+++++_Layout 1 02-Mar-25 21:34 Page 3

Mali transformatori i prigušnice

Teorija i praksa

Dr Radojle Radetić, dipl. inž. el.

Agencija Eho
www.infoelektronika.net

MALI TRANSFORMATORI I PRIGUŠNICE

– TEORIJA I PRAKSA –

Dr Radojle Radetić, dipl. inž. el.

Recenzenti:

Miodrag Gajić dipl. inž. el. FMT Zaječar

Profesor dr Dejan Jerkan, FTN, Novi Sad

Kompjuterska obrada teksta: Radojle Radetić

Izdaje i štampa: Agencija Eho, Niš, 2025

ISBN 978-86-80134-59-8

CIP - Каталогизација у публикацији Народна библиотека Србије, Београд

621.314.23

РАДЕТИЋ, Радојле, 1957-
Mali transformatori i prigušnice : teorija i praksa / Radojle Radetić. - Niš : Agencija Eho, 2025 (Niš : Agencija Eho). - 168 str. : ilustr. ; 24 cm

Autorova slika. - Tiraž 200. - O autoru: str. 161. - Bibliografija: str. 159.

ISBN 978-86-80134-59-8

a) Трансформатори

COBISS.SR-ID 163626505

Važne napomene

1. Autor je nastojao da materija u ovoj knjizi bude izložena jasno i tačno. I pored velikih napora da se izbegnu greške, ne može se garantovati da one ne postoje. Autor na to upozorava čitaoce i ne snosi nikakvu odgovornost za moguće posledice.
2. Izrada, ispitivanje i rad sa transformatorima može biti opsan i po život i zdravlje, i to moraju raditi stručna lica uz korišćenje odgovarajuće zaštitne opreme.
3. Autor zadržava sva prava eventualnih izmena, bez obaveze prethodnog obaveštenja.
4. Bilo kakvo umnožavanje, preštampavanje i kopiranje celine ili pojedinih delova ove knjige, nije dozvoljeno bez prethodne saglasnosti autora.

PREDGOVOR

Transformatori su jedna važna i velika grupa statičkih električnih mašina. Proizvode se za veliki broj namena, u širokom opsegu snaga, napona, struja, frekvencija itd. Pod malim transformatorima podrazumevaju se monofazni i trofazni transformatori hlađeni prirodnom cirkulacijom vazduha u opsegu snaga od reda VA do nekoliko desetina kVA.

Teorija transformatora je detaljno obrađena u postojećoj domaćoj literaturi. Postoji nekoliko knjiga koje se bave konstrukcijom transformatora. U tim knjigama akcenat je stavljen na velike, uljem hlađene transformatore koji se primenjuju u distribuciji električne energije (V. Petrović B. Mitraković, I. Volčkov, Đ. Kalić, Krstović i Radosavljević, i drugi).

U kontaktima sa kolegama iz nekoliko firmi – proizvođača malih transformatora ispostavilo se da njih ne prati i adekvatna literatura. Opšte poznavanje teorije transformatora je potrebno ali ne i dovoljno za njihov proračun, izradu i ispitivanje. Ova knjiga je pokušaj da se bar malo ublaži taj nedostatak.

Na području bivše države (Jugoslavije) postojalo je nekoliko knjiga koje su obrađivale ovu problematiku (T. Jelaković, F. Mlakar i I. Kolar, i drugi), ali se radi o literarturi staroj više od 50 godina, koju je danas teško naći. To je literatura primerena potrebama vremena u kome je nastala. Sveukupni razvoj nametnuo je potrebu za literaturom prilagođenom savremenim potrebama u ovoj oblasti. Mali transformatori i dalje postoje, proizvode se i potrebna je literatura o njima.

U podnaslovu ove knjige stoji “teorija i praksa“. Teorija je zastupljena minimalno, samo toliko koliko je autor smatrao da je potrebno za okvire ove knjige. Pod praksom autor podrazumeva proračun izradu i ispitivanje. Akcenat je stavljen na proračunima a koncepcija je takva da su za sve najvažnije veličine napravljeni matematički modeli. Sa ovakvim pristupom olakšani su neki budući koraci kao što su izrada aplikativnog softvera, ili bar ekselove tabele, za proračun malih transformatora.

Ova knjiga je namenjena čitaocima koji već imaju osnovna znanja o transformatorima, a koji se bave konstrukcijom, izradom i ispitivanjem malih transformatora. Nadam se da će ova knjiga odgovoriti svojoj nameni, i biće mi veliko zadovoljstvo ako se u tome bude bar delimično uspelo.

Ovde želim da se zahvalim svima koji su svojim savetima, primedbama i sugestijama doprineli boljem kvalitetu ove knjige. Tu u prvom redu mislim na recenzente koji su mi bili i velika podrška tokom izrade teksta.

Veliku zahvalnost dugujem Fabrici mernih transformatora (FMT) Zaječar D.O.O. koja je bila jedan od inicijatora i velika podrška u izdavanju ove knjige.

U Boru januara 2025. godine. Autor

SADRŽAJ

1. TRANSFORMATORI 6

1.1. Uvod 6
1.2. Veliki energetski transformatori 6
1.3. Mali transformatori 7
1.4. Vrste malih transformatora 7
1.5. Mrežni transformatori 8

2. OSNOVE TRANSFORMATORA 9

2.1. Idealan transformator 9
2.2. Realan transformator 10
2.3. Ekvivalentna šema transformatora 13
2.4. Rasipna induktivnost i reaktansa 14
2.5. Struja kratkog spoja 18
2.6. Strujni udar pri uključenju transformatora 19
2.7. Promena napona 20
2.8. Stepen iskorišćenja transformatora 21
2.9. Autotransformatori 23
2.10. Trofazni transformatori 25

3. FEROMAGNETNO JEZGRO I NAMOTI 27

3.1. Feromagnetno jezgro 27
3.1.1 Magnetni materijali 27
3.1.2 Načini izrade jezgara za transformatore 31
3.1.3 Oblici jezgara za transformatore 32
3.1.4 Izolacija lima 34
3.1.5 Gubici snage u jezgru (gvožđu) 34
3.2. Namoti 38
3.2.1 Provodnici 38
3.2.2 Gubici snage u namotajima 40
3.2.3 Izolacija malih transformatora 41
3.2.4 Izolacioni materijali 44
3.2.5 Koeficijent ispune prozora 47
3.2.6 Mase jezgra (gvožđa) i namotaja (bakra) 49

