

Razvoj energetskih distribucijskih transformatora

Blažević, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:437804>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

Razvoj energetske distribucijske transformatora

Diplomski rad

Nikola Blažević

Osijek, 2021.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMATIČKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 20.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Ime i prezime studenta:	Nikola Blažević
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1215, 08.10.2019.
OIB studenta:	77759104781
Mentor:	Prof.dr.sc. Marinko Stojkov
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Prof.dr.sc. Damir Štjivac
Član Povjerenstva 1:	Prof.dr.sc. Marinko Stojkov
Član Povjerenstva 2:	Izv. prof. dr. sc. Danijel Topić
Naslov diplomskog rada:	Razvoj energetske distribucijske transformatora
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Obraditi početne (prve) karakteristike i konstrukcije transformatora (električne i mehaničke); Razvojni koraci s pojavom novih tehničkih rješenja kroz razvoj distribucijskih transformatora; Opisati dosadašnja tehnička rješenja i nove energetske učinkovite energetske transformatore. Detaljno usporediti sve tehničke parametre transformatora, dimenzije, masu, gubitke itd... Tema rezervirana za studenta Nikolu Blaževića.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	20.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 26.09.2021.

Ime i prezime studenta:

Nikola Blažević

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1215, 06.10.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

19%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Razvoj energetskih distribucijskih transformatora**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Marinko Stojkov

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada	1
2. Početne karakteristike i konstrukcije transformatora	2
2.1. Idealni transformator u praznom hodu	3
2.2. Nadomjesna shema transformatora	5
2.3. Konstrukcija transformatora.....	8
2.3.1. Aktivni dijelovi.....	9
2.3.2. Pasivni dijelovi	10
2.4. Kvarovi i zaštita transformatora	12
2.4.1. Kvarovi	12
2.4.2. Buchholzova zaštita transformatora.....	13
2.4.3. Diferencijalna zaštita transformatora.....	15
2.5. Grupe spojeva transformatora	17
2.6. Natpisna pločica transformatora	18
3. Vrste transformatora	20
3.1. Vrste transformatora s obzirom na primjenu	20
3.1.1. Energetski transformator	20
3.1.2. Autotransformatori	22
3.1.3. Naponski i strujni mjerni transformatori	27
3.2. Vrste transformatora s obzirom na hlađenje	29
3.2.1. Uljni transformatori	29
3.2.2. Suhi transformator	32
4. Gubici u transformatoru	34
4.1. Gubici praznog hoda transformatora	34
4.2. Gubici kratkog spoja transformatora	36
5. Tehnička rješenja transformatora.....	38
6. Zaključak	44
LITERATURA	45

SAŽETAK.....	47
ABSTRACT	47
ŽIVOTOPIS.....	48

1. UVOD

Kroz povijest transformator je uvijek bio jedan od najvažnijih dijelova elektroenergetskog sustava. Industrijalizacijom društva, pojavila se sve veća potreba za električnom energijom. Kako bi se električna energija uspješno prenosila i distribuirala do potrošača, bilo je potrebno razviti transformatore sa što manjim gubicima. Stoga je potrebna stalna potražnja za novim tehnološkim rješenjima za poboljšanje učinkovitosti, smanjenje gubitaka, te smanjenje štetnog utjecaja na okoliš. Rad je pisan tako da su u drugom poglavlju obrađene početne karakteristike i konstrukcije transformatora. Razmatran je slučaj idealnog transformatora u praznom hodu, te je dan vektorski dijagram idealnog transformatora. Nadalje, napravljen je prikaz nadomjesne sheme transformatora koja je ključna za lakše izvođenje proračuna te analizu. Kod konstrukcije transformatora dane su dvije vrste dijelova transformatora, aktivni i pasivni dijelovi. Spomenuti su mogući kvarovi transformatora, te su opisane zaštite od spomenutih kvarova. U trećem poglavlju dane su vrste transformatora s obzirom na primjenu te s obzirom na način hlađenja. Nadalje, kao parametri kod kojih se mogu ostvariti poboljšanja rada transformatora navedeni su gubici praznog hoda te gubici kratkog spoja transformatora. Za kraj rada navedena su nova tehnička rješenja transformatora. Spomenuta tehnička rješenja osim što uzimaju u obzir tehničke parametre transformatora (gubitke, učinkovitost, dimenzije te masu), uzimaju u obzir i utjecaj rada transformatora na okoliš.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak ovog diplomskog rada je obraditi početne (prve) karakteristike te električne i mehaničke konstrukcije transformatora. Nadalje, cilj ovog rada je obraditi razvojne korake s pojavom novih tehničkih rješenja kroz razvoj distribucijskih transformatora. Također, u ovome radu će se opisati dosadašnja tehnička rješenja i novi energetske učinkoviti transformatori. Osim toga, u radu će se usporediti tehnički parametri transformatora, dimenzije, masa i gubici.

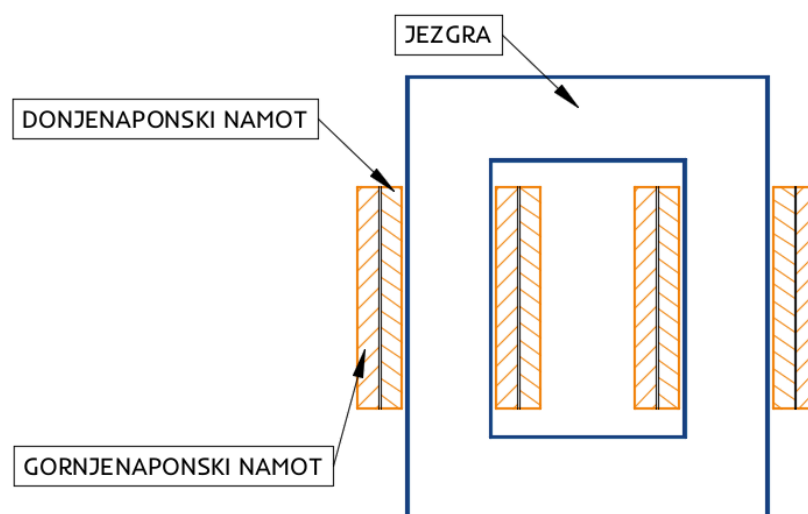
2. Početne karakteristike i konstrukcije transformatora

Transformator je statički elektromagnetski uređaj koji se koristi za prijenos i pretvorbu električne energije. Naime, električna energija prenosi se iz jednog ili više izmjeničnih krugova koji napajaju primarne namote transformatora, preko magnetskog toka u jezgri do jednog ili više izmjeničnih krugova. Navedeni izmjenični krugovi napajaju se sekundarnim namotom transformatora uz promijenjene vrijednosti struje i napona, ali uz nepromijenjenu vrijednost frekvencije. Svaki transformator sastoji se od jezgre, visokonaponskog i niskonaponskog odnosno primarnog i sekundarnog namota. To sve zajedno predstavlja aktivni dio transformatora, za razliku od konstruktivnog i izolacijskog dijela transformatora koji ne služi direktno za pretvorbu električne energije. Prve transformatore počela je graditi tvrtka GANZ u Budimpešti poslije 1880. godine. Izvedba transformatora tada bila je jednofazna s jezgrom u obliku prstena koji je izrađen iz željezne žice pa se može smatrati kao kolut željezne žice [1, 2]. U daljnjem razvoju transformatora prešlo se na klasični oblik gradnje u dvije izvedbe:

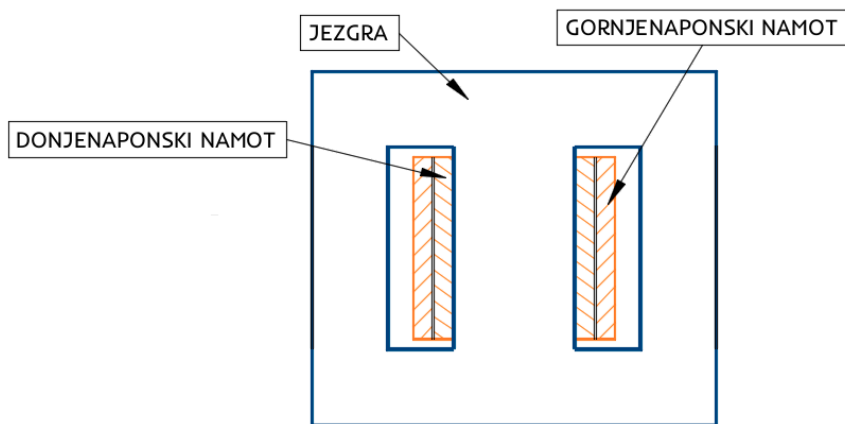
1. Jezgrasti oblik, slika 2.1.
2. Ogrnuti oblik, slika 2.2.

Jezgra klasičnog transformatora sastoji se od:

- Namota koji se nalazi na stupu jezgre
- Stupa i jarma koji zatvaraju magnetski krug



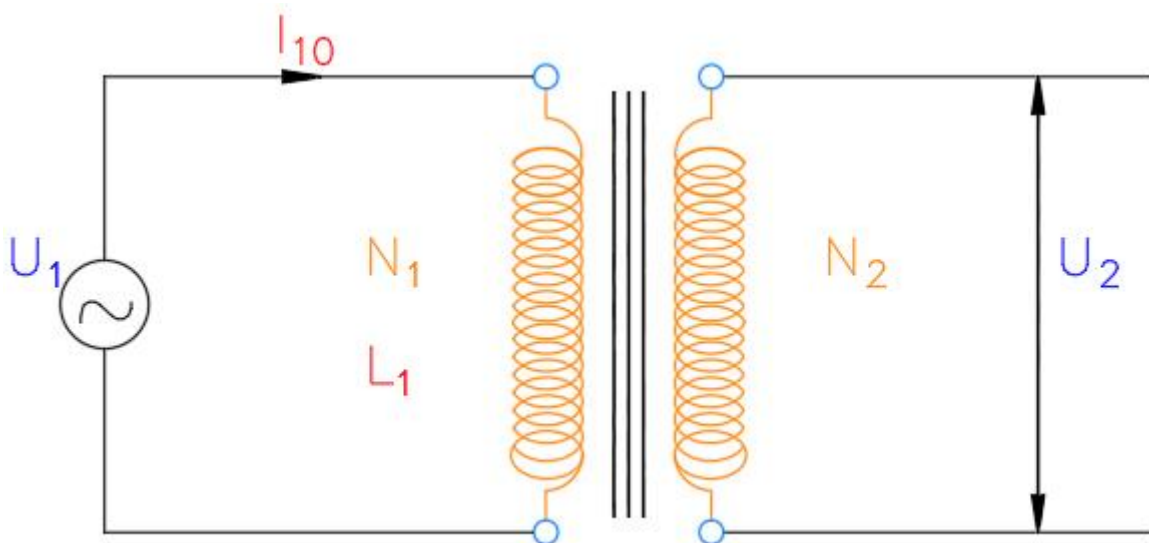
Slika 2.1. Jezgrasti oblik.



Slika 2.2. Ogrnuti oblik.

2.1. Idealni transformator u praznom hodu

Razmotrit će se idealni transformator s radom u praznom hodu. Kod takvog transformatora kroz sekundar ne prolazi struja jer su stezaljke sekundara otvorene (Slika 2.3.).



Slika 2.3. Idealni transformator u praznom hodu.

Za rješavanje problema transformatora, pronaći će se električne veličine za primar i sekundar kao posljedica toga što se doveo izmjenični napon U_1 na stezaljke primarnog namota. U odnosu prema U_1 definirat će se faze ostalih struja i napona. Nadalje, koristi se kompleksni prikaz izmjeničnih veličina. Može se pisati $U_1 = U_{1m}e^{i\omega t}$, tako da se za vrijeme $t = 0$ napon U_1 , postavi duž realne osi (Slika 2.4.). Ako je L_1 samoindukcija zavojnice primara namotane oko jezgre transformatora, njena

impedancija je imaginarna kada se radi idealnom transformatoru, $Z_1 = i\omega L_1$. Zbog napona U_1 koji se doveo na stezaljke primara, slaba struja će proći kroz zavojnicu primara:

$$I_{10} = \frac{U_1}{i\omega L_1} = I_{10m} e^{i(\omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (2-1)$$

Prethodno opisana struja kasni za naponom u iznosu od 90° . Na slici 2.4. ilustrirana je struja pomoću vektora koji se nalazi na negativnoj imaginarnoj osi. Protokom struje I_{10} , induciran je magnetski tok Φ kroz presjek k feromagnetskoj jezgri prema jednadžbi:

$$n_1 \Phi = L_1 I_{10} \quad (2-2)$$

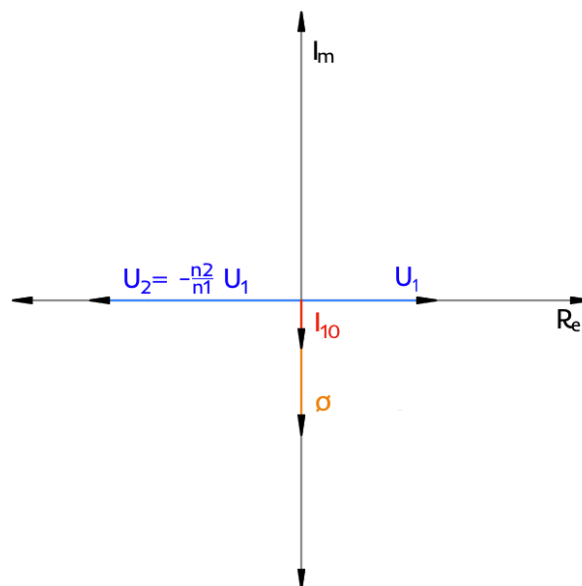
zato što ukupni tok kroz namot uvažava i broj zavoja n_1 . Struja I_{10} u fazi je s tokom Φ (Slika 2.4.). Ova jednadžba primjenjiva je u praznome hodu ukoliko je $I_2 = 0$, odnosno samo struja I_{10} inducira tok Φ . Odnos toka i napona objašnjava drugi Kirchhoffov zakon za strujnu petlju primara:

$$U_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt} = i\omega n_1 \Phi \quad (2-3)$$

Preostaje još odrediti napon U_2 na krajevima sekundara. Prema pretpostavci o idealnom transformatoru, isti tok Φ prolazi i kroz presjek zavojnice sekundara. Zavojnica sekundara ima n_2 zavoja pa će se na njezinim krajevima inducirati elektromotorna sila. Iz navedenog proizlazi:

$$U_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt} = i\omega n_2 \Phi = -\frac{n_2}{n_1} U_1 \quad (2-4)$$

gdje se koristi jednadžba (2-3). Omjer transformacije označava se kao n_2/n_1 . Može se uočiti da je napon sekundara suprotnog predznaka od napona primara. Taj je predznak dogovoren ovisno o tome koji se smjer magnetskog toka koji prolazi zavojnicama gleda kao pozitivan. Također, ovisi i o smjeru namatanja zavojnica. Može se postići da su naponi U_1 i U_2 u fazi pomoću zamjene krajeva namota [3].



