

Transformatorska ulja - analiza zahtjeva za kvalitetom i njihov utjecaj na okoliš

Divković, Sandra

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:041613>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Sandra Divković

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Davor Ljubas, dipl. ing.

Student:

Sandra Divković

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Davoru Ljubasu na izvrsnom mentorstvu i savjetima.

Veliko hvala mojoj obitelji na strpljenju i bezuvjetnoj podršci. Zahvaljujem prijateljima, a posebno prijateljici Ivi Župan na pomoći.

Sandra Divković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Sandra Divković** JMBAG: **0035212328**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Transformatorska ulja – analiza zahtjeva za kvalitetom i njihov utjecaj na okoliš**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Transformer oils – an analysis of their quality requirements and environmental impacts**

Opis zadatka:

Pouzdan rad svih vrsta transformatora (energetskih, distributivnih, specijalnih i dr.) ovisan je, između ostalog, o sredstvima i načinima podmazivanja. Ispravan rad transformatora koji zahtijevaju podmazivanje uljem uvelike ovisi o pravilnom odabiru ulja koje može biti različitog sastava i svojstava. Kroz ovaj rad potrebno je:

- objasniti osnovne pojmove iz područja podmazivanja transformatora (mogući sastav transformatorskog ulja, prikladni aditivi, funkcije primjene ulja u transformatorima, dijagnostika stanja transformatora u ovisnosti o promjeni sastava ulja),
- definirati parametre koji utječu na degradaciju ulja u transformatorima tijekom eksploatacije kao i načine njihova utvrđivanja (analize) i prevladavanja,
- utvrditi zakonske, normativne i strukovne zahtjeve prema transformatorskim uljima za svaku vrstu transformatora i utvrditi osnovne sličnosti i razlike među zahtjevima,
- proučiti i navesti mogućnosti regeneracije i odlaganja transformatorskih ulja nakon primjene, kao i ukupne utjecaje na okoliš od procesa proizvodnje, eksploatacije do završnog zbrinjavanja,
- provjeriti postoje li alternativni fluidi koji se koriste u novije vrijeme i koji mogu popraviti jedan od bitnih zahtjeva prema takvim uljima – smanjiti štetan utjecaj na okoliš.

U zaključnom dijelu rada potrebno je i dati pregled situacije na tržištu transformatorskih ulja u svijetu i u Republici Hrvatskoj.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Davor Ljubas

Datum predaje rada:

- 1. rok: 24. 2. 2022.
- 2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
- 3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
- 2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
- 3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. OSNOVE O TRANSFORMATORSKOM ULJU	4
2.1. Primjena ulja	4
2.1.1. Osnovne funkcije primjene ulja	4
2.1.2. Ostale funkcije transformatorskog ulja	5
2.1.3. Zahtjevi	6
2.1.4. Svojstva ulja	6
2.2. Mogući sastav transformatorskog ulja	9
2.2.1. Skupine ulja prema porijeklu	10
2.2.2. Kemijski sastav	12
2.3. Aditivi	16
2.3.1. Aditivi za transformatorska ulja	17
3. DIJAGNOSTIKA	19
3.1. Opći pregled dijagnostičkih metoda i učestalost izvođenja.....	19
3.2. Parametri koji utječu na degradaciju ulja tijekom eksploatacije	21
3.3. Metode analitike ulja	24
3.3.1. Analiza plinova otopljenih u ulju	25
3.3.2. Sadržaj vlage	28
3.3.3. Test dielektrične snage	29
3.3.4. Test za mjerenje površinske napetosti	29
3.3.5. Test za mjerenje neutralizacijskog (kiselinskog) broja	30
3.3.6. Indeks kvalitete ulja (eng. Oil Quality Index, Myers Index Number)	30
3.3.7. Test faktora disipacije	31
3.3.8. Analiza furana	31
3.3.9. Analiza polikloriranih bifenila (PCB) (eng. Polychlorinated Biphenyls)	32
3.3.10. Ostale dijagnostičke metode	33
3.4. Prevladavanje uvjeta koji utječu na degradaciju.....	33
4. LEGISLATIVA.....	34
4.1. Zakoni i norme	34
4.2. Regulatoriva transformatorskih ulja u RH	35

4.3. Međunarodna komisija za elektrotehniku	36
5. EKOLOŠKI UTJECAJ, REGENERACIJA I ODLAGANJE OTPADNOG ULJA.....	38
5.1. Klasifikacija ulja prema ekološkim kriterijima	38
5.1.1. PCB spojevi	40
5.2. Ekološki utjecaj transformatorskih ulja tijekom ukupnog radnog vijeka	41
5.2.1. Požari	43
5.3. Odlaganje i zbrinjavanje ulja nakon uporabe	44
5.3.1. Prijevremena zamjena transformatorskog ulja	44
5.4. Regeneracija	45
6. NOVE GENERACIJE DIELEKTRIKA.....	48
6.1. Nanofluidi	48
6.1.1. Nanočestice.....	49
6.1.2. Prednosti i nedostaci nanofluida	50
6.1.3 Potencijalna aplikacija nanofluida	51
6.2. Biljna ulja iz perspektive nove tehnologije.....	51
6.2.1. Postupak dobivanja ulja	52
6.2.2. Osvrt na biljna ulja s naglaskom na ekološke benefite	53
7. ZAKLJUČAK.....	55
LITERATURA.....	56

POPIS SLIKA

Slika 1: Zakon elektromagnetne indukcije (Faradayev) zakon prikazan na osnovnoj zamisli transformatora.....	2
Slika 2: Pojednostavljeni prikaz transformatora za pojačavanje napona (eng. Step up transformer).....	3
Slika 3: Sistematizirani prikaz svojstava ulja	9
Slika 4: Prikaz podjele transformatorskih ulja prema porijeklu	12
Slika 5: Tri osnovne vrste ugljikovodičnih spojeva koji tvore mineralna ulja:	13
Slika 6: Struktura sintetskih ulja na bazi silicija [21].....	14
Slika 7: Fotografija distributivnog transformatora	24
Slika 8: Simbolični i 3D prikaz molekule furana C_4H_4O	32
Slika 9: Logotip Međunarodne komisije za elektrotehniku [51]	37
Slika 10: Neki od toksikoloških i ekoloških piktograma	40
Slika 11: 3D prikaz molekula nanočestica	49

POPIS TABLICA

Tablica 1: usporedba glavih svojstava mineralnih, silikonskih, umjetnih i prirodnih esterskih ulja [34]	15
Tablica 2: Rasponi koncentracija plinova u mjernoj jedinici ppm (IEEE) [33].....	26
Tablica 3: Razredi kvalitete ulja [31].....	31
Tablica 4: Usporedba toksičnosti PCB-ova sa sličnim kapljevinama [31]	32
Tablica 5: Sigurnosno - tehnički list INA Trafo ulja 296 X [54]	42
Tablica 6: Usporedba svojstava palminog i mineralnog transformatorskog ulja [41]	52

POPIS OZNAKA

OZNAKA	OPIS
NN	Neutralizacijski broj
IFT	Test za mjerenje površinske napetosti
OQIN	Indeks kvalitete ulja
HPLC	Visokoučinska tekućinska kromatografija
PCB	Poliklorirani bifenil
DGA	Analiza plinova otopljenih u ulju

SAŽETAK

Energetski i distributivni transformatori čine neizostavan dio elektroenergetskog sustava. Za njihovo valjano funkcioniranje neophodan je pravilan izbor sredstva za podmazivanje. Tematika ovog završnog rada upravo su transformatorska (elektroizolacijska) ulja. Kroz poglavlja koja slijede obrađeni su zahtjevi, vrste, kemijski sastav i mogućnosti poboljšanja transformatorskih ulja. Dijagnostikom ulja su obuhvaćeni i sa stajališta fizike opisani najčešći uzroci kvara transformatora. Također, porast ekološke svijesti odrazio se u svim segmentima industrije i društva pa su tako proizvedena nova biorazgradiva transformatorska ulja. Trend globalizacije obrađen je kroz poglavlja u kojima je riječ o zakonima, institucijama i normama, a upravo je taj trend zaslužan i za jedan od novih smjerova razvitka komponenti ulja. Na posljepku se nalazi poglavlje o novim vrstama i razvoju dielektrika, čiju okosnicu čine nanofluidi i biljna ulja.

Ključne riječi: transformator, transformatorska ulja, dijagnostika, ekološki utjecaj

SUMMARY

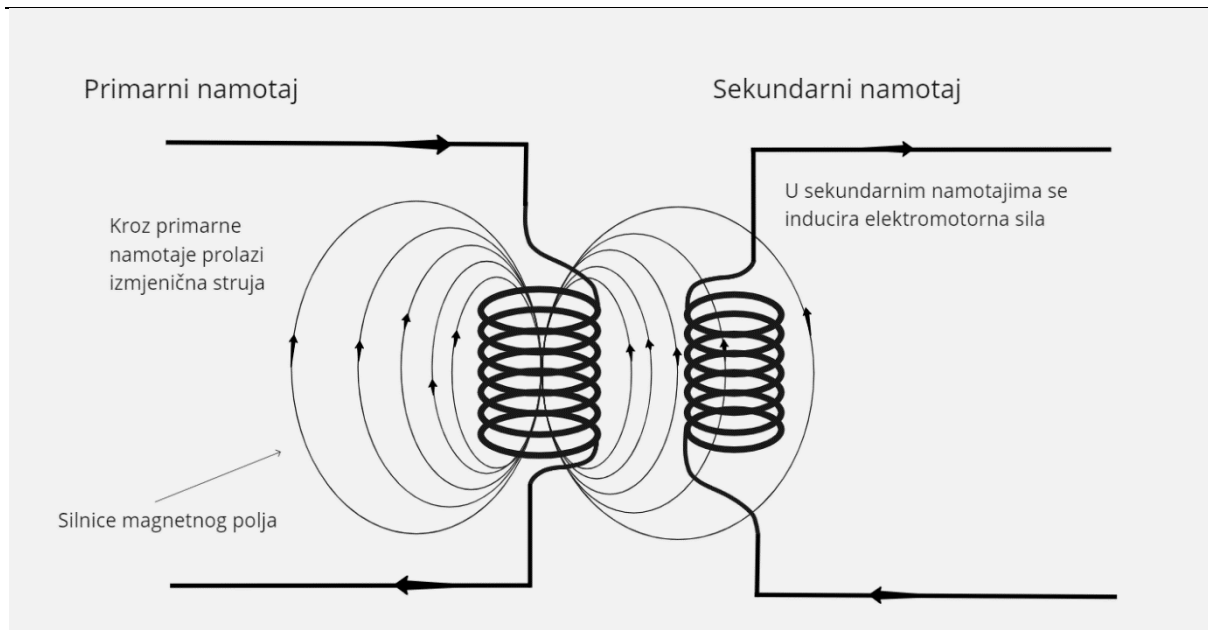
Power and distribution transformers form an indispensable part of the power system. For their proper functioning, a proper choice of lubricant is necessary. The topic of this thesis are transformer (electrical insulating) oils. In the chapters that follow, requirements, types, chemical composition and possibilities of improvement of transformer oils are covered. Oil diagnostics covers the most common causes of transformer failure and describes them from a physics point of view. Also, the increase in environmental awareness was reflected in all segments of industry and society, so new biodegradable transformer oils were produced. The trend of globalization is addressed through chapters dealing with laws, institutions and norms, and it is clearly that this trend is responsible for one of the new directions in the development of oil components. At the end, there is a chapter on new types and development of dielectrics, the backbone of which is nanofluids and vegetable oils.

Key words: transformer, transformer oils, diagnostics, environmental impact

1. UVOD

Transformatori su neizostavan dio elektroenergetskih sustava. Ovi električni uređaji nemaju pokretne dijelove, nisu zahtjevni za održavanje, u slučaju manjih preopterećenja, prenapona i sličnih poteškoća ne budu odmah trajno uništeni ili razoreni [1]. Funkcija transformatora je međuinuktivno povezati dva električna strujna kruga izmjenične struje i pretvoriti zadani napon prvog strujnog kruga u viši ili niži napon drugog strujnog kruga, ovisno o namjeni. Pretvorba se odvija bez promjene frekvencije, a snaga struje ostaje gotovo nepromijenjena. Dokaz tomu je efikasnost koja se kreće od 95 – 99 %, što ih čini grupom vrlo efikasnih električnih uređaja.

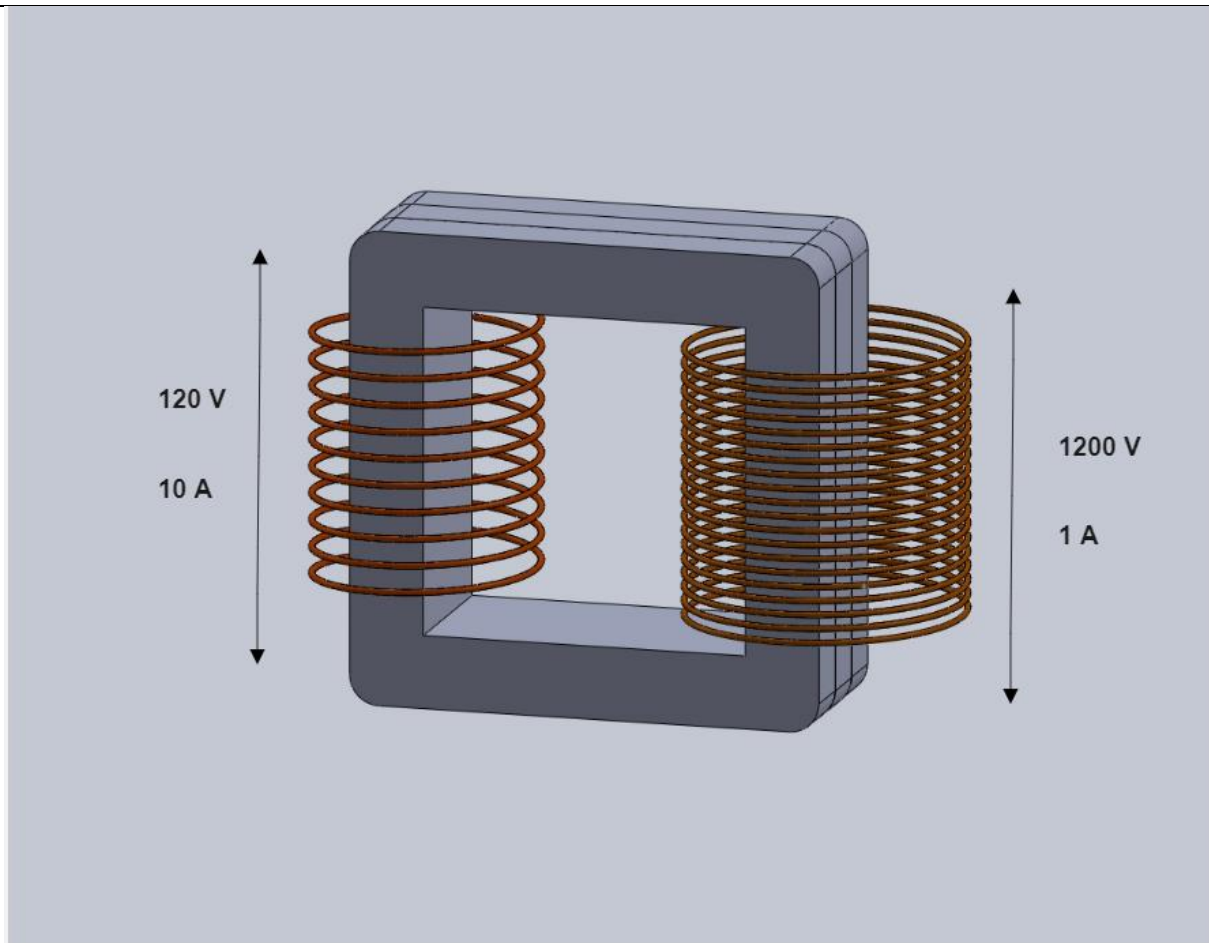
Aktivni dio transformatora, gdje se odvija pretvorba, čini feromagnetna jezgra sastavljena od spojenih izoliranih pločica i dva ili više, ovisno o vrsti, međusobno odvojena namota [2]. Rad transformatora temelji se na Zakonu elektromagnetske indukcije (M. Faraday 1831.), točnije na međusobnoj indukciji. Faraday je došao do spoznaje da ako promjenjivi magnetski tok obuhvati strujni krug, dolazi do induciranja električnog napona ili elektromotorne sile. Inducirani napon je proporcionalan broju namotaja kroz koji prolazi magnetski tok. Kad su dva strujna kruga povezana zajedničkim magnetskim tokom, a imaju različit broj namotaja, dolazi do stvaranja različitih napona [3]. Preslikano na transformator - jezgra služi za prijenos magnetskog toka iz jedne zavojnice u drugu, a primarni i sekundarni namoti predstavljaju dva zasebna strujna kruga između koji se vrši transformacija napona.