4. ELEMENTI PRORAČUNA MALIH TRANSFORMATORA 53

4.1. Zagrevanje transformatora 53
4.2. Odvođenje toplote konvekcijom 55
4.3. Izbor magnetne indukcije i gustine struje 56
4.4. Tipske vrednosti gubitaka u bakru 61
4.5. Tipske vrednosti porasta temperature namota 62
4.6. Gubici u bakru 63

4.7. Termičke otpornosti jezgara i namota 63
4.8. Stvarni porast temperature namota 64
4.9. Jedinične mase i cene transformatora 65

5. PRORAČUN MALIH TRANSFORMATORA 68

5.1. Cilj i strategije proračuna transformatora 68
5.2. Polazni podaci za proračun 69
5.3. Oblici jezgara 69
5.4. Proračun snage transformatora 70
5.4.1 Snaga monofaznih transformatora sa EI jezgrom na *f*=50 Hz 72
5.4.2 Snaga monofaznih transformatora sa UI jezgrom na *f*=50 Hz 73
5.4.3 Snaga trofaznih transformatora sa 3EI jezgrom na *f*=50 Hz 73
5.5. Tablična metoda izbora jezgra 74
5.6. Proračun dimenzija jezgra 74
5.6.1 Monofazni transformator sa EI jezgrom za *f*=50 Hz 74
5.6.3 Trofazni transformator sa 3EI jezgrom za *f*=50 Hz 76
5.7. Proračun brojeva navojaka za *f*=50 Hz 78
5.8. Struje namota transformatora 79
5.9. Gustina struje 79
5.10. Preseci i oblici provodnika 80
5.11. Provera smeštaja žice 80
5.12. Mase gvožđa i bakra 81
5.13. Gubici u gvožđu 82
5.14. Aktivne otpornosti transformatora 82
5.15. Gubici u bakru 83
5.16. Termičke otpornosti jezgara i namota 83
5.17. Porast temperature namota 83
5.18. Tok proračuna 84
5.19. Proračun monofaznih transformatora 85
5.19.1 Oblik jezgra 86
5.19.2 Struje primara i sekundara 86
5.19.3 Proračun širine i debljine jezgra 87
5.19.4 Proračun brojeva navojaka u namotima 88
5.19.5 Proračun preseka provodnika 88
5.19.6 Proračun mase gvožđa i bakra 89
5.19.7 Aktivne otpornosti namota i kratkog spoja 89
5.19.8 Proračun gubitaka u gvožđu 89
5.19.9 Proračun gubitaka u bakru 90
5.19.10 Proračun stepena iskorišćenja 90
5.19.11 Proračun reaktanse rasipanja 90
5.19.12 Proračun napona kratkog spoja 90
5.19.13 Proračun promene napona 90
5.19.14. Porast temperature 91

5.20. Primeri proračuna monofaznih transformatora 92
5.21. Proračun trofaznih transformatora 100
5.21.1 Oblik jezgra 101
5.21.2 Struja primara i sekundara 101
5.21.3 Proračun širine i debljine jezgra 101
5.21.4 Proračun brojeva navojaka u namotima 102
5.21.5 Proračun preseka provodnika 102
5.21.6 Proračun mase gvožđa i bakra 103
5.21.7 Aktivne otpornosti namota i kratkog spoja 103
5.21.8 Proračun gubitaka u gvožđu 103
5.21.9 Proračun gubitaka u bakru 103
5.21.10 Proračun stepena iskorišćenja 104
5.21.11 Proračun reaktanse rasipanja 104
5.21.12 Proračun napona kratkog spoja 104
5.21.13 Proračun promene napona 104
5.21.14 Porast temperature 104
5.22. Primeri proračuna trofaznih transformatora 105
5.23. Torusni transformatori 114
5.24. Skraćeni proračun feritnih transformatora 115

6. PRIGUŠNICE 117

6.1. Induktivnost 117
6.2. Prigušnice sa jezgrom 119
6.3. Reaktivna snaga prigušnice 120
6.4. Proračun prigušnice sa jezgrom za mrežne frekvencije 120

7. IZRADA MALIH TRANSFORMATORA 123

7.1. Dokumentacija transformatora i prigušnica 123
7.2. Namotavanje 124
7.3. Impregnacija namota i transformatora 125
7.4. Slaganje jezgra 127
7.5. Oprema transformatora 127

8. ISPITIVANJE MALIH TRANSFORMATORA 129

8.1. Mehanička ispitivanja 129
8.2. Provera ispravnosti 129
8.3. Merenje temperature 130
8.4. Komadna i tipska ispitivanja 131
8.5. Ispitivanje izolacije 132
8.6. Ogled praznog hoda 133
8.7. Ogled kratkog spoja 134
8.8. Merenje induktivnosti prigušnice 135
8.9. Proces zagrevanja i hlađenja čvrstog tela 136

8.10. Ogled zagrevanja transformatora 137
9. DODATAK 142
9.1. Rad transformatora na različitim frekvencijama 142
9.1.1 Gubici zbog vrtložnih struja 142
9.1.2 Ukupni gubici u gvožđu 143
9.1.3 Rad transformatora u zavisnosti od frekvencije 145
9.1.4 Rad na visokim frekvencijama 148
9.1.5 Rad na niskim frekvencijama 149
9.1.6 Uticaj materijala i oblika jezgra na snagu transformatora 153
9.2. Transformatori za ispravljače 155
LITERATURA 159
IZVODI IZ RECENZIJA 160
O AUTORU 161
PRILOZI 162

1. TRANSFORMATORI

1.1. Uvod

Transformatori su električni uređaji koji putem elektromagnetne indukcije transformišu jedan sistem napona i struje u drugi. Pri tome zadržavaju približno istu snagu, oblik napona, a samim tim i frekvenciju. Ova osobina transformatora nailazi na široku primenu pa tako:

- Energetski transformatori prenose električnu energiju iz jednog sistema napona i u drugi sa ili bez galvanske veze
- Izolacioni transformatori za galvansko odvajanje itd.
- Transformatori za pretvaranje broja faza (Skotovi transformatori)
- Merni transformatori služe za merenja visokih napona ili velikih struja
- Transformatori koji su sastavni deo poluprovodničkih pretvarača
- Transformatori za prenos informacija, sinhronizacioni, okidni transformatori itd.

1.2. Veliki energetski transformatori

Najveći (energetski transformatori) primenjuju se u prenosu električne energije. To su trofazni energetski transformatori. Oni prenose energiju između prenosnih mreža različitih naponskih nivoa (U Republici Srbiji 400 kV, 220 kV i 110 kV). Njihove snage u RS idu do 400 MVA. Prenosne mreže su direktno uzemljene i ovi transformatori su sprege Yy0.