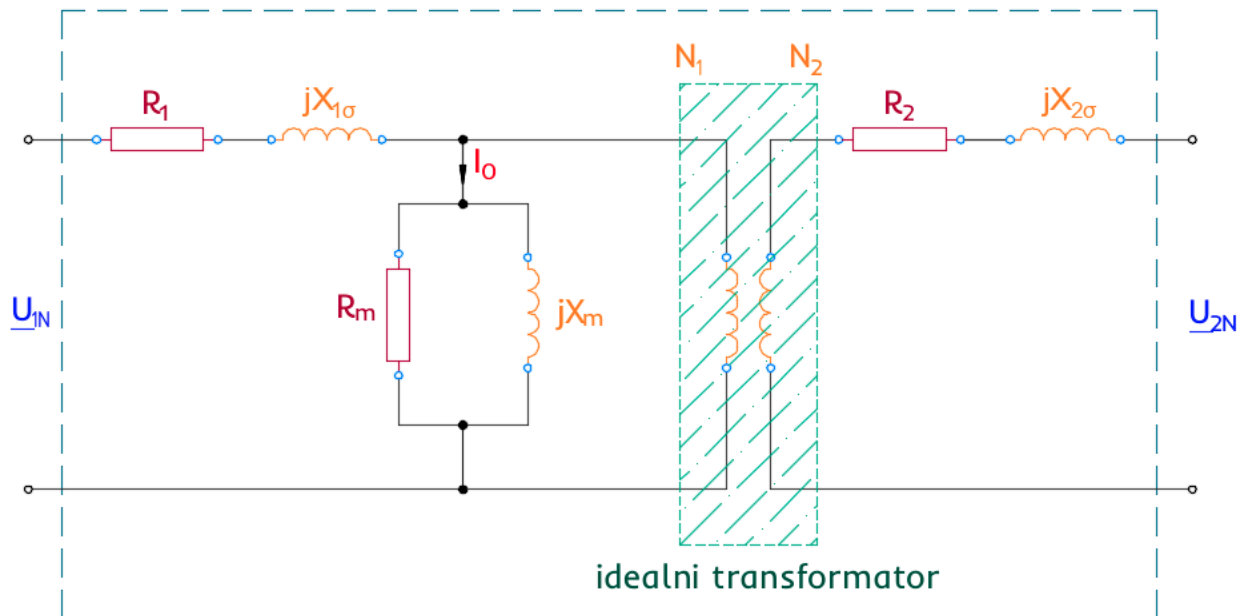
Slika 2.4. Vektorski dijagram idealnog transformatora.

2.2. Nadomjesna shema transformatora

Transformator kao dio električne mreže može se prikazati pomoću nadomjesne sheme za lakše izvođenje proračuna te analiza. Ta nadomjesna shema mora prikazati ponašanje transformatora sa zadovoljavajućom točnošću. Prilikom konstrukcije nadomjesne sheme transformatora treba uzeti u obzir fizikalne činjenice:

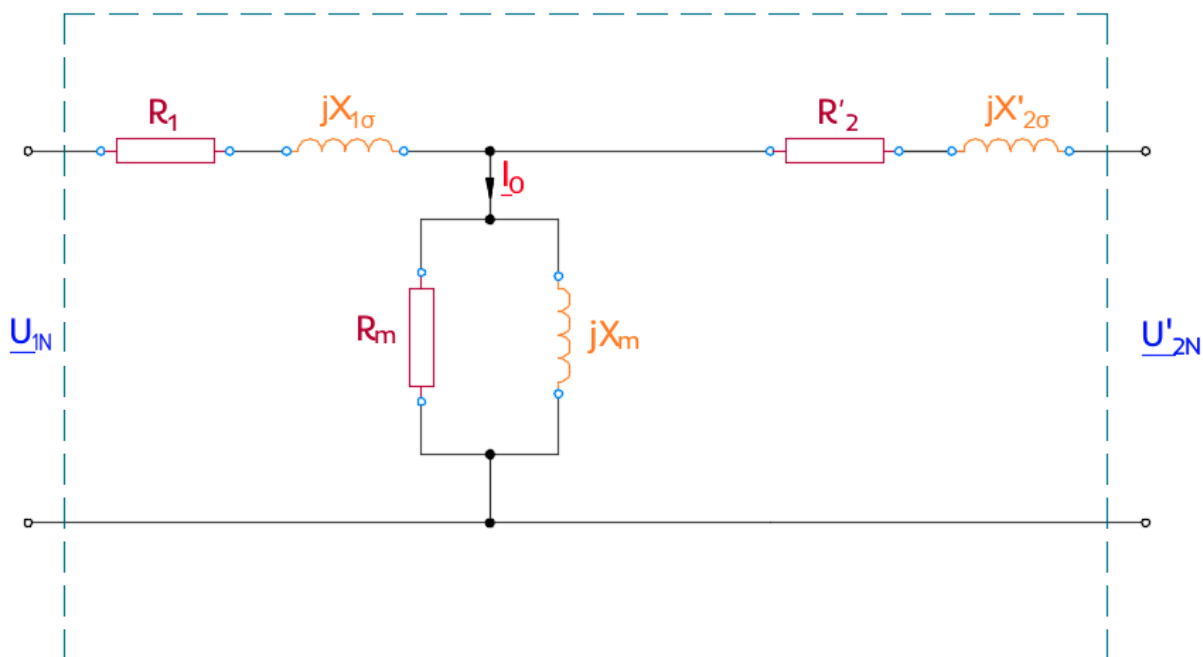
- Prolaskom struje kroz namote transformatora, stvaraju se gubici u bakru koji zagrijavaju namote, ti gubici proporcionalni su kvadratu struje
- Zbog nastajanja vrtložnih struja te histereze zagrijava se željezna jezgra
- Primarni i sekundarni namot imaju rasipni induktivitet

Gubici u namotima nadomještaju se djelatnim otporima R_1 i R_2 u primarnom i sekundarnom krugu. Rasipni magnetski tok koji se pojavljuje u primarnom i sekundarnom namotu nadomješta se zavojnicama induktiviteta $L_{1\sigma}$ i $L_{2\sigma}$, induktivnog otpora $X_{1\sigma}$ i $X_{2\sigma}$. Struju praznog hoda I_0 nadomješta se s dvije paralelne grane, kroz jednu teče struja magnetiziranja I_μ , a kroz drugu djelatna komponenta I_R kojom se opisuju gubici u željezu. Struja magnetiziranja kasni u fazi za priključenim naponom za 90° te se u njezinu granu piše induktivni otpor X_0 , a u granu struje I_R djelatni otpor R_0 [4]. Navedeno je prikazano na slici 2.5.



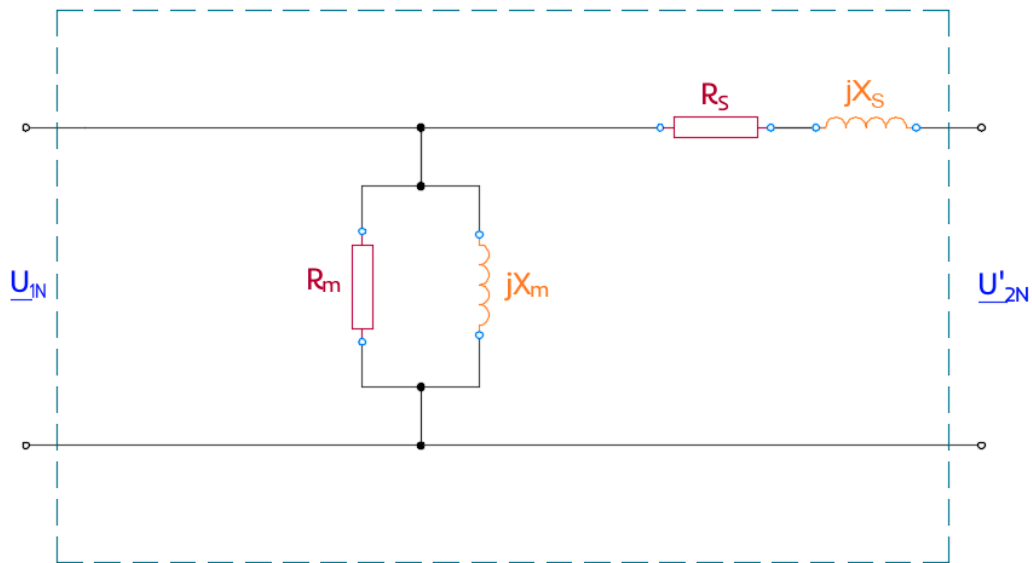
Slika 2.5. Nadomjesna shema transformatora.

Nakon dodanih navedenih elemenata, primarni i sekundarni krug su i dalje povezani idealnim transformatorom. Međutim, kako bi idealni transformator uklonili, on treba imati prijenosni omjer 1:1 jer tada nema nikakvu funkciju. To će se postići tako što će se reducirati sekundarne veličine na primar ili primarne veličine na sekundar. Navedeno je prikazano na slici 2.6.



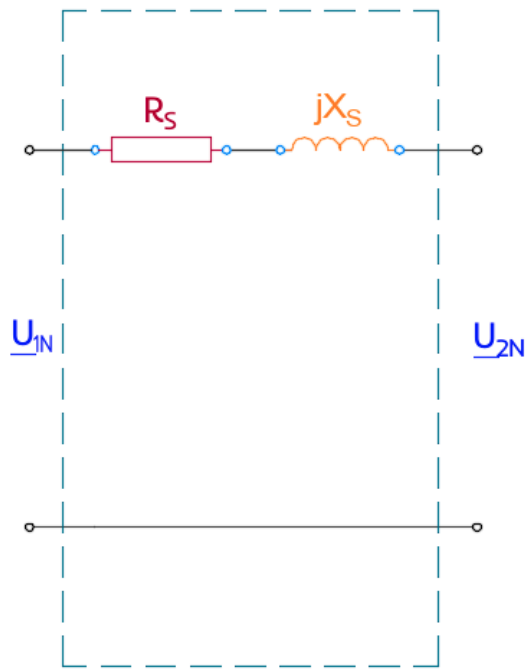
Slika 2.6. Nadomjesna shema transformatora reducirana na primar.

Zbog paralelne grane ova nadomjesna shema je poprilično složena te otežava proračune. Kada je prisutan normalan pogon transformatora, struja magnetiziranja znatno je manja od struje primara. Ta struja magnetiziranja, ovisno o veličini transformatora, iznosi nekoliko postotaka nazivne struje, povodom toga gubici u željezu su dovoljno mali da ih se može zanemariti. Zbog male struje praznog hoda (I_0) djelatni otpori R_1 i R_2 , te induktivni otpori $X_{1\sigma}$ i $X_{2\sigma}$ mogu se međusobno zbrojiti [4]. Na taj način dobije se nadomjesna shema prema slici 2.7.



Slika 2.7. Nadomjesna shema transformatora sa zbrojenim otporima.

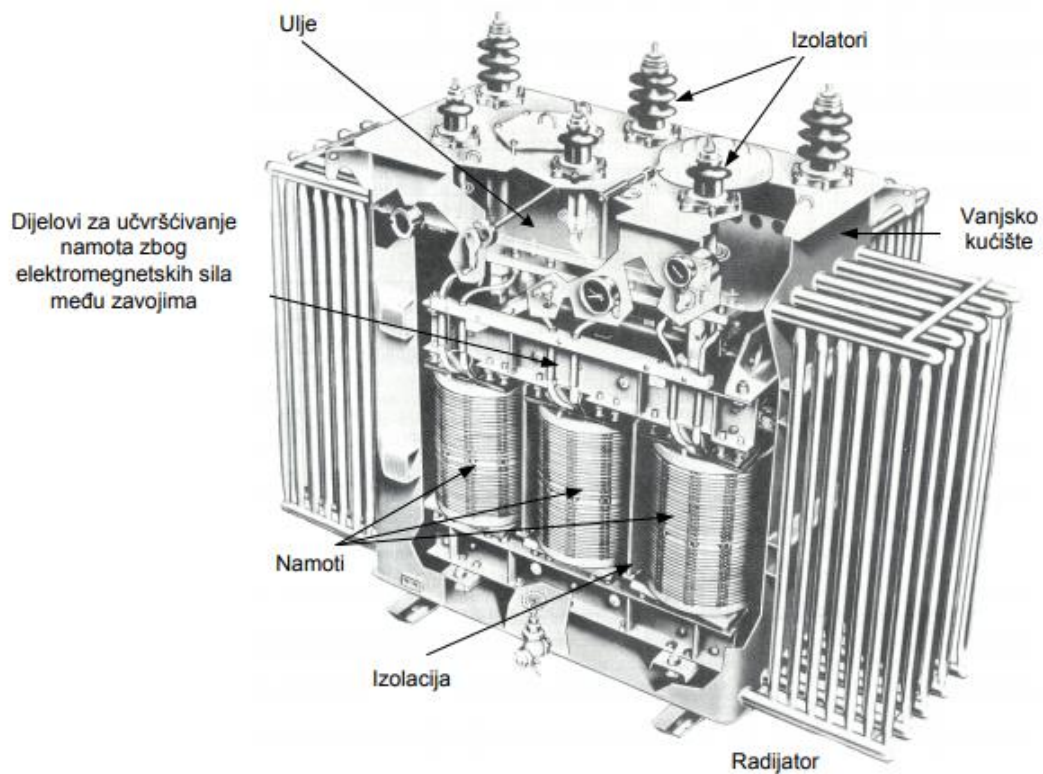
Ako se zanemari i struja praznog hoda, tada se uklanja paralelna grana te se dobije nadomjesna shema kao na slici 2.8.