Slika 1: Zakon elektromagnetne indukcije (Faradayev) zakon prikazan na osnovnoj zamisli transformatora

U širem kontekstu, elektroenergetski sustav tj. električna mreža može se podijeliti u tri dijela. Od elektrane do transformatorskih stanica električna energija se prenosi na velike udaljenosti visokim naponom. U toj fazi prijenosa koriste se energetske transformatori. Druga faza je prijenos od trafostanica koje se nalaze na rubovima velikih područja potrošnje do manjih koje se nalaze na lokaliziranim područjima potrošnje. U tu svrhu koriste se distributivni i specijalni transformatori, koji su podijeljeni u veliki broj manjih skupina (npr. uzemljivački, ispravljački, transformatori za željeznice, peći, mobilne trafostanice itd.). Zadnja faza prijenosa je od lokaliziranih trafostanica do krajnjih potrošača. Svrha ovih transformatora je prilagoditi napon kako bi korištenje uređaja bilo sigurno po život. Ova skupina neće biti obrađivana u ovom radu.

Bitno je napomenuti da gore navedena podjela nije jedini način za klasificiranje transformatora. Ovisno o vrsti hlađenja namota, moguće je uvesti podjelu prema najčešće korištenim rashladnim medijima na transformatore hlađene uljem i zrakom. Hlađenje zrakom koristi se kod uređaja maksimalnog napona do 50 kV. Usporedbe radi, napon energetskih transformatora se kreće u rasponu od 400 – 800 kV, distribucijskih s uljem do 70 kV, a suhih distribucijskih, kako je gore navedeno, do 50 kV [4].



Slika 2: Pojednostavljeni prikaz transformatora za pojačavanje napona (eng. Step up transformer)

Dakle, transformatorsko (elektroizolacijsko) ulje predstavlja vrlo bitnu kariku u transformatoru, a time i u elektroenergetskoj mreži. Svrstava se u područje maziva. Općenito, bilo koje mazivo je vrlo bitno stavka i jednakovrijedan konstrukcijski element ostalima. Podmazivanjem se smanjuje trenje, a time i trošenje strojnih dijelova, odvodi toplina i smanjuje intenzitet nepoželjnih kemijskih procesa poput oksidacije i korozije. Neovisno o kojem uređaju se radi, pomnim odabirom (i pravilnom eksploatacijom) osigurat će duži vijek trajanja.

Odabir transformatorskog ulja u širokim granicama utječe na rad transformatora. U nastavku će biti detaljno prikazana i razrađena maziva tj. ulja koja se koriste u uljnim transformatorima, zahtjevi koji se na njih postavljaju, parametri, dijagnostika stanja transformatora na osnovi stanja maziva, propisi, regeneracija, odlaganje i moguće alternative.

2. OSNOVE O TRANSFORMATORSKOM ULJU

2.1. Primjena ulja

Transformatorsko ulje obavlja više funkcija u transformatoru, a moguće ih je podijeliti na osnovne i dodatne.

2.1.1. Osnovne funkcije primjene ulja

Transformatorsko ulje ima dvojaku osnovnu ulogu: kao izolacijski i rashladni medij [5].

1) Izolacijski medij - Valja napomenuti da se izolacijski sustav visokonaponskih transformatora sastoji od papirnog i uljnog djela. I papir i ulje imaju zajedničku funkciju, a to je da sprječavaju električni proboj između dijelova transformatora s kojima su u doticaju. Razlika je u tome što se papirnom (tzv. trafo-papir) međusobno oblažu namoti i unutarnji vodljivi dio kućišta, a uljem se popunjava sav preostali prostor unutar dijela transformatora gdje se vrši pretvorba. Ulje i papir u sprezi izvršavaju još efikasnije svoje funkcije, jer ulje impregnacijom papira poboljšava njegovo svojstvo izoliranja. Pod papirni dio spadaju: celulozni materijal u koji su umotani namoti oko jezgre radi smanjenja gubitaka i prešani papir koji odvaja namote od uzemljenja. Vijek trajanja papirne izolacije poistovjećuje se s vijekom trajanja transformatora. Razlog tomu je što papirna izolacija predstavlja najslabiju točku transformatora, a ujedno ju nije moguće zamijeniti niti vršiti bilo kakve intervencije jednom kad je transformator pušten u rad. Svrha ulja kao izolacijskog medija je da izolira namote jer su različitog napona. Korisno je istaknuti da je dielektrik sinonim kojim elektrotehnička struka barata kada se transformatorsko ulje spominje u kontekstu izolacijskog medija. Sposobnost izoliranja iskazuje se vrijednošću dielektrične čvrstoće. Dielektrična čvrstoća pokazuje izdržljivost dielektrika na povećanje jakosti električnog polja. [6] Ako jakost električnog polja premaši odgovarajuću vrijednost, dolazi do pojave izbijanja električnog luka i probojnog napona. [7]

2) Rashladni medij – funkcija hlađenja održava temperaturu triju najkritičnijih dijelova transformatora u projektiranom rasponu, a tu spadaju namoti, jezgra i stjenke kućišta.

Hlađenje se odvija na sljedeći način: aktivni dio transformatora (jezgra i namoti) nalaze se u velikom spremniku napunjenom transformatorskim uljem. Ulaz ulja u spremnik nalazi se na dnu. Tu je ujedno temperatura ulja najniža. Ulje struji vertikalno prema gore, prolazi preko elektromagnetske jezgre i namota te se zagrijava. Dostrujavanjem na vrh spremnika, ulje je maksimalno zagrijano i tu izlazi iz spremnika. Nakon što ulje izađe iz spremnika, ulazi u radijatore odnosno rebra za hlađenje. Strujeći od vrha prema dnu, ulje predaje toplinu, hladi se i opet ulazi u spremnik na dnu.

Opisani princip je osnovni način hlađenja i odvija se slobodnom konvekcijom. Koristi se u samohlađenim transformatorima. Dodatnim intervencijama npr. dodavanjem serije ventilatora koji usmjeravaju zrak prema rebriima ili ugradnjom pumpi za prisilnu cirkulaciju ulja moguće je pojačati efekt hlađenja tj. postići hlađenje prisilnom konvekcijom. [9]

Ukupni gubici transformatora iznose 1 - 5%. Javljaju se u jezgri i stijenkama kućišta tj. spremnika u koji je sve uronjeno. Od svih tih gubitaka, najznačajniji su oni koji nastaju zbog zagrijavanja namota, a za optimalan rad transformatora ključno je hladiti upravo njih. Sposobnost hlađenja ulja prirodnom konvekcijom ovisi o pet faktora: gustoći, koeficijentu toplinskog širenja, viskoznosti, specifičnom toplinskom kapacitetu i toplinskoj provodnosti ulja [8].

2.1.2. Ostale funkcije transformatorskog ulja

Uz dvije glavne, ističu se još dvije vrlo bitne uloge transformatorskih ulja.

- ulje služi kao svojevrsan zaštitni premaz svih metalnih površina koje su u njega uronjene. Time se usporavaju procesi oksidacije i korozije koje je iznimno bitno pratiti. Ukoliko dođe do kontaminacije ulja produktima navedene dvije reakcije, ulje gubi

funkciju izolatora što rezultira požarima i velikim štetama na ostaloj opremi povezanoj s transformatorom [7].

- analizom ulja moguće je dobiti jasan uvid u trenutno stanje transformatora. Starenje ulja kao i bilo koji kvar ostavljaju specifične tragove, stoga je dijagnostičkim metodama moguće kontrolirati stanje ili ući u trag uzročno-posljedičnim vezama određenog kvara. O ovoj ulozi transformatorskog ulja bit će posvećeno jedno od poglavlja koji slijede.

2.1.3. Zahtjevi

Opći i esencijalni zahtjevi koje ulje mora zadovoljiti kako bi bilo prikladno za primjenu u transformatoru su sljedeći: [5]

- kemijska stabilnost: podrazumijeva se da ulje mora biti stabilno prema oksidaciji; otporno na toplinsku degradaciju odnosno u slučaju porasta temperature svojstva ulja se ne smiju znatno promijeniti; ulja moraju biti što manje podložna hidrolizi
- toplinske karakteristike: dobra vodljivost i veliki specifični toplinski kapacitet
- transformatorska ulja ne smiju biti toksična i ne smiju kemijski reagirati s drugim elementima transformatora s kojima su u doticaju
- u slučaju da se u transformatoru nalazi još neki fluid s kojim ulje graniči, vrijedi jednako pravilo kao u prethodnoj natuknici, ne smije doći do neželjenih reakcija
- poželjno je da dielektrična čvrstoća (veličina koja predstavlja granicu nakon koje povećanjem električnog polja izolator postane vodič) bude što veća i
- da je lako poboljšati stanje ulja i otklanjati nastale nepravilnosti u ulju tj. da je lako njegovo održavanje.

2.1.4. Svojstva ulja

Izbor ulja uvelike utječe na rad transformatora. Pri odabiru treba uskladiti mnoštvo parametara koji su potrebni za optimalni rad, esencijalne zahtjeve, ekonomske faktore, sigurnost - primjerice kriterij za odabir nisu isti za transformator koji se nalazi izvan grada, na otvorenom prostoru ili za transformator smješten u zatvorenom prostoru u središtu grada, itd. Temeljito poznavanje svojstava uvelike pripomaže donošenju optimalne i racionalne odluke.

Svojstva ulja podijeljena su u tri velike skupine: fizikalna, kemijska i električna svojstva.

2.1.4.1. Fizikalna svojstva

Fizikalna svojstva ulja su:

- Izgled ulja – ulje spremno za uporabu treba biti svijetlo žute boje, čisto, prozirno i bez ikakvih lebdećih čestica ili taloga. Pojava bilo koje navedene pojave ili promjena boje u žutu, jantarnu ili smeđu znak su onečišćenja ulja
- Gustoća – maksimalna preporučena gustoća ulja na temperaturi 29,5 °C iznosi 890 kg/m³
- Viskoznost – je kontrolni parametar za odvođenje topline. Povećanje viskoznosti u korištenom ulju u odnosu na svježe ulje indikator je oksidacijskih procesa i starenja ulja
- Točka paljenja (eng. Flash point, hrv. plamište) – je najniža temperatura pri kojoj se pare ulja i zrak (zajedno tvore smjesu) zapale u dodiru s otvorenim plamenom [10]. Nisko plamište znak je prisutnosti hlapljivih gorivih tvari, a do toga dolazi zbog duže izloženost ulja visokim temperaturama. Uslijed te izloženosti u ulju se stvaraju ugljikovodici niske molekularne mase i upravo oni snižavaju temperaturu plamišta. Visoke temperature kojima je izloženo transformatorsko ulje najčešće su posljedice neke vrste kvara.
- Temperatura stiništa (eng. Pour Point) – je najniža temperatura pri kojoj radna tekućina u određenim uvjetima teče. [11] Starenje ulja ne utječe na stinište. Do promjene dolazi jedino ako u radnom vijekom iz određenih razloga bude nadodana određena količina različitog ulja.
- Površinska napetost - je svojstvo tekućine prouzročeno međumolekulskim interakcijama. Na svaku molekulu u tekućini djeluju susjedne molekule. Međutim, na molekulu koja se nalazi na površini ne djeluju ostale molekule iz tekućine sa svih strana. To uzrokuje da tekućina nastoji zauzeti oblik koji će imati najmanju površinu (jer je rezultatna sila od međudjelovanja molekula na molekulu koja se nalazi na površini usmjerene prema unutrašnjosti tekućine). Rad koji je potreban uložiti da se poveća površina podijeljena s povećanjem te površine naziva se površinska napetost [5].

Mjerna jedinica je J/m^2 ili N/m [12]. Površinska napetost je indikator produkata starenja ulja i polarnih onečišćenja (kislina i naslage) čiji je uzrok oksidacija. Nova, nekorištena ulja imaju veliku vrijednost površinske napetosti, dok rabljenja i ostarjela ulja karakterizira niska vrijednost površinske napetosti [5].

2.1.4.2. *Kemijska svojstva*

Kemijska svojstva transformatorskog ulja su:

- Sadržaj vlage – kao što naziv govori, sadržaj vlage je udio vode sadržan u ulju. Iskazuje se postotkom, masenim ili volumnim udjelom. 0 označuje odsutnost, a 1 ili 100% maksimalan sadržaj vlage. Vlaga je iznimno nepoželjna u transformatorskim uljima jer ubrzava proces starenja, potiče hidrolitičke reakcije razgradnje nekih tvari u ulju, omogućuje proboj električne struje kroz ulje i dokida osnovne funkcije ulja (izolacija). Uz to, iznimno štetno djeluje na papirnati dio izolacije.
- Neutralizacijski (kiselinski) broj – je vrijednost koja označava sadržaj kiselina i lužina u novom ulju. Služi kao indikator za oksidacijsku degradaciju ulja. Mjeri se titracijom, a definirana je kao masa kalijeva hidroksida potrebna za neutralizaciju 1 g transformatorskog ulja [13]. Mjerna jedinica je KOH/g, Maksimalna dopuštena vrijednost neutralizacijskog broja iznosi 0,03 mg KOH/g [14].

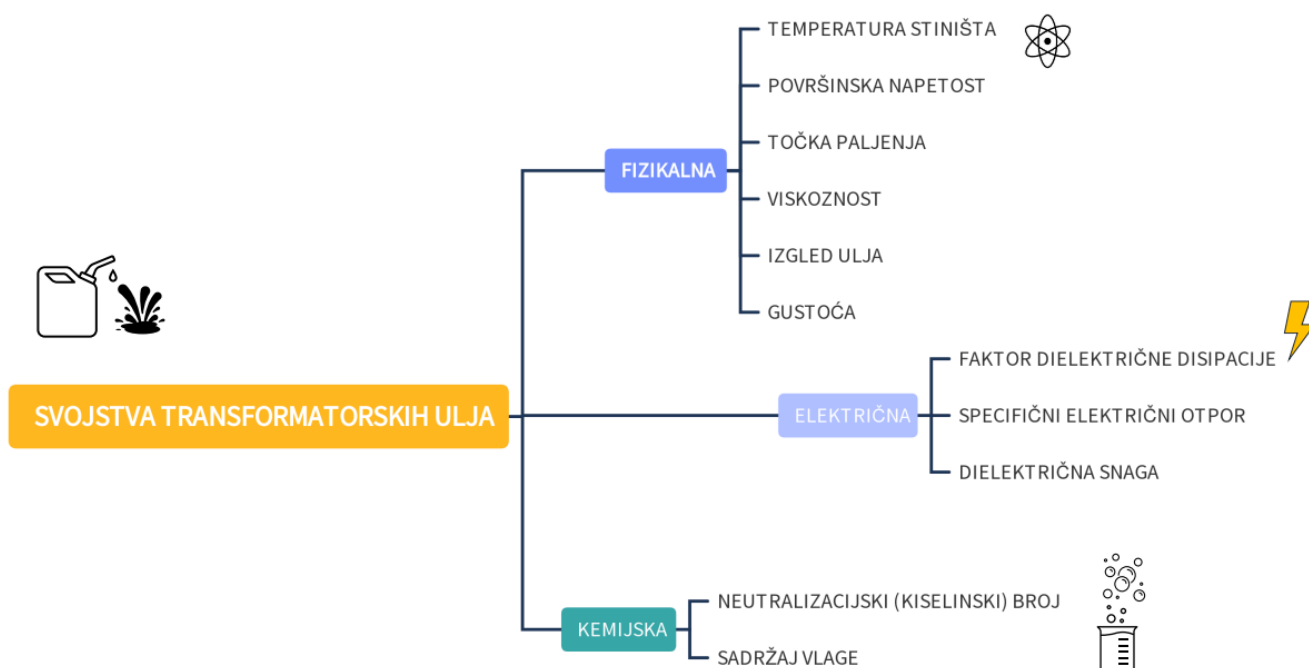
2.1.4.3. *Električna svojstva*

Električna svojstva transformatorskog ulja su:

- Dielektrična snaga (čvrstoća) (eng. Electrical strenght, Breakdown value) – definicija i detaljno objašnjenje su napisani u odlomku 2.1.1. Treba spomenuti da dielektrična snaga služi kao grubi indikator za prisutnost vodljivih čestica i vlage u ulju. Ako je dielektrična snaga snižena, sa sigurnošću se može utvrditi da je onečišćenje prisutno, dok nepromijenjena vrijednost može, ali i ne mora značiti odsutnost spomenutih čestica.
- Specifični električni otpor (eng. Specific resistance) – je fizikalna veličina koja opisuje svojstvo tvari da se opire protjecanju električne struje [15]. Recipročna je električnoj

provodnosti. Mjerna jedinica je Ω . Specifični električni otpor je osjetljiv na pojavu vodljivih čestica tj. atoma metala i svih vrsta iona. Prisutnost nabrojanih elemenata i vlage u bilo kojem obliku, snižuje vrijednost specifičnog otpora. [5]

- Faktor dielektrične disipacije (eng. Dielectric dissipation factor) – je mjera koja govori o gubitcima zbog oscilacija napona i struje u sustavu. Recipročna je vrijednost faktora kvalitete. Ovi gubici nastaju zbog električne vodljivosti, ionizacije, polarizacije, nehomogenosti, kao i zbog rezonantnih gubitaka koji nastaju pri određenim frekvencijama promjenjivog vanjskog električnog polja [16].