U distribuciji električne energije koriste se distributivni transformatori. Oni prenose energiju iz mreža višeg u mreže nižeg napona ili potrošačima električne energije. Naponski nivoi u distribuciji električne energije su 35 kV, 10 kV (u Vojvodini 20 kV) i niskonaponska mreža 0,4 kV.

Transformatori kojima se preuzima energija iz mreže 35 kV su snaga od više stotina kVA do desetak MVA. Visokonaponska mreža 35 kV je indirektno uzemljena i tu se koriste sprege namota u zvezdu. Uzemljenje neutralne tačke (zvezdišta) se vrši preko prigušnice ili otpornika.

Distributivna mreža 10 kV je izolovana i u njoj se koriste transformatori sa spregom u trougao. Snage ovih transformatora su od oko 50 kVA do oko 2,5 MVA. Niskonaponska mreža 0,4 kV je direktno uzemljena i sekundari transformatora 10/0,4 kV (ili 20/0,4 kV) su sprege zvezda ili izlomljena zvezda.

Što su naponski nivoi viši veći su razmaci između namotaja, veća su i rasipanja fluksa pa su i njihovi naponi kratkog spoja veći. Tako naponi kratkog spoja kod distributivnih transformatora su od oko 5 % a kod prenosnih idu i do 15 %.

Pored ovih postoje i transformatori za industrijske napone (od 550 V do 6 kV)

Energetski transformatori se u najvećem broju slučajeva hlade uljem pa se zovu i uljnim transformatorima.

Za snage ispod 2,5 MVA postoje i takozvani suvi transformatori. Njihovi namoti su zaliveni u araldit a hlade se prirodnom ili prisilnom cirkulacijom vazduha. Primenjuju se u distribuciji električne energije.

Po konstrukciji, mali transformatori su podkategorija suvih transformatora i koriste se za napajanje konkretnih uređaja iz distributivne mreže (mrežni transformatori).

1.3. Mali transformatori

Predmet razmatranja u ovoj knjizi biće mali (monofazni i trofazni) transformatori. Ovde će biti razmatrani najjednostavniji i najčešći slučajevi koji se odnose na:

- Rad na mrežnoj frekvenciji 50 Hz
- Sinusni oblik napona
- Naponi do 1000 V
- Snage monofaznih do oko 30 kVA i trofaznih do oko 50 kVA

Dobro razumevanje ovih osnovnih slučajeva omogućava da se konstruišu i naprave i transformatori van ovih okvira (za druge frekvencije, druge oblike napona, napone preko 1000 V, velike struje itd).

U najvećem broju slučajeva radi se o napajanju iz distributivne mreže, frekvencije 50 (ili 60) Hz i napona 231 V (monofazni) i 400 V (trofazni). Najčešći sekundarni naponi su 12 V, 24 V, 48 V, 120 V, 220V, 231 V 380 V i 400 V.

Najmanji transformatori (snage reda 1VA) koriste se za napajanje elektronskih kola u elektronskim uređajima. Transformatori snaga desetinu VA koriste se za aparate za brijanje, zvonca, igračke itd. Transformatori snaga stotine VA za napajanje komandnih kola u raznim uređajima, mali ispravljači za punjenje akumulatora itd.

Transformatori većih snaga (reda kVA) se koriste kao rastavni transformatori za napajanje svoje lokalne izolovane mreže, ispravljača stacionarnih baterija, u uređajima za razne vrste zavarivanja, itd.

Kod elektrolučnog zavarivanja koriste se transformatori za zavarivanje. Oni se odlikuju velikim rasipanjem fluksa i velikim naponima kratkog spoja.

1.4. Vrste malih transformatora

Prema nameni mogu biti:

- Mrežni transformatori
- Autotransformatori, regulacioni transformatori itd
- Transformatori za ispravljače
- Transformatori za invertore
- Transformatori za druge vrste pretvarača u energetskoj elektronici.

Poslednje tri kategorije odnose se na pretvarače energetske elektronike. Oni često rade sa složenijim oblicima napona i struja (pravougaoni), višim frekvencijama, ponekad sa velikim feromagnetnim zazorima itd. Materijali za njihova jezgra su feriti, amorfni i nano materijali. Zbog visokih frekvencija struje koriste se izolovani licnasti snopovi provodnika. Do izražaja dolaze i parazitne kapacitivnosti među namotima i prema jezgru, a postoje i još mnoge druge specifičnosti. Oni čine jednu veoma široku i kompleksnu oblast, i oni zbog toga prevazilaze okvire ove knjige.

Predmet razmatranja u ovoj knjizi biće mrežni transformatori.

1.5. Mrežni transformatori

Ovde se podrazumevaju mali transformatori za napajanje iz mreže distributivne (naponi 231V, ili 400V, 50 Hz).

Prema broju faza mogu biti:

- Monofazni
- Trofazni

Prema naponu:

- Za niski napon (ispod 1000 V)
- Za visoki napon (preko 1000 V)

U najvećem broju slučajeva radi se o napajanju iz distributivne mreže, frekvencije 50 (ili 60) Hz i napona 231 V (monofazni) i 400 V (trofazni). Najčešći sekundarni naponi su 12 V, 24 V, 48 V, 120 V, 220V, 231 V 380 V i 400 V.

Prema snazi

- Monofazni za snage od dela VA do nekoliko desetina kVA
- Trofazni od nekoliko desetina VA do nekoliko desetina kVA

Prema nameni mogu biti:

- Izolacioni transformatori (monofazni i trofazni snaga i do više desetina kVA)
- Za korektore i stabilizatore napona
- Za napajanje raznih uređaja
- Za uređaje za elektrolučno zavarivanje (više vrsta)
- Za napajanje mernih, signalnih, komandnih itd. kola
- Za zvonce, aparate za brijanje, igračke itd
- Za ispravljače
- Za primenu u elektronici.

Moglo bi se navesti još mnogo primena tako da je jasno je da se radi o veoma velikom broju različitih vrsta transformatora. Zbog toga ovde će biti razmatrani samo mrežni transformatori. Oni se napajaju mrežnim naponom 231 ili 400 V, frekvencije 50 Hz, monofazno ili trofazno. Napon je sinusoidalnog oblika.

Posebna klasa su regulacioni transformatori (i autotransformatori) sa izvodima za regulaciju napona ili sa kliznim kontaktom.

Snage se kreću od par VA, desetine i stotine VA a u izuzetnim slučajevima i više desetina kVA. Za veće snage obično se koriste trofazni transformatori.