Slika 2.8. Pojednostavljena nadomjesna shema transformatora uz zanemarenu struju praznog hoda.

2.3. Konstrukcija transformatora

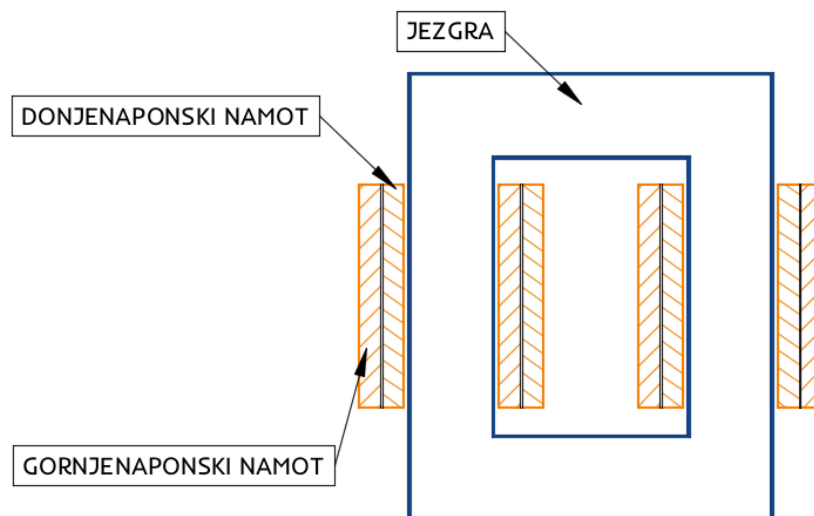
Kod konstrukcije transformatora možemo razlikovati dvije vrste dijelova transformatora, a to su aktivni dijelovi koji direktno sudjeluju pri pretvorbi i prijenosu energije te pasivni dijelovi koji ne utječu direktno na pretvorbu.



Slika 2.9. Osnovni dijelovi transformatora [2].

2.3.1. Aktivni dijelovi

Svi energetske transformatori sastoje se od jezgre izrađene od željeza i dva bakrena namota. Ti namoti nazivaju se primarni i sekundarni. Jezgra transformatora sastoji se od stupova na kojima je namot te jarmova koji međusobno povezuju stupove. Na slici 2.10. prikazani su aktivni dijelovi transformatora [1].



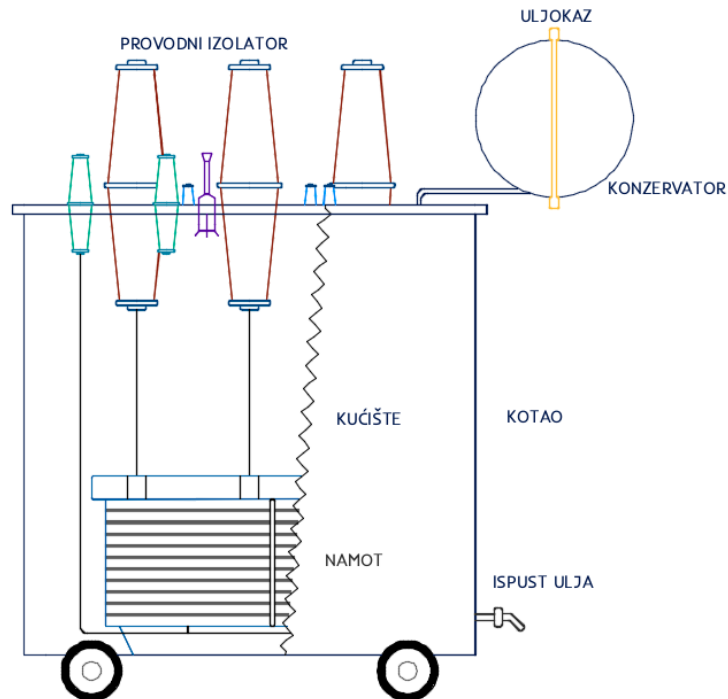
Slika 2.10. Aktivni dijelovi transformatora.

Osnovna zadaća jezgre je vođenje silnica magnetskoga toka. Jezgra se izrađuje od željeza jer ima dobro magnetsko vođenje, ali za izradu jezgri koriste se posebno obrađene vrste željeza, a ne čisto željezo. Limovi debljine 0,15, 0,27, 0,30, 0,35 mm čine jezgru, a u iznimnim slučajevima lim debljine 0,5 mm može se koristiti za transformatore malih snaga [4]. Limovi se izrađuju hladnim i toplim valjanjem. Hladno valjanim limovima potrebna je manja struja magnetiziranja za postizanje određene magnetske indukcije. Također, hladno valjani limovi imaju manje specifične gubitke. Kako bi se prevenirala pojava vrtložnih struja te spriječio električni kontakt, limovi jezgre se moraju međusobno izolirati. Naime, tako se smanjuju gubici transformatora. Jezgra se tijekom slaganja impregnira, lakira i mehanički steže pomoću vijaka. Na taj način se može spriječiti njihova vibracija kada djeluje magnetska sila. Limovi transformatora se dodatno osiguravaju bočnim zavarivanjem kod transformatora za koje su predviđene velike struje. Iako je transformator većinom jednofazan ili trofazan, svaki transformator sadrži dva namota bez obzira na broj faza transformatora. Primarni namot napaja se iz vanjskog izvora, a u sekundarnom namotu inducira se napon preko elektromagnetske indukcije te se tako napajaju trošila. Oko jezgre su namotane žice koje su načinjene samo od bakra, a one mogu biti okruglog ili pravokutnog presjeka. U praksi je zavojnica gdje se očekuje niži napon smještena bliže jezgri. Tako se može izbjeći skok iskre sa zavojnice na jezgru. Nadalje, stavlja se izolacija na vodiče i tako se međusobno odvajaju vodiči iste zavojnice, različite zavojnice i zavojnice od jezgre. Premazivanjem posebno napravljenim lakom za izoliranje, vodiči su izolirani. Takav izolirajući lak male je debljine, ima visoke toplinske izdržljivosti te elastičnosti. Sve navedeno ga sprječava da puca prilikom savijanja žice. Osim toga, izolacijski papir u trakama, kartoni te posebni izolacijski papiri mogu služiti kao izolacija [1, 2].

2.3.2. Pasivni dijelovi

Pasivni dijelovi mogu povećati energetska učinkovitost te omogućiti lakše korištenje transformatora iako nisu aktivni sudionici prijenosa energije. Uljni transformator sadrži kotao koji je glavni sastavni dio. Kotao podrazumijeva nekoliko sastavnica, a to su kotao u kojem je smješteno ulje, ulje transformatora, konzervator te provodne izolatore koji se nalaze na poklopcu. Kako bi se pojednostavilo stavljanje i vađenje jezgre u/iz kotla, ona je učvršćena poklopcem. Osim toga, jezgra dodiruje dno kotla u trenutku kada se poklopac smjesti na prirubnicu, a tako se većinski dio težine jezgre prenosi na dno. Time se omogućuje da se prilikom izrade poklopca i kotla ne mora paziti na to da budu u mogućnosti izdržati cijelu težinu jezgre. Transformatorsko ulje koristi se kako bi se namot transformatora hladio. Ulje čine specijalna mineralna/sintetička ulja s dobrim izolacijskim svojstvima te malom gustoćom u svrhu olakšavanja cirkulacije kroz

kućište. Također, ulje ne smije biti zapaljivo i ne smije imati štetni učinak na preostale dijelove transformatora. Ulje može cirkulirati prirodno ili prisilno uz pomoć pumpi. S vremenom, ulje će gubiti izolacijska svojstva, a kada se to dogodi, potrebno je promijeniti ulje novim. Kotao u kojem se nalazi ulje čini debeli željezni lim, a u kotlu se nalaze aktivni dijelovi transformatora, točnije jezgra i namoti. Kako bi se uklonila toplina iz kotla koriste se rebra, radijatori i cijevi. Na taj način se toplina prenosi van kotla, a može se prenijeti i u vodu za rashlađivanje. Na dnu kotla smješten je ventil koji ispušta ulje. Kotao je potrebno uzemljiti te paziti da voda ne uđe u ulje. Kako bi se poklopac kotla u potpunosti zatvorio, koriste se brtve i velik broj vijaka. Na poklopcu su smješteni provodni izolatori, konzervator, termometar i kuke za vađenje jezgre i namota. Provodni izolatori izrađeni su od šupljeg porculana sa šipkom koja prolazi kroz njega, a koja povezuje unutarnje krajeve namota s vanjskim vodičima. Nadalje, provodni izolatori se pomoću vijaka pričvršćuju za otvor poklopca. Termometar je smješten na poklopcu i služi za mjerenje temperature u gornjem dijelu kotla jer se tamo nalazi najtoplije ulje, a osim toga koristi se kao mjerni instrument i za zaštitu. Termometar ima specijalne kontakte koji alarmiraju zvučnim i svjetlosnim signalima ako dođe do pregrijavanja transformatora. Slično tome, ako dođe do povećanja temperature iznad kritične razine, izbacuje transformator iz pogona. Konzervator je rezervoar izrađen od metala, a nalazi se na vrhu transformatora. Konzervator ima određenu količinu rezervnog ulja i omogućuje da se ulje proširi u konzervator ako dođe do povećanja temperature, a posljedično i povećanja volumena. Kada se poveća volumen ulja, zrak se odvodi iz konzervatora. Nasuprot tome, kada se volumen ulja smanji, zrak se dovodi u konzervator nakon izvlačenja vlage. Vlaga se može izvući uz pomoć dehidratora ispunjenog kristalima silikagela na način da kristali skupljaju vlagu na sebe. Ako su kristali svijetle boje, i dalje su ispravni, no ako su tamne boje, istrošeni su. Uljokaz služi za vizualnu kontrolu razine ulja u konzervatoru, a smješten je na stijenci konzervatora [1, 2].



Slika 2.11. Pasivni dijelovi transformatora.

2.4. Kvarovi i zaštita transformatora

2.4.1. Kvarovi

Transformatori su u većini slučajeva konstantno u pogonu, a ispad transformatora iz pogona obično predstavlja ispad jednog dijela mreže. Takav događaj znači da će veliki broj potrošača ostati bez električne energije. Posljedično, kod transformatora se traži velika pogonska sigurnost. Ipak, potpuna sigurnost ne postoji pa je zato potrebno uzeti u mogućnost kvarove. Na transformatoru mogu nastupiti sljedeći kvarovi:

1. Proboj namota prema tijelu transformatora,
2. Proboj između primarnog i sekundarnog namota,
3. Proboj između faza,
4. Spoj među zavojima i
5. Kratkospojeni krug u jezgri.

Kod proboja 1), 2) i 3) treba razlikovati dvije mogućnosti:

- a) Proboj od prenapona koji u većini slučajeva nemaju snage da podrže luk, već odmah nestanu, a malu rupicu koju je proboj napravio kroz tvrdi dio izolacije, zalije ulje pa ostane vidljiva samo mala crna točkica na izolaciji. Ta točkica pokazuje da je na tom mjestu

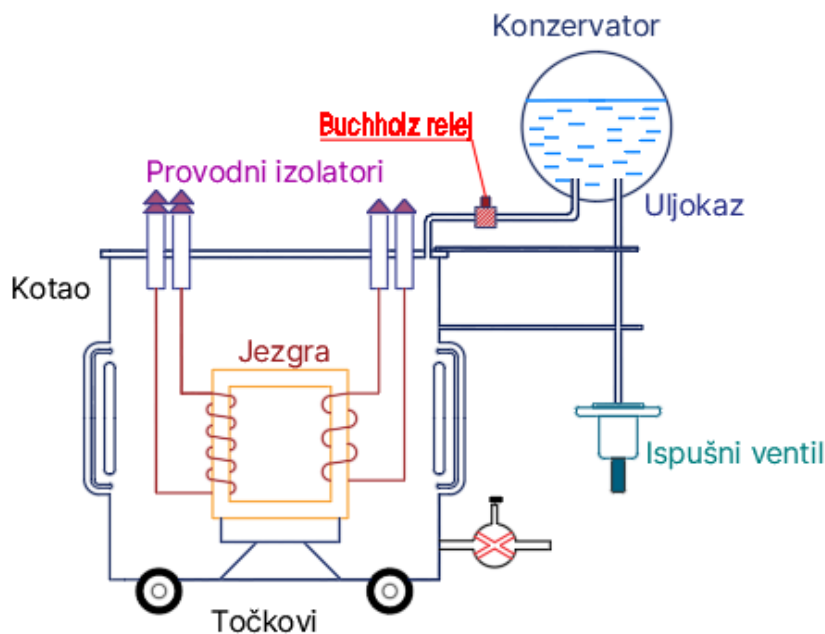
izolacija oslabljena, ali ne toliko da bi je pogonski napon mogao probiti. Prilikom otvaranja transformatora koji je duže vremena bio u pogonu, može se pod povećalom pronaći puno sitnih crnih točkica. S vremenom proboji sve više oštećuju izolaciju te ona slabi, dok je konačno pogonski napon ne probije i podrži luk s visokom temperaturom i toplinom koja topi bakar.

