizualno pregledati kako bi se utvrdila eventualna mehanička oštećenja. Posebnu pažnju potrebno je posvetiti segmentima ležajeva, koji su podložni najvećem trošenju. Svi segmenti moraju se izmjeriti i provjeriti jesu li unutar dopuštenih tolerancija.

Za preciznu procjenu stanja ležajeva, potrebno je provesti dodatna ispitivanja. Segmenti ležajeva izrađeni su od čelika, na koji je postavljena bijela kovina. Procjena stanja bijele kovine i njenog spoja s čeličnim dijelom važna je za utvrđivanje pouzdanosti segmenta. Ultrazvučno ispitivanje omogućava otkrivanje pukotina u bijeloj kovini, kao i eventualnih nepravilnosti u nalijeganju kovine na čeličnu podlogu. Ova metoda se temelji na svojstvu da se ultrazvučni valovi odbijaju od različitih površina s različitim frekvencijama, omogućujući na taj način detekciju potencijalnih oštećenja.

Za ispitivanje klizne površine segmenta koristi se metoda penetracije. Budući da pukotine na površini mogu biti mikroskopske i nevidljive golim okom, koristi se penetrantna tekućina koja prodire u pukotine i locira ih. Ova metoda omogućava otkrivanje pukotina veličine do 0,025 μm . Na ovaj način se osigurava temeljita kontrola stanja segmenta i mogućnost pravovremenog uočavanja oštećenja koja bi mogla ugroziti funkcionalnost ležajeva.

Ostala ispitivanja

Osim prethodno opisanih ispitivanja, potrebno je izvršiti čišćenje i pregled ostalih dijelova generatora poput kliznih kolutova, hladnjaka i kočnica. Hladnjake i pripadajuće cjevovode potrebno je očistiti, zaštititi antikorozivnim sredstvima i izvršiti tlačnu probu. Kočni sustav treba isto ispitati tlačnom probom i ustanoviti ispravnost sustava. Svi ostali uređaji kojima je generator opremljen trebaju se također provjeriti i po potrebi popraviti ili zamijeniti.

7.7.5. Montaža generatora

Priprema za montažu generatora

Nakon što su ispitivanja i popravci završeni, može se pristupiti montaži generatora. Montaža generatora se izvodi obrnutim redoslijedom od demontaže, no ovaj postupak zahtijeva dodatnu pažnju zbog preciznog podešavanja i centriranja pojedinih dijelova generatora.

Ukoliko je tijekom remonta došlo do pomaka osovine turbine, potrebno je osigurati ispravnu okomitost, centričnost i visinsku kotu osovine. Ovako postavljena osovina turbine predstavlja polaznu točku za daljnja mjerenja, pozicioniranja i centriranja dijelova pri montaži generatora.

Ako je došlo do pomaka statora, potrebno je pomoću dizalice vratiti stator na temeljne blokove. Zatim je važno precizno nivelirati i centrirati stator kako bi turbinska osovina bila savršeno usklađena s centrom statorskog provrta. Nakon ovih radnji može započeti montaža rotora.

Montaža rotora

Ako su s lančanog prstena demontirani pojedini polovi, potrebno ih je ponovno montirati prije vraćanja rotora u generator. Pol se postavlja na lančani prsten koristeći posebne naprave za montažu, tako da se užlijebi pomoću lastinog repa. Zatim se spoj učvrsti pomoću klinova, čime se osigurava mehanička čvrstoća i stabilnost između pola i lančanog prstena. Polne namote susjednih polova treba međusobno spojiti prema predviđenoj proceduri.

Za dizanje rotora koristi se naprava za nošenje rotora koja mora biti pravilno postavljena i podešena tako da rotor bude izniveliran tijekom podizanja. Nakon što je rotor podignut dizalicom, pažljivo se premješta prema provrtu statora, gdje se precizno centrira. Uz stator se postavljaju drvene letve, kao i prilikom vađenja rotora. Zračni razmak između rotora i provrta statora iznosi svega 16 mm.

Tijekom spuštanja rotora, potrebno je stalno pratiti i ispravljati položaj kako bi se spriječilo zaglavljivanje drvenih letvi. Također, rotor se mora okretati kako bi se oznake na osovini i glavini rotora uskladile. Kada se rotor spusti, vrši se centriranje i niveliranje prema osovini turbine te se vrši spajanje glavine rotora i osovine pomoću vijaka.

Montaža ostalih dijelova generatora

Gornji kombinirani i donji vodeći ležaji montiraju se obrnuto od redoslijeda demontaže. Segmenti ležajeva, nakon pregleda i mjerenja, postavljaju se prema oznakama kako bi svaki segment pravilno sjeo na svoje mjesto.

Također svi ostali dijelovi generatora trebaju biti pregledani i vraćeni na svoje mjesto.

7.7.6. Puštanje generatora u prvi pogon

Priprema za puštanje generator u prvi pogon

Prije puštanja generatora u prvi pogon, potrebno je pregledati sve rotirajuće dijelove kako bi se osiguralo da nema zaboravljenih materijala ili alata. Sustav kočnica mora se aktivirati nekoliko puta kako bi se provjerilo vraćanje kočnih elemenata u početni položaj. Također je važno provjeriti hladnjake, protok rashladne vode, nivo ulja u ležajevima, sustav visokotlačnog podmazivanja te termometre koji signaliziraju temperaturu statora na 75 °C te automatski zaustavljaju agregat na 90 °C.

Prije pokretanja generatora, potrebno je izmjeriti otpor izolacije statorskog i rotorskog namota. Ako otpor izolacije ne zadovoljava, treba vršiti sušenje namota. Sušenje se može izvoditi grijačima instaliranim ispod statora, mehaničkom vrtnjom kada je generator neuzbuđen i

neopterećen, i trolnim kratkim spojem gdje se struja uzbude podešava tako da statorska struja iznosi u početku 30%, a zatim se povećava na 50 – 60% nazivne struje.

Puštanje generator u prvi pogon

Prvi pogon generatora služi za provjeru mehaničkih parametara, kao što su vibracije, temperatura ležajeva, protok ulja u ležajevima, te se izvodi bez uzbude i s neopterećenim generatorom.

Brzina vrtnje tijekom prvog pogona postavlja se na 70% nazivne brzine, a posebna pozornost posvećuje se zagrijavanju ležajeva. Temperatura ležajeva kontinuirano se prati i bilježi s grafičkim prikazom. U slučaju da temperatura naglo raste, agregat treba odmah zaustaviti. Ako agregat radi stabilno, a temperature ležajeva su unutar dopuštenih vrijednosti, brzina vrtnje povećava se na 85%, a zatim na 100% nazivne brzine.

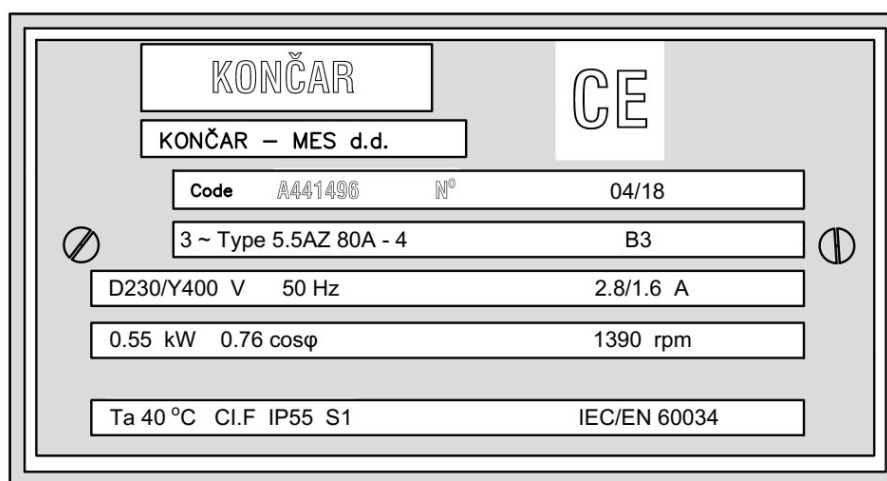
Tijekom prvog pogona vrši se mjerenje i vibracija koje moraju biti unutar 50 mikrona, a u suprotnom, potrebno je balansirati rotor ili tražiti drugi uzrok zbog kojeg dolazi do povećanja vibracija.

Nakon uspješne mehaničke vrtnje, generator se opterećuje s 85%, a zatim s 100% nazivnog opterećenja, uz kontinuirano praćenje zagrijavanja i električnih parametara.

8. ISPITIVANJE ASINKRONIH STROJEVA

Ispitivanje asinkronih strojeva provodi se prema općim normama koje reguliraju ispitivanje svih rotacijskih strojeva na izmjenični napon, osiguravajući usklađenost sa tehničkim i sigurnosnim zahtjevima. U tom kontekstu, asinkroni motori, koji su najzastupljeniji predstavnici ove grupe strojeva, predstavljaju idealan primjer za detaljno objašnjenje postupaka ispitivanja.

Na natpisnoj pločici asinkronog motora navedeni su najbitniji podaci koji pružaju osnovne informacije o karakteristikama i mogućnostima motora. Ti podaci uključuju nazivne vrijednosti napona i struje prema spoju namota, zatim nazivnu snagu, brzinu vrtnje, faktor snage, frekvenciju, a za kolutne strojeve napon i struju rotora. Osim toga, na pločici su navedeni vrsta pogona, vrsta zaštite, temperaturna klasa izolacije namota, godina proizvodnje, tip, tvornički broj, vrsta izvedbe, te naziv proizvođača. Na slici 8.1 prikazan je primjer osnovne natpisne pločice asinkronog motora.



Slika 8.1. Primjer osnovne natpisne pločice asinkronog motora

Natpisna pločica ima važnu ulogu u pružanju osnovnih informacija o konstrukciji stroja i njegovim radnim mogućnostima, što je od izuzetne važnosti za pravilnu primjenu i održavanje stroja. U slučaju bilo kakve veće intervencije na stroju, kao što je prematanje ili promjena načina hlađenja, potrebno je ažurirati ili zamijeniti natpisnu pločicu, uz obavezno navođenje imena izvođača tih promjena, kako bi se osigurala točnost podataka.

8.1. Ispitivanje asinkronog motora pri gradnji

Tijekom proizvodnje asinkronih motora provode se razne provjere i ispitivanja kako bi se osigurala kvaliteta i pouzdanost proizvedenih motora. U slučaju masovne proizvodnje, ispitivanja su integrirana u sam tehnološki proces proizvodnje, čime postaju njegov sastavni dio. Ovaj pristup omogućava brzu i efikasnu kontrolu kvalitete, pri čemu se detaljna ispitivanja provode na određenom postotku proizvedenih motora, na primjer, na svakom desetom motoru.

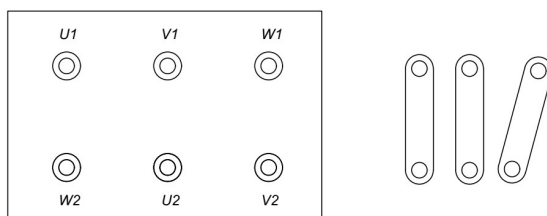
Bez obzira na obim proizvodnje, svaki proizvedeni asinkroni motor prolazi kroz osnovna ispitivanja koja uključuju provjeru ispravnosti spoja, izolacije namota te mehaničkog rada. Ispravnost izolacije namota provjerava se primjenom ispitnog napona između namota i mase, pri čemu su visina ispitnog napona i postupak ispitivanja precizno definirani propisima. Ispravnost mehaničkog rada provjerava se pokretanjem motora u praznom hodu određeno vrijeme. Tijekom tog ispitivanja motor ne smije stvarati prekomjernu buku, ne smije se pregrijavati niti pokazivati druge znakove nepravilnog rada. Ove provjere osiguravaju da svaki proizvedeni asinkroni motor bude spreman za sigurnu i pouzdanu upotrebu u praksi.

S druge strane, kod velikih asinkronih strojeva koji se proizvode pojedinačno, svaki proizvedeni stroj prolazi kroz detaljno ispitivanje u ispitnoj stanici. To uključuje temeljitu provjeru svih bitnih funkcija stroja kako bi se osiguralo da zadovoljava sve tehničke zahtjeve i norme.

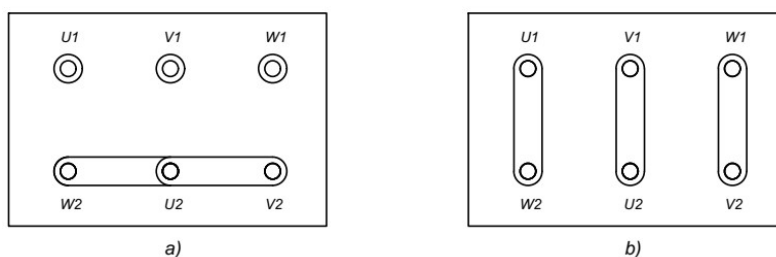
8.2. Ispitivanje namota asinkronog motora

8.2.1. Identifikacija stezaljki

Stezaljke trofaznog asinkronog motora potrebno je u priključnoj kutiji rasporediti na takav način da se omogući jednostavno prespajanje namota motora u zvijezdu ili trokut pomoću priključnih mostova. Na slici 8.2 prikazan je raspored stezaljki u priključnoj kutiji asinkronog motora s pripadajućim mostovima, a na slici 8.3 način postavljanja mostova za zvijezda i trokut spoj.



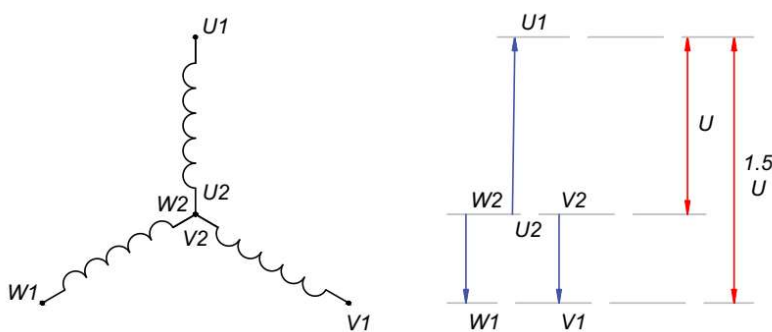
Slika 8.2. Raspored stezaljki u priključnoj kutiji asinkronog motora s pripadajućim mostovima



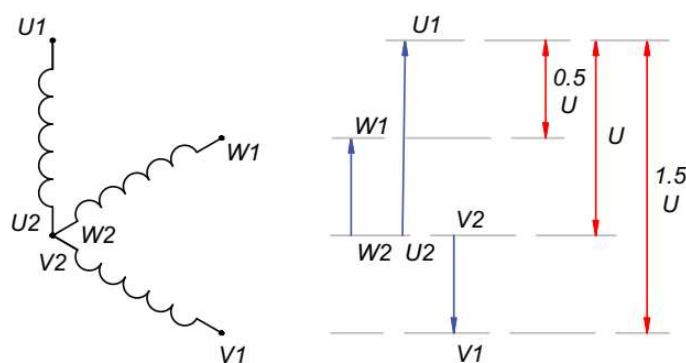
Slika 8.3. Način postavljanja mostova za a) zvijezda spoj, b) trokut spoj

Određivanje oznaka stezaljki trofaznog asinkronog motora provodi se na način da se prvo ommetrom utvrdi koje stezaljke pripadaju kojem faznom namotu, budući da svaki fazni namot ima dva izvoda. Potom se jedan od izvoda svake faze proizvoljno odabere kao kraj faznog namota i označi oznakama U2, V2, odnosno W2 te se svi odabrani krajevi međusobno kratko spoje. Preostali izvodi predstavljaju početke faznih namota i označe se oznakama U1, V1, W1.