U ovoj knjizi obuhvaćeni su monofazni i trofazni transformatori snaga:

- Monofazni do oko 4 kVA sa standardnim EI jezgrom,
- Monofazni do oko 30 kVA sa standardnim UI i
- Trofazni do oko 50 kVA sa standardnim 3EI jezgrom.

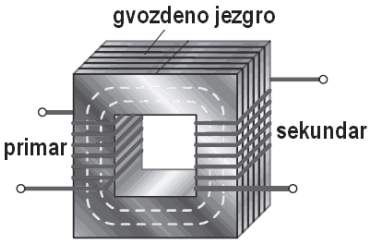
2. OSNOVE TRANSFORMATORA

Ova knjiga je namenjena čitaocima koji već imaju osnovna znanja o transformatorima. Zbog toga će ovde samo u najkraćim crtama biti prikazan princip rada i osnovni elementi teorije transformatora. Pojmovi koji budu potrebni na dugim mestima će biti detaljnije obrađeni.

2.1. Idealan transformator

Transformator se sastoji od dva namota (primarnog i sekundarnog) koji su međusobno magnetno spregnuti preko feromagnetnog jezgra. Ako se na primarni namot dovede naizmenični napon u jezgru će se pojaviti magnetni fluks (Φ) koji će u njemu indukovati elektromotornu silu koja se suprotstavlja dovedenom naponu. Pošto je suprotnog smera ova elektromotorna sila se naziva i kontra elektromotornom silom. Ista elektromotorna sila po jednom navojku indukovaće se i u sekundarnom namotu.

Za brojeve navojaka $N1$ i N_2 trenutne vrednosti za elektromotorne sile namota su:



Sl. 2.1. Transformator - princip rada

Primara $e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$

Sekundara $e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$

Zbog nesavršenosti provodnika i magnetne sprege indukovana kontra elektromotorna sila je nešto manja od dovedenog napona. Ovde će ta razlika biti zanemarena i smatraće se da je transformator idealan.

Ako je dovedeni napon sinusoidalnog oblika i fluks će biti istog oblika, ali fazno pomeren za 90^o (fluks kasni za 90^o). Ako se umesto trenutnih pređe na efektivne vrednosti, indukovane elektromotorne sile namota su:

- Primara $E_1 = 4{,}44 N_1 f \Phi$

- Sekundara $E_2 = 4{,}44 N_2 f \Phi$

U praznom hodu ove elektromotorne sile su vrlo bliske svojim naponima tako da je njihov odnos:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Izraz važi pod uslovom da su obuhvaćeni magnetni fluksevi oba namota jednaki. Takav transformator nazivamo idealnim.

Ako se sada na sekundarni namot priključi neko opterećenje (impedansa), u njemu će se pojaviti struja. Ova struja stvara svoj magnetni fluks u jezgru koji je suprotan fluksu primara. Rezultantni fluks se smanjuje što sada povećava struju primara i tako se vrši prenos energije sa primara na sekundar.

Kod idealnog trabstormatora ne postoje gubici snage. Iz jednakosti snaga primara i sekundara dobija se da je odnos struja recipročan odnosu napona.

Iz $U_1 I_1 = U_2 I_2$ sledi $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$

Na ovaj način se u zavisnosti od odnosa broja navoja primara i sekundara mogu menjati i odnosi njihovih napona, a obrnuto proporcionalno i odnosi struja.

Ako se na sekundar transformatora priključi opterećenje impedanse Z_2 na sekundari će se pojaviti struja:

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

Ova struja je u odnosu na indukovani napon pomerena za ugao φ_2 čiji je tangens:

$$tg\varphi = \frac{X}{R}$$

Sekundarna struja se prenosi na primar tako da je:

$$I_1 = I_2 \frac{N_2}{N_1}$$

Na ovaj način struja se sekundara preslikala na primar.

Sa ulaznim naponom opterećenje sekundara Z_2 preslikaće se na primar kao Z_1:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2 N_1 / N_2}{I_2 N_2 / N_1} = Z_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

Dakle impedansa se sa sekundara na primar preslikala sa kvadratom prenosnog odnosa napona (ili brojeva navojaka).

Dosadašnja razmatranja odnosila su se na idealan transformator. Kod njega su jezgro i namot idealni što pofrazumeva da su:

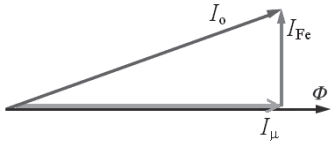
- Magnetna permeabilnost jezgra je bekonačna i ne postoje rasipni fluksevi.
- Ne postoje gubici aktivne snage u namotima i u jegru.

2.2. Realan transformator

Realan transformator se razlikuje od idealnog zbog nesavršenosti jezgra i namotaja. Te nesavršenosti nisu velike tako da se ponekad zanemaruju.

Nesavršenost jezgra manifestuje se kroz:

- Konačnu magnetnu permeabilnost i rasipane magnetne flukseve
- Gubitke aktivne snage u jezgru i u namotima.



Sl. 2.2-1. Struja praznog hoda

Konačna magnetna permeabilnost je posledica krive magnećenja gde je za dostizanje neke magnetne indukcije potrebna izvesna struja (jačina magnetnog polja). Ta zavisnost je još i nelinearna tako da ova struja nije sinusoidalnog oblika. Ona naglo raste kada se indukcija približi kolenu krive magnećenja. Ova

struja se naziva strujom magnećenja (I_μ). Ona ne stvara gubitke snage i njena osnovna komponenta je reaktivna (kasni za naponom za 90^o).

Druga nesavršenost odnosi se na gubitke aktivne snage u jezgru o namotima.

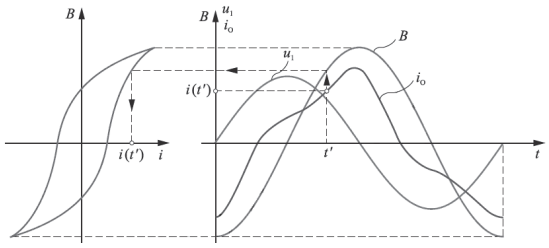
Gubici snage u jezgru potiču od gubitaka zbog histerezisa i vrtložnih struja. Ova komponenta struje je aktivna (u fazi je sa naponom).

Gubici snage zbog histerezisa i vrtložnih struja su:

Gubici zbog histerezisa $P_h = \eta \cdot f \cdot B_m^2 \cdot m_{Fe}$

Gubici zbog vrtložnih struja $P_V = \sigma \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot m_{Fe}$

η i σ koeficijenti gubitaka u gvožđu i zavise od materijala jezgra



Sl. 2.2-2. Struja praznog hoda

Gubici u gvožđu se predstavljaju aktivnom komponentom struje I_{Fe}.