- b) Proboj od udarnih valova većih snaga ili od pogonskih prenapona koji razvijaju luk i tope bakar.

Kod spoja među zavojima također se razlikuju dva slučaja, spoj među zavojima malog transformatora te spoj među zavojima velikog transformatora. Kod malog transformatora s malim naponom između zavoja, napon je premali da bi podržavao luk, stoga dolazi samo do zagrijavanja kratko spojenog zavoja zbog struje kratkog spoja. Vodič se s vremenom sve više grije, izolacija na kratko spojenom zavoju gori, a onda postepeno izgori i izolacija na susjednim zavojima. Iz tog razloga, između njih se stvara kratki spoj te se na taj način kvar relativno polako širi te može trajati i po nekoliko minuta. Ovakav kvar može se prepoznati po izgorenom namotu, kod kojeg tijekom kvara nije došlo do toga da se bakar otopi. Kada se radi o velikim transformatorima, napon jednog zavoja dovoljno je velik da spoj između zavoja odmah pretvara u luk, a zatim se bakar počne topiti i kvar se širi ubrzano. Za ovakav kvar karakteristično je da nema izgorene izolacije na cijelom zavoju, ali je rastopljen bakar te izgorena izolacija na mjestu gdje je nastupio spoj među zavojima. Trajanje ovog kvara iznosi nekoliko desetinki sekunde. Do kratko spojenog kruga u jezgri obično dolazi na tupom spoju ili ga stvaraju loše izolirani vijci i tlačne ploče kojima je stegnuta jezgra. Zbog toga u većini slučajeva dolazi do topljenja željeza, a tako oštećenu jezgru treba potpuno rastaviti, ukloniti stopljena mjesta na pojedinim limovima, ponovno izolirati limove i raspodjelom oštećenih limova na razna mjesta jezgre izbjeći preveliko povećanje indukcije na mjestu kvara. To je vrlo težak rad pa je zato ovakav popravak skup [1].

2.4.2. Buchholzova zaštita transformatora

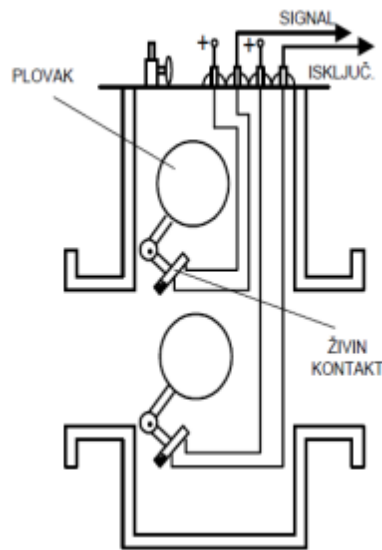
Kod uljnih se transformatora na mjestu kvara zbog visoke temperature razvijaju plinovi. Tu pojavu iskorištava Buchholzova zaštita ugrađena u cijev koja povezuje kotao transformatora s konzervatorom, što je prikazano na slici 2.12.



Slika 2.12. Transformator s ugrađenom Buchholzovom zaštitom.

Buchholzova zaštita sastoji se od posude u kojoj se skupljaju plinovi iz kotla te od dva plovka, gornjeg i donjeg. Svaki plovak povezan je sa svojim živo-srebrnim kontaktom. Donji kontakt povezan je još i s lopaticom, a osim toga posuda sadrži dva ispušna ventila s gornje i donje strane. Kod manjeg kvara u transformatoru plin se polako razvija te se sakuplja u gornjem dijelu posude i stiže nivo ulja prema dolje. Kako nivo ulja opada, pada i gornji plovak te okida gornji kontakt, koji daje signal upozorenja. Ta ista pojava može se dogoditi i ako je npr. kod čišćenja ulja ušao zrak u kotao ili ako pumpa za cirkulaciju ulja uvlači i zrak. Zato je predviđena mogućnost kontrole plina tako da se plin gornjim ispušnim ventilom ispušta van i pokuša zapaliti. U slučaju da plin gori, radi se o kvaru u transformatoru, ako plin ne gori, potrebno je pronaći objašnjenje prodiranja zraka u kotao. Kod većih kvarova plin se jako brzo razvija i gura ulje iz kotla prema konzervatoru. Prilikom tog procesa, ulje velikom brzinom prolazi kroz posudu Buchholzove zaštite i okrene lopaticu koja ukapča donji kontakt te kontakt isključi transformator iz pogona. Ako ulje nestaje iz kotla, jer je npr. kotao počeo propuštati ulje, onda nivo ulja pada te gornji plovak prvi daje kontakt za upozorenje, a zatim donji plovak zatvara kontakt za isključenje. Kako bi plin koji se razvije u kotlu što kraće stigao u posudu Buchholz zaštite, kotao transformatora treba postaviti otprilike 1-2% u nagnuti položaj tako da je najviše mjesto na poklopcu baš na mjestu gdje izlazi cijev iz kotla. Na donji ispušni ventil priključi se ručna zračna crpka te se zrak polako tiska u posudu zaštite. Ta

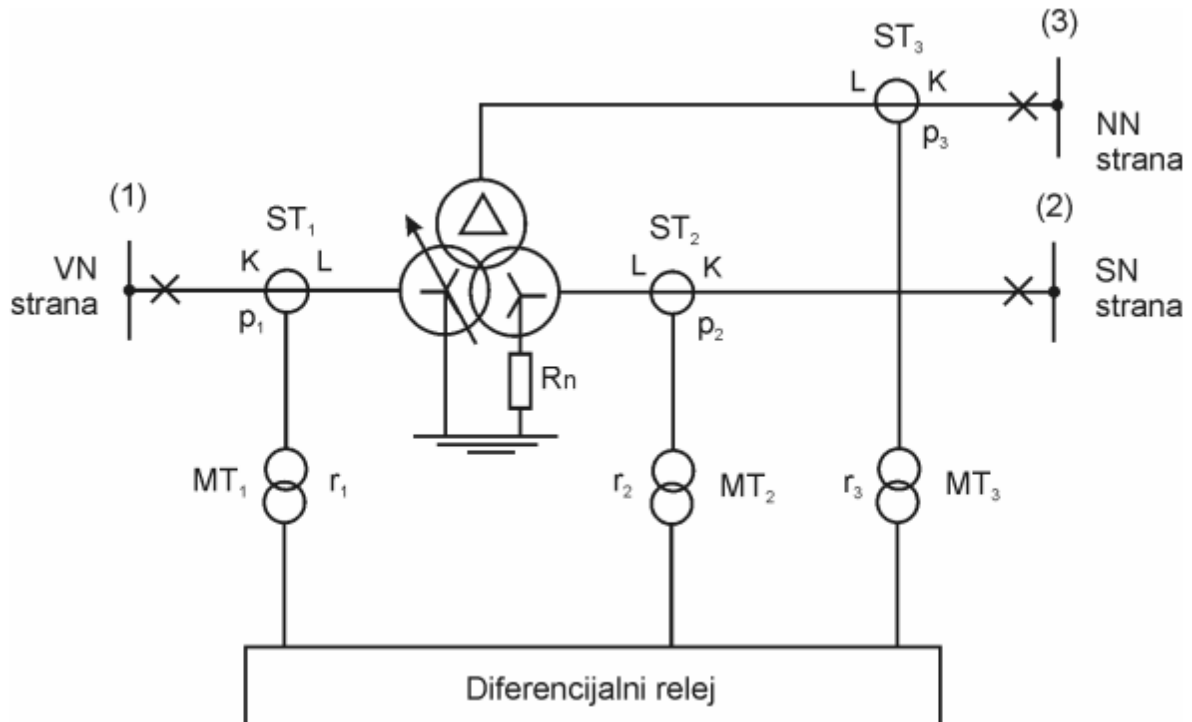
posuda je opremljena sa staklom kroz koje se može promatrati padanje nivoa ulja te nadzirati pravilno djelovanje gornjeg plovka [1].



Slika 2.13. Buchholz relej.

2.4.3. Diferencijalna zaštita transformatora

Brzina razvijanja kvara ovisna je o snazi koja hrani mjesto kvara, a zbog toga je razumljivo da se pri većoj snazi transformatora većom snagom razvija kvar. Posljedično, transformator treba brže isključiti iz pogona kako bi se kvar bez puno štete ograničio. Kod transformatora iznad nekoliko MVA, brzina djelovanja Buchholzove zaštite više ne zadovoljava, stoga se obično koristi diferencijalna zaštita. Princip rada diferencijalne zaštite zasniva se na mjerenju razlike struje iste faze na primarnoj i sekundarnoj strani, što je vidljivo na slici 2.14.[2].



Slika 2.14. Diferencijalna zaštita tronamotnog energetskeg transformatora.

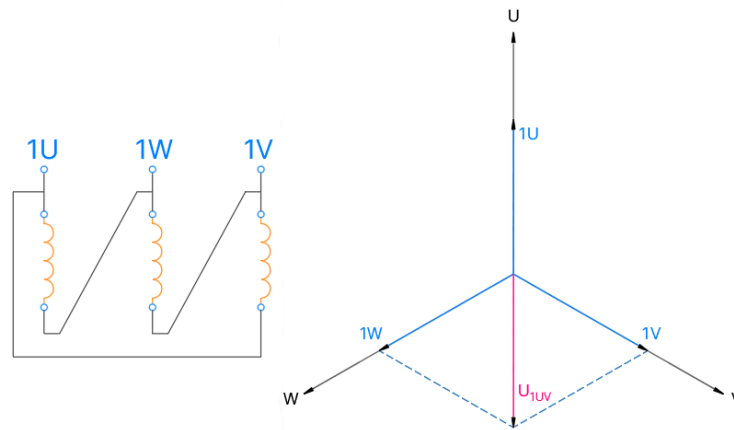
Strujni transformatori moraju imati takav prijenosni omjer da su njihove sekundarne struje i na jednoj i na drugoj strani transformatora jednake, npr. kod transformatora za 10 MVA, 110/10 kV, 52,5/578 A, strujni transformatori moraju imati prijenosni omjer 52,5/5 na primarnoj odnosno 578/5 na sekundarnoj strani. Ako transformator nije u kvaru i ako zanemarimo struju magnetiziranja, koja je kod velikih transformatora relativno mala, sekundarne struje oba strujna transformatora moraju biti jednake i po veličini i po fazi. Nadalje, zaključujemo da po Kirchhoffovom zakonu ne može između točaka „a“ i „b“ kroz diferencijalni relej poteći struja. Ako dođe do kvara u namotu transformatora, to mjesto mora napajati primarna strana. Stoga će zbog kvara struja na primarnoj strani biti relativno veća od struje na sekundarnoj strani za iznos povećanja struje. Ta razlika pojavljuje se i na sekundarnoj strani strujnih transformatora. Zbog toga poteći će odgovarajuća struja kroz diferencijalni relej, koji zatim očituje kvar i daje signal za isključenje transformatora iz pogona. Također, kako se od diferencijalne zaštite traži da mora sigurno djelovati na kvar u transformatoru, traži se da ona ne smije djelovati kod kvara u mreži. Točnije, ne smije djelovati izvan područja rada koje je sa strujnim transformatorima obuhvaćeno. U protivnom, diferencijalna zaštita bi mogla bez potrebe izbaciti transformator iz pogona, što se ni u kojem slučaju ne smije dogoditi [1].

2.5. Grupe spojeva transformatora

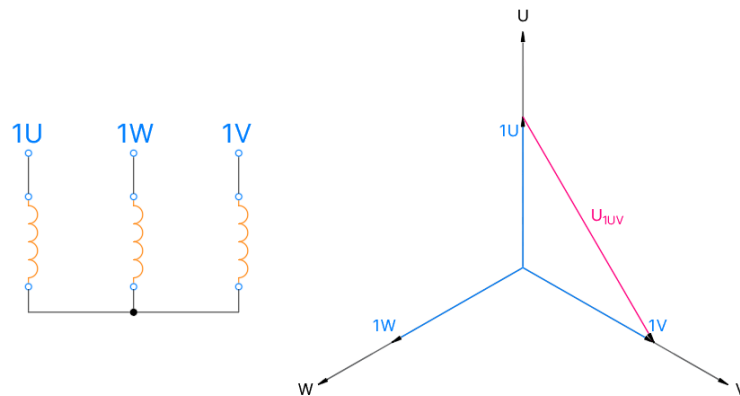
Postoje tri načina spajanja trofaznih transformatora, a to su:

1. Spoj u trokut
2. Spoj u zvijezdu
3. Spoj u slomljenu zvijezdu (cik-cak)

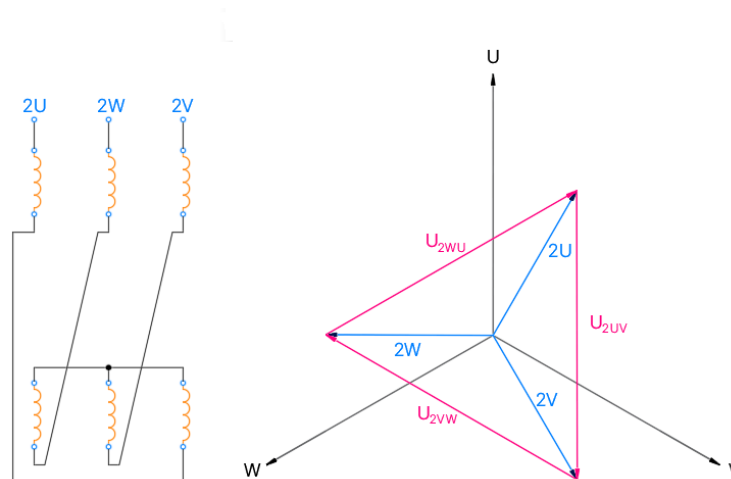
Spomenute grupe spojeva prikazane su na slikama 2.15., 2.16., te 2.17.