Sljedeći korak je provjera ispravnosti odabira početaka i krajeva faznih namota. Na jedan od faznih namota, primjerice U1-U2, dovodi se izmjenični napon U . Između stezaljki U1-V1 i U1-W1 treba se pojaviti napon čija je teorijska vrijednost $1.5 U$, s tim da se u praksi mjeri nešto manji napon, ali uvijek veći od U . Između stezaljki V1-W1 napon bi trebao biti 0. Navedeni slučaj gdje su pravilno označene stezaljke prikazan je na slici 8.4. Ako su stezaljke nepravilno označene, naponi između određenih stezaljki neće odgovarati navedenim vrijednostima. Na slici 8.5 prikazan je slučaj za nepravilno označene stezaljke gdje su oznake W1 i W2 zamijenjene.



Slika 8.4. Prikaz napona pri pravilno označenim stezaljkama asinkronog motora



Slika 8.5. Prikaz napona pri nepravilno označenim stezaljkama asinkronog motora

Na kraju je potrebno uspostaviti ispravan redoslijed faznih namota tako da se motor okreće u desnom smjeru kada je napajanje L1, L2, L3 navedenim redoslijedom priključno na stezaljke motora U1, V1, W1.

8.2.2. Mjerenje otpora namota

Ispitivanje otpora namota asinkronog motora provodi se kako bi se provjerila ispravnost namota i električnih spojeva, te procijenili električni gubici. Mjerenje se provodi U-I metodom, pri čemu je bitno da mjerna struja ne prelazi 10% nazivne struje namota kako bi se izbjeglo povećanje otpora zbog zagrijavanja. Potrebno je zabilježiti temperaturu namota tijekom mjerenja. Izmjerene vrijednosti otpora zatim se preračunavaju na referentnu temperaturu od 20°C te na temperaturu pogonskog toplog stanja od 75°C . Preračunati otpor uspoređuje se s referentnim vrijednostima koje je naveo proizvođač ili prethodnim mjerenjima. Ako su vrijednosti otpora unutar dopuštenih granica, namot se smatra ispravnim. Opća pravila za mjerenje otpora namota su navedena u prethodnim poglavljima.

8.3. Ispitivanje izolacije namota asinkronog motora

8.3.1. Mjerenje otpora izolacije namota

Mjerenje izolacijskog otpora asinkronog motora koristi se za procjenu kvalitete izolacije namota prema masi i prema ostalim namotima. Iako je postupak sličan mjerenju otpora namota, ovdje se mjeri otpor izolacije umjesto otpora vodiča, a provodi se pomoću megaommetra. Za razliku od mjerenja otpora namota, u ovom slučaju se primjenjuje veći naponi, dok su struje vrlo malog iznosa.

Indeks polarizacije se određuje kao omjer otpora R_{10min} i R_{1min} , dok se za modernije izolacijske materijale, kod kojih apsorpcijska struja kraće traje, uzima omjer otpora R_{60sek} i R_{15sek} . Mjerenje izolacijskog otpora i indeksa polarizacije provodi se prema normi IEEE std 43, koja daje preporuke za ispitivanje izolacijskog otpora rotacijskih strojeva, a postupak i preporučene vrijednosti navedeni su u prethodnim poglavljima.

8.3.2. Određivanje faktora dielektričnih gubitaka

Izolacijski sustav asinkronih motora, kao i svi dosad opisani izolacijski sustavi, ima određenu kapacitivnost. Zbog toga kroz njega, osim radne komponente, teče i kapacitivna komponenta struje. Kako je već prethodno objašnjeno kut dielektričnih gubitaka ovisi o odnosu tih struja. Određivanje faktora dielektričnih gubitaka asinkronih motora provodi se isključivo na visokonaponskim strojevima, gdje je to ispitivanje važno za procjenu kvalitete izolacije.

Za određivanje faktora dielektričnih gubitaka asinkronih motora koriste se napredne mosne metode, a najpoznatija je Scheringov most. Često se za ovakve slučajeve koristiti i Glynnov most, koji nudi veću osjetljivost i preciznost za ispitivanje izolacije visokonaponskih strojeva i složenih izolacijskih sustava.

8.3.3. Ispitivanje udarnim naponom

Provjera međuzavojne izolacije asinkronih motora najčešće se provodi udarnim naponom. Kao što je detaljno opisano u prethodnim poglavljima, udarni generator stvara valni oblik udarnog napona, koji se primjenjuje na sva tri fazna namota motora. Snimljeni odzivi se zatim uspoređuju kako bi se procijenila ispravnost izolacije.

Iako metoda udarnog napona može otkriti međuzavojne kratke spojeve, nije uvijek u potpunosti učinkovita. Najbolje rezultate postiže kod niskonaponskih i srednjenaponskih motora. Kod velikih visokonaponskih motora, ova metoda se koristi prvenstveno za provjeru međuzavojne izolacije na grupama svitaka u početnoj fazi gradnje samoga stroja.

8.3.4. Pokus visokim naponom

Dielektrična čvrstoća izolacijskog sustava ispituje se visokonaponskim pokusom, pri kojem se visoki izmjenični napon sinusnog oblika (50 ili 60 Hz) priključuje između stezaljki namota i uzemljenog kućišta stroja. Napon se održava 60 sekundi, a svi dijelovi stroja koji nisu uključeni u ispitivanje također moraju biti uzemljeni. Ispitni napon za nove strojeve izračunava se prema formuli:

$$U_{isp} = 2 U_n + 1 \text{ [kV]} \quad (8.1)$$

gdje je:

U_{isp} – ispitni napon [kV]

U_n – nazivni napon namota [kV]

Ispitivanje je posebno važno za statorske i rotorske namote visokonaponskih strojeva. Ako namot izdrži ispitni napon bez proboja, ocjenjuje se ispravnim.

Tijekom proizvodnje, ispitivanje visokim naponom se provodi u različitim fazama, npr. faze kada su svici neuloženi, namot uložen, prije impregnacije, poslije impregnacije, namot ugrađen u kućište te završno ispitivanje.

8.4. Ispitivanja asinkronog motora u pogonu

8.4.1. Mjerenje napona osovine

Kao što je već bilo prethodno spomenuto, napon osovine može se pojaviti kod svih većih izmjeničnih rotacijskih strojeva, uključujući i veće asinkrone motore. Nepravilnosti u magnetskom krugu električnog stroja mogu uzrokovati napon osovine, što može rezultirati strujom kroz ležajeve motora. Takve struje mogu izazvati elektrokoroziiju i time skratiti vijek trajanja ležajeva. Naponi veći od 300 mV mogu biti dovoljni za izazivanje tih struja. Da bi se spriječio ovaj problem, ležajevi se često izoliraju od mase, čime se prekida strujni krug ležajnih struja.

Da bi se prevenirali navedeni problemi treba utvrditi postojanje napona osovine te vršiti njegovo mjerenje. Pri mjerenju potrebno je ostvariti što bolji kontakt između mjernog uređaja i osovine koja se vrti. Za tu svrhu se koriste metalne četkice ili bakreni šiljci. Za kontrolu napona osovine koristi se voltmetar, koji mjeri napon između osovine i kućišta, te ampermetar, koji prati struju na izoliranom dijelu osovine.

8.4.2. Pokus vitlanja

Rotor asinkronog motora, bilo da je kolutne ili kavezne izvedbe, predstavlja kritičan dio motora koji može biti osjetljiv na povećana mehanička naprezanja. U slučaju naglog rasterećenja

radnog mehanizma, može doći do povećane brzine vrtnje rotor te u krajnjem slučaju i njegovog oštećenja.

Kako bi se provjerila mehanička čvrstoća rotirajućih dijelova, provodi se pokus vitlanja, gdje se motor vrti u praznom hodu pri povišenoj brzini, povećavajući frekvenciju napona napajanja na 120% nazivne vrijednosti u trajanju 120 sekundi. Nakon pokusa, preporučuje se mjerenje vibracija ležajeva kako bi se utvrdilo je li došlo do pomicanja dijelova rotora ili trajnih deformacija.

8.4.3. Mjerenje vibracija

Rotor asinkronog motora sastoji se od osovine, rotorskog paketa, rotorskog namota i ležajeva, te predstavlja složen mehanički sustav s očekivanim debalansom. Mjerenjem mehaničkih vibracija ležajeva može se utvrditi razina tog debalansa i procijeniti uravnoteženost rotora. Vibracije kod asinkronih motora su periodične, te se mogu analizirati kao harmonici. Pri mjerenju vibracija umjesto amplitude pomaka [μm], u praksi se često koristi efektivna vrijednost brzine vibriranja [mm/s].

Budući da temelji motora značajno utječu na vibracije, veliki asinkroni motori postavljaju se na čvrste podloge. Vibracije svih rotacijskih strojeva, uključujući asinkrone motore, mjere se u x, y i z smjeru, a provode se prema važećim normama.

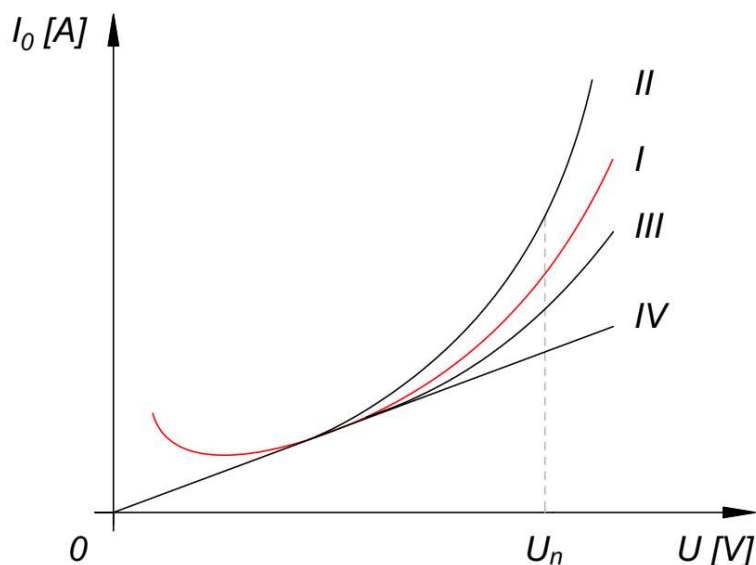
8.5. Funkcionalna ispitivanja asinkronog motora

8.5.1. Pokus praznog hoda

Pokus praznog hoda asinkronog motora izvodi se tako da je motor priključen na izvor napajanja i okreće se bez opterećenja na osovini. Snima se ovisnost struje i snage o naponu koji se mijenja u koracima od 1.2 - 0.25 U_n .

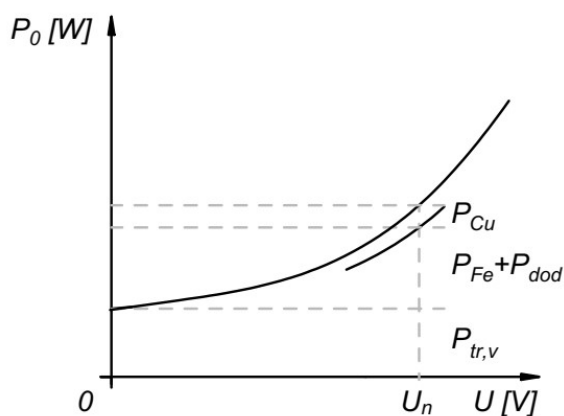
Ovim pokusom se dobiju karakteristike praznog hoda $I_o = f(U_o)$, $P_o = f(U_o)$, $\cos \phi_o = f(U_o)$ te se utvrde vrijednosti struje praznog hoda I_o , faktora snage $\cos \phi_o$ i gubitka P_o , $P_{tr,v}$ i P_{Fe} za nazivni napon U_n .

Karakteristika zasićenja asinkronog motora prikazuje ovisnost struje praznog hoda i napona, a prikazana je na slici 8.6.

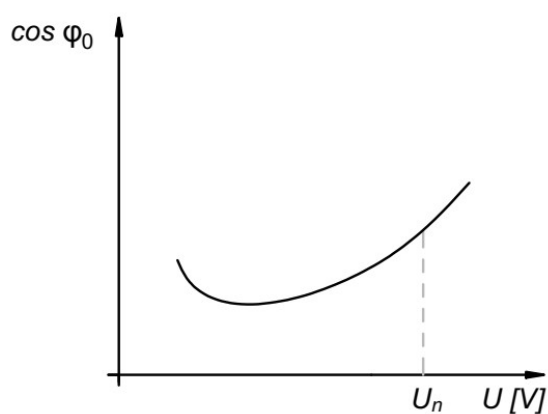


Slika 8.6. Karakteristika zasićenja asinkronog motora za slučaj;
I—uobičajeno zasićenje, II—veće zasićenje, III—manje zasićenje, IV—bez zasićenja pri sinkronoj brzini

Na slici 8.7 prikazana je raspodjela gubitaka praznog hoda asinkronog motora, a na slici 8.8 karakteristika faktora snage pri praznom hodu.