Slika 3: Sistematizirani prikaz svojstava ulja

2.2. Mogući sastav transformatorskog ulja

Prije razrade mogućeg sastava transformatorskih ulja, slijedi podjela u tri glavne skupine prema porijeklu ulja. Navedeni kriterij nije jedini prema kojem se ulja mogu razvrstati, ali je najbolji za razumijevanje veze kemijske strukture i svojstava.

2.2.1. Skupine ulja prema porijeklu

a) Ulja na bazi nafte odnosno mineralna ulja

Početak korištenja seže na kraj 19. stoljeća, točnije u 1891. godinu [14]. Odabirom mineralnog ulja za transformator, dobiva se najpovoljniji omjer cijene i fizikalnih svojstava. U usporedbi s drugim vrstama ulja cijena je relativno niska, jer su procesi crpljenja nafte i postupak frakcijske destilacije uhodani visokorazvijeni tehnološki procesi. Svojstva su jako dobro istražena, a ponašanje tijekom rada je upoznato u praksi. Proces regeneracije je također detaljno istražen i odavno primijenjen. Od ukupno korištene količine transformatorskih ulja, približno 90% odnosi se na ulja mineralnog porijekla. Međutim, negativan utjecaj na okoliš koji počinje s bušotinom nafte, zatim opasnost od havarije tijekom transporta, laka zapaljivost prilikom rada u transformatoru, loša biorazgradivost i kancerogenost potaknuli su struku da krene u smjeru razvoja novih transformatorskih ulja [17].

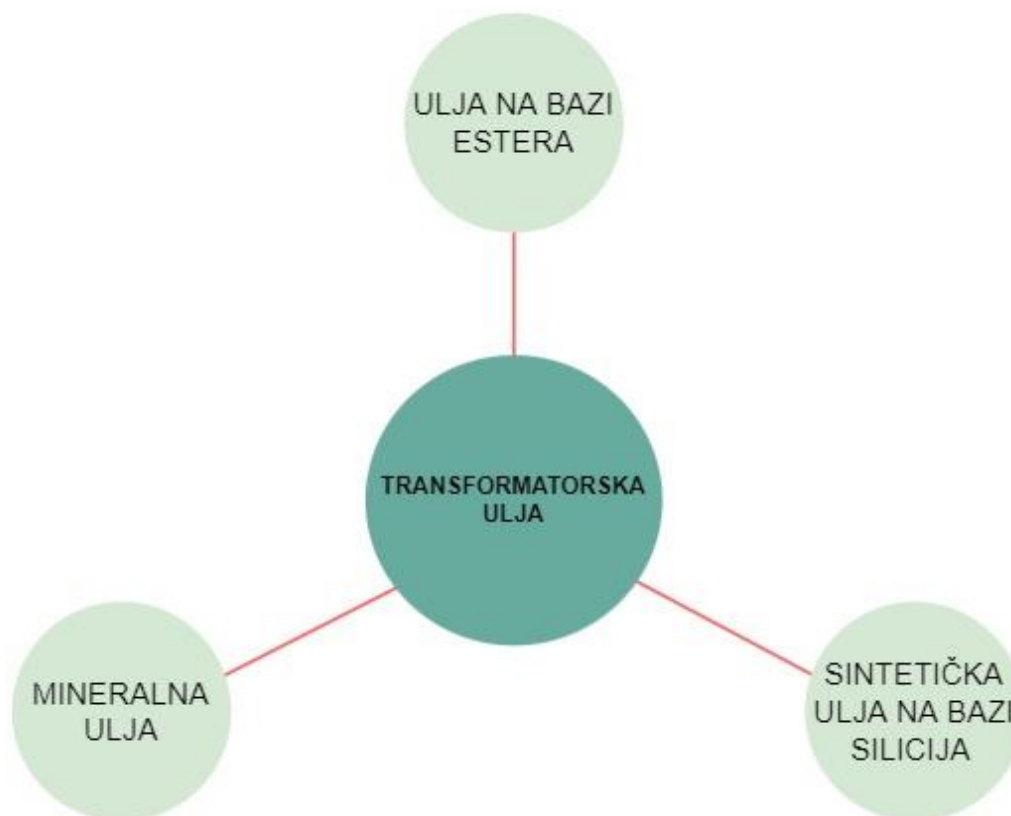
b) Sintetička transformatorska ulja na bazi silicija

Posebno su razvijena za transformatore pa jako dobro vrše zadaću hlade i izoliraju. U odnosu na mineralna ulja imaju višu temperatura zapaljenja i postignuto je svojstvo samogašenja. S te dvije postignute karakteristike mogućnost požara je uvelike smanjena. Toplinska stabilnost im je bolja nego kod svih drugih ulja, čak i u prisustvu zraka. S druge strane, ova ulja nisu u širokoj primjeni. Razlog tomu leži u visokoj cijeni, lošim svojstvima podmazivanja i izrazito negativnom utjecaju na okoliš u slučaju izlivanja tijekom radnog vijeka. Ukoliko dođe do pojave električnog luka dolazi do formiranja želatinaste strukture. U pravilu se koriste u transformatorima koji se nalaze na mjestima gdje postoje zahtjevi posebno vezani za njihova poboljšana svojstva, npr. u transformatorima za pružna vozila (požar predstavlja direktnu opasnost po ljudske živote) ili mobilnim transformatorima (bitna pouzdanost jer se postavljaju na mjesta gdje nema zamjenskih uređaja) i sl. Zajednički nedostatak s mineralnim uljima im je

loša biorazgradivost. Nakon radnog vijeka ova ulja se uništavaju pirolizom u pećima. Nakon pirolize ostaju uobičajeni produkti izgaranja obogaćeni finim prahom silicija koji zagađuju atmosferu [18].

c) Transformatorska ulja na bazi estera

Esterska ulja dijele se na sintetička i prirodna esterska ulja. Najvažnije svojstvo ove skupine je ekološka prihvatljivost tj. potpuna biorazgradivost. Naravno, biorazgradivost će varirati ovisno o vrsti najzastupljenijeg esterskog spoja, količini ulja i danom vremenu za razgradnju. Sintetička esterska ulja imaju iznimno povoljna svojstva prema ostatku izolacije transformatora. U kemijskom smislu imaju jako stabilnu strukturu. Kao polazna sirovina za izradu sintetičkih esterskih ulja koriste se spojevi iz sirove nafte. Prirodni esteri se dobivaju iz biljnih ulja, što ih čini jedinim transformatorskim uljem iz obnovljivih izvora. Odlikuje ih visoko plamište i točka zapaljenja. Teško na sebe vežu vlagu pa je opasnost razaranja papirnate izolacije svedena na minimum. Zanimljivost koja se veže uz biljna transformatorska ulja je da su korišteni kao izolacijska ulja prije početka uporabe mineralnih ulja, dok nisu bili dovoljno razvijeni postupci crpljenja i obrade nafte. Prirodna esterska ulja su podložnija oksidaciji od ostalih ulja, što im osjetno skraćuje radni vijek [19].



Slika 4: Prikaz podjele transformatorskih ulja prema porijeklu

2.2.2. Kemijski sastav

U nastavku će biti opisan kemijski sastav ulja po skupinama prema porijeklu.

2.2.2.1. Mineralna ulja

Mineralna ulja su građena najvećim dijelom od ugljikovodičnih spojeva. Ugljikovodici su spojevi sastavljeni isključivo od ugljika i vodika. Ostatak kemijskog sastava čine organski spojevi, nastali zamjenom pojedinih atoma ugljika i vodika u ugljikovodicima s atomima dušika, sumpora i kisika. Mineralna ulja tvore se od sljedeće tri osnovne vrste ugljikovodičnih spojeva:

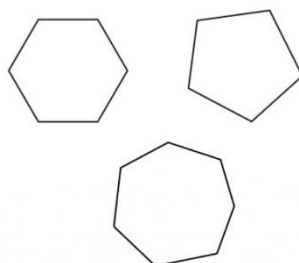
- 1) parafinski ugljikovodici – lančasti zasićeni ugljikovodici, nazivaju se još i alkani ili parafini
- 2) nafteni - nazivaju se i cikloalkani. Po svojstvima su vrlo slični parafinskim ugljikovodicima, mogu biti zasićeni i nezasićeni, a jedina veća razlika u odnosu na alkane je prstenasti oblik molekule
- 3) aromatski ugljikovodici – s naftenima dijele jednak ciklički oblik molekule, ali im se svojstva u potpunosti razlikuju [20].

Mineralna ulja sadrže sve tri vrste navedenih spojeva, ali u različitim količinama, veličinama molekula i strukturama. Upravo ti udjeli diktiraju fizikalna svojstva ulja. Primjerice ulje koje u svom sastavu sadrži 60% cikloalkana čije molekule sadrže 25 atoma ugljika će zbog prstenaste strukture imati više talište, vrelište i gustoću nego ulje koje sadrži 60% alkana s molekulama koje sadrži također 25 atoma ugljika. Slična je još jedna usporedba vezana za utjecaj aromata: mono-aromati pozitivno utječu, a poli-aromati negativno utječu na električna svojstva ulja [18].

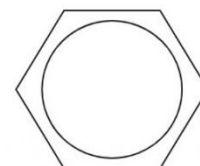
Slika 5: Tri osnovne vrste ugljikovodičnih spojeva koji tvore mineralna ulja:



a) parafini



b)nafteni

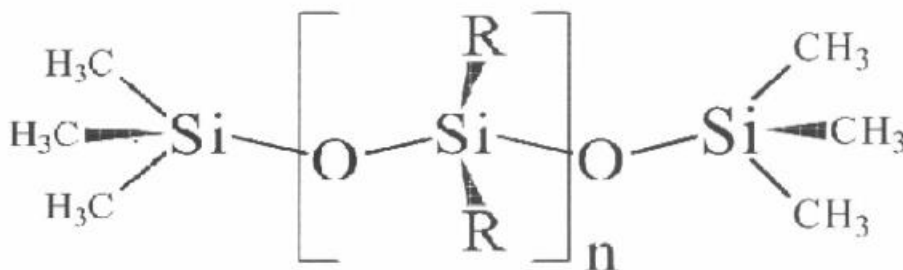


c)aromatski ugljikovodici

Uz 3 glavne skupine spojeva, u mineralnim uljima se uvijek nalaze spomenute molekule dušika, kisika i sumpora. Značajne su jer njihova količina utječe na oksidacijska svojstva ulja. Veliki udio nabrojanih spojeva čini ulje podložnim oksidaciji, a to naposljetku rezultira nemogućnošću da se obavljaju dvije osnovne funkcije ulja. Koliko će ovih spojeva biti u transformatorskom ulju, određuje finoća i preciznost rafinacije, kao i polazna sirovina odnosno sirova nafta. Treba imati na umu da su različita nalazišta nafte različito prikladna za proizvodnju goriva, bitumena, maziva i dielektričnih ulja.

2.2.2.2. Sintetska ulja na bazi silicija (Silikonska ulja)

Silikonska ulja se sastoje od linearnih sintetskih polimera. Osnovna jedinica polimera se sastoji od atoma silicija, dva atoma kisika i dvije organske radikalne skupine koje se obilježavaju slovom R. Te organske skupine mogu biti lančasti ugljikovodici (alifatski) ili aromatski ugljikovodici. Na krajevima polimera se nalaze atomi silicija koji najčešće budu vezani s tri metilne skupine CH₃. Takvi se silikonski polimeri nazivaju polidimetilsiloksani. O molekularnoj masi ovise fizikalne karakteristike, a molekularnu masu određuje broj jedinica i organskih grupa R. Povećanjem molekularne mase raste viskoznost, a smanjuje se isparljivost i toplinska provodnost fluida. Zbog prirode molekula koje se mogu sastojati od malog pa sve do velikog broja umreženih jedinica, viskoznost ovih ulja ima jako veliki raspon. Zbog toga svoju primjenu nalaze i u drugim sektorima elektroindustrije, pa čak i izvan nje [21].



Slika 6: Struktura sintetskih ulja na bazi silicija [21]

2.2.2.3. Sintetska esterska ulja

Kako je u poglavlju 2.2.1. napisano, polazna sirovina za izradu sintetskih esterskih ulja su spojevi iz sirove nafte. Proizvode se spajanjem poliola sa sintetskim ili prirodnim karboksilnim kiselinama. Dakle, nakon završene sinteze, molekula sintetskog esterskog ulja se sastoji od središnjeg poliola i nekoliko vezanih karboksilnih kiselina. Po definiciji, polioli su alkoholi s dvije ili više hidroksilne skupine [22]. Svrha dodavanja karboksilnih skupina u sintezi je postizanje kemijske stabilnosti [18].

2.2.2.4. Prirodna esterska ulja

Prirodna esterska ulja se sintetiziraju iz biljnih ulja tj. uljanih kultura. Osnovu čine molekule zasićenih i -jednostrukih, -dvostrukih, -trostrukih nezasićenih masnih kiselina. Zasićene masne kiseline karakterizira povoljna kemijska stabilnost, ali i velika viskoznost. S druge strane, trostruke nezasićene masne kiseline imaju nižu viskoznost, ali iznimno lako oksidiraju. Oksidacijska svojstva moguće je poboljšati dodatkom prikladnih aditiva, što će biti obrađeno u sljedećem poglavlju. Kao što svojstva mineralnih ulja ovise u prvom redu o nalazištu nafte odnosno pogodnosti kemijskog sastava bušotine, tako i svojstva prirodnih esterskih ulja ovise o porijeklu ulja tj. biljci iz koje je ulje izolirano. Uglavnom su to sjemenke soje, palmine orasi, ricinus i dr. [18].

Tablica 1: usporedba glavih svojstava mineralnih, silikonskih, umjetnih i prirodnih esterskih ulja [34]

Svojstvo	Mineralna ulja	Silikonska ulja	Sintetiski esteri	Prirodni esteri
Gustoća [g/cm ³]	< 0,895	0,95 – 0,97	< 1,0	< 1,0
Viskoznost pri 100 °C [cSt]	-	-	-	< 15

Viskoznost pri 40 °C [cSt]	< 12	40 +/- 4	< 35	< 50
Plamište [°C]	> 135	> 240	> 250	> 250
Temperatura paljenja [°C]	-	> 340	> 300	> 300
Stinište [°C]	< -40	< -40	< -45	< -10
Probojni napon [kV]	> 30	> 40	> 45	> 35
Faktor disipacije pri 90 °C	< 0.005	< 0.001	< 0,03	< 0.05
Sadržaj vlage [mg/kg]	< 30	< 50	< 200	< 200
Topljivost vode pri 23 °C [ppm] *	55	220	2600	1100
Biorazgradivost u 28 dana [%] *	25	-	-	97
Specifični toplinski kapacitet [J/kgK] *	1860	1510	1800 /2300	1500 /2100

* - očekivane vrijednosti

2.3. Aditivi

Niti jedno transformatorsko ulje, osim silikonskog, nije laboratorijski razvijano s ciljem ispunjavanja osnovnih funkcija. U principu, postupak proizvodnje bilo kojeg ulja za transformatore počinje odabirom prikladne sirovine. Pod pojmom prikladna sirovina misli se

na tvar koja će nakon svih procesa obrade i dorade dati proizvod što boljih specifikacija. Međutim, gotov proizvod rijetko kad sam po sebi može zadovoljiti sve nametnute zahtjeve. Zbog toga su osmišljeni aditivi.