Fazorski zbir ove dve struje daje struju praznog hoda. Ovo je struja primara kada na sekundaru nije priključeno opterećenje.

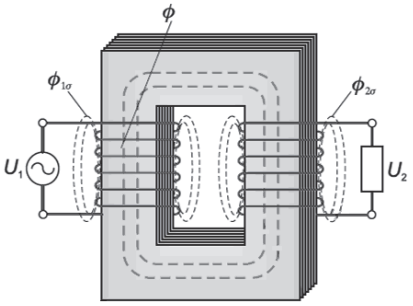
Zbog izobličenosti struje magnećenja, i struja praznog hoda je veoma izobličena (sl. 2.2-2).

Struja praznog i gubici u jezgru, mere se u ogledu praznog hoda.

Struja praznog hoda postoji u svim uslovima rada transformatora. Ona se dobija kao fazorski zbir primarne i preslikane struje opterećenja sa sekundara na primar.

Ovo su bile nesavršenosti jezgra.

Nesavršenosti namota manifestuju se kroz:



Sl. 2.2-3. Rasipni fluksevi kod realnog transformatora

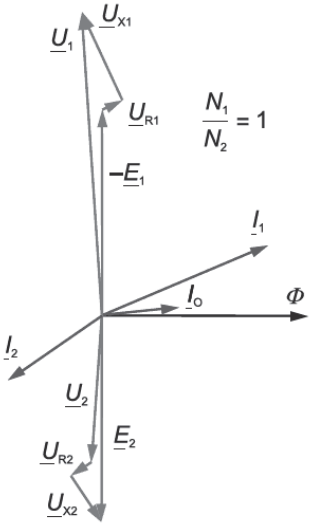
- Gubitke snage u namotima
- Rasipanje fluksa između namota.

Gubici snage u namotima su Džulovi gubici i posledica su aktivnih otpornosti provodnika od kojih su napravljeni i struje u njima. Pošto se provodnici najčešće prave od bakra ove gubitke nazivamo gubicima u bakru. Za primar i sekundar gubici u bakru su:

$$P_{R,1} = R_1 \cdot I_1^2 \quad \text{i} \quad P_{R,2} = R_2 \cdot I_2^2$$

Ovi gubici zavise od temperature i za opterećen transformator treba ih računati za radnu temperaturu.

Rasipni magnetni fluksevi su posledica nesavršene magnetne sprege primara i sekundara. U suštini oni su posledica konačne magnetne permeabilnosti materijala jezgra u odnosu na vazduh. Zbog toga delovi magnetnih flukseva primara i sekundara se zatvaraju lokalno, bez međusobne veze sa dugim namotom (sl. 2.2-3). Ovi fluksevi se manifestuju padovima napona ali ne i gubitkom aktivne snage. Ti padovi napona



Sl. 2.2-4. Fazorski dijagram napona i struja realnog transformatora

srazmerni su svojim strujama i zbog toga se mogu predstaviti rednim reaktansama primara (X_1) i sekundara (X_2). Sa ovim su obuhvaćeni svi elementi nesavršenosti realnog transformatora. Sada se mogu napisati jednačine za napone transformatora. U kompleksnom obliku one su:

$$\underline{U_1} = -\underline{E_1} + (R_1 + jX_1)I_1 = -\underline{E_1} + \underline{Z_1}I_1$$
$$\underline{U_2} = \underline{E_2} - (R_2 + jX_2)I_2 = \underline{E_2} - \underline{Z_2}I_2$$

Za struje važi da je:

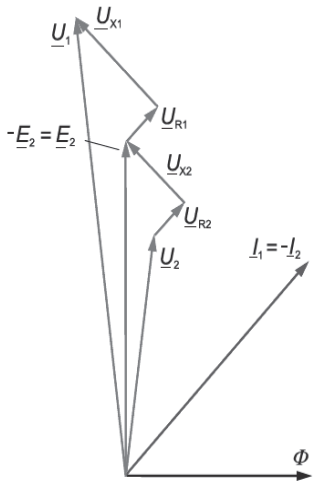
$$\underline{I_0} = \underline{I_1} + \underline{I_2}$$

Prema ovim jednačinama mogu se nacrtati fazorski dijagrami napona i struja (sl. 2.2-4). Prethodno je potrebno nekoliko važnih napomena.

Naponi primara i sekundara se mogu jako razlikovati. Zbog toga se fazorski dijagrami crtaju za svedene sekundarne napone. To je kao da se fazorski dijagrami crtaju za odnos navojaka $N_1/N_2 = 1$.

Udeo padova napona na pojedinačnim impedansama je reda nekoliko procenata od ulaznog napona. To bi na dijagramu napona bilo jako malo i zbog bolje preglednosti ovi delovi su uvećani. Takođe struja praznog hoda je daleko manja od nazivne struje (nekoliko procenata) i radi bolje vidljivosti i ona je uvećana.

Pošto su elektromotorne sile primara i sekundara jednake fazori sekundarne stane se mogu okrenuti za 180^o i tako se dobija fazorski dijagram kod koga su svi padovi napona skupljeni na jednom mestu. Zbog jako male struje praznog hoda ona se može zanemariti pa dijagram izgleda kao na sl. 2.2-5.



Sl. 2.2-5. Fazorski dijagram napona i struja realnog transformatora

Zanemarenjem struje praznog hoda napon sekundara je:

$$\underline{U_2} = \underline{U_1} - (R_1 + R_2)\underline{I_1} - j(X_1 + X_2)\underline{I_1} = \underline{U_1} - \underline{Z}\,\underline{I_1}$$

Odnosno

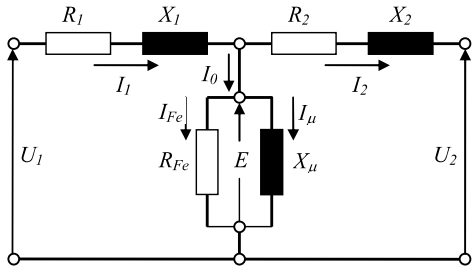
$$\underline{U_2} = \underline{U_1} - R_K I_1 - jX_K I_1 = \underline{U_1} - Z_K I_1$$

Z_k impedansa kratkog spoja

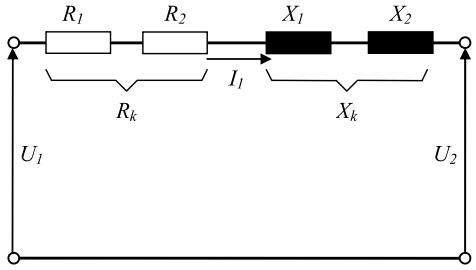
Ovaj izraz pokazuje da se transformator može približno predstaviti rednom impedansom Z_k čija je aktivna otpornost $R_k = R_1 + R_2$ i reaktansa $X_k = X_1 + X_2$.