Slika 2.15. Spoj u trokut.



Slika 2.16. Spoj u zvijezdu.



Slika 2.17. Spoj u slomljenu zvijezdu (cik-cak).

Za svaku od ovih grupa spojeva transformatora koriste se oznake koje definiraju određenu grupu spoja. Prilikom označavanja razlikuju se oznake za visokonaponski namot, a to je u većini slučajeva primar, te oznake za niskonaponski namot što je uobičajeno sekundar. Navedene oznake spoja za visokonaponski namot mogu biti D (spoj u trokut), Y (spoj u zvijezdu), te Z (cik-cak spoj). Oznake za niskonaponski namot su d (spoj u trokut), y (spoj u zvijezdu), te z (cik-cak spoj). Svaki transformator označen je dvama slovima i brojem. Prvo slova označava spoj primarnog namota, drugo slovo predstavlja spoj sekundarnog namota, a brojem se označava satni broj, npr. Yy0. Satni broj označava veličinu faznog pomaka između linijskih napona primara i sekundara. Bez obzira na način spoja transformatora, taj fazni pomak uvijek je višekratnik od 30° . Ako postoji nul-vodič, oznaci spoja se prije oznake satnog broja dodaje slovo N ili n, ovisno o tome je li spojen na primaru ili sekundaru, npr. Dyn5 [5].

2.6. Natpisna pločica transformatora

Natpisna pločica transformatora sadrži sva bitna obilježja za pravilni odabir i popravljjanje transformatora. Podaci koje natpisna pločica mora sadržavati su simbol i ime proizvođača, tip transformatora, godinu proizvodnje, serijski broj, nazivni napon primara i sekundara za spojeve zvijezda i trokut, nazivnu primarnu i sekundarnu struju, nazivnu frekvenciju, nazivnu snagu izraženu u kVA, grupu spoja i broj faza, napon kratkog spoja u postocima, vrstu hlađenja, ukupnu masu transformatora, ulja i aktivnog dijela. Nadalje, ako prilikom popravka transformatora dođe do promjene nekog od parametara, potrebno je staru natpisnu pločicu zamijeniti novom, s usklađenim novim podacima. Natpisna pločica izrađuje se od lima, te se podaci urezuju u nju kako se ne bi zbog atmosferskih i vanjskih utjecaja obrisali podaci [2]. Jedan od primjera natpisne pločice prikazan je na slici 2.18.

CE		KONČAR		D&ST	
Položaj		(20)	(10)		
①	+5%	21000	10500		
②	+2.5%	20500	10250		
③	Nazivni naponi	20000	10000	420	V
④	-2.5%	19500	9750		
⑤	-5%	19000	9500		
Nazivne struje		28.9	57.7	1375	A
Nazivne snage		1000	1000	1000	kVA
Stupanj izolacije		LI125 AC50	LI75 AC28	AC3	
U _k				%	
11004322					

TRANSFORMATOR			
Tip	6TBNO 1000-24x/AC		
Broj	DT1441-	God.	
Standard	IEC 60076		
Frekv.	50	Hz	
Hlađenje	ONAN		
Br. faza	3	Spoj	
	Dyn5		
Jezgra	GOES	806	kg
Vodič	Cu	546	kg
Ulje	KLASA 0	455	kg
Ukupna masa		2500	kg
P ₀	A ₀	770	W
P _k	C _k	10500	W

MADE IN CROATIA

Slika 2.18. Natpisna pločica Končar transformatora [2].

3. Vrste transformatora

Transformatori kao elektromagnetski uređaji imaju veliko područje primjene. Počevši od prijenosa i raspodjele električne energije, raznih transformacija struja i napona u različitim industrijskim postrojenjima pa sve do mnogih drugih područja. Stoga postoji i više podjela vrsti transformatora.

3.1. Vrste transformatora s obzirom na primjenu

Razlikuju se tri vrste transformatora ovisno o njihovoj primjeni. Energetski transformatori, autotransformatori te mjerni transformatori.

3.1.1. Energetski transformator

U elektranama koje se većinom grade u područjima energetskih izvora i u kojima su instalirani agregati velikih snaga, električna energija prenosi se na velike udaljenosti do širokih potrošačkih područja. Kako bi se pri prijenosu električne energije postigla što veća udaljenost, a da pri tome gubici budu što manji, prijenos se vrši pod što većim naponom. Međutim, generatori su projektirani za normirane napone od 3 kV, 6 kV i 10 kV plus 5 % do 10 % regulacije nazivnog napona. Stoga se u samoj elektrani neposredno iza generatora dodaje transformator koji podiže napon. Ovakva izvedba naziva se blok-transformator. Takvi transformatori podižu generatorske napone na napone prijenosnog sustava koji iznose 110 kV, 220 kV, te 400 kV. Međusobna povezanost mreža različitih naponskih razina u prijenosu i distribuciji omogućena je uporabom transformatora. Pomoću transformatora, visoki se napon spušta na 35 kV i 10 kV (moguća je i naponska razina od 20 kV) te se energija prenosi na potrošačka područja. Takvi transformatori nazivaju se mrežnim transformatorima. Svi takvi transformatori, predstavljeni u okviru jednog sustava nazivaju se energetski transformatori. Kako je bez ovih transformatora prijenos i distribucija električne energije nemoguća, oni su najvažniji i najkorišteniji transformatori. Ako u pojedinim dijelovima sustava zbog promjena opterećenja postoje češće promjene napona, transformatori u tim dijelovima moraju biti predviđeni za regulaciju napona pod opterećenjem. Energetski transformatori koji su opremljeni različitim uređajima za regulaciju napona nazivaju se regulacijski transformatori. Međutim, ako se transformacija napona ne vrši u širokim granicama, tada je ekonomičnije rješenje korištenje autotransformatora [6].



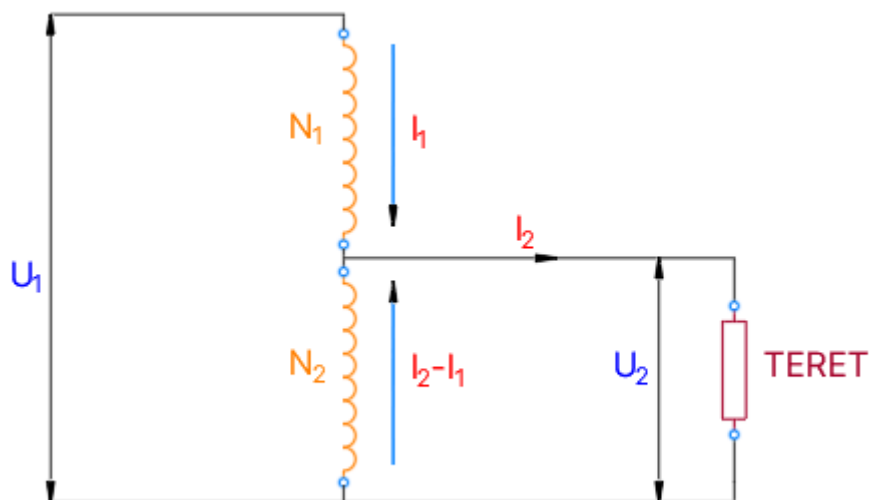
Slika 3.1. Distributivni transformator 630 kVA[6].



Slika 3.2. Mrežni transformator 150 MVA[6].

3.1.2. Autotransformatori

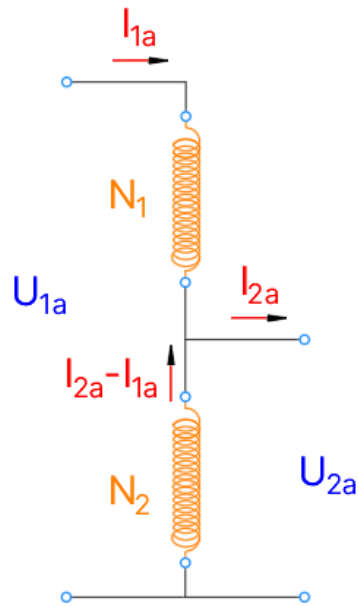
Klasični transformatori izvode se s dva namota, jedan je primarni, drugi je sekundarni. Ova dva namota spojena su magnetski, ali su električki izolirana. Međutim, autotransformator izvodi se samo s jednim namotom koji služi i kao primar i kao sekundar. To znači da osim što su namoti spojeni magnetski, spojeni su i električki. Primar se sastoji od serijskog spoja namota N_1 i N_2 , a sekundar se sastoji samo od namota N_2 . Gornjenaponsku stranu transformatora karakterizira namot N_1 , a donjenaponsku stranu predstavlja namot N_2 . Na slici 3.3. može se vidjeti nadomjesna shema autotransformatora, te se može vidjeti odnos primara i sekundara. U usporedbi s klasičnim transformatorima i njihovom izvedbom odvojenih namota primara i sekundara, autotransformator koristi manje bakrene žice zbog spojenog primara i sekundara. Ta karakteristika autotransformatora omogućava manje dimenzije, manje gubitke, olakšan transport, veću korisnost, te nižu cijenu u odnosu na klasičan transformator, a za iste snage i napone. Jedni od glavnih nedostataka autotransformatora su što se ne može izvesti u svim grupama spojeva, te što omogućuju izravan prijenos prenapona s jednog sustava na drugi zbog galvanske veze primarnog i sekundarnog namota. Najčešća grupa spoja autotransformatora je YNa0, što označava spoj autotransformatora u zvijezdu s uzemljenim zvjezdlištem. Na taj način može se ograničiti prenapon koji se prenosi s primarne na sekundarnu stranu [7, 8].



Slika 3.3. Nadomjesna shema autotransformatora.

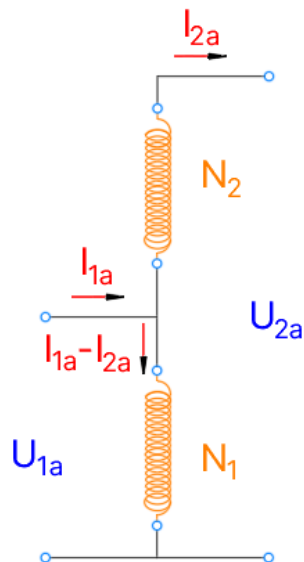
Autotransformator se može podijeliti na dvije vrste, a to su silazni i uzlazni autotransformatori. Kada je autotransformator silazni, onda se snižava naponska vrijednost primarnog na sekundarni

namot. U ovom slučaju, zajednički namot predstavlja N_2 , dok N_1 predstavlja serijski namot. Ovaj oblik izvedbe vidljiv je na slici 3.4.



Slika 3.4. Nadomjesna shema silaznog autotransformatora.

Ako je autotransformator uzlazni, to znači da podiže naponsku razinu primarnog napona na sekundar. U ovoj izvedbi N_1 predstavlja zajednički namot, dok N_2 predstavlja serijski namot. Ovakva izvedba prikazana je slikom 3.5.



Slika 3.5. Nadomjesna shema uzlaznog autotransformatora.

Ovisno o mreži u kojoj se koriste, autotransformatori mogu biti jednofazni ili trofazni. Zbog ekonomskih razloga često se koriste autotransformatori velikih snaga pri povezivanju visokonaponskih mreža (400 kV, 220 kV i 110 kV). Kod takvih transformatora uobičajeno se ugrađuje regulacijska sklopka koja omogućuje podešavanje prijenosnog omjera pod opterećenjem. Na slikama 3.6., 3.7., 3.8. te 3.9. prikazani su jednofazni i trofazni autotransformatori korišteni u prijenosu i distribuciji [9, 10].

Končar Energetski transformatori – trofazni autotransformator 400 MVA, 400/231/10,5 kV



Slika 3.6. Trofazni autotransformator 400MVA, 400/231/10,5 kV [10].

Hyundai – jednofazni autotransformator



Slika 3.7. Jednofazni autotransformator 83,3 MVA 400/138,6/11 kV [10].

Tablica 3.1. *Tehnički parametri jednofaznog autotransformatora prikazanog na slici 3.7. [10].*

Napon [kV]	VN	SN	NN
	400	138,6	11
Snaga [MVA]	VN	SN	NN
	50/66,7/83,3	50/66,7/83,3	15/20/25
Regulacija napona	Regulacijska sklopka pod teretom		
Hlađenje	ONAN/ONAF/OFAF		
Spoj	YNa0d1		

Mitsubishi Electric – jednofazni autotransformatori 500 MVA



Slika 3.8. Jednofazni autotransformator 500 MVA [10].

Hyundai – trofazni autotransformator



Slika 3.9. Trofazni autotransformator 500MVA, 512/242/25,2 kV [10].

Tablica 3.2. Tehnički parametri trofaznog autotransformatora prikazanog na slici 3.9. [10].