Slika 8.7. Gubici praznog hoda asinkronog motora

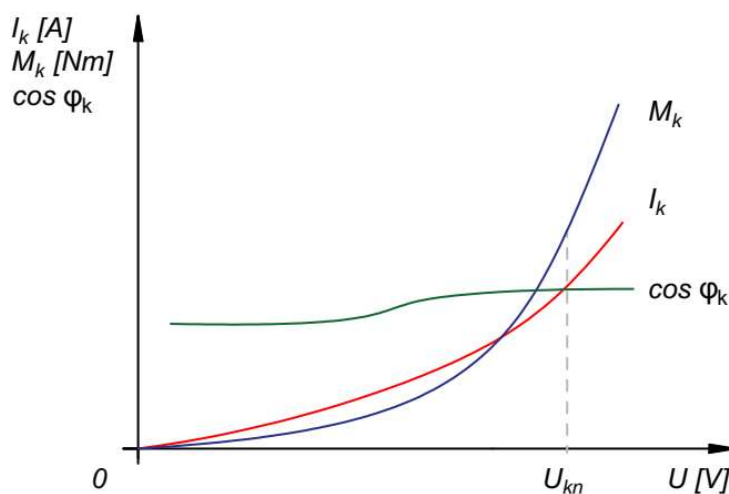


Slika 8.8. Ovisnost faktora snage o naponu pri praznom hodu asinkronog motora

Gubici u praznom hodu odnose se na gubitke u željezu P_{Fe0} , nastali zbog histereze i vrtložnih struja, gubitke u namotima statora P_{Cu0} , gubitke zbog trenja i ventilacije $P_{tr,v}$ te na dodatne gubitke P_{dod} u što spadaju površinski i pulzacioni gubici.

8.5.2. Pokus kratkog spoja

Pokus kratkog spoja asinkronog motora se izvodi na način da je rotor zakočen, dok se motor napaja sniženim naponom tako da struje ne prelazi vrijednost $3 - 3.5 I_n$. Ovim pokusom se snimaju karakteristike $I_k = f(U)$, $M_k = f(U)$, $\cos \phi_k = f(U)$ te se određuje potezna struja i potezni moment za nazivni napon. Moment na osovini motora se može mjeriti direktno ili odrediti računski. Na slici 8.9 prikazana je ovisnost momenta, struje i faktora snage o naponu kod kratkog spoja asinkronog motora.



Slika 8.9. Ovisnost momenta, struje i faktora snage o naponu kod kratkog spoja asinkronog motora

8.5.3. Snimanje karakteristika opterećenja

U karakteristike opterećenja spadaju ovisnosti: struje I , snage na osovini P_2 , brzine vrtnje n , klizanja s , faktora snage $\cos \phi$, gubitaka u motoru P_g , korisnosti η i momenta na osovini M o snazi uzetoj iz mreže P_1 .

Tijekom ispitivanja asinkroni motor se napaja nazivnim naponom te se mjeri struja, snaga i moment.

Ako je klizanje malog iznosa, mjeri se pomoću stroboskopa. Pri većem klizanju mjeri se brzina n , a klizanje s se računa prema izrazu:

$$s = (n_s - n) / n_s \quad (8.2)$$

Snaga na osovini računa se:

$$P_{2mj} = \omega \cdot M_{mj} \quad (8.3)$$

Ukupni gubici se računaju prema izrazu:

$$P_g = P_1 - P_{2mj} \quad (8.4)$$

Korisnost je:

$$\eta = P_{2mj} / P_1 \quad (8.5)$$

Faktor snage:

$$\cos \phi = P_1 / (\sqrt{3} \cdot U \cdot I) \quad (8.6)$$

Za slučaj da ne postoji mogućnost mjerenja momenta, on se u tom slučaju računa prema izrazu:

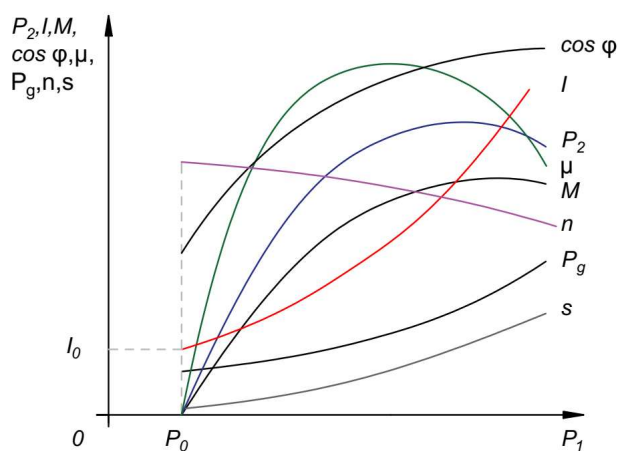
$$M = P_2 / \omega \quad (8.7)$$

Snaga P_2 dobije se izračunom na osnovu izmjerene snage P_1 i određenih gubitaka P_g koristeći podatke o gubicima iz pokusa praznog hoda.

Snimanje karakteristika opterećenja asinkronog motora provodi se mjerenjem navedenih veličina u koracima počevši od najvećeg opterećenja prema praznom hodu. Motor se napaja nazivnim naponom i frekvencijom, a kao nezavisna varijabla se uzima električna snaga P_1 koju motor uzima iz mreže. Slika 8.10 prikazuje karakteristike opterećenja asinkronog motora.

$U = konst.$

$f = konst.$



Slika 8.10. Karakteristike opterećenja asinkronog motora

Iz karakteristika opterećenja mogu se odrediti nazivni podaci asinkronog motora. Prvo je potrebno očitati nazivnu snagu P_2 s natpisne pločice motora te za nju na dijagramu odrediti pripadajuću električnu snagu P_1 koju motor uzima iz mreže. Zatim se na dijagramu povuče okomiti pravac iz točke P_1 koja je prethodno određena, te se iz sjecišta pravca i karakteristika mogu očitati nazivne veličine motora.

U tablici 8.1 navedeno je dozvoljeno odstupanje očitanih veličina od podataka na natpisnoj pločici prema normi IEC 60034-1:2004.

Tablica 8.1. Dozvoljena odstupanja veličina od podataka na natpisnoj pločici

Veličina	Dozvoljeno odstupanje
Korisnost η - strojevi do 150 kW	- 15% od $(1-\eta)$
- strojevi iznad 150 kW	- 10% od $(1-\eta)$
Faktor snage $\cos \varphi$	$\pm 1/6 (1-\cos \varphi)$; min 0.02, max 0.07
Klizanje s	$\pm 20\%$
Potezna struja	+ 20%
Potezni moment	- 15%
Prekretni moment	- 10%

8.5.4. Mjerenje klizanja

Klizanje asinkronog motora može se mjeriti na više načina. Veća klizanja se odrede tako da se mjeri brzina vrtnje rotor te se na osnovu izmjerene i sinkrone brzine odredi klizanje. Za manje iznosa klizanja do 5% ova metode je neprecizna pa se mjerenje vrši pomoću stroboskopa.

Mjerenje pomoću stroboskopa se izvodi tako da se na rotor postavi oznaka koja se obasjava bljeskovima stroboskopa. Okidanje stroboskopa se sinkronizira s frekvencijom mreže. Promatranjem oznake, a zbog tromosti oka, stvara se dojam da oznaka miruje za rotor koji se okreće sinkronom brzinom, odnosno da se okreće u suprotnom smjeru od rotora za rotor koji se okreće sporije od sinkrone brzine.

Mjerenje se provodi tako da se na stator postavi druga oznaka te se mjeri vrijeme T za koje će oznaka na rotoru napraviti određeni broj prolazaka N u odnosu na oznaku na statoru.

Klizanje se potom za frekvenciju mreže $f = 50$ Hz računa prema izrazu:

$$s_{\%} = \frac{N}{T \cdot f} \cdot 100 [\%] = \frac{2 \cdot N}{T} [\%] \quad (8.8)$$

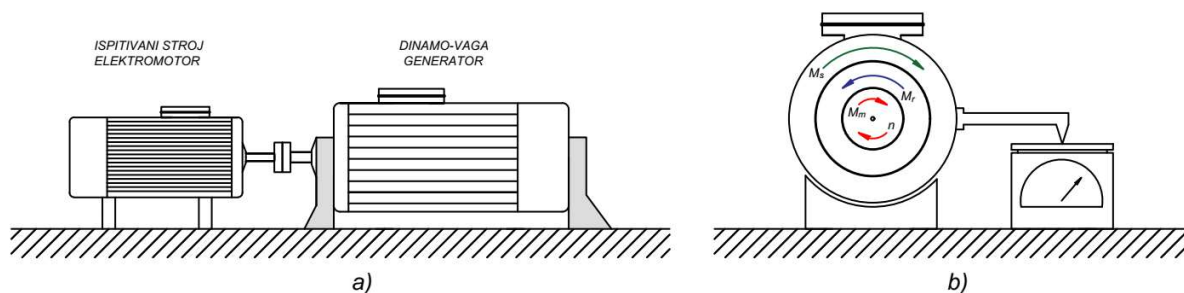
Ako motor ima p pari polova, po obodu rotora se pojavi p oznaka, pa s obzirom da se okreću p puta sporije, mjerenje se provodi na isti način.

8.5.5. Mjerenje momenta

Moment asinkronog motora moguće je odrediti indirektno, tako da se mjeri ulazna električna snaga P_1 , potom se odbiju od nje svi gubici i odredi snaga na osovini P_2 . Moment se zatim računa prema izrazu:

$$M = P_2 / \omega \quad (8.9)$$

Za točnije mjerenje momenta potrebno je vršiti direktno mjerenje pomoću dinamo-vage. Dinamo-vaga je električni generator koji ima posebnu izvedbu kućišta. Kućište se može slobodno kretati oko svoje uzdužne osi te prenositi silu na vagu s kojom je u dodiru. Slika 8.11 prikazuje način spajanja elektromotora i dinamo-vage te princip rada dinamo-vage.



Slika 8.11. Prikaz dinamo-vage; a) način spajanja elektromotora i dinamo-vage, b) princip rada dinamo-vage

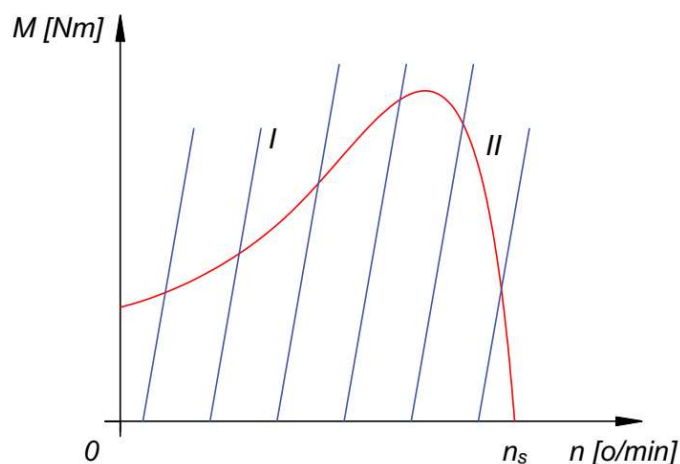
Princip mjerenja temelji se na tome da rotor generatora stvara protumoment koji djeluje nasuprot momentu na osovini elektromotora. Istovremeno, stator generatora razvija protumoment prema rotoru, te se taj moment prenosi preko poluge dužine l kao sila F koja djeluje na vagu. Moment se zatim izračunava prema sljedećem izrazu:

$$M = F \cdot l \quad (8.10)$$

Mjerenje pomoću dinamo-vage izvodi se najčešće u laboratoriju. Ako se mjerenje treba povoditi na terenu koriste se jednostavniji uređaji za mjerenje momenta kao što su mjerne osovine i tenzometarske trake.

8.5.6. Snimanje karakteristike momenta

Karakteristika momenta asinkronog motora je ujedno njegova vanjska karakteristika, a predstavlja ovisnost momenta o brzini vrtnje, odnosno o klizanju. Snimanje se vrši pomoću dinamo-vage, a provodi u više koraka. Na slici 8.12 prikazane su karakteristike dinamo-vage pri snimanju momenta asinkronog motora. Karakteristike dinamo-vage odabiru se izborom odgovarajućeg režima rada kako bi se osigurao njezin stabilan rad.



Slika 8.12. Snimanje karakteristike momenta asinkronog motora pomoću dinamo-vage;
I-karakteristike dinamo-vage, II-karakteristika asinkronog motora

Određivanje momenta se može vršiti i računski prema izrazu:

$$M = P_2 / \omega \quad (8.11)$$

U tom slučaju trebamo znati snagu na osovini motora P_2 , a to se postiže tako da je odredimo na osnovu izlazne snage generatora za terećenje i njegovih gubitka očitanih s baždarnih krivulja.

8.5.7. Pokus zagrijavanja

Pokus zagrijavanja asinkronog motora provodi se tako da se motor optereti nazivnim opterećenjem dovoljno dugo da temperatura stagnira u svim njegovim dijelovima. Tijekom ispitivanja temperatura se očitava u pravilnim vremenskim intervalima. Određivanje temperature se vrši računski na osnovu izmjerenog otpora namota ili direktnim mjerenjem za slučaj da su u motor ugrađeni termoelementi.

U slučaju određivanja temperature na osnovu izmjerenog otpora statorskog namota koristi se izraz:

$$R_{\vartheta} = R_{\vartheta 0} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta\vartheta) \quad (8.12)$$

$$\Delta\vartheta = \frac{1}{\alpha_{Cu}} \cdot \left(\frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta 0}} - 1 \right) \quad (8.13)$$

gdje je:

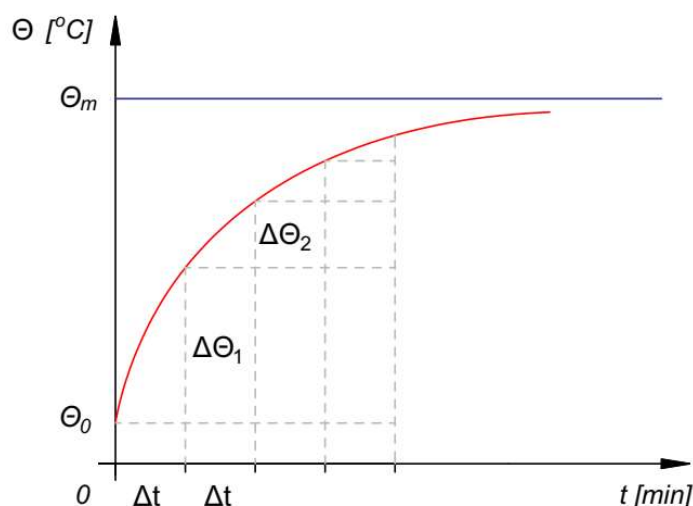
$R_{\vartheta 0}$ – otpor izmjeren na stezaljkama stroja prije početka rada (otpor na temperaturi okoline),

R_{ϑ} – otpor izmjeren na stezaljkama stroja nakon rada,

α_{Cu} – temperaturni koeficijent materijala namota (bakar),

$\Delta\vartheta$ – povišenje temperature namota u odnosu na temperaturu okoline.