Impedansa kratkog spoja se zove tako jer ona određuje struju kratkog spoja. Njena veličina određuje se iz ogleda kratkog spoja. Ogledi praznog hoda i kratkog spoja su deo redovnih ispitivanja transformatora i oni će biti razmatrani u posebnom poglavlju.

2.3. Ekvivalentna šema transformatora



Sl. 2.3-1. Ekvivalentna šema transformatora



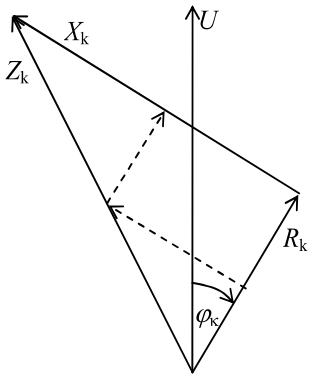
Sl. 2.3-2. Uprošćena ekvivalentna šema transformatora

Sada može da se nacrta ekvivalentna šema transformatora (sl. 2.3-1). Ona se sastoji od paralelne grane (grana magnetisanja) koja predstavlja stanje u jezgru i rednih impedansi primara i sekundara koje su posledica gubitaka snage u namotima i rasipnih flukseva. Ekvivalentna šema služi u analizi kola sa transformatorima. Pomoću nje može da se analizira ponašanje transformatora u stacionarnim stanima (prazan hod, opterećenje i kratak spoj).

U zavisnosti od potrebne tačnosti analize ekvivalentna šema može i da se pojednostavi ili i uskloži. Pri radu na visokim frekvencijama ili sa naponima pravougaonog oblika (kod invertora) do izražaja dolaze i parazitne kapacitivnosti namota međusobno i prema jezgru. Tada se električna šema može dopuniti i ovim kapacitivnostima.

Za približne analize grana magnećenja može da se izostavi i da se transformator predstavi samo rednom impedansom Z_k. Tako se dobija uprošćena ekvivalentna šema transformatora (sl. 2.3-2).

Veličine pojedinih parametara mogu se približno proračunati. Stvarne vrednosti određuju se iz ogleda praznog hoda i kratkog spoja.



Sl. 2.3-3. Kapov trougao

Impedansa Z_k se sastoji od aktivne otpornosti R_k i reaktanse X_k tako da je:

$$Z_K = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$$

Faktor snage u kratkom spoju je:

$$\cos\varphi_k = \frac{R_k}{Z_k} = \frac{R_k}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

Orijentacione vrednosti za impedansu Z_k su:

$$Z_K \approx (0{,}02...0{,}1)\frac{U_N}{I_N} \approx (0{,}02...0{,}1)\frac{P_N}{I_N^2}$$

Kod transformatora najmanjih snaga u impedansi Z_k dominantna je aktivna otpornost (R_k) a kod većih snaga reaktansa (X_k). Pravougli trougao koji obrazuju veličine Z_k, R_k i X_k naziva se Kapov trougao (sl. 2.3-3).

2.4. Rasipna induktivnost i reaktansa

Rasuti magnetni fluks je deo ukupnog fluksa koji obuhvataju samo svoj namot (ne obuhvata drugi namot). Tako i primar i sekundar imaju neke male rasute magnetne flukseve. Ovi fluksevi prolaze najvećim delom kroz vazduh tako da za njih važi linearnost sa strujom i mogu se predstaviti preko rasipnih induktivnosti. Njihova veličina zavisi od geometrije i od veličine namota i jezgra.

Prema obliku jezgra imamo:

- Stubne transformatore (ogrnuti i jezgrasti)
- Torusne transformatore
- Lončaste transformatore

Na svakom od ovih jezgara u principu možemo imati dve vrste namota i to:

- Cilindrične (koncentrične, cevaste)
- Kolutne (pljosnate)

Za torusne transformatore koriste se samo cevasti namoti.

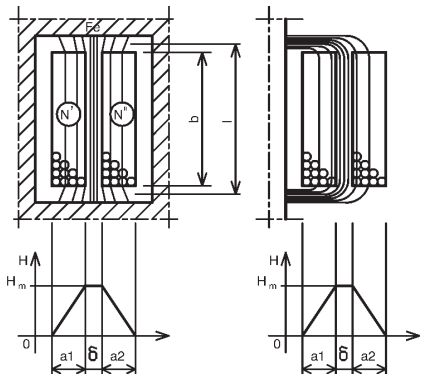
Analiza rasipnih induktivnosti i reaktansi prilagođena je nameni ove knjige.

Induktivnost cilindričnog namota poprečnog preseka A i dužine l_H je:

$$L = \mu_0 \cdot N^2 \frac{A_\gamma}{l_H}$$

A_γ površina kroz koju se zatvara rasuti fluks

$l_{H,sr}$ srednja dužina linije magnetnog polja



Sl. 2.4-1. Rasipni fluks kod cilindričnih namota

Za dva cilindrična kalema postavljena koaksijalno (sl. 2.4-1) površina kroz koju se zatvara rasuti fluks jednaka je proizvodu srednjeg obima i efektivne širine.

$$A_\gamma = l_{Cu,sr} \cdot a_{ef}$$

a_{ef} efektivna širina

Između dva cilindrična namota jačina polja je raspoređena kao na sl. 2.4-1. Za ovakvu raspodelu polja efektivna širina je:

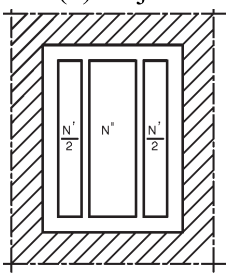
$$a_{ef} = \delta + \frac{a_1 + a_2}{3}$$

Sa ovim rasipna induktivnost je:

$$L_\gamma = \mu_0 \cdot N^2 \frac{A}{l_H} = \mu_0 \cdot N^2 \frac{l_{Cu,sr}}{l_{H,sr}} a_{ef} = \mu_0 \cdot N^2 \frac{l_{Cu,sr}}{l_{H,sr}} \left(\delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)$$

Energija rasutog magnetnog polja najvećim delom koncentrisana je u vazduhu. Srednja dužina linije magnetnog polja približno je jednaka visini prozora.

Ako su potrebne manje rasipne induktivnosti namota namoti se mogu podeliti na više (n) tanjih namota i postaviti naizmenično. Tada postoji n sada užih puteva polja.



sl. 2.4-2.