Napon [kV]	VN	SN	NN
	512	242	25,2
Snaga [MVA]	VN	SN	NN
	305/400/500	305/400/500	75/84/123
Regulacija napona	Regulacijska sklopka bez tereta		
Hlađenje	ONAN/ONAF/OFAF		
Spoj	YNa0d1		

3.1.3. Naponski i strujni mjerni transformatori

Mjerni transformatori su uređaji koji transformiraju mjerene struje ili napone gotovo u stalnom omjeru te praktički bez faznog pomaka u vrijednostima koje su prikladne za napajanje mjernih instrumenata, te regulacijskih i zaštitnih uređaja. To omogućuje nekoliko prednosti:

- Mjerene veličine struja i napona različitih nazivnih vrijednosti uvijek se transformiraju u iste nazivne vrijednosti, što smanjuje broj potrebnih vrsta mjernih instrumenata, te zaštitnih i regulacijskih uređaja
- Korištenjem mjernih transformatora, mjerni instrumenti izoliraju se od visokih napona u mjerenom krugu
- Mjerni instrumenti mogu biti udaljeni od mjenog strujnog kruga, što omogućuje postavljanje tamo gdje će biti najpovoljniji za upravljanje
- Kako je omogućena udaljenost mjernih instrumenata od mjenog strujnog kruga, na taj način se sprječava utjecaj magnetskog i električnog polja mjenog kruga na rad instrumenata
- Mjerni instrumenti i uređaji zaštićuju se od štetnog dinamičkog i termičkog utjecaja struja kratkog spoja u mjerenom strujnom krugu posebnim izvedbama mjernih transformatora
- Strujni krugovi se galvanski odvajaju

Naponski mjerni transformatori trebaju transformirati mjerene napone u gotovo stalnom omjeru. Kako u svakom mjerenju postoji određeno odstupanje tako postoji i kod naponskih mjernih transformatora. To odstupanje naziva se naponska pogreška. Nadalje, naponski mjerni transformatori trebaju transformirati mjerene napone primara i sekundara gotovo bez faznog pomaka. Tu također postoji određeno odstupanje, te se taj fazni pomak između primarnog i

sekundarnog napona zove fazna pogreška. Transformator se uvijek spaja tako da je primar transformatora spojen paralelno na izvor ili trošilo, točnije fazni vodič s nul-vodičem ili fazni vodič s drugim faznim vodičem. Sekundar transformatora spojen je na voltmetar paralelno. Treba naglasiti da je prilikom spajanja nužno da se uzemlji jedna stezaljka sekundara kako bi se osigurale osobe koje izvode mjerenje i kako bi se osigurao sami instrument. Naponski mjerni transformatori proizvode se s određenim karakteristikama za relativno male promjene napona. Te promjene variraju 0,8 - 1,2 puta vrijednost nazivnog napona za koji su izrađeni [11]. U tablici 3.3. prikazane su granice pogreške naponskih mjernih transformatora.

Tablica 3.3. Granice pogreške naponskih mjernih transformatora [2].

Klasa točnosti	Primarni napon	Pogreške	
		Naponske	Fazne(kutne)
0,1	Od $0,8 U_N$ do $1,2 U_N$	$\pm 0,1\%$	± 5 min.
0,2		$\pm 0,2\%$	± 10 min.
0,5		$\pm 0,5\%$	± 20 min.
1		$\pm 1,0\%$	± 40 min.
3	Za U_N	$\pm 3,0\%$	Nije propisana

Uz ove granice pogreške potrebno je znati i graničnu snagu transformatora. To je najveća snaga koju transformator može izdržati bez pregrijavanja. Pogreška za graničnu snagu transformatora nije unaprijed određena, a moguće je da je i višestruko veća nego snaga pri normalnom radu transformatora.

Strujni mjerni transformatori mjerenu struju pretvaraju u gotovo stalnom omjeru i praktički bez faznog pomaka. Način spajanja strujnog mjernog transformatora je taj da se spaja samo serijski na linijski vodič. To znači da je potreban prekid vodiča, a na mjestu gdje je prekinut vodič potrebno je spojiti primar te na ampermetar serijski spojiti sekundar. Važno je da strujni krug sekundara konstantno bude zatvoren te da jedna stezaljka bude uzemljena. U odnosu na naponski mjerni transformator, strujni mjerni transformatori izrađuju se u svrhu rada s vrlo promjenjivim opterećenjem. To opterećenje može biti do 1,2 puta vrijednost nazivne struje. Nadalje, struja magnetiziranja je problem koji se pojavljuje kod strujnog mjernog transformatora. Ta struja se ne može zanemariti kada se radi o malom iznosu mjerene struje jer prouzrokuje mjernu pogrešku. Za tu pogrešku propisuju se strujne i kutne pogreške prikazane u tablici 3.4. [11].

Tablica 3.4. Granice pogreške za strujne mjerne transformatore [2].

Klasa točnosti	± granice strujnih pogrešaka u % pri				± granice kutnih pogrešaka u minutama pri			
	0,1 I_N	0,2 I_N	1,0 I_N	1,2 I_N	0,1 I_N	0,2 I_N	1,0 I_N	1,2 I_N
0,1	0,25	0,2	0,1	0,1	10	8	5	5
0,2	0,5	0,35	0,2	0,2	20	15	10	10
0,5	1,0	0,75	0,5	0,5	60	45	30	30
1	2,0	1,5	1,0	1,0	120	90	60	60
3	0,5 do 1,2 $I_N \rightarrow 3,0$				Nisu ograničene			
5	0,5 do 1,2 $I_N \rightarrow 5,0$				Nisu ograničene			

3.2. Vrste transformatora s obzirom na hlađenje

Prolaskom struje kroz namote transformatora dolazi do stvaranja topline. To stvaranje topline uzrokuje određene gubitke u transformatoru. Kako bi se ti gubici smanjili, transformator je potrebno nekako hladiti. Ovisno o vrsti hlađenja, razlikuju se dvije vrste transformatora, uljni i suhi transformatori.

3.2.1. Uljni transformatori

Uljni transformatori koriste izolacijsku tekućinu velikog specifičnog toplinskog kapaciteta za hlađenje. Na ovaj način najčešće se hlade transformatori velikih nazivnih snaga i napona. Uljni distributivni transformatori dimenzionirani su za nazivne snage od 50 kVA do 2500 kVA te maksimalni pogonski napon od 36 kV. To su većinom trofazni uljni transformatori hlađeni prirodnim strujanjem ulja oko namota kao primarno rashladno sredstvo te zraka kao sekundarnog rashladnog sredstva (ONAN – *Oil Natural Air Natural*). Prema IEC normi postoji još načina hlađenja kao što su ONAF (*Oil Natural Air Forced*), OFAF (*Oil Forced Air Forced*), te OFWF (*Oil Forced Water Forced*). Ovi transformatori prikladni su za rad i u zatvorenom i u otvorenom prostoru, a ovisno o prostoru razlikuju se samo po izvedbi provodnih izolatora. U tablici 3.5. prikazani su gubici zbog opterećenja i naponi kratkog spoja za niz nazivnih snaga od 50 kVA do 2500 kVA te maksimalnog napona 24 kV. Niz A_k predstavlja najniže gubitke koji se obično koriste u EU [12, 13].

Tablica 3.5. Prikaz gubitaka zbog tereta P_k (W) pri 75° za $U_m = 24$ kV [13].

Nazivna snaga [kVA]	D_k [W]	C_k [W]	B_k [W]	A_k [W]	Napon kratkog spoja [%]
50	1350	1100	875	750	4
100	2150	1750	1475	1250	
160	3100	2350	2000	1700	
250	4200	3250	2750	2350	
315	5000	3900	3250	2800	
400	6000	4600	3850	3250	
500	7200	5500	4600	3900	
630	8400	6500	5400	4600	
630	8700	6750	5600	4800	6
800	10500	8400	7000	6000	
1000	13000	10500	9000	7600	
1250	16000	13500	11000	9500	
1600	20000	17000	14000	12000	
2000	26000	21000	18000	15000	
2500	32000	26500	22000	18500	

Gubici praznog hoda i razina buke prikazani su u tablici 3.6.

Tablica 3.6. Gubici praznog hoda P_0 i razina zvučne snage L_{wA} (dB(A)) za $U_m = 24$ kV [13].

Nazivna snaga	E_0		D_0		C_0		B_0		A_0		Napon kratkog spoja
	P_0 [W]	L_{wA} [dB(A)]	P_0 [W]	L_{wA} [dB(A)]	P_0 [W]	L_{wA} [dB(A)]	P_0 [W]	L_{wA} [dB(A)]	P_0 [W]	L_{wA} [dB(A)]	
50	190	55	145	50	125	47	110	42	90	39	4
100	320	59	260	54	210	49	180	44	145	41	
160	460	62	375	57	300	52	260	47	210	44	
250	650	65	530	60	425	55	360	50	300	47	
315	770	67	630	61	520	57	440	52	360	49	
400	930	68	750	63	610	58	520	53	430	50	
500	1100	69	880	64	720	59	610	54	510	51	
630	1300	70	1030	65	860	60	730	55	600	52	
630	1200	70	940	65	800	60	680	55	560	52	6
800	1400	71	1150	66	930	61	800	56	650	53	
1000	1700	73	1400	68	1100	63	940	58	770	55	
1250	2100	74	1750	69	1350	64	1150	59	950	56	
1600	2600	76	2200	71	1700	66	1450	61	1200	58	
2000	3100	78	2700	73	2100	68	1800	63	1450	60	
2500	3500	81	3200	76	2500	71	2150	66	1750	63	

Primjer distributivnog transformatora prikazan je na slici 3.10.



Slika 3.10. Uljni distributivni transformator [12].

3.2.2. Suhi transformator

Za razliku od uljnog transformatora, suhi transformator ne koristi ulje za hlađenje, već upotrebljava zrak u transformatoru. Da bi se omogućio veći protok zraka, kod suhog transformatora ugrađuju se ventilatori. To za posljedicu ima povećano odvođenje topline iz transformatora, a na taj se način smanjuju gubici transformatora. Suhi distributivni transformatori dimenzionirani su za nazivne snage od 100 do 5000 kVA te maksimalni pogonski napon od 24 kVA [12]. Primjer suhog distributivnog transformatora prikazan je na slici 3.11.



Slika 3.11. Suhi distributivni transformator [12].

4. Gubici u transformatoru

Gubici u transformatoru dijele se na gubitke praznog hoda ili gubitke u željezu te na gubitke kratkog spoja ili gubitke u bakru. Smanjenjem gubitaka može se povećati energetska učinkovitost transformatora. Budući da transformator nije pomičan nego statičan uređaj, njegovi gubici su manji nego gubici drugih strojeva. Primjerice, gubici su manji u usporedbi s električnim motorima jer kod transformatora nema mehaničkog rada već statička transformacija napona i struje .

4.1. Gubici praznog hoda transformatora

Zagrijavanjem željezne jezgre dolazi do gubitaka u praznom hodu ili do gubitaka u željezu. Gubici praznog hoda mogu se podijeliti u tri skupine:

- gubici vrtložnih struja,
- gubici histereze i
- gubici rasipanja.

Spomenuti gubici proporcionalni su naponu i ovise samo o njemu. Inducirani napon do kojeg dolazi uslijed promjenjivog magnetskog toka stvara gubitke vrtložnih struja u jezgri. Taj napon dovodi do protoka struje u jezgri, a posljedično do zagrijavanja jezgre. Odnos ovisnosti relativnih gubitaka vrtložnih struja može se izraziti jednačinom:

$$p_{Fe,v} = k_v f^2 B_m^2 \quad (3-1)$$

gdje je k_v konstanta materijala, f frekvencija napajanja, a B_m maksimalna magnetska indukcija. Nadalje, jednačina kojom se mogu opisati ukupni gubici vrtložnih struja je:

$$P_{Fe} = p_{Fe,v} m_{Fe} \quad (3-2)$$

Gdje je m_{Fe} masa željezne jezgre. Gubici vrtložnih struja smanjuju se ovisno o tome kako je izrađena željezna jezgra. Zbog navedenih gubitaka, željezna jezgra se izrađuje tako što se slažu transformatorski limovi, a električna otpornost jezgre povećava se tako što se legiraju limovi sa silicijem. Gubici vrtložnih struja smanjuju se korištenjem tankih limova. Gubitke histereze uzrokuje promjena smjera čestica željeza prilikom djelovanja promjenjivog magnetskog polja. Promjena smjera čestica izjednačava se s frekvencijom napajanja transformatora. Kada se smjer mijenja, dolazi do međusobnog trenja čestica željezne jezgre, a to uzrokuje zagrijavanje željezne jezgre. Ti gubici ovisni su o obliku petlje histereze. Oblik petlje ovisi o kvaliteti limova koji čine

jezgru, maksimalnoj vrijednosti magnetske indukcije (B_m) i frekvenciji (f). Relativni gubici histereze mogu se izračunati formulom:

$$p_{Fe,h} = k_h f B_m^x \quad (3-3)$$

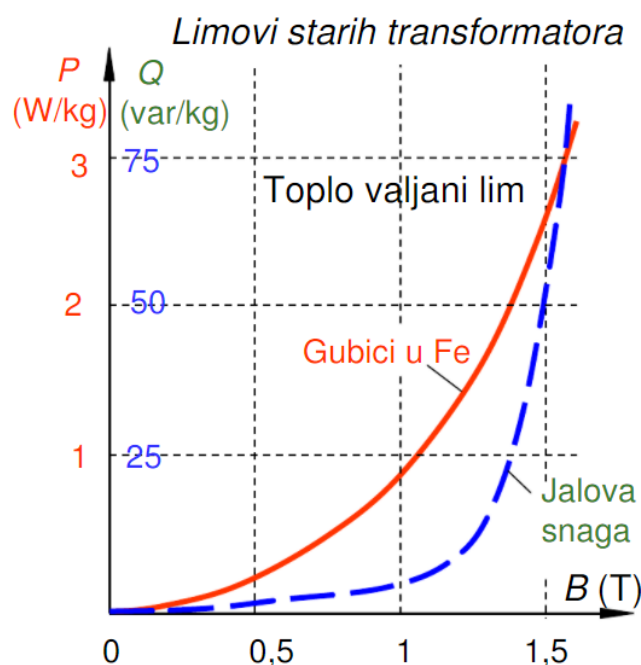
Gdje je k_h konstanta materijala, a x promjenjivi parametar koji ovisi o indukciji. Ukupni gubici histereze dobiju se umnoškom relativnih gubitaka histereze ($p_{Fe,h}$) i mase željezne jezgre (m_{Fe}).