Kod ispitivanja zagrijavanja malih motora potrebno je relativno kratko vrijeme, dok u slučaju većih motora zagrijavanje do ustaljenog stanja može trajati i nekoliko sati. Iz tog razloga se pokus može prekinuti nakon nekog vremena, a konačna nadtemperatura odrediti grafičkim postupkom. Na slici 8.13 prikazana je karakteristika zagrijavanja motora gdje su naznačeni prirasti temperature u određenim vremenskim periodima te konačna nadtemperatura.



Slika 8.13. Karakteristika zagrijavanja elektromotora

Toplinska vremenska konstanta predstavlja vrijeme T u kojem nadtemperatura postigne 63.2% konačne nadtemperature.

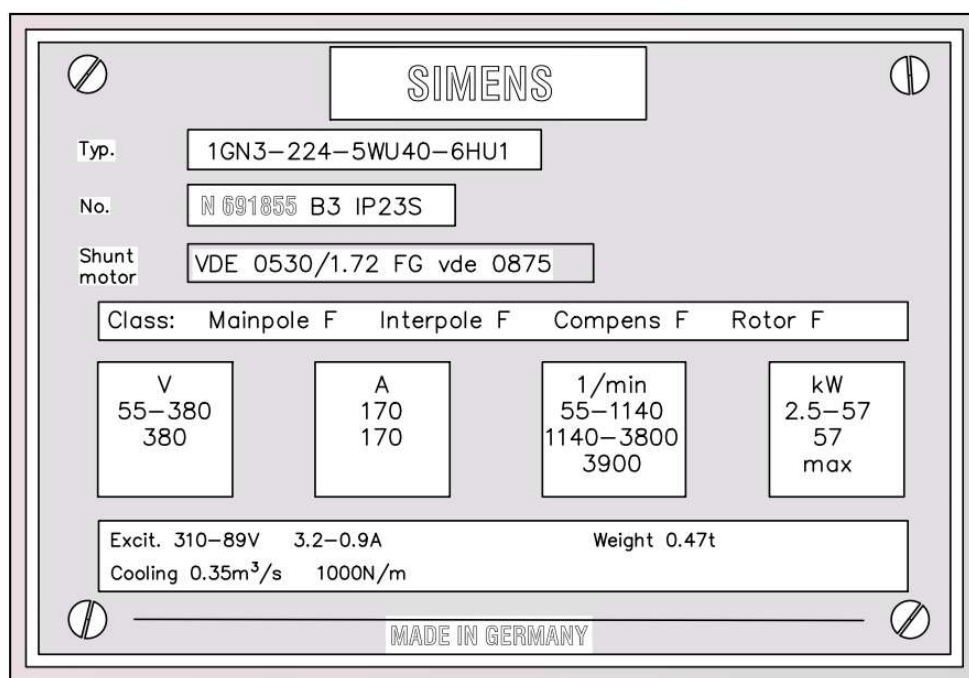
Asinkroni motori u pravilu imaju konačnu nadtemperaturu manju od dozvoljene za temperaturnu klasu upotrijebljene izolacije, što znači da motor ima određenu toplinsku rezervu te može podnijeti i nešto veće opterećenje od nazivnog bez opasnosti da će doći do oštećenja izolacije.

9. ISPITIVANJE ISTOSMJERNIH STROJEVA

Klasični kolektorski istosmjerni strojevi sve više ustupaju mjesto modernijim tipovima istosmjernih strojeva. Tako se u novije vrijeme sve češće upotrebljavaju beskolektorski istosmjerni motori, zvani još BLDC motori (engl. *Brushless Direct Current*). Ovi moderni motori nude prednosti kao što su veća pouzdanost, manja potreba za održavanjem i poboljšana energetska učinkovitost. Iako se kolektorski istosmjerni strojevi sve manje koriste, još uvijek ih je moguće pronaći u starijim sustavima ili izvedbama gdje su potrebne specifične karakteristike koje se mogu pronaći kod ove vrste strojeva.

Natpisna pločica istosmjernih strojeva pruža sve bitne informacije o određenom stroju, uključujući nazivni napon, struju, snagu, zatim napon i struju uzbude, nazivnu brzinu vrtnje, vrste namota, temperaturnu klasu izolacije namota, vrstu zaštite, vrstu pogona, godinu proizvodnje, tip, izvedbu, tvornički broj i naziv proizvođača.

Svaka značajnija izmjena na istosmjernom stroju, poput prematanja namota ili promjene načina hlađenja, mora biti zabilježena na natpisnoj pločici, uz navođenje izvođača radova. Na slici 9.1 je prikazan primjer natpisne pločice istosmjernog stroja.



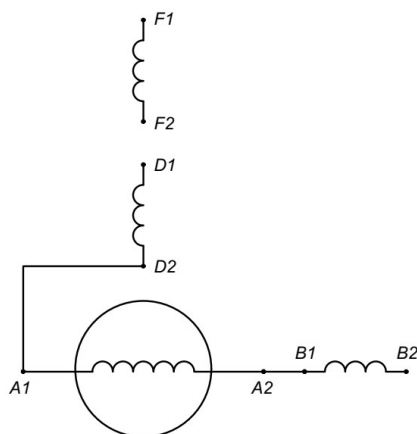
Slika 9.1. Primjer natpisne pločice istosmjernog stroja

9.1. Određivanje oznaka stezaljki

Namoti istosmjernog stroja uključuju armaturni namot na rotoru (A1-A2), uzbudni namot na statoru koji može biti nezavisan (F1-F2), paralelan (E1-E2) ili serijski (D1-D2), te

kompenzacijski namot (C1-C2) i namot pomoćnih polova (B1-B2) smješteni na glavne i pomoćne polove statora.

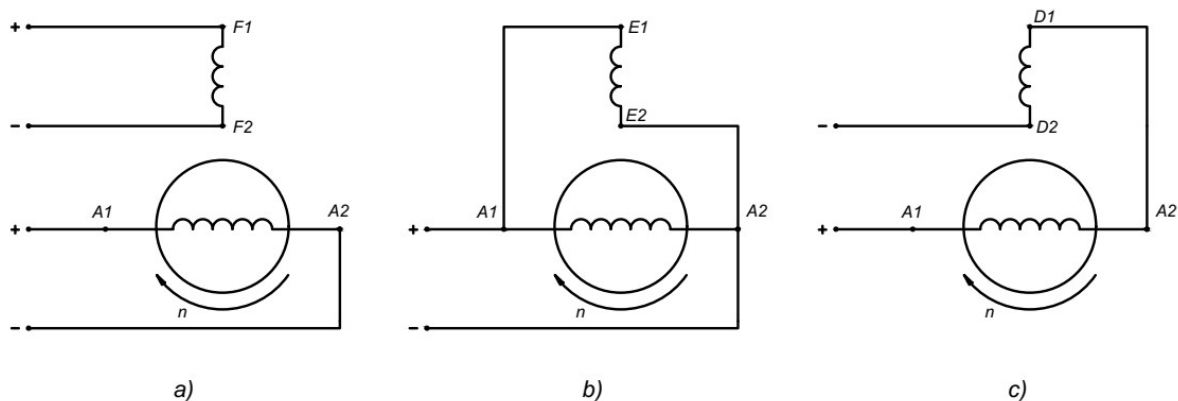
Spajanjem namota u različitim kombinacijama moguće je ostvariti specifične karakteristike istosmjernih strojeva pogodne za određene primjene. Na slici 9.2 prikazan je način na koji može biti spojen namot istosmjernog stroja.



Slika 9.2. Primjer spoja namota istosmjernog stroja

Za pravilno označavanje stezaljki namota istosmjernih strojeva, struja u svim namotima treba teći od stezaljke označene s nižim (višim) brojem prema stezaljci s višim (nižim) brojem, kako bi se osiguralo potpomagajuće magnetsko djelovanje uzбудnih namota i ispravan polaritet magnetskog polja kompenzacijskog namota i namota pomoćnih polova.

Stežaljke u pogledu smjera vrtnje trebaju biti označene tako da smjer vrtnje i polariteti odgovaraju prikazu na slici 9.3. Smjer vrtnje stroja se definira gledanjem s kraja osovine prema stroju.

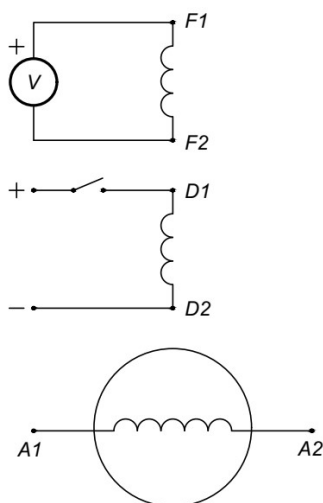


Slika 9.3. Prikaz spoja namota i smjera vrtnje za stroj; a) nezavisno uzbuđen, b) paralelno uzbuđen, c) serijski uzbuđen

Određivanje oznaka stezaljki se vrši tako da se prvo odaberu izvodi armaturnog namota, tj. oni izvodi koji su priključeni na četkice kolektora. Jedan od tih izvoda se proizvoljno odredi i označi oznakom A1.

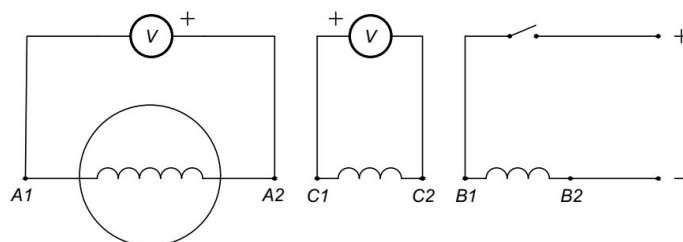
Zatim je potrebno uskladiti da svi uzbudni namoti imaju magnetsko polje odgovarajućeg smjera. To se postiže tako da se na jedan uzbudni namot narine istosmjerni napon, a na ostalim

se pomoću voltmetra odredi polaritet. Za pravilno označene stezaljke polariteti napona trebaju odgovarati prikazu na slici 9.4.



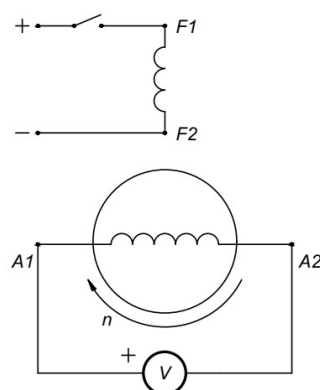
Slika 9.4. Prikaz načina određivanja oznaka stezaljki uzбудnih namota

Na slici 9.5 prikazani su pravilni polariteti namota armature i kompenzacijskog namota pri narinutom istosmjernom naponu na namot pomoćnih polova.



Slika 9.5. Određivanje oznaka namota armature, kompenzacijskog namota i namota pomoćnih polova

Na posljetku je još potrebno uskladiti oznake stezaljki armaturnog i uzbudnog namota kako bi smjer okretanja bio ispravan. To se provodi dovođenjem istosmjernog napona na uzbudni namot, te okretanja rotora u desnom smjeru i određivanja polariteta induciranog napona na namotu armature. Na slici 9.6 su prikazani ispravni polariteti narinutog i induciranog napona.



Slika 9.6. Određivanje oznaka namota u pogledu ispravnog smjera vrtnje

9.2. Mjerenje otpora namota

Za mjerenje otpora namota istosmjernih strojeva koristi se U-I metoda. S obzirom na to da su otpori namota relativno male vrijednosti, potrebno je koristiti naponski spoj kako bi se smanjila pogreška mjerenja. Izmjereni otpor se preračunava na referentnu temperaturu od 20 °C, a često i na temperaturu toplog stanja od 75°C. Detalji mjerenja opisani su u prethodnim poglavljima.

Specifičnost mjerenja otpora namota armature istosmjernih strojeva je u tome da je priključivanje mjernih instrumenata potrebno izvesti na samom kolektoru kako bi se izbjegao otpor četkica i prijelazni otpor između četkica i kolektora.

9.3. Mjerenje otpora izolacije namota

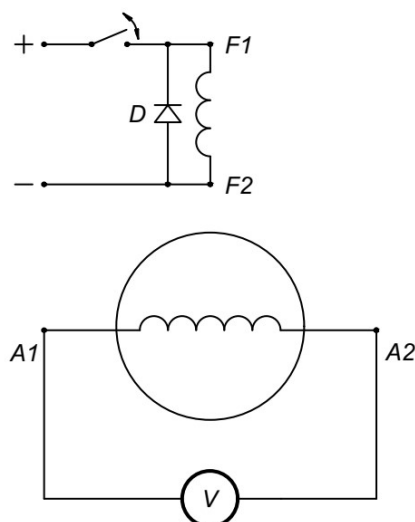
Postupak mjerenja otpora izolacije, kao i vrijednosti ispitnih napona te preporučene minimalne vrijednosti otpora izolacije i indeksa polarizacije navedeni su u prethodnim poglavljima, a određeni prema preporuci za ispitivanje otpora izolacije rotacijskih strojeva IEEE Std 43.

9.4. Podešavanje neutralne zone

Neutralna zona nalazi se u simetrali između glavnih polova, i u nju se postavljaju četkice kolektorskog stroja. Kod starijih malih strojeva, bez pomoćnih polova, položaj četkica ponekad se pomiče radi poboljšanja komutacije pri opterećenju. Noviji strojevi rješavaju te probleme upotrebom pomoćnih polova, pa se kod njih četkice uvijek postavljaju u neutralnu zonu čime se postiže ispravna komutacija i ujednačene karakteristike u oba smjera vrtnje. Neutralnu zonu je potrebno provjeravati poslije remonta i problema s komutacijom.

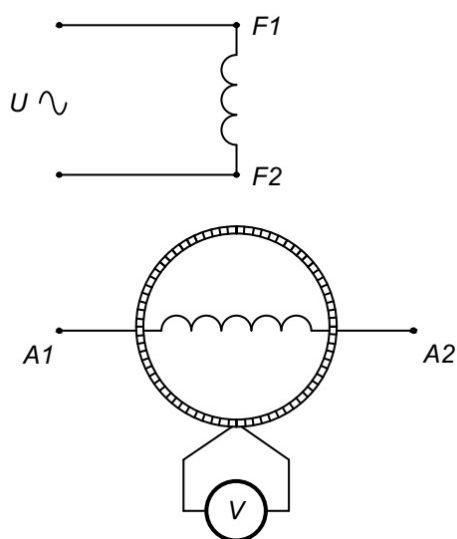
Za određivanje neutralne zone koristi se više metoda, a najčešće su metoda indukcije i izmjenična metoda.

Metoda indukcije temelji se na činjenici da se u četkicama, koje su točno u neutralnoj zoni, pri promjeni uzbudne struje ne inducira napon, jer su te četkice povezane sa svicima čija je os okomita na os kroz glavne polove. Postupak uključuje priključivanje istosmjernog izvora na uzbudni namot i mjerenje napona na četkicama. Ako voltmetar pokazuje minimalne otklone, četkice su pravilno postavljene u neutralnu zonu. Na slici 9.7 prikazana je navedena metoda indukcije.