Za takve namote rasipna induktivnost je:

$$L_\gamma \approx \mu_0 \cdot N^2 \frac{l_{Cu,sr}}{n^2 l_{H,sr}} \left(\delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)$$

Za kolutne namote raspodela je dosta komplikovanija. Takvi namoti se kod malih transformatore retko koriste i zato se ovde neće razmatrati.

Dobijeni izraz za rasipnu induktivnost biće primenjen za transformatore najčešće korišćenih oblika.

- Monofazno EI jezgro sa normalnim prozorom

- Sa cevnim namotima i n=1, $l_{Cu,sr} \approx 5{,}53 a^{0,6} d^{0,4}$ i $l_H = 1{,}5a$ $a_{ef} = \delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \approx \frac{a}{4}$

$$L_\gamma \approx \mu_0 N^2 \frac{l_{Cu,sr}}{l_{H,sr}} \frac{a}{4} \approx \mu_0 N^2 \frac{5{,}53 a^{0,6} d^{0,4}}{6} \approx 12 \cdot 10^{-7} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$$

Reaktansa je: $X \approx X_\gamma = \omega L_\gamma = 2\pi f L_\gamma \approx 82 \cdot f \cdot 10^{-7} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$

Za f=50 Hz reaktansa rasipanja je: $X(\Omega) \approx 4{,}1 \cdot 10^{-4} N^2 a^{0,6} d^{0,4} (m)$

- Monofazno EI jezgro sa visokim prozorom

- Sa cevnim namotima i n=1, $l_{Cu,sr} \approx 5{,}53 a^{0,6} d^{0,4}$, $l_H = 3a$, $a_{ef} = \delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \approx \frac{a}{4}$

$$L_\gamma \approx \mu_0 N^2 \frac{l_{Cu,sr}}{l_{H,sr}} \frac{a}{4} \approx \mu_0 N^2 \frac{5{,}53 a^{0,6} d^{0,4}}{12} \approx 6 \cdot 10^{-7} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$$

Reaktansa je: $X \approx X_\gamma = \omega L_\gamma = 2\pi f L_\gamma \approx 4 \cdot f \cdot 10^{-6} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$

Za f=50 Hz reaktansa rasipanja je: $X(\Omega) \approx 2 \cdot 10^{-4} N^2 a^{0,6} d^{0,4} (m)$

- Monofazno UI jezgro

Kod UI jezgra namoti primara i sekundara su podeljeni na pola i stavljeni na oba stuba tako da je broj puteva rasutog fluksa n=2.

- Sa cevnim namotima i n=2, $l_{Cu,sr} \approx 5{,}53 a^{0,6} d^{0,4}$, $l_H = 3a$, $a_{ef} = \delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \approx \frac{a}{4}$

$$L_\gamma \approx \mu_0 N^2 \frac{l_{Cu,sr}}{2 l_{H,sr}} \frac{a}{4} \approx \mu_0 N^2 \frac{5{,}53 a^{0,6} d^{0,4}}{24} \approx 3 \cdot 10^{-7} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$$

Reaktansa je: $X \approx X_\gamma = \omega L_\gamma = 2\pi f L_\gamma \approx 2 \cdot f \cdot 10^{-6} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$

Za *f*=50 Hz reaktansa rasipanja je: $X(\Omega) \approx 10^{-4} N^2 a^{0,6} d^{0,4} (m)$

Ako bi primar bio na jednom, a sekundar na drugom stubu rasipna induktivnost bi bila približno:

$$L_\gamma \approx 2\mu_0 N^2 \frac{l_{Cu,sr}}{l_{H,sr}} a_{ef} \approx 2\mu_0 N^2 \frac{5{,}53 a^{0,6} d^{0,4}}{3} \frac{a}{3} = 1{,}2\mu_0 N^2 a^{0,6} d^{0,4} \approx 16 \cdot 10^{-7} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$$

Reaktansa je: $X \approx X_\gamma = \omega L_\gamma = 2\pi f L_\gamma \approx f \cdot 10^{-5} \cdot N^2 \cdot a^{0,6} \cdot d^{0,4}$

Za *f*=50 Hz reaktansa rasipanja je: $X(\Omega) \approx 5 \cdot 10^{-4} N^2 a^{0,6} d^{0,4} (m)$

Ovo je veoma velika vrednost i zbog toga se namoti dele na pola i postavljanju na oba stuba. Međutim ovo omogućava dobijanje željene rasipne induktivnosti odgovarajućom podelom namota po stubovima (ne samo po 50/50%).

Ovako velike rasipne induktivnosti pogodne su za transformatore za elektrolučno zavarivanje.

- Trofazno 3EI jezgro

Kod trofaznog transformatora sa 3EI jezgrom namoti primara i sekundara su jedan preko drugoga i zauzimaju polovinu širine prozora.

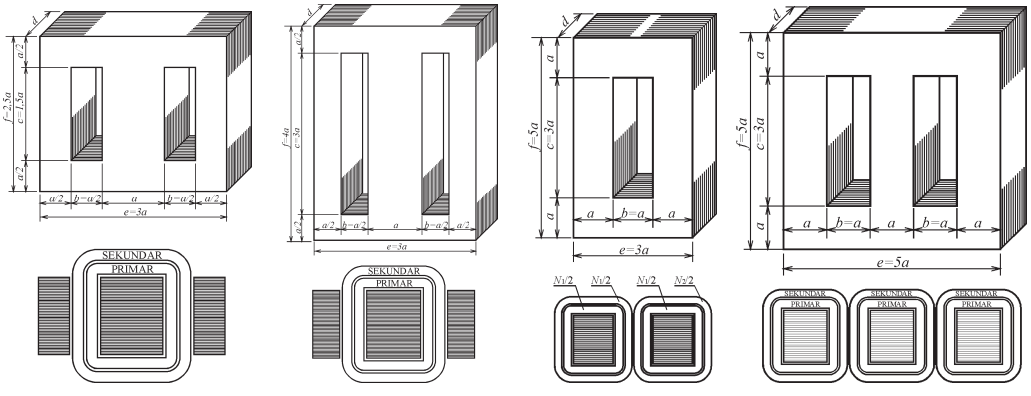
- Sa cevnim namotima i *n*=1, $l_{Cu,sr} = 5{,}53 a^{0,6} d^{0,4}$, $l_H = 3a$, $a_{ef} = \delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \approx \frac{a}{4}$

$$L_\gamma \approx \mu_0 N^2 \frac{l_{Cu,sr}}{l_{H,sr}} \frac{a}{4} \approx_0 N^2 \frac{5{,}53 a^{0,6} d^{0,4}}{12} \approx 6 \cdot 10^{-7} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$$