Aditivi su kemijske tvari koje se dodaju u malim količinama za poboljšavanje postojećih ili postizanje novih potrebnih svojstava maziva. Više različitih aditiva u ulju može tvoriti jako efikasan spreg, što rezultira iznimno dobrim svojstvima. Isto tako, moguće je i negativno međudjelovanje, što se može odraziti na ispunjavanje funkcije ulja [23]. Iz prethodnog odlomka može se zaključiti da se dodavanje aditiva uglavnom odvija u posljednjoj fazi proizvodnog postupka

2.3.1. Aditivi za transformatorska ulja

Uobičajeni aditivi u transformatorskim uljima su:

- Antioksidanti – dodaju se ulju kako bi poboljšali stabilnost prema oksidaciji. Tu se ubrajaju razni inhibitori, razlagači peroksida, metalni pasivatori. Temelje se na fenolnim,aminskim, sumpornim ili fosfornim spojevima
- Pasivatori metala – prvenstveno se koriste za smanjenje elektrostatičkog naboja koji je posljedica viška ili manjka elektrona na neuzemljenim ili izolacijskim površinama. Uz tu glavnu funkciju, povoljno djeluju i na oksidacijsku stabilnost. Tri glavna spoja ove skupine temelje se na toluenu i benzenu.
- Depresanti za snižavanje stiništa – snižavaju temperature stiništa. Njihova svrha je poboljšati niskotemperaturna svojstva ulja. Dvije glavne vrste spoja su: polinaftaleni i polimetakrilati
- Aditivi za smanjenje otapanja plinova u ulju – kada dođe do preskakanja struje (pražnjenja) u visokonaponskim sustavima, dolazi do oslobađanja različitih plinova koji imaju tendenciju otopiti se u ulju i time narušiti funkcionalnost ulja. U slučaju pojave pražnjenja, ovi aditivi sprječavaju otapanje plinova u transformatorskom ulju
- Aditivi za povišenje temperature plamišta
- Aditivi za kontroliranje gustoće – koriste se u klimatski hladnim područjima. Osiguravaju gustoću ulja u rasponu u kojem ne dolazi do izlučivanja kristala ulja

-
- Inhibitori korozije - sprječavaju koroziju metalnih površina tako što formiraju na njima tanki zaštitni sloj.

3. DIJAGNOSTIKA

Na temelju analize transformatorskog ulja moguće je dobiti sliku općeg stanju i uvjeta rada transformatora. Mehanizam koji omogućuje dijagnostiku stanja transformatora u ovisnosti o promjeni stanja ulja je sljedeći. Sve greške i poteškoće koje se dogode u komponentama transformatora uzrokuju disipaciju energije. Ta ista disipacija energije uzrokuje kemijske promjene u ulju odnosno nastupa degradacija ulja. Svaka poteškoća ostavlja jedinstven trag ili jedinstvenu kombinaciju tragova. Ovisno o vrsti promjene koja se dogodila u ulju, moguće je utvrditi koji problem ju je uzrokovao. Nakon utvrđivanja problema, slijedi odabir dijagnostičke metode kojom se može pobliže istražiti poteškoću ili se bira način uklanjanja otkrivene pogreške [7].

3.1. Opći pregled dijagnostičkih metoda i učestalost izvođenja

Kao što je prethodno napisano, pod pojmom dijagnostika transformatora podrazumijeva se primjena jedne ili više dijagnostičkih, tj. analitičkih metoda s ciljem određivanja stanja transformatora, odnosno u krajnjem slučaju, određivanja i lociranja kvara u transformatoru. Neposredno nakon završenog procesa proizvodnje ulja, ono se podvrgava „tvorničkoj“ dijagnostici. Cilj tvorničke dijagnostike nije traženje i uklanjanje poteškoća, već mjerenje referentnih vrijednosti ulja. Na osnovi tih vrijednosti se kasnije mjere promjene ulja nastale uslijed radnog vijeka.

Dijagnostika koja se obavlja tijekom radnog vijeka transformatora može se podijeliti u dvije skupine prema mjestu obavljanja:

1) Terenska ispitivanja

Koriste se prenosivi uređaji koji mjere fizikalne, električne, ultrazvučne i toplinske veličine. Neke od metoda su: vizualni pregled transformatora, mjerenja raznih otpora i kapaciteta, struja magnetiziranja, frekvencijskih odziva, termovizija, mjerenje ultrazvučne aktivnosti itd. Ova ispitivanja nisu normirana jer na terenu nije moguće osigurati uvijek i svugdje jednake uvijete ispitivanja. Ispitivač koji vrši terenska ispitivanja mora biti obučen i poželjno je da ima što više iskustva kako bi rezultati bili pouzdani.

2) Laboratorijska ispitivanja

Koristi se oprema za laboratorijska ispitivanja, a provode se na uzorcima izolacijskih materijala iz transformatora. Ove metode su preciznije od terenskih i normirane su. Na stranicama koje slijede svaka od metoda bit će posebno obrađena.

Mnogobrojne dijagnostičke metode obuhvaćaju veliki opseg ispitivanja. Provođenje svih metoda je nepotrebno, oduzima veliku količinu vremena i skupo je. Oprema za ispitivanje je u pravilu također skupa i kompleksna za korištenje tj. iziskuje obučeni kadar za rukovanje. Zbog toga su dijagnostičke metode prema učestalosti svrstane u sljedeće tri skupine:

- A) Standardni opseg dijagnostičkih metoda – prati se opća promjena stanja transformatora, kontrole ove vrste su učestalije ako je riječ o: velikim transformatorima ili onima koji nemaju zamjenu, starijim transformatorima koji su bliže kraju vijeka trajanja i ukoliko je proizvođač propisao česte kontrole
- B) Prošireni opseg dijagnostičkih metoda – namjena: za analizu preostalog vijeka trajanja ili za utvrđivanje/istraživanje kvara na transformatoru
- C) Specijalne dijagnostičke metode – predstavljaju najvišu razinu dijagnostike, zahtijevaju skupu dijagnostičku opremu i posebno obučene eksperte, u pravilu se primjenjuju

samo na velikim distribucijskim jedinicama i u svrhu analize kvara istih tih transformatora

Ovisno radi li se o rutinskoj kontroli transformatora, preciznijoj detekciji kvara ili utvrđivanju uzroka kvara, biraju se metode iz prikladnog opsega [25].

3.2. Parametri koji utječu na degradaciju ulja tijekom eksploatacije

Osim disipacije energije, još mnogo čimbenika ostavlja tragove u ulju, npr. električna i toplinska naprezanja, nečistoće, vlaga ili čestice od konstrukcijskih materijala koji graniče s uljem. Krucijalne karakteristike transformatorskog ulja su dielektrična snaga, kako bi ulje moglo obavljati funkciju izoliranja i malena viskoznost, kako bi ulje moglo u dovoljnoj mjeri hladiti transformator. Oba svojstva bivaju narušena prisustvom bilo kojeg procesa degradacije ili razlaganja. Ta tri glavna procesa su: oksidacija, onečišćenje i izloženost visokim temperaturama. Također treba imati na umu da ulje vremenski stari (tj. oksidira) te da izrada i montaža nikad nisu idealno izvedene. Zbog svega toga, bitno je razlučiti parametre koji pokreću degradaciju [26]. Najvažniji su:

1. Toplina – kao što povišena temperatura utječe na razgradnju papirnato djela izolacije, jednako tako utječe i na degradaciju ulja. Ova dva procesa odvijaju se različitim brzinama, ali način na koji temperatura na njih utječe je isti. Porastom temperature, brzina odvijanja degradacije i kod ulja i kod papirnate izolacije raste. O negativnom utjecaju povišene temperature svjedoči tvrdnja da se za povišenje temperature u iznosu od 10 °C, brzina degradacije poveća dvostruko.

2. Kisik – sva transformatorska ulja bazirana na ugljikovodicima, prirodno su podložna neprestanom procesu oksidacije radi kisika iz atmosferskog zraka koji je posvuda prisutan. Termin starenje ulja je također uvriježeni naziv koji je zapravo povezan s oksidacijom. Krajnji produkti oksidacije ugljikovodika, kao i ostalih spojeva, su molekule ugljikovog dioksida i vode. Međutim ako proces nije dovršen do kraja, oksidacijski produkti mogu sadržavati molekule alkohola, aldehida, ketona, peroksida i kiseline. Korisno je napomenuti da osim kisika koji je potreban za početak reakcije, oksidaciju dodatno pospješuju: toplina, prisutnost metalnih katalizatora (željezo, bakar, aluminij), električno naprezanje i oksidacijski produkti od prethodnih reakcija. Oksidacijski produkti još k tomu vode stvaranju naslaga i uništavanju izolacijskog papira te smanjuju sposobnost odvođenja topline.

3. Električno izbijanje (eng. Partial Discharge) (PD) i termičko degradiranje (eng. Thermal Faulting) (TF) – Električno izbijanje je široki termin iz elektrotehnike koji je definiran kao prolazak čestica nabijenih električnim nabojem kroz plinove u električnom polju pri kojem zbog sudara među česticama dolazi do određenih svjetlosnih, akustičnih i toplinskih popratnih pojava. Oblici električnog izbijanja poredani prema rastućem nizu slijedili bi redom: pražnjenja, iskrenje, luk. Pri temperaturama manjim od 1000 K, plinovi su izvrsni izolatori, pa se transformatorsko ulje može poistovjetiti s tim pojmom u definiciji. Izbijanje se javlja kao pojava električnog luka, ionizacije, korone ili munje, ovisno o uvjetima okoline [27]. Međutim, kolokvijalno se engleski termin Partial Discharge prevodi kao parcijalno pražnjenje, a kad se o parcijalnom pražnjenju govori u kontekstu transformatora taj pojam označava mala pražnjenja koja se pojavljuju unutar dielektrika kao znak njegove degeneracije odnosno propadanja [28]. U procesu degradacije ulja, reakcija za proizvodnju plinovitog vodika troši najmanje energije. Plinoviti vodik nastaje prekidanjem veza u ugljikovodicima i najčešće ga proizvode PD i TF procesi i pojava električnog luka. Sam vodik proizveden u značajnoj količini može nastati jedino pod utjecajem korone ili parcijalnog pražnjenja. U prisutnosti TF procesa, uz vodik, proizvest će se metan zajedno s etanom i etilenom. Porastom temperature na kojoj se TF događa, rast će i omjer proizvedenog etilena i etana.

4. Električni luk (eng. Arching) – je vrsta električnog izbijanja. Definiran je kao trajno samostalno izbijanje elektriciteta u plinovima, među grafitnim ili metalnim elektrodama, označeno visokom temperaturom i velikom gustoćom električne struje, jake termoelektronske i fotoelektronske emisije, te padajućom značajkom napon-struja. Teorija električnog luka još nije dovoljno objašnjena [29]. Kad je električni luk dominantna pojava u transformatoru, u ulju će biti najviše proizvedenog etina (acetilena). Pojava električnog luka vodi slomu sustava brže od svih drugih kvarova. Stoga čak i najmanji trag acetilena, a najmanji trag znači svega 2 – 3 molekule na milijun drugih, treba uzeti ozbiljno i kao razlog za brigu.

5. Kiseline – visoke koncentracije kiselina (općenito kiselinski broj veći od 0,6 mg KOH/g) uzrokuju stvaranje naslaga u ulju. Naslage su produkti čvrstog oblika i složene kemijske građe koji se talože širom transformatora. Nakupljanje naslaga ozbiljno narušava funkciju hlađenja transformatora uljem, a to u konačnici rezultira većim kvarovima zbog pregrijanja sustava [7].



Slika 7: Fotografija distributivnog transformatora

Na fotografiji se može uočiti valjkasti spremnik – konzervator. Svrha konzervatora je primiti odnosno nadoknaditi volumen ulja koji fluktuiraju zbog temperaturne razlike (kao i ostala ulja, i transformatorskom ulju se volumen povećava porastom, a smanjuje snižavanjem temperature).

3.3 Metode analitike ulja

Uzorkovanje transformatorskog ulja zahtjevan je zadatak i mora ga obaviti posebno obučeno osoblje. Analiza ulja provodi se u certificiranim laboratorijima sa standardiziranom i propisanom opremom. Pravila, uvjeti i način uzorkovanja propisani su normom IEC 60475. Greške u analizi ulja, tj. nepodudaranje rezultata sa stvarnim stanjem u transformatoru gotovo

u svim slučajevima posljedica je faze uzimanja uzorka i transporta do laboratorija, a rijetko kad greškama u laboratorijskoj analizi na analitičkim uređajima.

Uzorak se uzima za vrijeme rada transformatora ili dok je on ugašen. Ako se obavlja dok je transformator u pogonu, moraju biti poduzete najstrože mjere opreza. Jednako tako, osim rutinskih kontrola u propisanim intervalima, analiza ulja mora se izvršiti prije i poslije zamjene bilo kojeg regulacijskog sustava u transformatoru. Preporučuje se izvađeni uzorak transportirati u staklenim bocama s navojnim čepom. Primjerice, čep nikako ne smije biti od gume da se ne bi čestice gume pojavile u ulju. Preporuka je da čep bude pluteni ili od aluminija. Zatim, uvjeti pri kojima se uzorak ulja vadi iz transformatora trebaju biti slični. Potrebno je voditi evidenciju koja sadržava temperaturu i vlažnost zraka te opterećenje transformatora (ako se uzorkuje transformator u radu). Uzrokovanje se ne smije vršiti ako pada kiša ili vlažnost zraka prelazi 70 %, iz razloga što je potrebno da uvjeti u okolišu prilikom uzorkovanja budu što približniji onima koji su osigurani u laboratoriju. Najmjerodavnija slika koju ulje može dati se dobije uzimanjem uzorka iz slavine na dnu spremnika ulja. Obično je takva slavina konstrukcijski predviđena za uzimanje dijagnostičkih uzoraka [1].

Slijedi pregled i opis najvažnijih testova i metoda u području fizikalno-kemijske dijagnostike transformatorskih ulja.

3.3.1. Analiza plinova otopljenih u ulju

Kao što sam naziv kaže, (eng. Dissolved gas analysis – DGA – IEC 567) DGA test zasniva se na kromatografskoj analizi vrste i količine otopljenih plinova u uzorku ulja. Ova metoda je daleko najrazvijenija i na najpouzdaniji način daje uvid u stanje transformatora. Rezultati analize se u principu mogu podijeliti na: upozorenja za mogući razvitak kvara, znak da je potrebno poduzeti neku vrstu intervencije ili dijagnosticiranje stadija do kojeg je kvar napredovao. Ako se dogodi da u transformatoru dođe do naglog oslobađanja velike količine plinova, dolazi do aktivacije Bucholtzovog releja. Releji su sklopni aparati koji se koriste u elektrotehnici. Automatskim

otvaranjem ili zatvaranjem svojih kontakata pod utjecajem neke fizičke veličine služe kao svojesvrni osigurači [53]. Bucholtzov relej se aktivira slobodnim plinovima. Točnije, kada dođe do kvara u transformatoru, temperatura ulja poraste. Ulje isparava i oslobađaju se plinovi koji se ne mogu trenutno otopiti u ulju. Količina i vrsta plinova ovise o vrsti kvara, no kad koncentracija dosegne graničnu vrijednost koja je određena relejom, on se aktivira i šalje upozorenju osoblju (nadzornom centru).

Zbog norme i same osjetljivosti analize, potrebna je posebna pozornost pri uzorkovanju ulja. Neke od specifičnosti uzorkovanja za DGA analizu su:

- u spremniku transformatora iznad razine ulja uvijek postoji dodatni prostor. U tom prostoru nalazi se zrak ili mješavina zraka i plinova koji nisu topivi u ulju. U pravilu se plinovi iz tog područja ne uzimaju za analizu. No ako je došlo do kvara koji nikako nije bio predviđen, potrebno je analizirati i te plinove
- ako se kvar dogodio nakon oslobađanja velike količine plinova tj. došlo je do aktivacije Bucholtzovog releja, treba pričekati nekoliko sati s uzimanjem uzorka – da se plinovi stignu otopiti i pravilno rasporediti po raspoloživom volumenu [25]
- boca za transport ulja do laboratorija mora biti ispunjena maksimalno tj. što je više moguće transformatorskim uljem bez slobodnog prostora na vrhu posude za uzorkovanje – atmosferski zrak koji popuni ostatak dostupnog volumena reagira s uljem i tako promjeni sliku stanja transformatora.