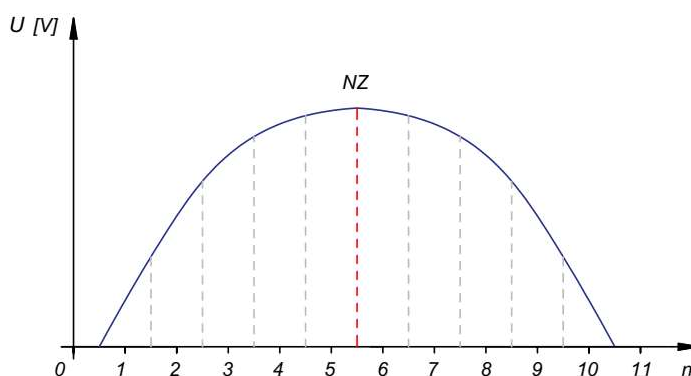


Slika 9.7. Spoj pri izvedbi metode indukcije

Izmjenična metoda koristi sličan princip kao prethodna, ali uz izmjeničnu struju za napajanje uzbuđenog napona. Inducirani napon mjeri se direktno na kolektoru između susjednih lamela. Maksimalni napon se odnosi na svitak u neutralnoj zoni, čime se određuje položaj neutralne zone. Na slici 9.8 prikazan je spoj za izvedbu izmjenične metode, na slici 9.9 rezultati mjerenja napona između susjednih lamela kolektora i određivanje neutralne zone.



Slika 9.8. Spoj pri izvedbi izmjenične metode



Slika 9.9. Rezultati mjerenja napona između susjednih lamela kolektora i određivanje neutralne zone (NZ)

9.5. Snimanje karakteristika regulacije

Karakteristike regulacije nezavisno uzbuđenog istosmjernog stroja daju ovisnost struje uzbuđenja o struji armature za motorski i generatorski režim rada uz konstantan napon na stezaljkama armature i konstantnu brzinu vrtnje.

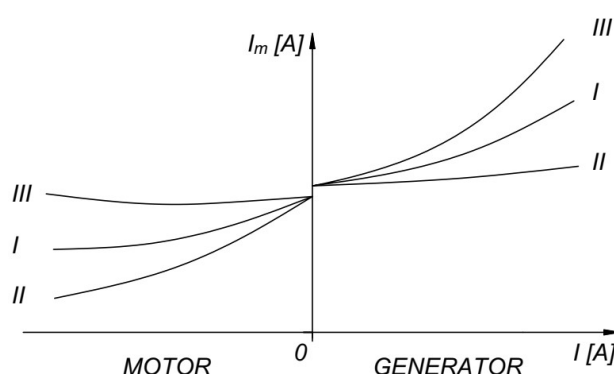
Snimanje se provodi na način da se vrši promjena opterećenja stroja, a struja uzbude se podešava tako da se napon i brzina vrtnje održavaju konstantnim bilo da je generatorski ili motorski rad. Pri ispitivanju se izrađuje prirodna karakteristika te karakteristike s kompaundacijom i protukompaundacijom.

Kompaundacija se odnosi na dodavanje, uz namot nezavisne uzbude, dodatnog namota serijske uzbude kroz koji protječe struja opterećenja u tom smjeru da pojačava glavni magnetski tok. U slučaju da dodatna serijska uzbuda dovodi do smanjenja glavne uzbude dobiva se protukompaundacija.

Na slici 9.10 prikazane su sve tri karakteristike regulacije za oba režima rada.

$U = konst.$

$n = konst.$



Slika 9.10. Karakteristike regulacije istosmjernog stroja; I - prirodna, II - kompaundirana, III - protukompaundirana

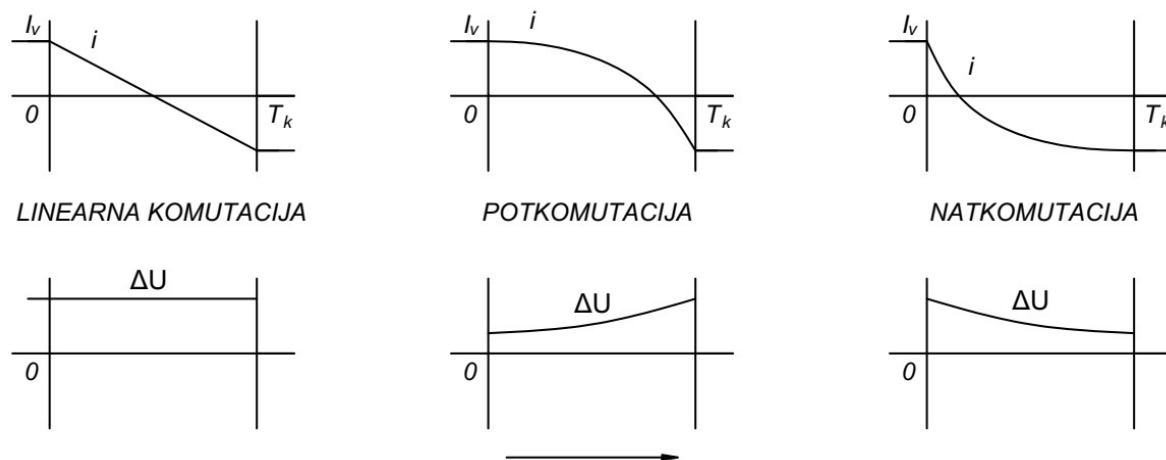
Na grafu je vidljivo da u motorskom radu kako bi se održala brzina vrtnje konstantnom treba pri povećanju opterećenja smanjivati struju uzbude, dok je kod generatorskog rada za održavanje konstantnog napona pri povećanju opterećenja potrebno povećavati struju uzbude. Također je vidljivo kako način kompaundacije utječe na potrebu za promjenom uzbudne struje da bi se napon i brzina vrtnje održavali konstantnima.

S obzirom da se smjer struje u armaturi, a time i smjer struje u kompaundnom namotu serijske uzbude mijenja pri promjeni režima rada stroja, a istovremeno smjer struje nezavisne uzbude ostaje nepromijenjen, može se ustvrditi da spoj namota za kompaundaciju u generatorskom radu odgovara protukompaundaciji u motorskom radu.

9.6. Ispitivanje komutacije

Komutacija je jako bitna kod istosmjernih strojeva, stoga je važno utvrditi komutacijsko stanje stroja i po potrebi napraviti korekcije kako bi se stanje popravilo. Snimanjem pada napona na četkici može se odrediti tip komutacije, a razlikuju se tri osnovna tipa; linearna komutacija, natkomutacija i potkomutacija. Mjerenje pada napona se provodi na tri točke četkice; na ulaznom bridu, sredini i izlaznom bridu pomoću mjernog šiljka dok je stroj u vrtnji pod opterećenjem. Na slici 9.11 su prikazani tipovi komutacije s obzirom na oblik krivulja pada

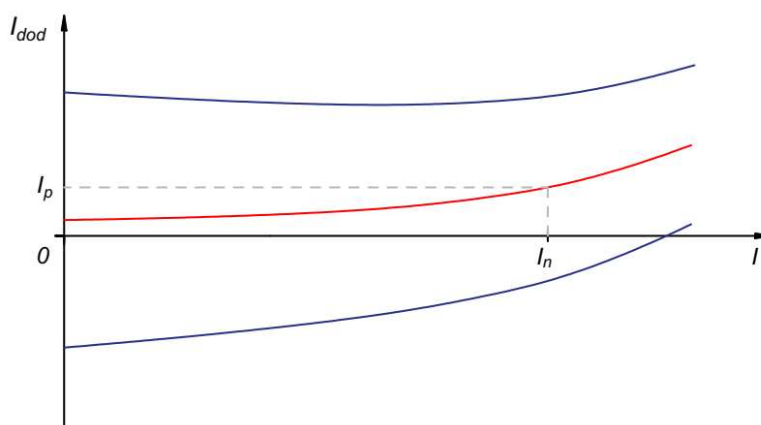
napona na četkici i toka struje svitka u komutaciji. Za dobru komutaciju je potrebno stanje blage natkomutacije.



Slika 9.11. Vrste komutacije s obzirom na struju svitka u komutaciji i pad napona na četkici

Također je za kvalitetnu komutaciju potrebno odrediti područje rada u kojem stroj radi bez iskrenja, a to se provodi određivanjem crnog pojasa komutacije. To ispitivanje se provodi tako da stroj radi opterećen, a namot pomoćnih polova se napaja iz dodatnog istosmjernog izvora. Tijekom ispitivanja se mjeri struja armature i dodatna struja koja prolazi kroz namot pomoćnih polova. Promjenom opterećenja stroja, a time i armaturne struje, mijenja se i dodatna struja na način da se odredi njena gornja i donja vrijednost pri kojoj se javlja iskrenje.

Prikazivanjem grafički dodatne i armaturne struje može se odrediti crni pojas komutacije te potrebna vrijednost dodatne struje koja daje zadovoljavajuću komutaciju u čitavom području opterećenja. Na osnovu ovog ispitivanja se može napraviti i eventualna promjena rasporeda pomoćnih polova. Na slici 9.12 je grafički prikaz ovisnosti dodatne i armaturne struje pri određivanju crnog pojasa komutacije istosmjernog stroja.



Slika 9.12. Ovisnost dodatne i armaturne struje pri određivanju crnog pojasa komutacije istosmjernog stroja

10. NADZOR I DIJAGNOSTIKA ELEKTRIČNIH STROJEVA

10.1. Nadzor tehničkih sustava

Nadzor tehničkih sustava je proces praćenja, kontroliranja i upravljanja radom tehničkih sustava s ciljem osiguravanja njihove ispravnosti, učinkovitosti i sigurnosti. To uključuje prikupljanje podataka o stanju sustava, analiziranje tih podataka, te poduzimanje odgovarajućih mjera za preventivno održavanje, otkrivanje kvarova i optimizaciju rada sustava. Iako se često koristi pojam nadzor, mogu se susresti i drugi izrazi poput monitoringa, motrenja ili praćenja.

Nadzor tehničkih sustava može se provoditi na dva osnovna načina; on-line i off-line nadzor (slika 10.1).

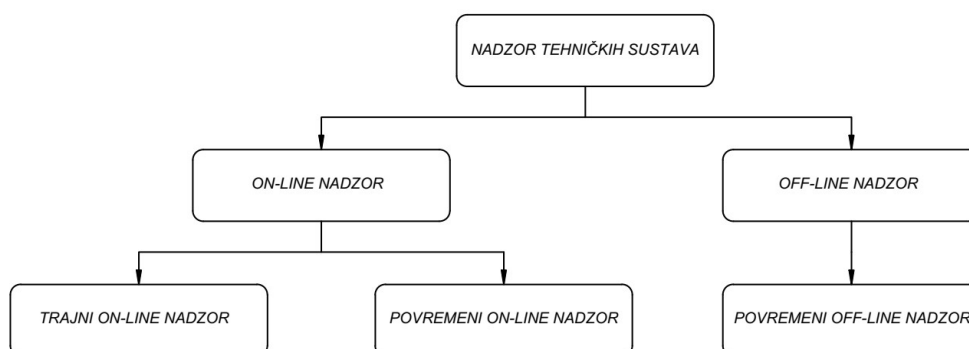
On-line nadzor odvija se u stvarnom vremenu dok je tehnički sustav u pogonu, a dijeli se na trajni i povremeni on-line nadzor.

Trajni on-line nadzor može imati dvostruku ulogu, tj. može služiti za zaštitu sustava te za dijagnostiku. Ovaj oblik nadzora kontinuirano prati rad sustava, omogućujući pravovremenu detekciju problema i njihovo rješavanje u realnom vremenu.

Povremeni on-line nadzor provodi se periodično i koristi se isključivo za dijagnostičke svrhe, tj. za analizu i procjenu stanja sustava.

S druge strane, off-line nadzor provodi se kada je tehnički sustav izvan pogona, a služi za dijagnostičke svrhe. Ovaj tip nadzora omogućuje detaljnu analizu sustava, a posebno je važan u procesu održavanja te za identifikaciju potencijalnih kvarova prije ponovnog stavljanja sustava u pogon.

Sustav nadzora tehničkih sustava donosi niz prednosti, uključujući produljenje vijeka trajanja opreme i rano otkrivanje kvarova, te omogućuje pravovremene intervencije. Također, omogućava učinkovitije upravljanje resursima, poput vremena, ljudskih resursa i kapitala, što rezultira smanjenjem operativnih troškova i poboljšanjem ekonomičnosti poslovanja.



Slika 10.1. Vrste nadzora tehničkih sustava

10.2. Sustav nadzor transformatora

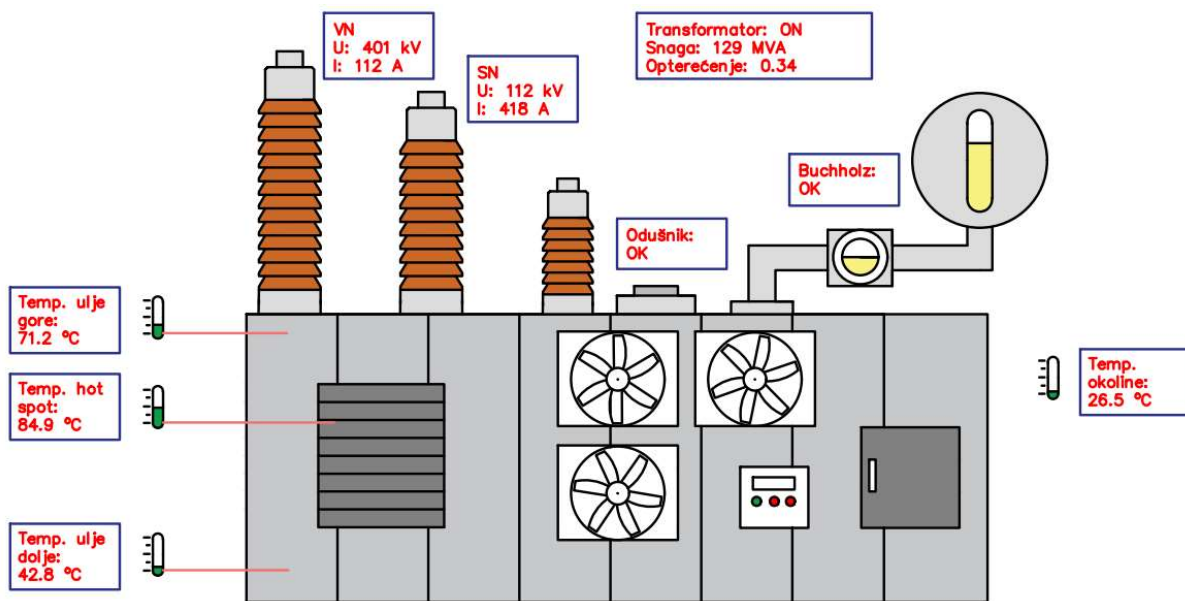
Sustav nadzora transformatora važan je za pružanje uvida u stanje i uvjete rada transformatora u stvarnom vremenu. Ovaj sustav omogućuje kontinuirano praćenje različitih parametara, čime se osigurava pravovremena detekcija potencijalnih problema i optimizacija rada transformatora.