$$P_{Fe,h} = p_{Fe,h} m_{Fe} \quad (3-4)$$

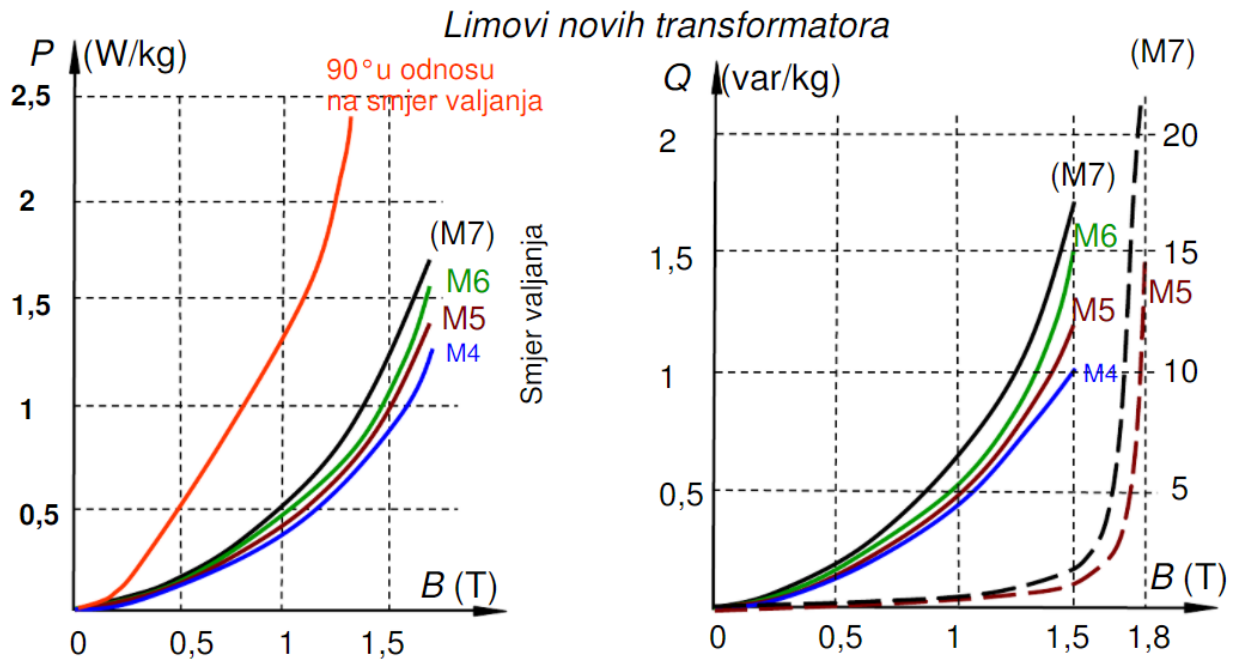
Gubici histereze smanjuju se izabiranjem posebnih magnetskih vrsta željeza s malim magnetskim trenjem. Gubicima rasipanja smatraju se gubici neulančanog dijela magnetskog polja koji nije u doticaju sa željeznom jezgrom. S obzirom na to da u proračunu transformatora nije važno kolika vrijednost pada napona na primaru, a kolika na sekundaru, za izračun se koristi Blondelov faktor rasipanja koji je prikazan jednadžbom:

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} \quad (3-5)$$

Gdje je M međuinduktivitet primara i sekundara, L_1 induktivitet primara i L_2 induktivitet sekundara [14].



Slika 4.1. Gubici u željezu starijih transformatora [14].



Slika 4.2. Gubici u željezu novih transformatora [14].

4.2. Gubici kratkog spoja transformatora

Gubici kratkog spoja ili gubici u bakru toplinski su gubici u namotima izrađenim od bakra za vrijeme protoka struje kroz vodiče. Navedeni gubici ovisni su samo o struji, a ne ovise o naponu napajanja. Ukupni gubici kratkog spoja dobiju se zbrajanjem gubitaka u primarnom i sekundarnom namotu, a mogu se izračunati pomoću sljedećih jednadžbi:

$$P_{Cu} = P_{Cu_1} + P_{Cu_2} \quad (3-6)$$

$$P_{Cu_1} = I_1^2 \times R_1 \quad (3-7)$$

$$P_{Cu_2} = I_2^2 \times R_2 \quad (3-8)$$

Gdje su P_{Cu} ukupni gubici u bakru, P_{Cu_1} gubici kratkog spoja primarnog namota, P_{Cu_2} gubici kratkog spoja sekundarnog namota, I_1 struja primarnog namota, I_2 struja sekundarnog namota, R_1 radni otpor primarnog namota i R_2 radni otpor sekundarnog namota.

Radni otpor vodiča računa se sljedećom jednadžbom:

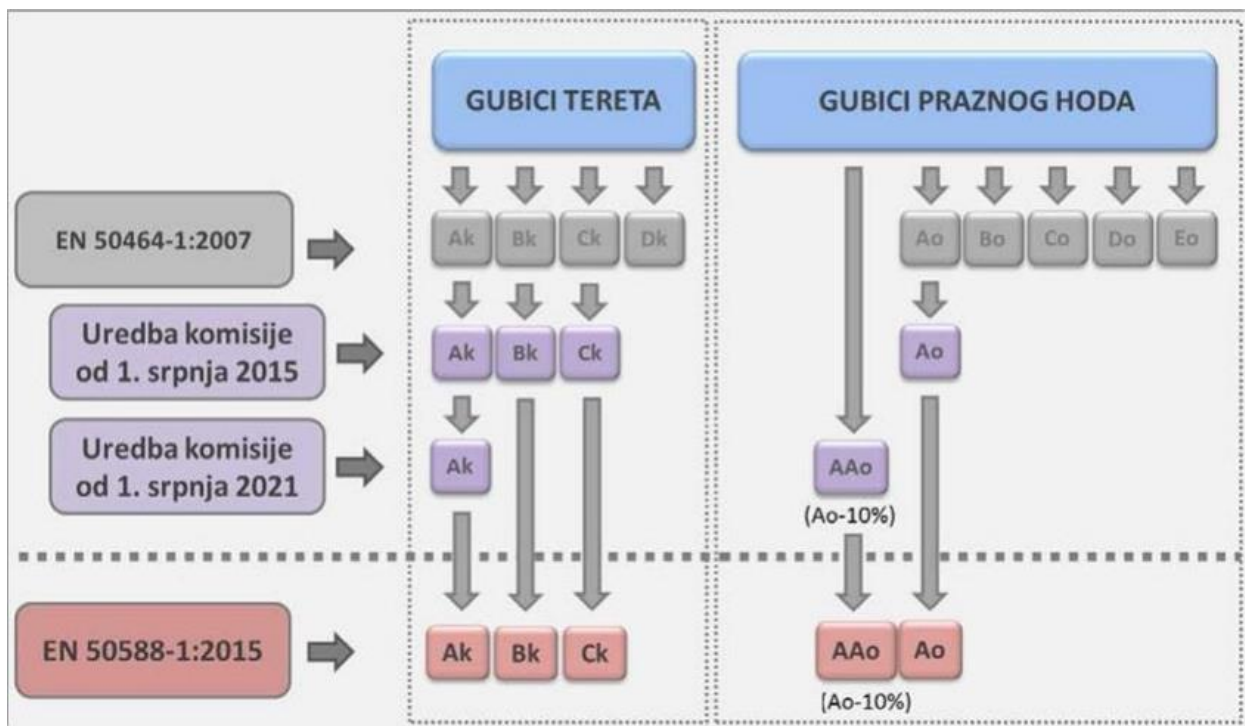
$$R = \rho \times \frac{l_{Cu}}{q} \quad (3-9)$$

Gdje je ρ specifični otpor bakra, l_{Cu} duljina vodiča i q presjek vodiča.

Teorijski, navedeni gubici bi se mogli smanjiti povećanjem presjeka vodiča, međutim, u praksi se koristi hlađenje zbog ekonomskih razloga. Ovim načinom iznos gubitaka se ne smanjuje, ali se otklanjaju negativne posljedice porasta temperature preko dopuštene granice. Povećavanjem međusobnog razmaka namota omogućuje se lakši protok ulja te učinkovitiji odvod topline, a sve navedeno dovodi do boljeg hlađenja [14].

5. Tehnička rješenja transformatora

U današnje vrijeme za izvedbu energetskih distribucijskih transformatora moraju se poštovati određene norme i uredbe koje donosi Europska komisija. Prema uredbi komisije (EU) br. 548/2014 i europskoj normi HRN EN 50588-1:2017, koristi se ekološki dizajn distributivnih transformatora [15].



Slika 5.1. Ekološki dizajn transformatora [16].

Ova uredba i norma primjenjuje se na dosadašnja tehnička rješenja distribucijskih transformatora, odnosno na uljne i suhe transformatore. Prema njima su definirani maksimalni gubici te indeksi vršne učinkovitosti (eng. *Peak Efficiency Indeks, PEI*) distribucijskih transformatora. Navedene vrijednosti dijele se na razinu 1 i razinu 2 [16]. Maksimalni gubici opterećenja i gubici u željezu (izraženi u W) za trofazne srednje velike uljne i suhe distribucijske transformatore razine 1 i razine 2 prikazani su u tablici 5.1. te u tablici 5.2.

Tablica 5.1. Maksimalni gubici za uljne transformatore [15].

Nazivna snaga (kVA)	Razina 1. (od 1. srpnja 2015.)		Razina 2. (od 1. srpnja 2021.)	
	Najviši teretni gubici P_k (W)	Najviši gubici praznog hoda P_0 (W)	Najviši teretni gubici P_k (W)	Najviši gubici praznog hoda P_0 (W)
≤ 25	C_k (900)	A_0 (70)	A_k (600)	$A_0 - 10\%$ (63)
50	C_k (1100)	A_0 (90)	A_k (750)	$A_0 - 10\%$ (81)
100	C_k (1750)	A_0 (145)	A_k (1250)	$A_0 - 10\%$ (130)
160	C_k (2350)	A_0 (210)	A_k (1750)	$A_0 - 10\%$ (189)
250	C_k (3250)	A_0 (300)	A_k (2350)	$A_0 - 10\%$ (270)
315	C_k (3900)	A_0 (360)	A_k (2800)	$A_0 - 10\%$ (324)
400	C_k (4600)	A_0 (430)	A_k (3250)	$A_0 - 10\%$ (387)
500	C_k (5500)	A_0 (510)	A_k (3900)	$A_0 - 10\%$ (459)
630	C_k (6500)	A_0 (600)	A_k (4600)	$A_0 - 10\%$ (540)
800	C_k (8400)	A_0 (650)	A_k (6000)	$A_0 - 10\%$ (585)
1000	C_k (10500)	A_0 (770)	A_k (7600)	$A_0 - 10\%$ (693)
1250	B_k (11000)	A_0 (950)	A_k (9500)	$A_0 - 10\%$ (855)
1600	B_k (14000)	A_0 (1200)	A_k (12000)	$A_0 - 10\%$ (1080)
2000	B_k (18000)	A_0 (1450)	A_k (15000)	$A_0 - 10\%$ (1305)
2500	B_k (22000)	A_0 (1750)	A_k (18500)	$A_0 - 10\%$ (1575)
3150	B_k (27500)	A_0 (2200)	A_k (23000)	$A_0 - 10\%$ (1980)

Tablica 5.2. *Maksimalni gubici za suhe transformatore [15].*

Nazivna snaga (kVA)	Razina 1. (od 1. srpnja 2015.)		Razina 2. (od 1. srpnja 2021.)	
	Najviši teretni gubici P_k (W)	Najviši gubici praznog hoda P_0 (W)	Najviši teretni gubici P_k (W)	Najviši gubici praznog hoda P_0 (W)
≤ 50	B_k (1700)	A_0 (200)	A_k (1500)	$A_0 - 10\%$ (180)
100	B_k (2050)	A_0 (280)	A_k (1800)	$A_0 - 10\%$ (252)
160	B_k (2900)	A_0 (400)	A_k (2600)	$A_0 - 10\%$ (360)
250	B_k (3800)	A_0 (520)	A_k (3400)	$A_0 - 10\%$ (468)
400	B_k (5500)	A_0 (750)	A_k (4500)	$A_0 - 10\%$ (675)
630	B_k (7600)	A_0 (1100)	A_k (7100)	$A_0 - 10\%$ (990)
800	A_k (8000)	A_0 (1300)	A_k (8000)	$A_0 - 10\%$ (1170)
1000	A_k (9000)	A_0 (1550)	A_k (9000)	$A_0 - 10\%$ (1395)
1250	A_k (11000)	A_0 (1800)	A_k (11000)	$A_0 - 10\%$ (1620)
1600	A_k (13000)	A_0 (2200)	A_k (13000)	$A_0 - 10\%$ (1980)
2000	A_k (16000)	A_0 (2600)	A_k (16000)	$A_0 - 10\%$ (2340)
2500	A_k (19000)	A_0 (3100)	A_k (19000)	$A_0 - 10\%$ (2790)
3150	A_k (22000)	A_0 (3800)	A_k (22000)	$A_0 - 10\%$ (3420)

Indeks vršne učinkovitosti računa se prema izrazu:

$$PEI = 1 - \frac{2 \times (P_0 + P_{c0})}{S_r \times \sqrt{\frac{P_0 + P_{c0}}{P_k}}} \quad (5-1)$$

Gdje je:

P_0 – gubici praznog hoda

P_k – gubici tereta

S_r – nazivna snaga

P_{c0} – gubici rashladnog sustava

Vrijednosti indeksa najniže vršne učinkovitosti za uljne i suhe distribucijske transformatore prikazane su u tablici 5.3. te u tablici 5.4.