Općenito, plinovi otopljeni u ulju mogu biti podijeljeni u dvije skupine: plinovi zbog starenja ulja odnosno oksidacije (kisik, dušik, ugljikov dioksid, ugljikov monoksid) i plinove uzrokovane nekom vrstom poremećaja (vodik, metan, etan, etilen, acetilen). Valja napomenuti da granica između vrste kvara, proizvedene količine plina i vremenskog trajanja radnog vijeka transformatora nije fiksna. Interpretaciju rezultata i konačnu dijagnozu trebaju dati stručnjaci za koje je poželjno da imaju što više iskustva u radu s DGA metodom [31].

Tablica 2: Rasponi koncentracija plinova u mjernoj jedinici ppm (IEEE) [33]

Plin	Normalna koncentracija	Povišena koncentracija	Abnormalna koncentracija
Vodik H ₂	< 100	100 - 700	< 700

Kisik O ₂	Kako je dobiveno mjerenjem	Kako je dobiveno mjerenjem	Kako je dobiveno mjerenjem
Dušik N ₂	Kako je dobiveno mjerenjem	Kako je dobiveno mjerenjem	Kako je dobiveno mjerenjem
Metan CH ₂	< 12	120 – 400	< 400
Ugljikov monoksid CO	< 350	350 – 500	< 570
Ugljikov dioksid CO ₂	< 2500	2500 – 4000	< 4000
Etilen C ₂ H ₄	< 15	15 – 100	< 100
Etan C ₂ H ₆	< 35	35 – 100	< 100
Acetilen C ₂ H ₂	< 0	0 – 50	< 50

3.3.1.1. Identifikacija kvara

Kao što je već napisano, svaka vrsta kvara ostavi sebi svojstven otisak u ulju glede strukturne promjene. DGA metoda detektira sljedeće:

- Električno izbijanje (parcijalno pražnjenje) – odvija se pri uobičajenim radnim temperaturama. Dominantni plin koji se proizvodi je vodik (H₂). Vodik ima malu molekulsku masu i hlapljiv je. Lako se ionizira, pa zbog toga dolazi do ponovnih pražnjenja. Točnije na aktivnim dijelovima transformatora, gdje su vodiči savijeni pod oštrim kutem dolazi do pojave korone, a ulju se povećava vlaga i kiselinasti broj. Što je napon transformatora veći, veći je rizik od električnog izbijanja
- Niskotemperaturna toplinska degradacija – odvija se u temperaturnom intervalu od 150 °C do 300 °C. Plin svojstven ovoj pojavi je etan (C₂H₆). Nastaje na mjestima povišene temperature koja su lokalizirana na aktivnim dijelovima transformatora. Etan bude proizveden u tankom sloju ulja koji okružuje mjesto povišene temperature. Pogoršavanju situacije doprinose vibracije i pojačano opterećenje zbog loše izvedenog spoja namota sa strujnim krugovima transformatora
- Visokotemperaturna toplinska degradacija – obuhvaća temperaturni interval od 300°C do 700 °C. Dominantno se proizvodi etilen (C₂H₄), popraćen s metanom (CH₄) i etanom (C₂H₆). Točke s kritičnom temperaturom se i dalje nalaze na aktivnom djelu transformatora tj. visokotemperaturna degradacija se tumači kao uznapredovala

niskotemperaturna degradacija. Ako se koncentracija ugljikovog monoksida (CO) kreće između 500 – 700 mg/L, onda je kritična točka smještena u blizini papirnatog dijela izolacije. Ako je koncentracija ugljikovog monoksida (CO) općenito veća od koncentracije ugljikovog dioksida (CO₂), onda je problem lokaliziran u navojima. Druga situacija je u principu kratki spoj, teško se popravlja i ako se transformator ne izuzme iz pogona na vrijeme dolazi do uništenja transformatora

- Visokoenergetsko električno pražnjenje – obuhvaća temperaturni interval od 800 °C – 1200 °C. Karakterizirano je proizvodnjom acetilena (C₂H₂). Dakako, mjesto povišene temperature nalazi se na aktivnom djelu transformatora, ali točno područje nije moguće specificirati. U slučaju pojave visokoenergetskog pražnjenja tj. električnog luka, trenutno dolazi do kvara transformatora. To znači da ne postoji vremenski period u kojem je moguće pratiti razvitak koncentracije acetilena. Ukoliko se u uzorku nađe i najmanji trag odnosno svega nekoliko čestica acetilena, potrebno je žurno intervenirati [33].

3.3.2. Sadržaj vlage

Sadržaj vlage određuje se metodom IEC 60814. Voda je jako štetna po svu elektroenergetsku opremu čak i u najmanjim količinama. Neovisno o mjestu pojave uvijek biva privučena na mjesta gdje su najveća električna naprezanja. A upravo ta mjesta predstavljaju mjesta najveće opasnosti. Voda ubrzava procese propadanja i ulja i papirnatog dijela izolacije. Jednom kad na papirnatoj izolaciji započne proces degradacije odnosno gubljenja mehaničkih svojstava, nikad više ne može biti vraćena u prvotno stanje.

Vlaga se u transformatoru može pojaviti na dva načina:

- 1) Atmosferskim putem – Prvi način: pomoću odzračnika. Odzračnici su smješteni na dodatnom dijelu spremnika u kojem se nalazi ulje transformatora. Kako se ulje grije prilikom rada, tako mu se volumen širi i po potrebi ulazi/izlazi u dodani dio. Dodatni dio je odzračnikom spojen s atmosferom radi postizanja ravnoteže tlaka. Može se

dogoditi da odzračnik, koji je većinom punjen silikagelom (amorfni silicijev dioksid) koji inače apsorbira vlagu [30], u slučaju zasićenja propusti vodu u transformator. Drugi način: propuštanjem uslijed pukotina, raznih oštećenja, lošeg brtvljenja i sl.

- 2) Iz unutarnjih izvora – svi procesi degradacije ulja i papirnate izolacije oslobađaju vodu, a posebice se ističe proces oksidacije i izloženost povišenim temperaturama.

Analiza sadržaja vlage, kada je vlaga prisutna u relativno malim koncentracijama, obavlja se metodom Karl Fischer Moisture Test. Ovaj test se provodi tako da se kapljica ulja postavi u uređaj koji mjeri koncentraciju vlage u ulju, a rezultat se vrjednuje mjernom jedinicom mg/L (ppm). Test ne mjeri vlažnost u papirnatj izolaciji.

3.3.3. Test dielektrične snage

Test (IEC 60156) se vrši tako da se dvije elektrode kontroliranog iznosa izmjeničnog napona urone u ulje. Elektrode moraju međusobno biti razmaknute propisanom udaljenosti. Kada se pojavi električni luk, dielektrična snaga je savladana.

Voda, sve vrste naslaga i vodljivih čestica smanjuju dielektričnu snagu izolacijskog ulja. U slučaju da su sva tri nabrojana faktora prisutna u ulju, dielektrična čvrstoća bit će izrazito smanjena. Čisto i „suho“ ulje samo po sebi ima visoku dielektričnu čvrstoću, no to ne mora nužno značiti odsutnost kontaminanata svih vrsta. Test nije dovoljno osjetljiv pa se ova pojava događa jer koncentracija čestica nije dovoljno velika da ostavi ikakav utjecaj.

3.3.4. Test za mjerenje površinske napetosti

Ovaj test (engl. Interfacial Tension - ASTM D971) je jako osjetljiv na prisutnost naslaga i polarnih onečišćenja čije porijeklo potiče od papirnate izolacije. Ukoliko se rezultati testa kreću u vrijednosti od 0,04 – 0,05 N/m, ulje je u dobrom stanju. Produkti oksidacije snižavaju površinsku napetost. Kritična vrijednost iznosi 0,018 N/m. Ako su rezultati još niži od te vrijednosti, potrebno je hitno zaustaviti rad transformatora.

3.3.5. Test za mjerenje neutralizacijskog (kiselinskog) broja

Metoda se vodi po nazivom ASTM D974 (eng. Neutralization number). Podrijetlo kiselina u ulju dolazi od oksidacijskih i degradacijskih procesa, no mogu dospjeti i atmosferskim putem u ulje. Organske kiseline su štetne za izolacijski sistem i glavni su pokretač korozije unutar transformatora, poglavito ako je prisutna i voda. Neizbježna popratna pojava porasta kiselosti je stvaranje naslaga u transformatoru. Neutralizacijski broj mjeri se titracijom. Kao što je napomenuto u poglavlju 2.1.4.2., maksimalna dopuštena vrijednost neutralizacijskog broja iznosi 0,03 mg KOH/g. Jednom kad ova vrijednost bude dosegnuta, kiselinski broj nastavi rapidno rasti.

Veza između neutralizacijskog broja i površinske napetosti

Istraživanja su pokazala da postoji veza između neutralizacijskog broja i površinske napetosti. Povećanje neutralizacijskog broja praćeno je padom vrijednosti površinske napetosti. Test površinske napetosti prilično je moćan alat za određivanje efektivnosti izvršavanja dvaju osnovnih zadaća transformatorskog ulja i dijagnostiku preostalog radnog vijeka do trenutka kada je potrebno poduzeti mjere za saniranje nakupljenih naslaga. Provođenje jednog testa odlična je provjera za provjeru rezultata drugog testa i obrnuto. Ako vrijednosti testa površinske napetosti nisu popraćene odgovarajućim rezultatima neutralizacijskog broja, onda to treba biti tumačeno kao indikator polarnih onečišćenja koja ne dolaze od uobičajenih procesa oksidacije.

3.3.6. Indeks kvalitete ulja (eng. Oil Quality Index, Myers Index Number)

Vrijednost indeksa kvalitete ulja dobije se dijeljenjem vrijednosti površinske napetosti s neutralizacijskim brojem. Ova metoda se ne ubraja u klasične testove ulja jer je matematičke prirode, ali daje izvrsnu vezu između neutralizacijskog broja, površinske napetosti i izgleda ulja. Razredi kvalitete ulja su sljedeći:

Tablica 3: Razredi kvalitete ulja [31]

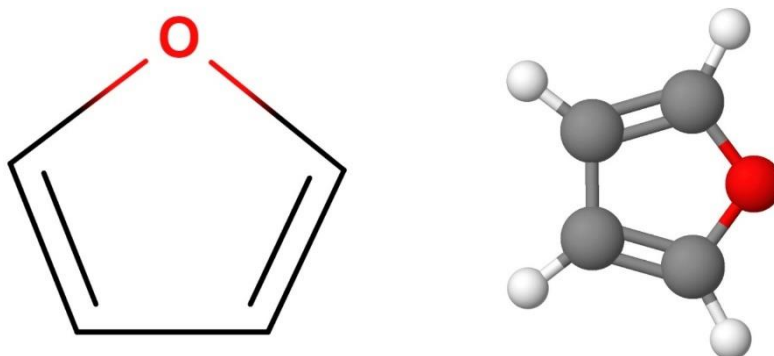
Kategorija ulja	NN	IFT	Boja	OQIN
Dobro ulje	0,0 – 0,1	30,0-45,0	Blijedo žuta	300 - 1500
Ulje prihvatljivo za rad	0,05 – 0,1	2,1 – 29,9	žuta	271 - 600
Ulje marginalne kvalitete	0,11 – 0,15	24,0 – 27,0	Svijetlo žuta	160 - 318
Ulje loše kvalitete	0,16 – 0,40	18,0 – 23,9	Jantarna	45 - 159
Jako loša ulja	0,41 – 0,65	14,0 – 17,9	Smeđa	22 - 44
Iznimno loša ulja	0,66 – 1,50	9,0 – 13,9	Tamno smeđa	6 - 21
Neupotrebljivo ulje	1,51 i više	-	Crna	-

3.3.7. Test faktora disipacije

Test (IEC 247) faktora disipacije pripada preventivnom odnosno rutinskom djelu dijagnostike. Mjeri se količina struje koja se rasipa kroz ulje i tako stvara gubitke. Disipaciju može uzrokovati mnogo faktora koji su dospjeli iz vanjskog okoliša u ulje ili su posljedica unutarnjih procesa. Test je općenit odnosno „grub“. Služi za opću detekciju onečišćenja, tako da nije specificirana niti jedna stavka koja bi se trebala mjeriti ovim testom [31].

3.3.8. Analiza furana

Ovim testom mjeri se prisutnost furana u ulju. Furan je skraćeni naziv od punog naziva furfuran, a predstavlja peteročlani heterociklički spoj C_4H_4O . Furan je bezbojan i posjeduje aromatska svojstva [32]. U transformatorskom mogu nastati jedino ako se odvija proces razgradnje celuloze s papirnate izolacije. Analiza furana provodi se visokoučinskom tekućinskom kromatografijom - HPLC [25].



Slika 8: Simbolični i 3D prikaz molekule furana C_4H_4O

3.3.9. Analiza polikloriranih bifenila (PCB) (eng. Polychlorinated Biphenyls)

PCB-ovi su sintetski organski spojevi, bazirani na ugljiku, vodiku i kloru. Bit će detaljnije opisani u poglavlju 5.1.1., a u ovom odlomku će biti sagledani s aspekta dijagnostike. Metoda kojom se PCB spojevi analiziraju je ASTM D409. Metoda je vrsta kromatografske analize koja detektira skupine klora po kojima međusobno razlikuju vrste PCB molekula. Komplikirana je za izvođenje, jer jednom kad prepoznata molekula klora (jednostavniji dio analize), potrebno je dosta pažnje da se ustanovi u kojem broju i kakvoj kombinaciji atomi molekule stoje međusobno (poznato je cca. 200-tinjak PCB-spojeva). Kako će biti napisano, PCB spojevi su izašli iz upotrebe u proizvodnji novih transformatorskih ulja zbog izrazito negativnog utjecaja na okoliš [31].

Tablica 4: Usporedba toksičnosti PCB-ova sa sličnim kapljevina [31]

Smrtna doza (količina koja usmrti 50% testiranih organizama)	g/kg
PCB	8,7
Trikloretilen	5,2

Aceton	9,8
Metanol	12,9

3.3.10. Ostale dijagnostičke metode

Neke od ostalih dijagnostičkih metoda su:

- Metoda otopljenih metala [33]
- Analiza spoja poliklorbifenil [31]
- Test utvrđivanja čestica u ulju [25]
- Mjerenje viskoznosti [35].

3.4. Prevladavanje uvjeta koji utječu na degradaciju

Uvjete koji potpomažu degradaciju ulja nikada nije moguće ukloniti do kraja. Moguće je pratiti određene parametre koji daju informacije o stupnju degradacije, kontrolirati ih i do određene mjere ograničiti takve uvjete. Za postizanje optimalnosti u radnom vijeku ulja, pa tako i transformatora, potrebno je primijeniti cijeli niz kombinacije znanja, iskustva i vještina. Prva točka gdje je moguće utjecati na parametre degradacije ulja nalazi se u završnoj fazi proizvodnog procesa. To je faza dodavanja aditiva (aditivi su detaljno obrađeni u odlomku 2.3.). Sljedeća točka u biti predstavlja valjani nadzor, pregled i uklanjanje uzroka degradacije ulja. Npr. ako je uzrok povećanja vlage u ulju propuštanjem na odzračniku, zamjenom odzračnika uklanja se izvor tog uvjeta degradacije. Treća, a ujedno i zadnja točka kojom je moguće prevladati nepoželjne uvjete su procesi regeneracije ulja. Regeneracijom ulja moguće je ukloniti veliki dio neželjenih produkata, nakupina i čestica. Proces regeneracije detaljno su obrađeni odlomkom 5.4.

4. LEGISLATIVA

Legislativa ili zakonodavstvo je djelatnost kojom država donosi i formulira zakone [42]. Ovisno o uređenosti zakona jedne države, moguće je donijeti zaključke o stanju u njoj. Tako visokorazvijene države imaju do kraja definirane i efikasne zakone, dok su u nerazvijenim državama zakoni manjkavi, često nedorečeni i ponekad na štetu građana. Kako je svaki segment društva pokriven određenim djelom zakona, tako nisu izostavljena niti transformatorska ulja.

Ne postoji zakon koji se striktno bavi transformatorskim uljima. Općenito, da bi neko transformatorsko ulje postalo legalno i upotrebivo na valjan način, mora udovoljiti zakonskim, normativnim i strukovnim zahtjevima. Tako se transformatorsko ulje promatra iz više propisa npr. zaštite okoliša, vrste i odlaganja otpada i dr. [37].