Sustav nadzora omogućava praćenje različitih parametara transformatora, a može se odnositi na parcijalni ili kompletni nadzor. Parcijalni sustavi nadzora fokusirani su na praćenje jedne ili nekoliko veličina, kao što su motrenje temperature, plinova u ulju ili parcijalnih izbijanja. Ovi sustavi pružaju specifične informacije koje su važne za praćenje određenih aspekata rada transformatora. S druge strane, kompletni sustavi nadzora omogućuju praćenje stotinjak različitih parametara, pružajući sveobuhvatan uvid u stanje transformatora i omogućujući detaljnu analizu njegovog rada.

Praćenje parametara unutar sustava nadzora obuhvaća nekoliko bitnih aktivnosti. Prvo se prikupljaju vrijednosti parametara putem mjerenja ili estimacije. Mjerenje se obavlja pomoću senzora koji su ugrađeni na transformator, dok se estimacija vrijednosti parametara provodi softverskim alatima unutar sustava nadzora. Na temelju izmjerenih vrijednosti, te podataka o transformatoru, omogućuje se precizno procjenjivanje stanja sustava. Prikupljene informacije zatim se pohranjuju u bazu podataka i prezentiraju korisniku ili se prosljeđuju u druge sustave, poput SCADA sustava, što omogućuje dodatnu vidljivost stanja, daljnje analize i donošenje odluka.

Osim praćenja parametara, sustav nadzora obuhvaća i niz dodatnih mogućnosti koje pomažu u upravljanju transformatorom. To uključuje alarme i trendove koji u stvarnom vremenu pružaju važne informacije o radu transformatora, te napredno upravljanje rashladnim sustavom, koji osigurava optimalnu temperaturu rada transformatora. Također, sustav uključuje i mogućnost posluživanja udaljenih korisnika, kao i komunikacijske alate koji omogućuju razmjenu informacija s drugim sustavima. Sve ove mogućnosti čine sustav nadzora transformatora neophodnim za održavanje njegove pouzdanosti i učinkovitosti, te za osiguravanje dugotrajnog i stabilnog rada elektroenergetskog sustava u cijelosti.

Na slici 10.2 nalazi se grafički prikaz nadziranog transformatora pomoću SCADA sustava s naznačenim vrijednostima bitnih parametara mjerenih putem senzora ugrađenih na odgovarajuća mjesta na transformatoru.



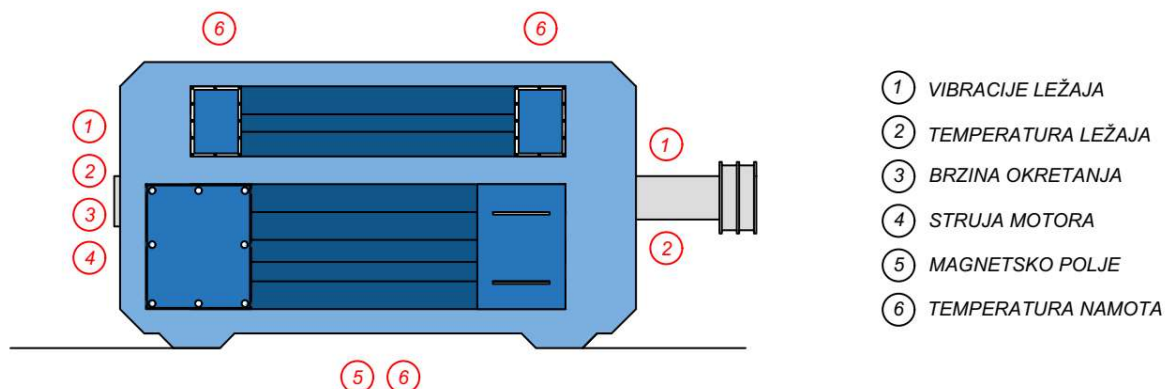
Slika 10.2. Grafički prikaz nadziranog transformatora pomoću SCADA sustava

10.3. Sustav nadzora rotacijskih strojeva

Rotacijski strojevi predstavljaju važne komponente elektroenergetskog sustava u pogledu proizvodnje, ali i potrošnje električne energije, stoga je njihova pouzdanost od presudne važnosti za stabilan rad cijelog sustava.

Ugradnja sustava nadzora za ove strojeve omogućava prediktivno održavanje, što znači da se potencijalni problemi mogu detektirati i riješiti prije nego što dovedu do većih kvarova ili prekida u radu. Ovi sustavi ne samo da smanjuju rizik od neplaniranih zastoja, već i značajno doprinose sigurnosti pogona, povećavajući ukupnu raspoloživost opreme.

Slika 10.3 prikazuje smještaj senzora na elektromotoru pomoću kojih se izvodi nadzor stroja.



Slika 10.3. Smještaj senzora na elektromotoru

10.4. Senzori za trajni nadzor električnih strojeva

Za trajni nadzor električnih strojeva potrebno je stroj opremiti odgovarajućim senzorima koji kontinuirano mjere bitne parametre i šalju signale u centralni sustav za nadzor, gdje se ti podaci analiziraju i pohranjuju. Ovi senzori omogućavaju praćenje parametara poput temperature, vibracija, brzine vrtnje, struje, napona itd., što omogućuje pravovremeno otkrivanje nepravilnosti koje mogu ukazivati na potencijalne kvarove.

Najčešći senzori koji se koriste za nadzor električnih strojeva mogu se podijeliti u nekoliko kategorija:

- Senzori za mjerenje struje i napona omogućuju praćenje napajanja i električnih prilika u samom stroju. Mjerenje većih vrijednosti struja i napona najčešće se izvodi putem strujnih i naponskih mjernih transformatora.
- Senzori temperature (termistori, termoparovi, PT100 senzori) koriste se za mjerenje temperature u dijelovima stroja poput namota i ležajeva, kako bi se na vrijeme uočilo pregrijavanje ili problemi s hlađenjem.
- Vibracijski senzori (akcelerometri) mjere vibracije u rotirajućim dijelovima, osobito u ležajevima, te pomažu u detekciji mehaničkih oštećenja ili neuravnoteženosti.
- Senzori brzine vrtnje (tahometri, enkoderi) mjere brzinu okretanja osovine, čime se prati stabilnost pogona i mogući problemi s rotacijom.
- Senzori položaja (induktivni i optički senzori) koriste se za praćenje položaja rotora i drugih komponenti, čime omogućuju precizno upravljanje i nadzor rada stroja.

Kondicioniranje signala senzora podrazumijeva obradu sirovih signala koje senzori generiraju kako bi se osigurala njihova točnost i prilagodba za daljnju analizu. To uključuje filtriranje šuma, pojačanje slabih signala, linearizaciju nelinearnih senzora te A/D konverziju analognih signala u digitalne, kako bi se podaci mogli precizno obraditi. Nakon kondicioniranja, prikupljeni signali se šalju u centralni sustav gdje se analiziraju u realnom vremenu putem softverskih algoritama, uključujući statističke metode i analizu trendova, te se pohranjuju u bazu podataka za dugoročno praćenje. Ova baza podataka omogućava usporedbu trenutnih mjerenja s povijesnim podacima, što olakšava otkrivanje obrazaca i nepravilnosti.

10.5. Dijagnostički sustavi

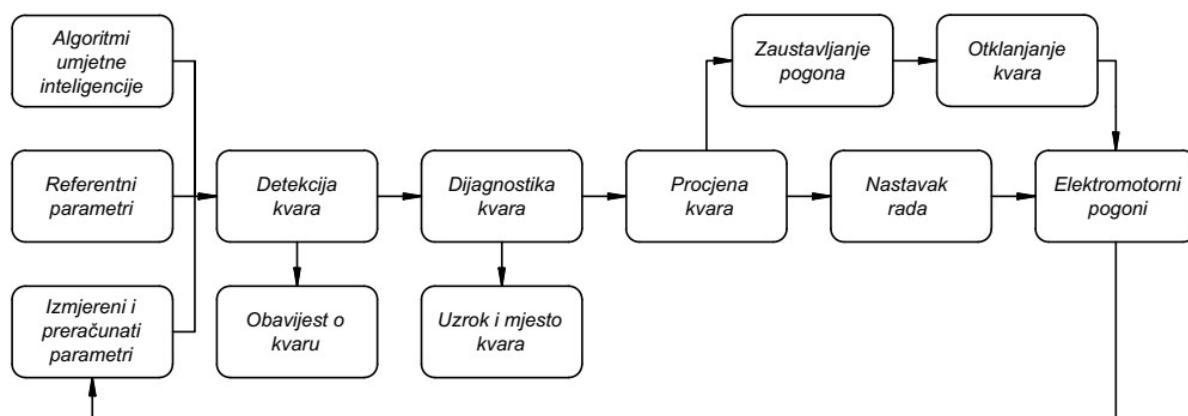
Tehnička dijagnostika predstavlja bitan proces pravovremenog i/ili periodičnog utvrđivanja stanja strojeva s ciljem procjene njihove pouzdanosti te planiranja daljnjeg pogona. Svrha dijagnostike je omogućiti rano otkrivanje potencijalnih kvarova, bilo na cijelom stroju ili na njegovim pojedinim komponentama, što omogućava pravovremeno poduzimanje mjera za sprečavanje ozbiljnijih oštećenja. Time se omogućuje bolje planiranje održavanja i popravaka, čime se minimaliziraju zastoji u proizvodnji, uzrokovani zamjenom ili popravkom strojeva. Kvalitetnim nadzorom stanja strojeva mogu se izbjeći nepotrebna zaustavljanja proizvodnog procesa, što pozitivno utječe na efikasnost i produktivnost.

Osnova tehničke dijagnostike leži u usporedbi stvarnih parametara stroja s onima koji su optimalni za njegov rad. Ovo uključuje detaljno poznavanje kako teorijskih principa rada

stroja, tako i praktičnih iskustava u vezi s ponašanjem stroja u različitim kvarnim režimima. Današnji električni strojevi često su pod upravljanjem računalnih sustava, što omogućava napredne metode nadzora i dijagnostike. Različiti senzori, poput senzora magnetskog toka, brzine, temperature, pozicije, napona, struje i sl. ugrađeni su u pogone kako bi omogućili precizno upravljanje. Ti isti senzori mogu se koristiti i u dijagnostičke svrhe, bez potrebe za dodatnom opremom.

Moderni dijagnostički sustavi temelje se na korištenju postojećih senzora i podataka koje oni pružaju. Kvalitetna dijagnostika zahtijeva promatranje i analizu širokog spektra električnih i mnogi drugih fizikalnih veličina, a velik broj od tih zadataka danas se obavljaju uz pomoć računala. Na primjer, automatizirani sustavi za dijagnostiku često koriste blok sheme, koje uključuju simulirane vrijednosti parametara, i algoritme umjetne inteligencije. Simulirane vrijednosti parametara temelje se na matematičkim modelima, teorijskim znanjima i provedenim simulacijama, te predstavljaju idealne uvjete koje sustav treba zadovoljiti tijekom ispravnog rada. Algoritmi umjetne inteligencije, s druge strane, koriste ekspertne sustave za prepoznavanje obrazaca u izmjenjenim i unaprijed proračunatim veličinama, omogućujući preciznu detekciju kvarova i drugih nepravilnosti u radu stroja.

Na slici 10.4 prikazana je blok shema modernog računalom upravljanog elektromotornog pogona s ugrađenom dijagnostikom.



Slika 10.4. Blok shema računalom upravljanog dijagnostičkog sustava elektromotornog pogona

Na prethodnoj slici prikazan je proces dijagnostike, detaljno raščlanjen na bitne komponente. Sustav kontinuirano mjeri parametre koji su kritični za rad stroja. Ti izmjereni parametri zatim se obrađuju i šalju u računalni sustav, gdje se uspoređuju s vrijednostima koje predstavljaju idealne ili referentne uvjete rada. U normalnom radu stroja, ove vrijednosti se razlikuju unutar unaprijed određenih, dozvoljenih granica. Međutim, kada odstupanje izmjerenih vrijednosti premaši te granice, sustav generira upozorenje o mogućem kvaru.

Ekspertni sustav tada analizira stvarno ponašanje stroja na temelju prikupljenih podataka i donosi zaključak o mogućem mjestu i uzroku kvara. Ovaj proces dijagnostike kvara može biti vrlo složen, jer se različiti kvarovi mogu manifestirati na sličan način, što otežava točno prepoznavanje specifičnog problema. Nakon što je kvar dijagnosticiran, vrši se procjena njegove ozbiljnosti, a na temelju te procjene donosi se odluka o daljnjem radu pogona.

Ako je odstupanje minimalno i ne predstavlja neposrednu prijetnju za sigurnost ili funkcionalnost stroja, pogon nastavlja s radom, dok se prikupljeni podaci koriste za planiranje

budućih popravaka ili nabavku rezervnih dijelova. U slučajevima kada je odstupanje značajnije, planiraju se aktivnosti koje treba poduzeti u najkraćem mogućem roku kako bi se spriječilo daljnje pogoršanje stanja. Ako su odstupanja izrazito velika ili postoji ozbiljna opasnost za siguran rad, pogon se odmah zaustavlja kako bi se kvar otklonio.

U situacijama kada dijagnostički sustav nije potpuno automatiziran, određene zadatke, kao što su analiza prikupljenih podataka i upravljanje postupkom mjerenja, obavlja čovjek. U takvim slučajevima, ljudski faktor postaje neizostavan za pravilnu interpretaciju podataka i donošenje ispravnih odluka u vezi s održavanjem i popravcima.