Tablica 5.3. *Indeksi najniže vršne učinkovitosti za uljne transformatore [15].*

Nazivna snaga (kVA)	Razina 1. (1. srpnja 2015.)	Razina 2. (1. srpnja 2021.)
	Indeks najniže vršne učinkovitosti (%)	
$3150 < S_r \leq 4000$	99,465	99,532
5000	99,483	99,548
6300	99,510	99,571
8000	99,535	99,593
10000	99,560	99,615
12500	99,588	99,640
16000	99,615	99,663
20000	99,639	99,684
25000	99,657	99,700
31500	99,671	99,712
40000	99,684	99,724

Tablica 5.4. *Indeksi najniže vršne učinkovitosti za suhe transformatore [15].*

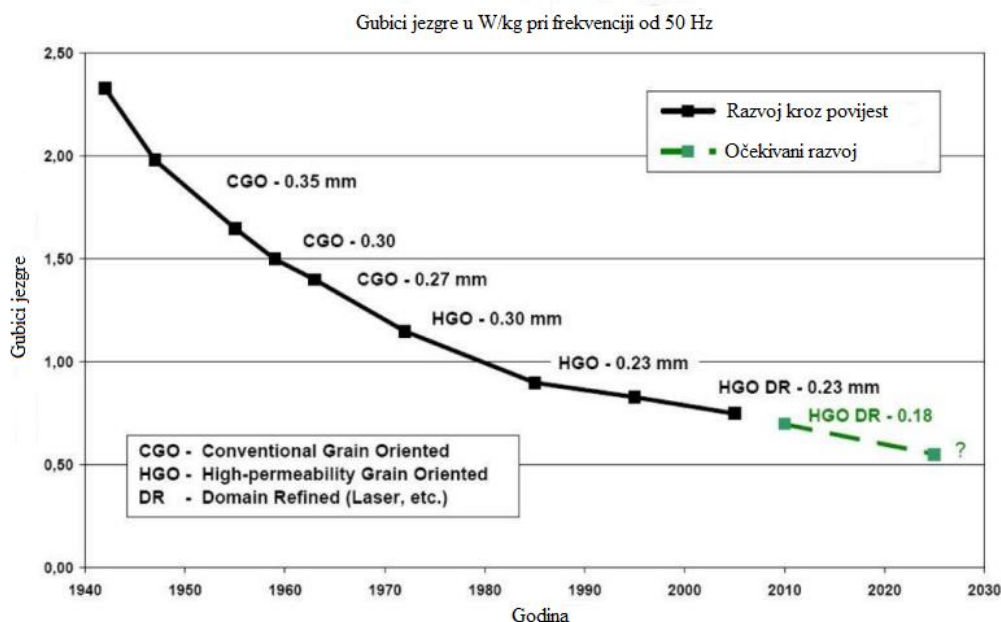
Nazivna snaga (kVA)	Razina 1. (1. srpnja 2015.)	Razina 2. (1. srpnja 2021.)
	Indeks najniže vršne učinkovitosti (%)	
$3150 < S_r \leq 4000$	99,348	99,382
5000	99,354	99,387
6300	99,356	99,389
8000	99,357	99,390
≥ 10000	99,357	99,390

Transformatori istih snaga izvedbe imaju različite vrijednosti tehničkih parametara za ispunjenje uvjeta razine 1 u odnosu na razinu 2. Usporedba tehničkih parametara za različite razine prikazana je u tablici 5.5.

Tablica 5.5. Tehnički parametri transformatora ekološkog dizajna [16].

Snaga [kVA]	Razina gubitaka	P ₀ [W]	P _k [W]	L _{w(A)} dB(A)	DIMENZIJA I MASE					POVEĆANJE UKUPNE MASE
					DUŽINA [mm]	ŠIRINA [mm]	VISINA [mm]	MASA ULJA [kg]	UKUPNA MASA [kg]	
50	A ₀ C _k	90	1100	≤39	795	685	1175	105	400	30%
	AA ₀ A _k	81	750	≤38	760	660	1300	100	520	
630	A ₀ C _k	600	6500	≤52	1480	935	1575	295	1690	33%
	AA ₀ A _k	540	4600	≤51	1260	955	1650	350	2240	
2000	A ₀ B _k	1450	18000	≤60	1940	1180	1910	760	4560	36%
	AA ₀ A _k	1305	15000	≤59	2280	1280	2380	1030	6200	

Prema tablici 5.5., može se zaključiti da transformatori razine 2 imaju manje gubitke, ali zbog potrebe povećanja presjeka jezgre te povećanja presjeka vodiča, imaju veću ukupnu masu. Ujedno ovi povećani presjeci jezgre i vodiča donose i povećanu cijenu proizvodnje transformatora. Kako bi se ispunili uvjeti ekološkog dizajna, dolazi do potrebe za većom kvalitetom materijala za izradu transformatora. Posljedično, jezgra se izrađuje od laserski tretiranih visokopermeabilnih limova (eng. *HGO DR – high permeability grain oriented domain refined*). Nadalje, ugrađuju se limovi sa specifičnim gubicima od 0,75 W/kg. Najniže vrijednosti gubitaka jezgre i gubitaka tereta postižu se korištenjem najboljih laserskih limova (ZDKH – 23). Gubici jezgre korištenjem različitih vrsta limova kroz povijest prikazani su na slici 5.2. [16].



Slika 5.2. Utjecaj vrste limova na gubitke jezgre [16].

Transformatori kao statički elektromagnetski uređaji mogu se smatrati kapitalnom investicijom, jer kroz svoj životni vijek, koji može trajati do nekoliko desetljeća, mogu povratiti vrijednost

početne investicije. Nadalje, neke elektrodistribucije znaju zahtijevati da proizvođač sam odredi razine gubitaka transformatora u skladu s ekološkom izvedbom te u skladu sa zadanim cijenama gubitaka. Kapitalizirana cijena transformatora može se podijeliti u dvije komponente, osnovna cijena transformatora te cijena troškova eksploatacije transformatora za vrijeme njegovog životnog vijeka. Navedena cijena može se izraziti kao:

$$CT = OCT + A \times P_k + B \times P_0 \quad (5-2)$$

Gdje je:

CT – kapitalizirana cijena transformatora [€]

OCT – prodajna cijena transformatora [€]

A – cijena gubitaka tereta [€/kW]

P_k – gubici tereta [kW]

B – cijena gubitaka praznog hoda [€/kW]

P_0 – gubici praznog hoda [kW]

Cijena gubitaka tereta (A), te cijena gubitaka praznog hoda (B) ovise o nekoliko parametara:

- Životnom vijeku transformatora
- Predviđenom opterećenju transformatora
- Kamatnoj stopi
- Cijeni energije

Uobičajeno cijena gubitaka tereta (A) u EU iznosi od 5000 do 17000 €/kW, dok cijena gubitaka praznog hoda (B) iznosi od 500 do 2500 €/kW [16].

6. Zaključak

Nakon opisanog teorijskog rada transformatora te njegovih vrsta i gubitaka, dana su nova tehnička rješenja za izvedbu distribucijskih transformatora. Spomenuta tehnička rješenja moraju zadovoljavati određene norme i uredbe dane od strane Europske komisije čija je članica i Republika Hrvatska. Stoga te norme i uredbe moraju poštovati proizvođači i korisnici unutar Republike Hrvatske. U radu je definirana norma „HRN EN 50588-1:2017“ i uredba komisije (EU) „br. 548/2014“ prema kojoj se koristi ekološka izvedba distribucijskih transformatora. Zadovoljavanjem uredbi i normi usmjerava se tehnološki napredak distribucijskih transformatora prema izvedbama transformatora sa smanjenim gubicima i boljom učinkovitošću, a da se pri tome ispunjavaju uvjeti zaštite okoliša. Međutim, ovakvi transformatori imaju povećanje ukupne mase zbog korištenja dodatnih materijala, što za posljedicu ima i povećanje ukupne cijene proizvodnje. Zaključno, tijekom godina princip rada transformatora ostao je isti, no razvojem novih tehnoloških dostignuća i zbog potrebe za smanjenjem gubitaka, uvedena su nova tehnička rješenja. Ta se rješenja ostvaraju modernizacijom prilikom izrade limova te prilagodbom dimenzija transformatora.

LITERATURA

- [1] A. Dolenc ,Transformatori, 1 i 2 dio, Sveučilište u Zagrebu, 1991.
- [2] D. Sokolović, Energetska učinkovitost energetskih transformatora, završni rad, Osijek, 2019., dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:167245> [17.09.2021.]
- [3] D. Pajić, Praktikum 6 Transformatori, Sveučilište u Zagrebu
http://www.phy.pmf.unizg.hr/~dpajic/buksa/praktikum/6_Transformator.pdf
[15.09.2021.]
- [4] Z. Varga, Električni strojevi i uređaji, Zagreb, 2016., dostupno na: <https://element.hr/wp-content/uploads/2020/06/unutra-52106.pdf> [17.09.2021.]
- [5] D. Vukasović, Određivanje grupe spoja transformatora, završni rad, Split, 2020., dostupno na <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:228:530769> [17.09.2021.]
- [6] Osnove elektroenergetskih sistema, predavanje 4, dostupno na:
<https://vdocuments.mx/reader/full/6energetski-transformatori-vo-hep-i-priklucivanje-na-mreza> [17.09.2021.]
- [7] Electrical4U, Auto Transformer: What is it?, dostupno na: <https://www.electrical4u.com/what-is-auto-transformer/> [16.09.2021.]
- [8] Što je autotransformator?, dostupno na: <https://hr.best-diy-site.com/4266456-> [17.09.2021.]
- [9] Crushtymks, Energija i snaga za sve, dostupno na: <https://crushtymks.com/hr/energy-and-power/724-autotransformer-connection-explained.html> [17.09.2021.]
- [10] D. Žarko, Autotransformator, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, dostupno na: <https://www.scribd.com/doc/219601671/Autotransformator> [17.09.2021.]
- [11] Tehnička enciklopedija, Mjerna nesigurnost – Mjerni transformatori, dostupno na:
https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/mjerni_transformatori.pdf [18.09.2021.]
- [12] D. Belić, Analiza sustava za proizvodnju distributivnih i specijalnih transformatora, diplomski rad, Zagreb 2015., dostupno na: http://repositorij.fsb.hr/4517/1/Belic_2015_diplomski.pdf
[17.09.2021.]
- [13] I. Sitar, Distributivni uljni transformatori prema normi EN 50464, Šibenik, 2008., dostupno na: <http://www.ho-cired.hr/wp-content/uploads/2013/06/SO1-05.pdf> [17.09.2021.]

- [14] Z. Maljković, Transformatori, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2010., dostupno na: <https://vdocuments.mx/reader/full/transformatori-maljkovic> [17.09.2021.]
- [15] Službeni list Europske unije, UREDBA KOMISIJE (EU) br. 548/2014, dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/548/oj/hrv> [17.09.2021.]
- [16] J. Kralj, K. Pongrašić, D. Trstoglavec, M. Mikulić, EKOLOŠKI DIZAJN DISTRIBUTIVNIH TRANSFORMATORA PREMA UREDBI KOMISIJE (EU) BR. 548/2014 I EUROPSKOJ NORMI HRN EN 50588-1:2017, Opatija, 2018., dostupno na: https://www.ho-cired.hr/images/OPATIJA2018/Prezentacije/SO1/Prezentacija-SO1_01.pdf [18.09.2021.]

SAŽETAK

U ovome radu obrađene su početne karakteristike i konstrukcije transformatora. Nadalje, opisane su vrste transformatora s obzirom na primjenu, energetski transformator, autotransformator te mjerni transformatori. Također, obrađeni su transformatori s različitim načinom hlađenja, uljni te suhi transformator koji se koriste u distribuciji. Dane su uredbe i norme koje moderni transformatori trebaju zadovoljiti svojim tehničkim rješenjima kako bi se mogli upotrebljavati u današnjem elektroenergetskom sustavu.

Ključne riječi: *konstrukcije transformatora, energetski transformator, uljni transformator, suhi transformator, norme*

ABSTRACT

Development of power distribution transformers

This paper explains the initial characteristics and constructions of transformers. Furthermore, paper describes the types of transformers used for different applications, power transformer, autotransformer and measuring transformers. Also, transformers with different cooling methods, oil and dry transformer used in distribution are illustrated. Finally, paper defines regulations and standards that modern transformers need to meet their technical solutions in order to be used in today's power system.

Keywords: *transformers constructions, power transformer, oil transformer, dry transformer, standards*

ŽIVOTOPIS

Nikola Blažević rođen je 11. ožujka 1997. godine u Đakovu. Završava osnovnu školu „Josipa Antuna Čolnća“ 2011. godine u Širokom Polju 2011. te upisuje Srednju strukovnu školu Braće Radić u Đakovu. Škola kasnije mijenja naziv u Srednja strukovna škola Antuna Horvata, a upisao je smjer računalni tehničar za strojarstvo. Godine 2015. upisuje preddiplomski stručni studij Elektrotehnike, smjer elektroenergetika na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, današnji naziv Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Kroz fakultativno obrazovanje u 5. semestru stručnog studija odrađuje stručnu praksu u HEP ODS d.o.o. – Elektroslavonija Osijek – Centar za terenske aktivnosti – Terenska jedinica Đakovo. Nakon završetka stručnog studija, godine 2018. upisuje razlikovne obveze na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija. Završetkom razlikovnih obveza, godine 2019. upisuje diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika izborni blok DEA – Elektroenergetski sustavi.