4.1. Zakoni i norme

Prema definiciji, zakon je svaki opći pravni akt što ga donese zakonodavno tijelo, prema propisanom zakonodavnom postupku, te nosi naziv zakona bez obzira na sadržaj [43]. Prema pravnoj hijerarhiji propisa, na najvišem mjestu je ustav, ispod ustava zakon, a ispod zakona se nalaze upravni (podzakonski) akti (pravilnici, uredbе). Postoje različite vrste zakona, a neki od njih su: ustavni, organski (donosi se kvalificiranom većinom), obični, proračun itd. Donošenje zakona nije lakomislена odluka, nego je postupak uređen ustavom i poslovnikom predstavničkog tijela. Naziva se zakonodavni postupak.

Norme postoje u svim znanostima, a posebno su bitne za tehnička područja. Norma je sporazumno ustanovljen dokument i, ako nije drugačije propisano, ne predstavlja zakonsku obavezu. Odobravaju ih mjerodavna tijela, koja za opću uporabu daju pravila, upute i značajke djelovanja, te time daju najviši stupanj opće usklađenosti za dane uvjete. Ciljevi normizacije su mnogobrojni: povećanje razine sigurnosti proizvoda i procesa, čuvanje zdravlja i života ljudi, zaštita okoliša, promicanje kvalitete proizvoda, procesa i usluga, poboljšanje proizvodne učinkovitosti, osiguranje popravljivosti i zamjenjivosti, otklanjanje tehničkih zapreka i sl. Što se tiče tehničke primjene, normiraju se proizvodi, postupci i usluge. Primjerice svaka od

prethodno navedenih metoda za dijagnostiku transformatorskih ulja je normirana. Prema tijelima koja su donijela normu i područjima primjene razlikuju se međunarodne norme (ISO), europske norme (EN) i nacionalne norme [45].

U RH nacionalna norma zove se Hrvatska norma, a njen zakonom zaštićen naziv i znak je HRN. Da bi neka norma postala hrvatska nacionalna norma, mora ju prihvatiti hrvatsko nacionalno normirno tijelo, odnosno Hrvatski zavod za norme. [46]

4.2. Regulatorna transformatorskih ulja u RH

Kao što je prethodno napisano, transformatorska ulja podliježu zakonima i normama iz više različitih aspekata. Slijedi prikaz i opis najbitnijih zakona i pravilnika vezanih za transformator i transformatorsko ulje propisanih od strane nacionalnog zakonodavstva. Korisno je napomenuti da su Narodne novine službeni list Republike Hrvatske u kojem se izdaju i tiskaju izglasani zakoni. Tako se uz naziv zakon uvijek upisuje skraćenica NN (oznaka za Narodne Novine), te broj izdanja lista odvojen od godine izdavanja kosom crtom (npr. list broj 65 u godini 2020 se piše 065/2020) [51].

Sam transformator je uređaj s vrlo bitno funkcijom i velikim potencijalom za utjecaj na okolinu i život zajednice. Tako već u fazi projektiranja istog, treba voditi računa o sljedećim zakonima:

- Zakon o prostornom uređenju (NN 153/2013)
- Zakon o zaštiti na radu (NN 071/2014)
- Zakon o zaštiti od požara (NN 092/2010)
- Zakon o zaštiti od buke (NN 030/2009)
- Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja (NN 091/2010)

Transformatorska ulja imaju veliki potencijal prema okolišu i ljudskom zdravlju. Svako postrojenje (ili fizička/pravna osoba) odgovorno je za navedene utjecaje. Stoga je obvezno postupati u skladu s propisima kako bi se izbjegle opasnosti. Zakoni i pravilnici koji određuju uređuju te odnose su sljedeći:

- Zakon o zaštiti okoliša (NN 080/2013) – ovim zakonom pokrivaju se pitanja zaštite okoliša radi očuvanja okoliša, smanjivanje rizika za život i zdravlje ljudi, očuvanje prirodnih zajednica, racionalno korištenje prirodnih izvora i energije [47]
- Pravilnik o gospodarenju otpadnih ulja (NN 124/2006) – propisuje postupanje s otpadom koji je odbačen ili odložen, koji se namjerava ili mora odložiti. Otpad se razvrstava ovisno o svojstvima i mjestu nastanka [48]
- Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (NN 114/2015) – ovim pravilnikom se definira vrsta otpada, ispitivanje fizikalno-kemijskih svojstava otpada, uzorkovanje, obrazac izvješća o otpadnom ulju (Katalog otpada) [49]

4.3. Međunarodna komisija za elektrotehniku

Međunarodna komisija za elektrotehniku (eng. International Electrotechnical Commission) je međunarodna organizacija za pripremu i objavljivanje normi u području elektrotehnike, elektronike i s njima povezanih područja [51]. Organizacija stvaranjem normi olakšava komunikaciju i sporazumijevanje elektro struči diljem svijeta, a time doprinosi i lakšoj trgovačkoj razmjeni elektro dobara. Prema ovom, međunarodnom normnom tijelu i njegovim normama, usklađuju se regionalne i nacionalne norme. Za ovaj završni rad, posebno je zanimljivo izdanje koje propisuje norme za sve fluide koji su primijenjeni u elektrotehnici, točnije dio koji se odnosi na nekorištena (nova) izolacijska ulja za transformatore [52]. Neke od normi, uključujući i norme od ostalih normizacijskih institucija:

1) koje su već spomenute i opisane u prethodnim odlomcima:

- IEC 567 – DGA metoda (3.3.1.)
- IEC 60814, Sadržaj vlage (odlomek 3.3.2.)
- IEC 60156 – Test dielektrične snage (odlomek 3.3.3.)
- ASTM D971 – Test za mjerenje površinske napetosti (odlomek 3.3.4.)
- ASTM D974 – Test za mjerenje neutralizacijskog broja (odlomek 3.3.5.)
- IEC 247 – Test faktora disipacije (odlomek 3.3.7.)

2) Ostale norme:

- IEC 60422, *Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance Guidance* – Upute za nadzor i održavanje mineralnih ulja u električnoj opremi
- IEC 60475, *Method of sampling liquid dielectrics* – Metoda za uzorkovanje ulja
- IEC 61125:1992, *Unused hydrocarbon-based insulating liquids – Test methods for evaluating the oxidation stability* – Test za vrjednovanje oksidacijske stabilnosti nekorištenih mineralnih ulja
- IEC 61619, *Insulating liquids – Contamination by polychlorinated biphenyls (PCBs) – Method of determination by capillary column gas chromatography* – Mjerenje razine onečišćenja ulja PCB spojevima (kromatografska analiza)
- IEC 61868, *Mineral insulating oils – Determination of kinematic viscosity at very low Temperatures* – Određivanje kinematičke viskoznosti na niskim temperaturama
- IEC 62021-1, *Insulating liquids – Determination of acidity – Part 1: Automatic potentiometric Titration* – Određivanje kiselosti izolacijskih ulja automatskom potenciometrijskom titracijom – dio 1.
- IEC 62021-2, *Insulating liquids – Determination of acidity – Part 2: Colourimetric titration* – Određivanje kiselosti izolacijskih ulja kolorimetrijom – dio 2.
- IEC 62535:2008, *Insulating liquids – Test method for detection of potentially corrosive sulphur* – Test za detekciju potencijalnih korozivskih djelovanja pokrenutih sumporom
- ISO 3016, *Petroleum products – Determination of pour point* – Test za određivanje točke stiništa
- ISO 3675, *Crude petroleum and liquid petroleum products – Laboratory determination of Density* – Metoda za laboratorijsko određivanje gustoće sirove nafte i njenih tekućih proizvoda



International
Electrotechnical
Commission

Slika 9: Logotip Medunarodne komisije za elektrotehniku [51]

5. EKOLOŠKI UTJECAJ, REGENERACIJA I ODLAGANJE OTPADNOG ULJA

Visoka razina onečišćenja okoliša u svjetskim razmjerima potakla je i pokrenula mnogobrojne promjene u svakom segmentu ljudske djelatnosti. Tako su s ekološkog aspekta sagledana i transformatorska ulja. Da bi se osiguralo pouzdano rukovanje, korištenje i skladištenje kao i bezopasno odlaganje i uništavanje otpadnih izolacijskih kapljevina, potrebno je vrlo dobro poznavati njihova svojstva. Korektnije iskazano – bolje razumijevanje toksičko-ekoloških karakteristika materijala osigurava bolje i kvalitetnije higijensko-tehničke mjere zaštite.

Nakon završetka radnog vijeka, transformatori se isključuju s mreže i slijedi proces njihova odlaganja. Moguće ih je sagledati iz dvije perspektive: kao beskoristan otpad ili kao vrijednu sirovinu. Iz koje god perspektive transformatori bili gledani, nepropisno odlaganje u okoliš iznimno je štetno za prirodu i za čovjeka. Tehnologija za recikliranje otpada razvija se svaki dan pa materijali koje danas nije moguće reciklirati potencijalno mogu biti reciklirani u budućnosti. Iz toga proizlazi činjenica da transformator koji izlazi iz upotrebe danas, puno manje vrijedi od onoga koji će izaći za dvadesetak godina, uz napomenu da oba imaju približno jednaku građu. Primjerice, vrijedne sirovine bez kojih nije moguće konstruirati funkcionalan transformator, a mogu biti ponovno korištene su: bakar, aluminij, ulje i čelik [4].

5.1. Klasifikacija ulja prema ekološkim kriterijima

Svako ulje ima svoje toksikološke i ekološke utjecaje, koji moraju biti nedvosmisleno određeni i istaknuti na deklaraciji tj. dokumentaciji ulja koje proizvođač/dobavljač mora osigurati. Toksikološki utjecaji određuju se praćenjem sljedećih stavki: utjecaj na organizam prilikom gutanja, aspiracije, udisanja para, kontakt s kožom i očima, izazivanje alergijskih reakcija, kancerogenost i mutagenost. Za određivanje toksikoloških utjecaja mjerodavna je medicinska struka pa se oni ovdje neće podrobnije opisivati.

Promatranje ekološkog utjecaja ulja dijeli se u dvije skupine:

- 1) utjecaj primarnih svojstava ulja kao materijala npr. u slučaju izlivanja ulja u tlo, podzemne vode i sl.
- 2) utjecaj sekundarnih pojava odnosno utjecaji prilikom normalnog pogona, uslijed povišenih temperatura ili kombinacije s drugim mogućim utjecajima iz okoline.

Djelovanje na okoliš procjenjuje se preko sljedećih stavki:

- Biorazgradivost – testom biorazgradivosti mjeri se mogućnost razgradnje ulja pomoću mikroorganizama. U pravilu, sva transformatorska ulja osim prirodnih esterskih, spadaju u kategoriju teško razgradivih materijala
- Ekotoksičnost – je mjera koja označava smrtnu dozu tvari za 50% ispitanih vodenih organizama. Mjeri se u koncentracijama reda veličina mg/L. Ako kapljevina koja se ispituje ima vrlo nisku topivost u vodi, kao što je to slučaj s transformatorskim uljima, onda se ekotoksičnost određuje kod granice topivosti
- Bioakumulativnost – se određuje bioakumulacijskim potencijalom koji je definiran koeficijentom raspodjele. Koeficijent raspodjele označava razliku između topivosti materije u masti i u vodi. Iz bioakumulativnosti se procjenjuje koliko je velika mogućnost nagomilavanja otpadne tvari u hranidbeni lanac (u tkivo organizama).
- Tlak pare u ovisnosti o temperaturi, površinska napetost, topivost u vodi itd.

Slika 10: Neki od toksikoloških i ekoloških piktograma:



a) preosjetljivost na udisanje b) opasno za vodeni okoliš c) fizikalna opasnost d) akutna toksičnost (nadražujuće) e) akutna toksičnost (udisanje, preko kože, gutanje) f) opasnost od požara g) otrov askarel h) zabranjena uporaba otvorenog plamena [55]

5.1.1. PCB spojevi

Najpoznatiji negativni utjecaj na okoliš od strane transformatorskih ulja ostavili su upravo ovi spojevi. 1920.-tih godina u SAD-u je proizvedeno transformatorsko ulje bazirano na mješavini PCB-ova. PCB spojevi su poliklorirani bifenili i predstavljaju grupu sintetskih organskih kemikalija, a sastoje se od ugljika, vodika i klora. Postoji 209 različitih PCB spojeva, široke primjene [36]. Komercijalni nazivi ovih ulja su Askarel i Piranol, pa je u praksi uvriježeno sva ovakva ulja nazivati Askarelima. PCB spojevi označili su revoluciju u proizvodnji transformatorskih ulja jer nisu lako zapaljivi i kemijski su stabilni u odnosu na prethodno korištene dielektrike. Međutim, obrnuto od zapaljivosti i kemijske stabilnosti, biorazgradivost PCB spojeva gotovo je jednaka nuli. Kada dospiju u prirodu, ostaju nepromijenjeni. Na to se nadovezuje velika štetnost po ljudsko zdravlje i faunu područja gdje je ulje odloženo. Sve to,

uključujući i porast ekološke svijesti, rezultiralo je prestankom proizvodnje svih Askarela 1977. godine, a 1979. su u SAD-u zakonom zabranjeni. Trend iz SAD-a slijedile su ostale razvijene države, čime je završena era duga 50-tak godina svih PCB transformatorskih ulja [9].

5.2. Ekološki utjecaj transformatorskih ulja tijekom ukupnog radnog vijeka

Radni vijek transformatorskog ulja sastoji se od niza manjih faza u kojima je vrlo bitno pažljivo rukovanje, kontrola, provođenje mjera zaštite i spremnost na provođenja sanacije ukoliko je to potrebno (npr. za slučaj izlivanja, isparivanja, razvijanja zapaljivih produkata i sl.) Radni vijek uključuje: transport, skladištenje, preradu, punjenje transformatora, postupke s uljem tijekom korištenja i postupke s rabljenim uljem.

- **TRANSPORT** - Prilikom transporta, koji se vrši željezničkim ili autocisternama, bačvama ili metalnim kontejnerima, potrebno je kontrolirati čistoću i brtvljenje kako ne bi došlo do onečišćenja. Kojim god se spremnikom transportiralo ulje, na njemu mora biti istaknuta oznaka koja je u skladu s važećim zakonskim obvezama. Oznaka uključuje identifikaciju i kvalitetu sadržaja. Osim pločice s oznakom, koja mora stajati istaknuta tj. na vidom mjestu, osoba zadužena za prijevoz tereta obvezna je imati dokumentaciju u kojoj se nalaze detaljni podaci o transportiranoj tvari. U slučaju izlivanja ili bilo kakvih drugih neželjenih događanja, prve intervencije za sanaciju štete i zaštitu okoliša biraju se upravo prema oznakama i dokumentaciji.
- **SKLADIŠTENJE** – ova faza je također regulirana propisima. Prostor za skladištenje mora biti hladan i dobro ventiliran, zatvoren ili natkriven, temperatura okoline ne smije biti viša od 50 °C. Svi potencijalni izvori požara moraju biti uklonjeni. Za vrijeme skladištenja, najveći negativni efekt na okoliš događa se za vrijeme požara pa će ta tema biti detaljnije opisana u odlomku 5.2.1.
- **PUNJENJE/PRAŽNENJE, PRERADA ULJA** – tijekom navedenih radnji treba obratiti pozornost na čistoću kontejnera, spremnika i samog postrojenja kako bi izbjegli onečišćenje ulja. U prostoru gdje se odvijaju ovi procesi trebaju biti poduzete mjere

zaštite tla. U slučaju izlivanja, ulje nikako ne smije završiti u kanalizaciji ili podzemnim vodama. Pod pojmom podzemne vode podrazumijevaju se podzemni slojevi tla i podzemni vodeni tokovi. Tlo se od prodora ulja štiti ugradnjom separatora u tokove otpadnih voda, izgradnjom sabirnih (uljnih) jama ispod transformatora i zaštitom tla pomoću nepropusnih materijala. Posljedično, prema skupinama koje stoje iza pojma podzemne vode, mjere protiv izlivanja ulja se dijele na one koje štite tlo i one koje štite vodu.

- **POSTUPCI S ULJEM TIJEKOM KORIŠTENJA I KONTROLE** – Pogonska kontrola ulja tijekom rada prati se na uljokazima. Potencijalnu opasnost za izlivanje ulja predstavljaju brtve ventila, poklopci, provodni izolatori, mjerna oprema i ostala pomoćna oprema. Ulje izliveno tijekom uzorkovanja tj. obavljanja kontrole (tu se podrazumijeva redovna dijagnostika i radovi na postrojenju manjeg opsega) spadaju u kategoriju otpadnog (rabljenog) ulja. Otpadno ulje odlaže se u poseban kontejner. Jednako tako krpe, papir i drugi zauljeni predmeti koji su korišteni u kontrolama, popravcima i sanacijama transformatora odlažu se u posebno predviđen kontejner za to [37].