Za uspješno obavljanje zadatka, dijagnostički sustav mora zadovoljiti nekoliko uvjeta:

- Pouzdanost
Signal koji se analizira mora sadržavati relevantne i precizne informacije na temelju kojih se može pouzdano dijagnosticirati kvar. To znači da sustav mora biti sposoban razlikovati normalne radne uvjete od onih koji ukazuju na potencijalne probleme.
- Jednostavnost
Dijagnostički sustav ne smije ometati normalan rad pogona. Njegova implementacija ne bi smjela zahtijevati instalaciju dodatnih senzora ili mjerača na teško dostupnim mjestima, što bi moglo zakomplicirati rad i održavanje sustava.
- Ekonomičnost
Poželjno bi bilo koristiti već postojeće senzore i mjerne veličine koje se već koriste za upravljanje pogonom. To smanjuje dodatne troškove povezane s ugradnjom nove opreme ili prilagodbom postojećeg sustava.
- Mogućnost automatizacije
Dijagnostički sustav trebao bi biti sposoban za potpuno automatiziran rad, bez potrebe za stalnom prisutnošću operatera. Automatizacija smanjuje ljudske pogreške i osigurava kontinuirani nadzor nad sustavom.

Moderne dijagnostičke metode i sve veća integracija računalnih tehnologija omogućile su proširenje primjene dijagnostike u različitim industrijskim pogonima. Dok su se u prošlosti dijagnostičke metode uglavnom temeljile na termičkim analizama i mjerenjima vibracija, današnji sustavi koriste širok spektar fizikalnih veličina za precizniju i sveobuhvatniju dijagnostiku.

Trenutne tendencije u razvoju dijagnostičkih sustava usmjerene su na integraciju naprednih metoda umjetne inteligencije, kao što su ekspertni sustavi, neuronske mreže, neizrazita logika i sl. Ove metode omogućuju sustavima da uče iz prijašnjih podataka, prilagođavaju se promjenama u radu pogona te samostalno donose odluke o stanju sustava. Zbog svoje učinkovitosti i pouzdanosti, sve je češća praksa da se dijagnostički sustav, temeljen na ovim tehnologijama, ugrađuje kao standardna komponenta sustava s električnim strojevima.

Takva integracija ne samo da povećava pouzdanost i sigurnost pogona, već i omogućuje optimizaciju održavanja, smanjujući nepotrebne zastoje i troškove povezane s neplaniranim kvarovima. U konačnici, to dovodi do povećanja efikasnosti i produžetka vijeka trajanja opreme.

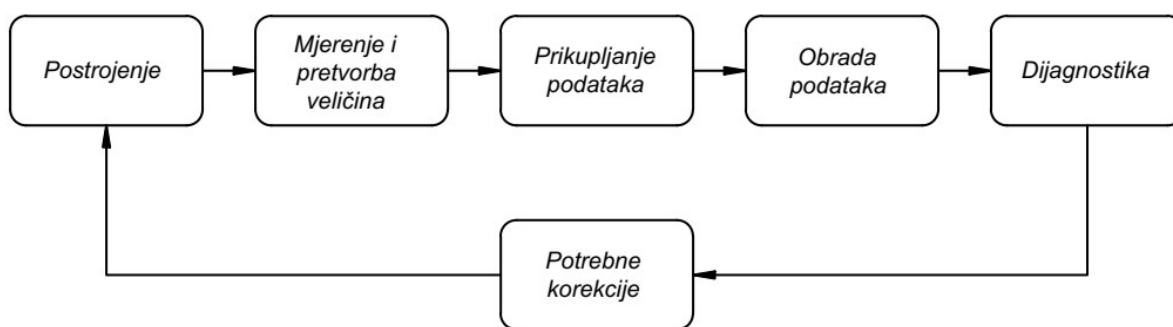
Dijagnostika stanja nekog procesa ili sustava predstavlja složen i zahtjevan zadatak koji obuhvaća nekoliko faza. Ove faze mogu se ilustrirati na temelju odgovarajuće blok sheme

(slika 10.5) koja prikazuje slijed aktivnosti potrebnih za uspješnu dijagnostiku. Karakteristične faze rada u takvom procesu uključuju:

- **Mjerenje i pretvorba veličina**
Ova faza podrazumijeva kontinuirano mjerenje bitnih parametara sustava, poput temperature, tlaka, protoka, vibracija i sl. Nakon mjerenja, podaci se pretvaraju u oblik koji je prikladan za daljnju obradu, najčešće električne signale ili digitalne podatke.
- **Prikupljanje podataka**
U ovoj fazi, prikupljeni signali se pohranjuju i organiziraju u baze podataka. Ova faza osigurava da su svi relevantni podaci dostupni za analizu, čime se omogućava stvaranje sveobuhvatne slike o stanju sustava.
- **Obrada podataka**
Podaci se analiziraju koristeći različite matematičke i statističke metode, kao i algoritme umjetne inteligencije, kako bi se identificirali obrasci, odstupanja ili nepravilnosti koje mogu ukazivati na potencijalne kvarove ili probleme u sustavu.
- **Dijagnostika**
Na temelju obrađenih podataka donose se zaključci o stanju sustava. Ova faza uključuje identifikaciju specifičnih kvarova, određivanje njihovog uzroka te procjenu rizika daljnjeg rada. Dijagnostika može biti podržana ekspertima ili u potpunosti automatizirana, ovisno o izvedbi i složenosti sustava, te potrebama korisnika.

Cijeli proces dijagnostike može biti potpuno automatiziran, čime se osigurava brza i točna analiza podataka bez potrebe za ljudskom intervencijom. Međutim, u nekim slučajevima, određeni dijelovi procesa mogu biti djelomično ili u potpunosti pod nadzorom čovjeka, posebno kada su potrebne specifične stručne procjene ili kada automatizacija nije dovoljna za rješavanje kompleksnih problema.

Svaka faza u procesu dijagnostike ima svoje specifične izazove i zahtijeva pažljivu implementaciju kako bi se osigurao uspješan ishod. Kvalitetna izvedba svake od ovih faza važna je za točnost i pouzdanost cjelokupne dijagnostike.



Slika 10.5. Faze dijagnostičkog sustava

Za uspješnu dijagnostiku neophodno je pažljivo odabrati odgovarajuće fizikalne veličine koje pružaju najpouzdanije informacije o stanju sustava koji se analizira. To znači da se odabiru one veličine koje najbolje reflektiraju kritične aspekte rada stroja ili pogona. U svrhu prikupljanja ovih podataka, u stroj ili pogon ugrađuju se različiti senzori. Ovi senzori uzimaju uzorke odabranih veličina, poput brzine ili temperature, te ih po potrebi pretvaraju u druge mjerne jedinice, npr. u električne signale, kako bi se podaci mogli lako analizirati i koristiti u daljnjim procesima dijagnostike.

Za uspješnu dijagnostiku stanja stroja, prikupljeni podaci često moraju proći kroz niz složenih obrada. Ovaj korak predstavlja srž dijagnostičkih sustava, gdje se računalna tehnologija intenzivno primjenjuje i gdje je moguće postići visoku razinu automatizacije. Obrada podataka može se odvijati u stvarnom vremenu (on-line), dok stroj radi, ili nakon što su podaci prikupljeni i pohranjeni za kasniju analizu (off-line).

Jedan od najjednostavnijih oblika obrade podataka uključuje kontinuirano praćenje određene veličine tijekom duljeg vremenskog razdoblja i usporedbu tih mjerenja s prethodnim vrijednostima. Kada se zabilježe značajna odstupanja, to može signalizirati potencijalni kvar ili problem u radu stroja.

Među najraširenijim metodama obrade podataka za dijagnostičke svrhe ubrajaju se:

- **Spektralna analiza**
Temelj ove metode je prebacivanje signala iz vremenske domene u frekvencijsku domenu. Analizom signala u frekvencijskoj domeni, kao što su struja ili vibracije, moguće je otkriti različite vrste kvarova. Prebacivanje signala u frekvencijsku domenu omogućuje prikaz spektra frekvencija i pripadajućih amplituda signala, što pomaže u identifikaciji specifičnih problema. Osnovna matematička operacija koja omogućuje ovu transformaciju je Fourierova transformacija, koja razlaže kompleksne signale na njihove frekvencijske komponente.
- **Korelacijska analiza**
Korelacija se pojavljuje u dvije osnovne varijante: auto-korelacija i klasična korelacija. Auto-korelacija mjeri sličnost signala s njegovom vlastitom verzijom pomaknutom u vremenu za određeni interval τ , što pomaže u prepoznavanju periodičnih obrazaca ili nepravilnosti. Klasična korelacija, s druge strane, koristi se za analizu odnosa između dva različita signala, što može pomoći u razumijevanju međusobne povezanosti različitih dijelova sustava.
- **Usrednjavanje signala**
Ova tehnika se često koristi kod dijagnosticiranja kvarova na komponentama kao što su ležajevi i reduktori. Proces uključuje višekratno ponavljanje mjerenja istog signala i njegovo usrednjavanje kako bi se smanjio utjecaj šuma i drugih smetnji. Na taj način, signali koji ukazuju na kvarove postaju izraženiji i lakše se prepoznaju. U praksi, to može uključivati prikupljanje velikog broja uzoraka tijekom dužeg vremenskog razdoblja. Međutim, ovaj pristup može zahtijevati značajnu količinu memorije za pohranu podataka, što treba uzeti u obzir pri projektiranju sustava.

Napredak u mjernim i računalnim tehnikama omogućio je širu primjenu ovih metoda u industrijskoj dijagnostici, čime se poboljšava preciznost i pouzdanost u otkrivanju kvarova.

Otkrivanje vrste i veličine kvara, kao i identifikacija mogućeg uzroka, predstavlja završnu i najvažniju fazu dijagnostičkog procesa. Unatoč napretku tehnologije, ovo je još uvijek faza u kojoj automatizacija nije u potpunosti zaživjela, te ljudska stručnost često igra presudnu ulogu. Iako postoje razvijeni ekspertni sustavi koji mogu pružiti kvalitetne rezultate u dijagnostici, konačna odluka o prirodi i ozbiljnosti kvara često ovisi o procjeni stručnjaka.

10.6. Automatizirana dijagnostika

Automatizirana dijagnostika odnosi se na segment tehničke dijagnostike u kojem računalno upravlja cjelokupnim dijagnostičkim procesom, od prikupljanja podataka do donošenja dijagnostičkih odluka. Automatizacija ovog procesa uključuje niz postupaka i aktivnosti kojima se upravljanje dijagnostičkim procesom pojednostavljuje, ubrzava i čini učinkovitijim.

Korištenje računala u dijagnostici značajno olakšava obradu i analizu podataka, što je osobito važno s obzirom na složenost postupaka i veliki broj podataka i parametara koji se moraju uzeti u obzir. Automatizacija omogućuje bržu i precizniju obradu informacija, smanjujući vrijeme potrebno za donošenje dijagnostičkih odluka te minimizirajući mogućnost ljudske pogreške.

Zahvaljujući ovim prednostima, računalno podržana dijagnostika postaje sve važnija u suvremenim pogonima. Omogućuje kontinuirani nadzor i održavanje sustava, što rezultira smanjenjem neplaniranih zastoja, produženjem radnog vijeka opreme i poboljšanjem ukupne učinkovitosti proizvodnih procesa. Automatizirana dijagnostika također olakšava integraciju naprednih tehnologija, poput umjetne inteligencije i strojne obrade podataka, što dodatno unapređuje točnost i pouzdanost dijagnostičkih sustava.

U današnjem vremenu sve su češće tendencije razvoja i primjene metoda umjetne inteligencije (AI) i sofisticiranih algoritama za dijagnostiku. Ove tehnologije omogućuju računalima da analiziraju složene uzorke, donose zaključke i predlažu moguća rješenja, čime se postupak dijagnostike značajno olakšava. Posebno je važno to što AI može obraditi veliku količinu podataka i uzeti u obzir mnogobrojne parametre istovremeno, što je često izazov za ljudske stručnjake.

Unatoč ovim tehnološkim naprecima, stručnost i iskustvo stručnjaka ostaju neophodni, osobito u situacijama kada su rezultati dijagnostike nejasni ili kada se pojave neočekivane situacije koje zahtijevaju donošenje odluka na temelju znanja i intuicije. U budućnosti, daljnji razvoj AI-a i algoritama mogao bi dodatno smanjiti potrebu za ljudskom intervencijom, no ljudska procjena će i dalje ostati važan faktor u osiguravanju točnosti i pouzdanosti dijagnostičkih procesa.

Automatizacija ispitivanja asinkronih motora

U nastavku će biti objašnjena automatizacija ispitivanja asinkronih motora. Automatizirani sustav za ispitivanje asinkronih motora obuhvaća skup raznovrsnih testova i mjerenja kojima se provjerava i dokazuje ispravnost motora, s posebnim naglaskom na bitne mehaničke i električne karakteristike. Automatizacija ovog sustava podrazumijeva djelomičnu ili potpunu automatizaciju različitih faza ispitivanja, s ciljem povećanja učinkovitosti, točnosti i pouzdanosti rezultata.

Automatizacija ispitivanja asinkronih motora provodi se unutar tri kategorije:

- Automatizacija upravljanja električnim strojevima uključenim u ispitivanje
Ovo uključuje automatizirano upravljanje radom motora i povezanih uređaja tijekom testiranja, čime se osigurava precizna i sigurna provedba testova.
- Automatizacija procesa prikupljanja podataka

Automatizirani sustavi omogućuju kontinuirano i točno prikupljanje podataka tijekom ispitivanja, bez potrebe za ručnim bilježenjem, što smanjuje mogućnost pogrešaka i ubrzava cijeli proces.

- Automatizacija procesa obrade podataka

Prikupljeni podaci automatski se obrađuju, analiziraju i uspoređuju s referentnim vrijednostima ili projektnim podacima, čime se olakšava donošenje zaključaka o ispravnosti motora.

S obzirom na visoku cijenu i važnu ulogu velikih asinkronih motora u industrijskim pogonima, kupci moraju biti sigurni u njihovu ispravnost već prilikom preuzimanja, što se postiže detaljnim testiranjem u ispitnim stanicama proizvođača. Kvaliteta asinkronog motora ocjenjuje se kroz niz ispitivanja koja utvrđuju mehanička i električna svojstva u skladu s prethodno definiranim specifikacijama ugovora.

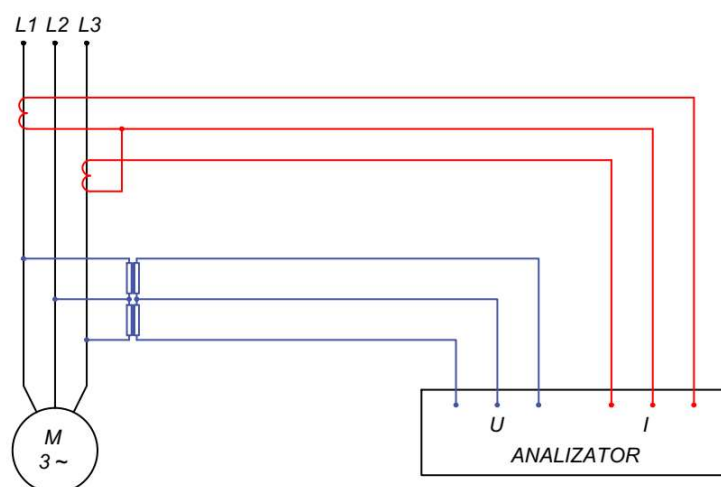
Primjer jednog od testova je pokus praznog hoda motora, kojim se provjeravaju mehanički hod, struja praznog hoda, gubici u magnetskom krugu, te gubici uslijed trenja i ventilacije. Ovi se podaci uspoređuju s projektnim specifikacijama kako bi se osigurala sukladnost.