Reaktansa je: $X \approx X_\gamma = \omega L_\gamma = 2\pi f L_\gamma \approx 4 \cdot f \cdot 10^{-6} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$

Za *f*=50 Hz reaktansa rasipanja je: $X(\Omega) \approx 2 \cdot 10^{-4} N^2 a^{0,6} d^{0,4} (m)$

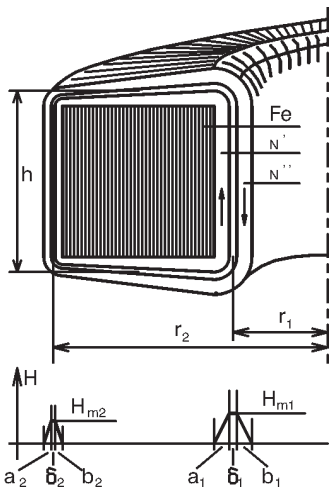
Ako se traže još manja rasipanja namote treba podeliti kao na sl. 2.13.



$X_\gamma \approx 4 \cdot 10^{-4} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$ $X_\gamma \approx 2 \cdot 10^{-4} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$ $X_\gamma \approx 10^{-4} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$ $X_\gamma \approx 2 \cdot 10^{-4} N^2 a^{0,6} d^{0,4}$

Sl. 2.4-3. Oblici standardnih monofaznih i trofaznih jezgara

Torusni transformator



Sl. 2.4-4. Torusni namoti

Kod torusnog transformatora situacija je kao na sl. 2.16. I za njih važi izraz za rasipnu induktivnost:

$$L_\gamma = \mu_0 N^2 \frac{l_{Cu,sr.}}{l_{H,sr.}} \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right)$$

Ovde su $l_{\mathrm{Cu,sr.}}$ srednja dužina navojka, $l_{\mathrm{H,sr.}}$ srednja dužina linije magnetnog fluksa rasipanja, koja se ovde poklapa sa dužinom srednje linije obima jezgra. Veličine δ, a i b su takođe odgovarajuće srednje vrednosti.

$$L_\gamma \approx \mu_0 N^2 \frac{2{,}2(r_2 - r_1 + h)}{\pi(r_2 + r_1)} \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right)$$

Namoti torusnih transformatora su tanki (po jedan do 2 sloja) a srednja linija polja veoma dugačka. Zbog toga je rasipna induktivnost kod torusnog transformatora znatno manja nego stubnih tipova transformatora sa cilindričnim namotima.

Torusna jezgra se prave od feromagnetnog lima sa indukcijom zasićenja oko 2 T. Zbog male rasipne induktivnosti mogu da imaju veoma jak strujni udar pri uključenju. Ponekad ih je vrlo teško uključiti preko automatskih osigurača.

Bifilarno motanje

Najbolja magnetna sprega se postiže bifilarnim motanjem namota što dolazi u obzir samo kad oba namota imaju jednak broj navojaka istog prečnika žice, a sve pod uslovima da je napon između njih dovoljno nizak i da je lak na žici dovoljna izolacija. U tom slučaju rasipna induktivnost je približno jednaka ukupnoj unutrašnjoj induktivnosti za oba namota, odnosno:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} N \cdot l_{Cu,sr.} = 10^{-7} \cdot N \cdot l_{Cu,sr.}$$

Podužna unutrašnja induktivnost okruglog provodnika je:

$$l = \frac{\mu_0}{8\pi} = 50 \left(\frac{nH}{m} \right)$$

Tipičan primer ovakvog namota je primar sastavljen od dva identična namota za push-pull invertor.

Unutrašnja induktivnost postoji uvek, ali je ona u ostalim slučajevima toliko mala u odnosu na ukupnu, da se najčešće zanemaruje.

2.5. Struja kratkog spoja

Struja kratkog spoja je važna zbog mogućih oštećenja elemenata koje napaja, samog transformatora i potrebe za efikasnom zaštitim od kratkog spoja. Zbog toga je poželjno da ona ne bude suviše manja.

Napon kratkog spoja se sastoji iz aktivne i reaktivne komponente. Izračunavanje aktivne komponente je jednostavno na osnovu aktivne otpornosti oba namota (odgovarajuće svedenih).

$$U_R = (R_1 + R_2)I_1$$

ili u relativnim jedinicama: $u_R = \frac{U_R}{U_{1N}}$ i $u_R\% = u_R \cdot 100$

Ukoliko je u namotu izraženo potiskivanje struje (skin efekat) otpori se mogu umesto merenja izračunati iz gubitaka u bakru (iz ogleda kratkog spoja). Pošto je omski otpor zavisan od temperature, to se ove vrednosti najčešće odnose na radnu temperaturu.

Induktivna komponenta napona kratkog spoja se izračunava kao:

$$U_X = \omega(L_1 + L_2)I_1 = \omega L_K I_1 = X_K I_1$$

ili u relativnim jedinicama:

$$u_X = \frac{U_R}{U_{1N}} \quad \text{i} \quad u_X\% = u_X \cdot 100$$

Rasipna induktivnost se nešto teže proračunava i znatno zavisi od geometrije namota. Najpouzdanije vrednosti dobija se iz ogleda kratkog spoja.

Sada je napon kratkog spoja:

$$U_K = \sqrt{U_R^2 + U_X^2}$$

ili u relativnim jedinicama:

$$u_K = \sqrt{u_R^2 + u_X^2} \quad \text{i} \quad u_K\% = \sqrt{(u_R\%)^2 + (u_X\%)^2}$$

Struja kratkog spoja (u primaru) pri nazivnom naponu je:

$$I_{1K} = \frac{U_{1N}}{|Z_K|} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{R_K^2 + X_K^2}} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + \omega^2(L_1 + L_2)^2}} = \frac{I_{1N}}{u_k}$$

Ako je na primer u_K=0,05 (5 %), onda je struja kratkog spoja dvadeset puta veća od nominalne. Sa ovog aspekta povoljnije je da napon kratkog spoja bude što viši. Sa aspekta gubitaka i zagrevanja, bolje je da u naponu kratkog spoja dominira reaktivna komponenta. Kod veoma malih transformatora koji napajaju čisto aktivna opterećenja u naponu kratkog spoja dominantna je aktivna otpornost namota, tako da je $U_K \approx U_R$.

U tabeli 2.5-1 prikazane su tipične vrednosti struja praznog hoda, napona kratkog spoja kao i njihovih faktora snage za male monofazne i trofazne transformatore.