Primjer gore više puta spomenute dokumentacije ulja bit će u nastavku prikazan na primjeru transformatorskog ulja proizvođača INA Maziva – INA Trafo ulje 296 X. Dokument se naziva sigurnosno - tehnički list, a radi bolje preglednosti bit će prikazan kroz tablicu. Dokument je napravljen sukladno Uredbi EZ br. 1907/2006.

Tablica 5: Sigurnosno - tehnički list INA Trafo ulja 296 X [54]

Sigurnosno – tehnički list INA Trafo ulja 296 X		
1. Identifikacija tvari	Naziv proizvoda	INA Trafo ulje 296 X
	Upotreba proizvoda	Za punjenje transformatora
	Podaci o dobavljaču koji isporučuje sigurnosno – tehnički list	INA Maziva d.o.o. Član INA grupe
2. Identifikacija opasnosti		Aspit. Toks. 1

	Razred (klasa) opasnosti i kod kategorije	H304 – može biti smrtonosno ako se proguta ili uđe u dišni sustav
	Oznake opasnosti	P102 – čuvati izvan dohvata djece
		P301 + P310 – ako se proguta odmah nazvati centar za kontrolu otrovanja/liječnika
		P405 – skladištiti pod ključem
3. Sastav/podaci o sastojcima	Naziv tvari	Bazno ulje - 309-877-7/ 101316-72-7
		Destilati - 265-156-6/ 64742-53-6
4. Mjere za suzbijanje požara	Sedstva za gašenje požara	Pjena, suhi prah, CO ₂
	Opasnosti koji proizlaze iz tvari/smjese	Dim, CO ₂ , CO, drugi produkti nepotpunog izgaranja
5. Mjere kod slučajnog ispuštanja	Osobne mjere opreza	Koristiti osobna zaštitna sredstva
	Mjere zaštite okoliša	Spriječiti ispuštanje u vodotokove, drenažne sustave, tlo

5.2.1. Požari

Posebno opasne za ljude i okoliš su nepredvidive poteškoće koje vode eksplozijama i požarima. Uzrok požara su najčešće kvarovi i havarije, a vrlo rijetko zbog nakupljanja para ili visokih temperatura okoline. Prvu opasnost za vrijeme požara predstavlja razvijanje ugljikovog monoksida i dioksida pa je prva mjera koja treba biti poduzeta zaštita dišnih puteva i evakuacija osoblja. Oslobođanje CO i CO₂ popraćeno je obično i razvijanjem otrovnih para. Sekundarne posljedice su zagađenje tla i lokalno zagađenje atmosfere - kvaliteta zraka bilježi

drastičan pad. Gašenje požara vodom strogo zabranjeno! Gasi se suhim prahom ili pomoću CO₂. Zbog uistinu velikih razmjera negativnih utjecaja požara, kako na ljudske živote tako i na okoliš, klasifikacija transformatorskih ulja prema ponašanju u požaru regulirana je zakonom. Procjena se vrši preko sljedećih kriterija:

- zapaljivost (plamište, temperatura zapaljenja i samozapaljenja)
- oslobađanje topline
- efektivna toplina izgaranja
- sposobnost širenja plamena
- razvoj dima

Također, pravilo je da općenito zahtjev na otpornost prema zapaljenju mora biti definiran prije proizvodnje svakog električnog uređaja [37].

5.3. Odlaganje i zbrinjavanje ulja nakon uporabe

Nakon što završe svoj radni vijek, transformatorska ulja se razvrstavaju u različite kategorije otpadnih ulja ovisno o stupnju degradacije. Otpadna kategorija ulja se određuje prema važećem pravilniku (u RH je to trenutno Pravilnik o gospodarenju otpadnim uljima NN 124/2006) i izmjene i dopune Pravilnika – NN 121/2008, 031/2009, 156/2009, 091/2011, 045/2012, 086/2013 i 095/2015). Ulja koja ne sadrže opasna onečišćenja treba regenerirati. Najčešće budu pretvorena u ulja za loženje. Ulja onečišćena PCB-ovima predstavljaju posebnu kategoriju otpada. Kao što je prije spomenuto iznimno su štetna za okoliš, a spaljivanje nije rješenje jer izgaranjem razvijaju kancerogene spojeve [37]. Iako se kategorije otpadnih ulja ponešto razlikuju ovisno o politici koja ih je propisala, moguće je razlučiti tri glavne skupine: ulja standardnih, specijalnih i opasnih stanja [35].

5.3.1. Prijevremena zamjena transformatorskog ulja

Zamjena transformatorskog ulja se vrši kada je ulje toliko kontaminirano da je bilo kakav tretman skuplji od zamjene. Primjerice, ako je ulje pretjerano ostarjelo (oksidiralo). Stanje odnosno granica se ne određuje otprilike, nego je propisana vrijednostima neutralizacijskog broja koji treba biti veći od 1 mg KOH/g, a površinska napetost niža od 10 mN/m. Prilikom zamjene ulja transformator, odnosno dio gdje se nalazi ulje, mora biti repariran u stanje što bližem onom na početku radnog vijeka. Sve nakupine i talozi moraju biti temeljito uklonjeni. Uklanjanje se vrši pomoću otapala ili manjom količinom novog ulja koje se nakon čišćenja ne ulijeva u transformator nego se tretira kao otpadno ulje. Proces zamjene transformatorskog ulja je jako rijetka pojava, a ulje koje je prijevremeno završilo svoj vijek trajanja podliježe jednakoj kategorizaciji kao ostala rashodovana tj. otpadna ulja. [8]

5.4. Regeneracija

Regeneracija ulja se provodi kada produkti degradacije onečiste ulje do određene vrijednosti ili ako je ulje u iznimno dobrom stanju nakon izmjene. Ako se regeneracija provodi za vrijeme radnog vijeka kako bi bolje obavljalo funkciju tj. radi popravljivanja fizikalnih/kemijskih/električnih svojstava, onda se naziva tretmanom ulja. Ako se ulje regenerira nakon radnog vijeka to znači da mu se vraćaju prvotna svojstva kako bi služilo početnoj namjeni. To treba razlikovati od pojma rafinacije pod kojim se podrazumijeva proces kemijsko-fizikalnog pročišćavanja nakon kojeg ulje ne služi početnoj svrsi. Primjer je pretvaranje transformatorskog ulja u loživo ulje. Metodama u nastavku moguće je ukloniti vlagu, raspršene čestice i otopljene plinove u određenim granicama i s određenim uvjetima. [8].

- 1) Sita i mreže – sita i mreže mogu biti izrađeni od metala, posebnih tkanina ili tekstila. Dio koji skuplja nečistoće izvodi se od tankih limova ili spiralno namotanih žica. Bivaju zadržane samo čestice koje imaju veću površinu od šupljina u sitima/mrežama. Ova metoda se koristi kao metoda prefiltracije, a nikako kao glavni tretman.
- 2) Filter preše – filter preša je uređaj koji se sastoji od niza ploča od poroznog papira naslonjenih na metalne potpornje. Nizovi ploča mogu biti spojeni u serije ili svi skupa

poredani u paraleli, a filtracija se provodi propuštanjem ulja okomito na ploče. Finoća filtracije ovisi o klasi poroznosti papira od kojeg su filteri napravljeni. Metoda je općenito efektivna, a to se posebno odnosi na uklanjanje vlage iz ulja. Nedostatak ovog tretmana je njegova kratkotrajnost. Primjerice, vlaga iz ulja se uklanja dok se sami filteri ne ovlaže. Kada se to dogodi, proces filtracije se mora zaustaviti, filteri se moraju čistiti i sušiti zamijeniti novima.

- 3) Filter patrone – slično filter prešama, filter patrone se sastoje od niza diskova izrađenih od papira ili tkanine. Smjer propuštanja ulja je izvana prema unutra, paralelno s površinom pojedinačnih diskova. U ovom slučaju finoća filtracije ne ovisi samo o vrsti materijala, nego i o tlaku kojim ulje protječe. Ova metoda, kao i prethodna, najviše pogoduje izdvajanju vlage, ali je ograničena s vrijednosti tlaka propuštanja ulja.

4) Pješčani filteri

Pješčani filteri su grupni naziv za filtere načinjene od usitnjenih čestica – granulacijski filtri. Koriste se samo za velike kapacitete filtriranja. Kao materijal s kojim se vrši filtracija koristi se uglavnom aktivna glinica ili slični materijali glinenog porijekla (Fullers' earth). Uklanjanje nečistoća se provodi fizikalno-kemijskim putem, pa se na ovaj način uklanjaju produkti oksidacije i uklanjaju kiseline (regulira se neutralizacijski broj).

- 5) Centrifuga – centrifugiranje je vremenski relativno kratak tretman, a koristi se za razdvajanje kapljevina različitih gustoća ili odvajanje krutih čestica od tekućine. Ako se centrifugom odvajaju dvije tekućine, najčešće je riječ o izdvajanju vlage iz ulja. Ako je cilj odvojiti krute čestice od tekućine, onda se izdvajaju krute čestice od ulja. Za potpuno razdvajanje potrebno je dodatno napraviti filtraciju.
- 6) Kolone za izdvajanje plinova/vode – Podvrgavanjem vrućih fino disperziranih slojeva ulja dovoljno niskom vakuumu, rezultira uklanjanjem vode i većine plinova otopljenih u ulju. Ova metoda je znatno ograničena vrelištem kapljevine (ulja), odnosno može se koristiti samo kod ulja koji imaju tlak pare znatno niži od tlaka pare za vodu.

Nabrojani postupci se rijetko kad koriste odvojeno. Prilikom provođenja tretmana ulja, uvijek je riječ i kombinaciji navedenih postupaka. Najčešće kombinacije su nabrojane ispod i to rastućim nizom prema efikasnosti:

- Prefiltracija + filter preša
- Prefiltracija + centrifuga
- Prefiltracija + vakuumska centrifuga
- Prefiltracija + filter patrone + kolone za izdvajanje plinova/vode [8].

6. NOVE GENERACIJE DIELEKTRIKA

Kako je briga za okoliš zajednička smjernica za konstruiranje i proizvodnju svih novih proizvoda, taj zahtjev nije izostavljen niti kod transformatorskih ulja. Mnogo prije, u pogledu postavljanja novih zahtjeva na područje dielektrika, pokretale su se inicijative iz koji su proizašli alternativni transformatorski fluidi. Tako je prvi zahtjev bio postavljen na kemijsku stabilnost i zapaljivost. Mineralna ulja zamijenjena su uljima na bazi PCB-ova. Nakon postavljanja zahtjeva vezanih za zdravlje ljudi i okoline, razvijena su ulja na bazi silicija – silikonska ulja. Silikonska ulja su pak opet nerazgradiva pa je znanost pribjegla stvaranju ulja na bazi estera koji će kao osnovno svojstvo imati dobru biološku razgradivost. U dijelu koji slijedi bit će riječ o dvama aktualnim uljima, koji s prethodnim alternativama imaju zajedničku karakteristiku da su sigurnija za rukovanje i pogone gdje se nalaze kao i ljude koji s njima rade. Međutim, još naprednija su u odnosu na prethodnike jer brinu o okolišu nakon što im prođe vijek trajanja (ulja smanjenog štetnog utjecaja na okoliš).

6.1. Nanofluidi

Nanofluidi su prvi put predstavljani javnosti 1995. godine u SAD-u. Prošlo desetljeće obilježeno je intenzivnim istraživanjem ovih dielektrika. Nanofluidi su tekućine koje u sebi sadržavaju homogeno raspršene čestice, uz to da te sitne čestice zauzimaju svega nekoliko posto masenog udjela ukupne tekućine. Kada se termin nanofluidi spominje u kontekstu s transformatorima, podrazumijeva se da taj termin označuje smjesu transformatorskog ulja i nano čestica u svrhu funkcije izoliranja i hlađenja [38].

Pažnju oko nanofluida privlače tri iznimno poželjna svojstva. Ukoliko je izolacija transformatora konstruirana od polimera, nanofluidi joj produljuju vijek trajanja. To svojstvo nije zabilježeno kod niti jednog drugog transformatorskog ulja. Sljedeće dvije karakteristike koje odlikuju nanofluide su poboljšana električna i toplinska svojstva. Poboljšanjem ovih svojstava otvara se prostor za daljnji napredak prema izgradnji visokih i ultra-visokih naponskih elektroenergetskih mreža. Inače za elektroenergetskim mrežama ove vrste potreba već odavno postoji, ali zbog fizičkih ograničenja u materijalima, izgradnja nije bila moguća.

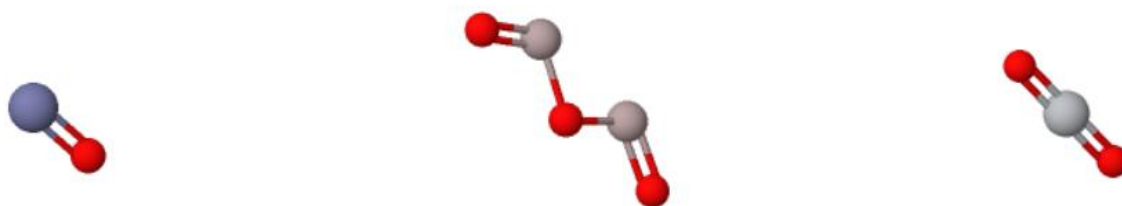
6.1.1. Nanočestice

Odabirom nanočestica određuju se ključna svojstva transformatorskog ulja. Odabir se vrši uzimajući u obzir zahtjeve koji moraju biti ispunjeni i svojstva koja pojedine čestice nude. Najčešći kriterij za odabir su vodljivost i permitivnost. Dielektrična permitivnost je fizikalna veličina koja opisuje utjecaj dielektrika na međudjelovanje električnih naboja. Ako su električni naboji točkasti i udaljenost među njima stalna, električna sila među njima obrnuto je razmjerna dielektričnoj permitivnosti [39]. Veliki broj nanočestica bio je predmet istraživanja. Djelomično istražene čestice razvrstane su po sljedećim kategorijama:

- Vodljive nanočestice: Fe_3O_4 , ZnO , i SiC
- Izolacijske nanočestice: SiO_2 i Al_2O_3
- Poluvodljive nanočestice: TiO_2 , CuO i Cu_2O .

Bitno je napomenuti da se nanofluidi sastoje od baznog ulja i raspršenih nanočestica. Kao bazna ulja koriste se mineralna ili biljna ulja.

Slika 11: 3D prikaz molekula nanočestica:



a) vodljive nanočestice ZnO

b) izolacijske nanočestice Al_2O_3

c) poluvodljive nanočestice TiO_2

6.1.2. Prednosti i nedostatci nanofluida

Prednosti nanofluida u odnosu na druge vrste transformatorskih ulja su:

- Veći probojni napon (eng. Impulse Breakdown Voltage) pogoduje za primjenu u visokonaponskim sustavima
- Kod istosmjernih transformatora, nanofluidi su puno manje osjetljivi na vlagu. Efekt toga je produljeni vijek trajanja izolacije
- Veća otpornost na parcijalna pražnjenja
- Bolja otpornost prema starenju ulja pa je pouzdanost sustava veća
- Veća toplinska vodljivost, dakle bolji efekt hlađenja.

Nedostatci:

- Stabilnost nanofluida – u teoriji nanočestice su stabilne ako su manje od 100 nm. Unatoč tako malim dimenzijama, sustav je svejedno teško održati stabilnim. Među česticama postoje sile privlačenja što uzrokuje grupiranje čestica. Problem koji se nadovezuje je sedimentacija čestica pod utjecajem sile teže jer im je gustoća veća od baznog ulja
- Prijetnja po ljudsko zdravlje – rizik udisanja nanočestica iz zraka je jako velik. Čestice se dijele u tri skupine: male (<80 nm), srednje (80-2000 nm) i velike (>2000 nm). Najveći rizik predstavlja srednja skupina jer nakon raspršenja te čestice ostaju do nekoliko tjedana u zraku. Željezovi oksidi uništavaju ljudska pluća; bakar, cink i krom uzrokuju različite disfunkcije respiratornog sustava s kancerogenim posljedicama. Nanočestice se iz respiratornog sustava lako šire po cijelom tijelu, dolaze do živčanog sustava na koji djeluju toksično. Ne prodiru lako kroz kožu, ali moguće ih je lako unijeti u probavni trakt. Ukoliko se to dogodi, upiju se u krvotok, a zatim se nakupe u jetri
- Utjecaj na okoliš: ako se nanočestice izlože okolišu, zajedno sa svojim produktima vrlo lako dospiju u atmosferu i vodu. Tako zagađuju vodu, tlo i biljni svijet. Stupanj zagađenja koji mogu uzrokovati ovisi o fazi u kojoj se čestice nalaze.
- Visoka cijena: priprema, proces i rukovanje s nanofluidima je skupo jer zahtijeva obučenos radnika i modernu aparaturu za pripremu.