Automatizacija ovih ispitivanja ne samo da povećava pouzdanost i brzinu procesa, već i omogućuje proizvođačima da osiguraju visoku kvalitetu svojih proizvoda, dok istovremeno pruža kupcima veću sigurnost i povjerenje u ispravnost kupljenih motora.

Na slici 10.6 prikazan je mjerni sustav za automatizirano prikupljanje i obradu podataka iz pokusa praznog hoda, kratkog spoja i opterećenja asinkronog motora.

Mjerni se sustav sastoji od trofaznog analizatora snage te od dva naponska i dva strujna mjerna transformatora. Analizator je pomoću sučelja vezan na računalo s instaliranim programskim paketom za ispitivanje asinkronih motora.

U automatiziranom mjernom sustavu, računalo upravlja procesom očitavanja mjernih veličina. Tijekom ispitivanja, stvarne vrijednosti mjernih veličina očitavaju se automatski i u stvarnom vremenu. Izračuni i preračuni tih vrijednosti odvijaju se u analizatoru snage prije nego što se podaci prenesu u računalo i pohrane na tvrdi disk. Ovaj proces omogućuje precizno i učinkovito prikupljanje i obradu podataka tijekom ispitivanja.



Slika 10.6. Mjerni sustav za automatizirano prikupljanje i obradu podataka

10.7. Baze podataka

Baze podataka su organizirane zbirke podataka koje omogućuju učinkovito pohranjivanje, pretraživanje, ažuriranje i upravljanje informacijama unutar različitih sustava. Baze podataka imaju ključnu ulogu u prikupljanju, organiziranju i korištenju informacija o električnim strojevima, uključujući osnovne podatke o strojevima, povijest pogonskih događaja i rezultate obavljenih ispitivanja. Njihova uporaba značajno unapređuje dijagnostiku stanja složenih električnih strojeva.

Izrada i korištenje baza podataka predstavlja važan korak prema sistematizaciji podataka koji su važni za praćenje, dijagnostiku i procjenu stanja električnih strojeva. Ova sistematizacija omogućuje brže i preciznije donošenje odluka, a ekonomska korist može biti značajna, s obzirom na mogućnost optimizacije održavanja, smanjenje troškova, te bolje planiranje investicija.

Baze podataka također pružaju temelj za istraživanja koja mogu rezultirati prijedlozima za optimizaciju ispitivanja, određivanje optimalnih intervala za remont, te analize troškova i ulaganja. Osim toga, baze podataka mogu poslužiti kao osnova za razvoj naprednih ekspertnih sustava koji koriste tehnike strojnog učenja i umjetne inteligencije, što dodatno poboljšava dijagnostiku i održavanje.

Korištenje informacijskih tehnologija, posebno baza podataka, značajno unapređuje postojeću tehničku dijagnostiku i kvalitetu rada. Integracija svih relevantnih podataka u jednu cjelinu omogućuje efikasnije upravljanje informacijama. Povezivanjem baza podataka s odgovarajućim aplikacijama omogućuje se brzo i učinkovito pretraživanje podataka, usporedba statističkih obrada, te izvođenje detaljnih analiza.

Baze podataka, zajedno s računalnim programima, mogu se integrirati u sveobuhvatan informacijski sustav unutar sektora održavanja, nadzora i dijagnostike tehničkih sustava. Time se dodatno povećava efikasnost i točnost procesa održavanja i dijagnostike, omogućujući bolje upravljanje resursima i pravovremeno otkrivanje potencijalnih kvarova.

10.8. Informacijski sustav

Primjena informacijskih sustava u elektroenergetskim sustavima postaje sve učestalija zbog njihove sposobnosti poboljšanja upravljanja i dijagnostike. U modernim elektrodistribucijskim sustavima koristi se sofisticirana tehnologija za kontinuirano ili periodično praćenje i dijagnosticiranje stanja i radnih parametara komponenti. Na temelju tih podataka može se procijeniti njihovo stanje, stupanj istrošenosti i preostali vijek trajanja.

Uvođenjem informacijskog sustava u aktivnosti održavanja, nadzora i dijagnostike tehničkih sustava, uspostavlja se integrirani sustav upravljanja. Ovaj sustav standardizira poslovne procese planiranja, organizacije, izvršenja i dokumentiranja svih aktivnosti, čime se značajno unapređuje učinkovitost rada.

Prednosti primjene informacijskog sustava uključuju:

- Neprekidnu dostupnost informacija i podataka,
- Integraciju svih informacija u jednu cjelinu,
- Kontinuiranu usporedbu izmjerenih i zadanih parametara,
- Mogućnost daljinskog nadzora i poboljšanje planiranja aktivnosti održavanja,
- Povećanje pouzdanosti rada postrojenja,
- Pozitivne ekološke učinke,
- Povećanje sigurnosti na radu,
- Pravovremeno otkrivanje grešaka i sprječavanje ili smanjenje posljedica kvarova,
- Optimizaciju upravljanja resursima, uključujući procjenu i produljenje vijeka trajanja opreme.

Međutim, postoje i neki nedostaci uvođenja informacijskih sustava, kao što su:

- Visoki početni troškovi investicije,
- Nedostatak obuke i zainteresiranosti osoblja za potpuni prijelaz na novi sustav.

Integracija ovih sustava doprinosi cjelokupnom poboljšanju upravljanja i održavanja elektroenergetskih sustava, ali zahtijeva pažljivo planiranje i ulaganje u edukaciju osoblja.

11. ISPITNA DOKUMENTACIJA

Ispitna dokumentacija predstavlja neizostavan element u održavanju i upravljanju električnim instalacijama i postrojenjima, te je u određenim slučajevima reguliran i zakonom. Ovisno o složenosti i značaju postrojenja, prikupljanje i praćenje podataka tijekom rada postrojenja obavezno se evidentira u pogonski dnevnik. U taj se dnevnik upisuju sljedeće informacije:

- Svi zabilježeni kvarovi,
- Zamjene uređaja,
- Obavljena ispitivanja,
- Izvršena mjerenja,
- Radovi na održavanju.

Ispitivanja se provode prema strogo definiranoj proceduri, koja osigurava točnost i ponovljivost rezultata. Rezultati ispitivanja unose se u radni list, nakon čega se na temelju dobivenih podataka donosi zaključak. Uz to, potrebno je sastaviti izvješće o ispitivanju, koje može imati oblik ispitnog protokola ili zapisnika. Nakon završetka svih ispitnih aktivnosti, rezultati se unose u bazu podataka radi buduće reference i analize.

Dokumentacija ispitivanja mora biti detaljna i strukturirana, te uključuje:

- Specifikaciju potrebnih instrumenata, alata i opreme za ispitivanje,
- Sažetke za svaki korak ispitivanja, pružajući jasne upute za izvođenje,
- Izradu kontrolnih lista koje omogućuju praćenje i evidentiranje rezultata ispitivanja,
- Zaključak temeljen na analiziranim podacima,
- Ispitni izvještaj koji sadrži sve relevantne rezultate i preporuke.

Ovakva dokumentacija ne samo da osigurava sigurnost rada, već i omogućuje preciznu analizu i optimizaciju radnih procesa, pridonoseći dugotrajnoj pouzdanosti i učinkovitosti postrojenja. Tablica 11.1 odnosi se na izvadak iz HEP-ovog pravilnika o održavanju energetskih transformatora.

Tablica 11.1. Izvadak iz HEP-ovog pravilnika o održavanju energetskih transformatora

ENERGETSKI TRANSFORMATORI – ODRŽAVANJE				
Opis aktivnosti		Period u ovisnosti o naponskoj razini transformatora [kV]		
		110	35	20(10)
Ispitivanje transformatorskog ulja:				
	Obavlja se mjerenjem probojne čvrstoće ulja uzimanjem uzorka.	2G	2G	-
Ispitivanje izolacije namota:				
	Izolacija namota energetskih transformatora ispituje se mjerenjem otpora izolacije svakog namota prema zemlji posebno i međusobno.	4G	4G	-
Specijalna ispitivanja (samo za transformatore preko 8 MVA):				
	Laboratorijsko ispitivanje kemijskih, fizikalnih i električnih karakteristika ulja,	PP (4G)	PP (5G)	-
	Plinska kromatografija ulja.	PP (4G)	PP	-
Skup električnih ispitivanja transformatora:				
	- Ispitivanje izolacije istosmjernim naponom, - Mjerenje radnog otpora namota, - Ispitivanje regulacijske sklopke mjerenjem radnog otpora VN namota,	PP (5G)	PP (5G)	-
	- Mjerenje frekvencijskog odziva transformatora (FRA), - Mjerenje povratnog napona,	PP	-	-
	- Ispitivanje izolacije izmjeničnim naponom, - Ispitivanje provodnih izolatora, - Mjerenje struja magnetiziranja, - Mjerenje rasipnog induktiviteta namota.	PP (5G)	PP	-
*G - godina *PP – prema potrebi Sva ispitivanja odnose se na transformatore snage preko 250 kVA				

U tablicama 11.2 prikazan je primjer izvještaja ispitivanja asinkronog motora/generatora prije puštanja u pogon te u tablici 11.3 primjer izvještaja pri probnom pokretanju.

Tablica 11.2. Primjer izvještaja ispitivanja asinkronog motora/generatora prije puštanja u pogon

Napojna mreža			
Iznos napona	V		
Variranje napona	☐ ne	☐ da	
Frekvencija	Hz		
Test izolacijskog otpora			
Statorski namot (1 min., 1000 VDC)	MΩ, test	kV, temp.	°C
Statorski namot (15 / 60 s. ili 1 / 10 min.)	PI = _____, test		
Rotorski namot (1 min.)	MΩ, test	kV, temp.	°C
Grijač	MΩ (500 VDC)		
Detektori temperature	MΩ (500 VDC)		
Izolacija ležajeva	MΩ (500 VDC)		
Test otpora pomoćnih uređaja			
Stator 1 Pt 100	Ω		
Stator 2 Pt 100	Ω		
Stator 3 Pt 100	Ω		
Stator 4 Pt 100	Ω		
Stator 5 Pt 100	Ω		
Stator 6 Pt 100	Ω		
Ležaj Pt 100 D-end	Ω		
Ležaj Pt 100 N-end	Ω		
Temperatura zraka 1 Pt 100	Ω		
Temperatura zraka 2 Pt 100	Ω		
Grijač za sprečavanje kondenzacije	Ω		

Tablica 11.3. Primjer izvještaja ispitivanja asinkronog motora/generatora pri probnom pokretanju

Prvi start (samo nekoliko sekundi)										
Smjer vrtnje				☐ desni smjer ☐ lijevi smjer						
Neuobičajeni zvukovi				☐ ne ☐ da, napomena:						
Drugi start (odspojeno, ako je moguće)										
Neuobičajeni zvukovi				☐ ne ☐ da, napomena:						
Neuobičajene vibracije				☐ ne ☐ da, napomena:						
Vibracije ležajeva				d-end mm/s, rms; n-end mm/s, rms						
Rad stroja				☐ ok ☐ prestanak rada napomena:						
Vrijeme	Vibr.ležajeva		Temp.ležajeva		Stator			Temp.stator.namota		
	d-end	n-end	d-end	n-end	Struja	Faktor snage	Struja uzbude	U	V	W
sat, min	mm/s rms	mm/s rms	°C	°C	A	cos φ	A	°C	°C	°C
0:00										
0:05										
0:10										
0:15										
0:20										
0:25										
Primjedbe:										
Zapažanja:										

LITERATURA

- [1] Gašparac, I. Cettolo, M.; Električni strojevi, Upute za laboratorijske vježbe, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2011
- [2] Mandić, I. Tomljenović, V. Pužar, M.; Sinkroni i asinkroni električni strojevi, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012
- [3] Kuzle, I.; Dijagnostika u održavanju elemenata elektroenergetskog sustava, Održavanje elektroenergetskog sustava, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2013
- [4] Krčum, M.; Repetitorij s laboratorijskim vježbama iz električnih strojeva, Sveučilišni studijski centar za stručne studije, Split, 2009
- [5] Mandarić, A.; Ispitivanje sinkronih generatora, PP HE Jug, Split, 2019
- [6] Rade Končar; Ugovor broj 451-13701, Trofazni sinhroni generator S 6624-36, Upute za pogon i održavanje - knjiga 1, Zagreb, 1987
- [7] Ekonerg – Institut za energetiku i zaštitu okoliša d.o.o., Institut za elektroprivredu i energetiku d.d.; Pravilnik o redovnom održavanju građevina, postrojenja i opreme u elektranama HEP PROIZVODNJE D.O.O., Zagreb, 2012
- [8] Končar; Elaborat HE „Đale“ Remont generatora 2, Zagreb, 2004
- [9] Čorak, T; Sustav automatiziranog ispitivanja asinkronog stroja u tvornici, Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2001
- [10] Gill, P.; Electrical Power Equipment Maintenance and Testing, Second Edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2009
- [11] Mijović, B.; Održavanje strojeva i uređaja, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2019
- [12] Dereani, D. Bubić, V.; Interni pravilnik za rad i održavanje elektropostrojenja Cemex Hrvatska d.d., Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, Trogir, 2014
- [13] Miletić, A.; Dijagnostičke metode i kriteriji za ocjenu elektromehaničkog stanja asinkronog stroja, Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2002
- [14] Banović, M.; Končar TMS – sustav motrenja transformatora, Elektroenergetika, Zagreb, 2006
- [15] Ban, D. Čorak, T. Grubić, D.; Automatizirano ispitivanje velikih asinkronih strojeva za termoelektrane, Cigre, Cavtat, 2001
- [16] ChatGPT; <https://chatgpt.com/> (2024)
- [17] Hrvatski zavod za norme; <https://www.hzn.hr/> (30.7.2024.)
- [18] International Organization for Standardization; <https://www.iso.org/members.html> (30.7.2024.)
- [19] Hrvatska enciklopedija; <https://enciklopedija.hr/clanak/dielektrik> (6.8.2024.)
- [20] Tehnička enciklopedija; <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/vibracije.pdf> (6.8.2024)