6.1.3 Potencijalna aplikacija nanofluida

Transformatorska ulja temeljena na nanofluidima nude daleko bolju funkciju izoliranja i hlađenja u usporedbi s mineralnim uljima. Zbog toga su već priznati kao budući alternativni dielektrici za transformatore. Nanofluidi smanjuju temperaturu u vršnom sloju ulja i u kritičnim točkama transformatora za cca. 5 °C. Izvrsna toplinska i električna svojstva imaju za posljedicu transformatore puno manjih dimenzija od uobičajenih. Ipak, svojstva nanofluida najviše do izražaja dolaze u visokonaponskim sustavima. Kako je već rečeno, iako pružaju iznimno dobru funkcionalnost, nanofluidi mogu ozbiljno naštetiti okolišu i ljudskom zdravlju. Sve dok ta dva zahtjeva ne budu u potpunosti kontrolirana, primjena nanotehnologije ne bi trebala prijeći iz znanstvenog područja u područje konkretne primjene.

6.2. Biljna ulja iz perspektive nove tehnologije

Glavna obilježja biljnih ulja opisana su u odlomku 2.2.1. Kemijski sastav detaljno je objašnjen odlomkom 2.2.2.4. Biljna ulja su trenutno najnovija alternativa koja je u aktivnoj uporabi. Izvrsno udovoljavaju ekološkim zahtjevima i to je razlog zašto će još jednom biti obrađena u poglavlju novih dielektrika.

Svojstvo	Palmino ulje	Mineralno ulje
Gustoća na 15 °C [kg/m ³]	860	880
Kinematska viskoznost [mm ² /s]	5,06	8,13
Plamište [°C]	186	152
Stinište [°C]	- 32,5	- 45
Neutralizacijski broj (mg po KOH/g)	0,005	< 0,01
Dielektrična konstanta	2,95	2,2

Probojni napon (kV)	81	70 - 75
---------------------	----	---------

Tablica 6: Usporedba svojstava palminog i mineralnog transformatorskog ulja [41]

6.2.1. Postupak dobivanja ulja

Biljno ulje za transformatore u praksi se dobiva iz soje, palminih oraha, ricinusa, uljane repice i suncokreta. Proces prerade od biljke do ulja spremnog za transformator složeni je proces i sastoji se od niza koraka. Ekvivalentan je postupku frakcijske destilacije sirove nafte. Prvi u nizu postupaka je [41]:

- Ekstrakcija – je postupak izdvajanja ulja od biljke. Nakon ekstrakcije ulje je „grubo“ tj. dobivena je sirovina koja ide u proces daljnje prerade
- Degumiranje – ovim postupkom započinje proces rafinacije. Degumiranjem se izdvajaju fosfolipidi, CO₂, proteini i možebitni tragovi metala. Vršiti se pomoću male količine vode i separacije centrifugom
- Neutralizacija – neutralizacijom se uklanjaju masne kiseline, sumporni spojevi i biljni pigmenti. Vršiti se fosfornom kiselinom H₃PO₄
- Pranje i sušenje ulja – može se smatrati kao međukorak
- Izbjeljivanje – izbjeljivanjem se eliminira prirodna boja ulja i uklanjaju se pokretači oksidacije. Izbjeljivanje se vrši miješanjem ulja s različitim vrstama adsorbenata
- Filtracija – mediji za filtraciju ulja u ovoj fazi obrade su spojevi na bazi silicijevog dioksida SiO₂
- Dezodoracija – dezodoracijom se uklanjaju mono i digliceridi, zaostali pesticidi i svi mirisi ulja
- Obrada tzv. poliranjem – zadnji korak je tzv. poliranje ulja koji se odnosi na uklanjanje svih komponenti koje su netopive u ulju.

6.2.2. Osvrt na biljna ulja s naglaskom na ekološke benefite

Biljna ulja karakteriziraju superiornija svojstva od svih drugih konvencionalnih transformatorskih ulja baziranih na sirovoj nafti. Od tih prednosti, posebno se ističu toplinska svojstva, sigurnost od požara i umanjen štetni utjecaj na okoliš nakon završnog radnog vijeka. Sigurnost od požara podrazumijeva svojstvo samogašenja, koje otvara prostor za primjenu ne samo u transformatorima, nego i u drugoj elektrotehničkoj opremi. Biljna ulja štite papirnatu izolaciju, čime se povisuje prag maksimalno dopuštenih opterećenja. U slučaju preopterećenja, ne dolazi do drastičnog smanjenja vijeka trajanja izolacije. Ukoliko dođe do izlivanja u bilo kojoj fazi životnog vijeka ulja, saniranje posljedica iziskuje osjetno manje financijskih sredstava i vremena. Opseg zagađenja je vrlo mali, no svejedno postoji. Sva biljna ulja su razgradiva, ali nisu baš sva netoksična. Npr. u posljednje vrijeme u proizvodnji transformatorskih ulja odlično se pokazala biljka jatrofa. Jatrofa nije jestiva, blago je otrovna, otporna je na sušu. Zahtijeva minimalno održavanje, a prirodno posjeduje potrebne pesticide i fungicide. Životni vijek seže joj do pedeset godina. Jatrofa posjeduje jako povoljnu kombinaciju faktora za uzgajanje, obradu i funkcioniranje, ali nije potpun bezopasna za rukovanje i odlaganje [41].

Biorazgradivost je karakteristika koja specifično izdvaja biljna ulja od ostalih. Biorazgradivost se definira kao sposobnost razgrađivanja tvari djelovanjem mikroorganizama tj. mogućnost postupne razgradnje čvrstih i otopljenih organskih tvari u jednostavnije spojeve djelovanjem bakterija i gljivica. Biološka razgradnja može se odvijati na dva načina: aerobno i anaerobno. Aerobna biorazgradnja odvija se pomoću bakterija. Krajnji produkti su ugljikov dioksid i voda, uz ostatak biomase i oslobađanje određene količine energije. Razgradnja pomoću anaerobnih bakterija odvija se u više stupnjeva, svaki stupanj uz pomoć specifičnih mikroorganizama. [40] Različita istraživanja su pokazala da se biorazgradivost prirodnih esterskih ulja kreće u rasponu od 70 % do 100 %, ovisno o tome je li je riječ o aerobnoj ili anaerobnoj razgradnji.

Najveći nedostatak biljnih ulja je loša oksidacijska stabilnost. Međutim, taj nedostatak nije preprečio put uporabi biljnih ulja. Zahvaljujući širokoj istraženosti i razvijenosti područja aditiva, njihovim dodavanjem moguće je u velikoj mjeri poboljšati stabilnost ulja. Za popravljanje oksidacijskih svojstava dodaju se aditivi na bazi fenola, od kojih su najpoznatiji

butilirani hidrosianizol (BHA), butilhidroksitoluen (BHT) i tert – butilhidrokinon (TBHQ). Osim antioksidansa, u biljna ulja je prijeko potrebno dodati depresante za sniženje temperature staništa ukoliko se transformator ne nalazi u geografskim područjima oko ekvatora. Treba napomenuti da se produkti oksidacijskih procesa kod mineralnih i biljnih ulja ponešto razlikuju. Produkti oksidacije mineralnih ulja imaju tendenciju stvarati naslage na površinama transformatora, dok produkti oksidacije biljnih ulja ne stvaraju nikakve netopive čestice. Međutim, svejedno su problematične jer povećavaju viskoznost čime slabi sposobnost hlađenja. Isti ti produkti stvaraju efekt brtvljenja na površinama s kojima dođu u dodir. Dugi nedostatak je granica opterećenja. Biljna ulja imaju odlična svojstva i predstavljaju alternativu bez premca za primjenu u distributivnim transformatorima. Restrikcija opsega je neminovna kad je riječ o upotrebi u energetske transformatorima. Izloženost visokom naponu poništava sva bitna svojstva biljnih ulja. Kao treći nedostatak poželjno je navesti visoku cijenu biljnih ulja, zbog složenosti i skupoće procesa od sirovine do gotovog proizvoda [41].

7. ZAKLJUČAK

Iz svega do sad izloženog, evidentan je široki raspon vrsta ulja, njihovih svojstva kao i različitih transformatora gdje mogu biti primijenjena. Iz inženjerske prakse je poznato da nikad nije moguće u potpunosti zadovoljiti sve poželjne karakteristike. Odabir predstavlja optimalno rješenje tj. kompromis između više i manje ispunjenih zahtjeva koje ulja sa svojim svojstvima ispunjavaju. Jednom odabran dielektrik, neovisno o tome u kojoj mjeri zadovoljava tražene zahtjeve, nužno je pratiti i kontrolirati. A upravo to praćenje i kontrolu omogućuju različite metode dijagnostike. U slučaju detekcije bilo kakve nepravilnosti, potrebno je obaviti daljnja ispitivanja metodama koje su prikladnije za specificirani problem. Oslabljena svojstva ulja moguće je poboljšati ili povratiti nekim od tretmana regeneracije ulja. Briga o okolišu i zdravlju ljudi, osim zakona i normi, potaknula je razvoj potpuno novih dielektrika s poboljšanim starim i novim traženim svojstvima. Međutim, bilo da je riječ o zamjeni ulja, regeneraciji, metodama dijagnostike ili razvoju dielektrika nove generacije, nužno je pridržavati se važećih zakona i normi. Time se štiti okoliš i zdravlje ljudi, a zatim i produljuje vijek trajanja uređaja u kojima se već koriste. To osigurava pravilno i po život sigurno funkcioniranje elektroenergetskog sustava u cjelini. Na posljetku pravilno funkcioniranje i je svrha svega, jer se tako održavaju uvjeti života koje poznajemo i omogućuje daljnji napredak društva.

LITERATURA

1. Department of the Army TM 5-686, *Power Transformer Maintenance and Acceptance Testing*, 16 November 1998.
2. Georgilakis, Pavlos S.: *Spotlight on Modern Transformer Design*, Springer – Verlag London Limited 2009.
3. M.Del Vecchio, R., Poulin, R., T.Feghali, P., M.shah, D., Ahuja, R., *Transformer Design Principles*, CRC Press 2002.
4. ABB Group, *Transformer Handbook*, IEC Geneva 2004.
5. Dasgupta, I., *Power Transformers Quality Assurance*, New Age International (P) Ltd. 2009.
6. *Dielektrik, Dielektrična čvrstoća*, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=15003>, 2.1.2022.
7. H. Harlow, J., *Electric Power Transformer Engineering*, Taylor & Francis Group, LCC, 2012.
8. Hochart, B., *Power Transformer Handbook*, Butterworths & Co. Ltd, 1987.
9. Hart, D., *Dielectric Fluids for Transformer Cooling*, White Paper Dielectric Fluids 5-08
10. *Plamište*,
<http://struna.ihjj.hr/searchdo/?q=plami%C5%A1te&naziv=1&polje=0#container>, 3.1.2022.
11. *Stinište*, <http://struna.ihjj.hr/search-do/?q=stini%C5%A1te#container>, 3.1.2022.
12. *Površinska napetost*, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49856>, 3.1.2022.
13. *Neutralization number*, <https://www.britannica.com/technology/lubrication/Solid-lubricants#ref30080>, 3.1.2022.
14. Njombog Tante, D., Al-Liddawi, S. Y., Ssekasiko, D., *Properties of Transformer Oil that affect Efficiency*, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, 2014
15. *Električna otpornost*, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=69719>, 3.1.2022.
16. *Dielektrični gubitci*, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=15003>, 3.1.2022.

17. Trnka, P., Mentlik, V., Cerny, J., *Electronsluting Fluids – New Insulating Mixtures*, University of West Bohemia in Pilsen, Faculty of Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, 2011.
18. Fritsche, R., Rimmel, U., Trautmann, F., Schafer, M., *Prototype 420 kV Power Transformer Using Natural Ester Dielectric Fluid*, Siemens AG, TransnetBW GmbH, Germany, 2014.
19. Genga Devi, K., Ravindran, M., Senthil Kumar, S., *Analysis of Critical Parameters of Vegetable Oil as an Alternate Dielectric Fluid to Mineral Oil*, Department of EEE, National Engineering College, Kovilpatti, TamilNadu, India, 2016.
20. *Ugljikovodici*, <http://struna.ihjj.hr/naziv/ugljikovodici/2775/>, 6.1.2022.
21. Rajaković, V., Drakić, K., Pejović, V., *Komparativna analiza silikonskih i mineralnih transformatorskih ulja*, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, 2003.
22. *Poliol*, <http://struna.ihjj.hr/naziv/poliol/7095/>, 6.1.2022.
23. Ljubas, D., Dobrović, S., *Izbor i sastav hidrauličkih ulja i ulja za pneumatske sustave*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
24. *Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear*, EN 60296:2012, European Committee for Electrotechnical Standardization, 2012.
25. Gazivoda, S., Mikulecky, A., *Dijagnostika distribucijskih transformatora*, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, 2008.
26. Sun, C., Ohodnicki, P. J., Stewart, E. M., *Chemical Sensing Strategies for Real-Time Monitoring of Transformer Oil: A Review*, IEEE Sensor Journal, 2017.
27. *Električni izboji*, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=17580>, 7.1.2022.
28. Taberero Garcia, A., *Power Transformer Maintenance. Field Testing.*, Unitronics, S.A., 2015.
29. *Električni luk*, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17582>, 8.1.2022.
30. *Silikagel*, <http://struna.ihjj.hr/naziv/silikagel/34472/>, 9.1.2022.
31. Gray, I.A.R., *A Guide to Transformer Oil Analysis*.
32. *Furan*, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=20858>, 9.1.2022.
33. De Bruto, J., *Transformer Oil Management Overview*, Saftronics 2014.

34. Mazzaro, M., De Bartolomeo, D., Pompili, M., Calcara, L., Rebolini, M., Valant, A., Scatiggio, F., *Power Transformer Fire and Environmental Risk Reduction by Using Natural Esters*, 19th International Conference on Dielectric Liquids, UK, 2007.
35. IEEE Power Engineering Society, *IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA, 2007.
36. PCB, <https://www.bioinstitut.hr/blog/kemija/poliklorirani-bifenili-pcb-97/>, 10.1.2022.
37. Musulin, B., *Ekološki aspekti korištenja i odlaganja transformatorskih ulja*, Hrvatski komitet međunarodne konferencije za velike električne sisteme, Cavtat, 1999.
38. Rafiq, M., Lv, Y., Li, C., *A Review on Properties, Opportunities, and Challenges Of Transformer Oil-Based Nanofluids*, Hindawi Publishing Corporation, 2016.
39. Dielektrična permitivnost, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=15002>, 11.1.2022.
40. Biorazgradivost, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=7797>, 11.1.2022.
41. Prasad Chavidi, V., Gnanasekaran, D., *Vegetable Oil based Bio-lubricants and Transformer Fluids, Application in Power Plants*, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018.
42. Zakonodavstvo, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=66766>, 2.2.2022.
43. Zakon, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=66760>, 2.2.2022.
44. Zakonodavni postupak, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=66765>, 2.2.2022.
45. Norma, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=44095>, 2.2.2022.
46. Hrvatski zavod za norme, <https://www.hzn.hr/default.aspx?id=6>, 2.2.2022.
47. Zakon o zaštiti okoliša, <https://sredisnjikatalogrh.gov.hr/>, 2.2.2022.
48. Pravilnik o gospodarenju otpadnim uljima, <https://sredisnjikatalogrh.gov.hr/>, 2.2.2022.
49. Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada, <https://sredisnjikatalogrh.gov.hr/>, 2.2.2022.
50. Narodne novine, <https://www.nn.hr/hr/o-nama/>, 2.2.2022.
51. International Electrotechnical Commission, <https://iec.ch/what-we-do>, 2.2.2022.
52. *Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformer and switchgears*, International Standard IEC, 02.2012.

-
53. *Sklopni aparati, relej*, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=56453>, 8.2.2022.
54. *Sigurnosno – tehnički list INA Trafo ulje 296 X*, INA Maziva d.o.o., 7.2.2017.
55. *Zavod za istraživanje i razvoj sigurnosti*, <http://www.zirs.hr/znakovi-sigurnosti.aspx?category=71>, 17.9.2022