

UDŽBENICI SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
MANUALIA UNIVERSITATIS STUDIORUM ZAGRABIENSIS



Nakladnik
Graphis d.o.o., Maksimirska 88, Zagreb

Recenzenti
prof. dr. sc. Zlatko Maljković
dr. sc. Antun Mikulecky
prof. dr. sc. Zvonimir Valković

Autori
prof. dr. sc. Damir Žarko
dr. sc. Branimir Čučić

Objavljivanje ovog sveučilišnog udžbenika odobrio je Senat Sveučilišta u Zagrebu na prijedlog Fakulteta elektrotehnike i računarstva iz Zagreba, rješenjem klasa: 032-01/19-01/27; ur. br.: 380-062/250-20-6 od 25. rujna 2020.

Objavljivanje ovog sveučilišnog udžbenika pomoglo je Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske (klasa: 402-07/19-01/00088; ur. br.: 533-03-19-0002).

ISBN 978-953-279-039-9

CIP zapis je dostupan u računalnome katalogu Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu pod brojem 001103916.

©Sva prava pridržava nakladnik GRAPHIS d.o.o., Maksimirska 88, Zagreb,
tel./faks +385 1 2322-975, graphis1@inet.hr, www.graphis.hr

Tiskano u Hrvatskoj.

**Damir Žarko
Branimir Ćućić**

Transformatori

u teoriji i praksi

I. izdanje

SADRŽAJ

Predgovor	XV
I. TEORIJA TRANSFORMATORA	1
1. UVOD	3
2. TEORIJSKE OSNOVE TRANSFORMATORA	7
2.1. Jednadžbe magnetskog polja i feromagnetski materijali	7
2.2. Magnetski krug s feromagnetskom jezgrom i zračnim rasporom	11
2.2.1. Struja magnetiziranja i gubici u jezgri	13
2.2.1.1. Gubici zbog histereze	16
2.2.1.2. Gubici vrtložnih struja	19
2.2.1.3. Anomalijski gubici	26
2.2.1.4. Ukupni gubici u željezu, dinamička petlja histereze i struja magnetiziranja	36
2.2.2. Vlastiti induktivitet	40
2.2.3. Međuinduktivitet	42
2.3. Matematički model transformatora	48
2.3.1. T/2 nadomjesna shema transformatora	52
2.3.2. T nadomjesna shema transformatora	54
2.4. Opterećeni transformator	58
2.5. Fazorski dijagram transformatora	59
2.6. Određivanje parametara nadomjesne sheme transformatora	62
2.6.1. Otpor namota	62
2.6.2. Pokus praznog hoda	63
2.6.3. Pokus kratkog spoja	66
2.7. Izračun rasipne reaktancije transformatora	74
2.7.1. Bikoncentrična izvedba namota	79
2.7.2. Pločasta izvedba namota	81
2.7.3. Rasipna reaktancija	83

2.8. Pad napona u transformatoru	84
2.9. Zakoni sličnosti	89
2.10. Pojednostavljeni toplinski model transformatora	95
2.10.1. Zagrijavanje transformatora	98
2.10.2. Hlađenje transformatora	100
2.10.3. Kratkotrajni rad s preopterećenjem	102
II. STRUKTURA I DIZAJN TRANSFORMATORA	105
3. VRSTE, GLAVNI DIJELOVI I GRUPE SPOJA TRANSFORMATORA	107
3.1. Podjela transformatora prema namjeni	107
3.2. Dijelovi transformatora	108
3.2.1. Aktivni dio	108
3.2.2. Kotao i hladnjaci	109
3.2.3. Sustavi disanja transformatora	109
3.2.4. Provodnici i priključci na transformator	109
3.3. Oznake stezaljki	113
3.4. Spojevi namota	115
3.4.1. Spoj zvijezda (Y, y)	116
3.4.2. Spoj trokut (D, d)	116
3.4.3. Spoj razlomljena zvijezda (Z, z)	117
3.4.4. Spoj ZN	118
3.4.5. Spoj Yy	119
3.4.6. Spoj Yd, Dy	119
3.4.7. Spoj Dd	120
3.4.8. Spoj Yz	120
3.4.9. Satni broj	120
3.4.10. Crtanje shema spojeva namota trofaznih transformatora	121
4. OBLICI PRESJEKA STUPA I NAMOTA	127
4.1. Usporedba idealno popunjenih jezgara s različitim oblicima presjeka stupa	128
4.1.1. Usporedba uz uvjet istog presjeka jezgre	128
4.1.2. Usporedba uz uvjet istih gubitaka jezgre	131
4.2. Masa jezgre s konačnim brojem paketa	134
5. JEZGRA I GUBICI PRAZNOG HODA	135
5.1. Povijesni razvoj transformatorskog lima i gubitaka transformatora	135
5.2. Vrste i karakteristike transformatorskog lima	139
5.2.1. Označavanje transformatorskog lima prema standardu	139
5.2.2. Karakteristike transformatorskog lima	140
5.3. Izolacija transformatorskog lima	141
5.4. Popunjavanje presjeka stupa i jarma	142
5.4.1. Primjer popunjavanja kružnog presjeka	144
5.5. Slaganje limova jezgre i step-lap	144
5.6. Gubici praznog hoda transformatora	147
5.7. Izvedba jezgara	148
5.7.1. Izvedbe jednofaznih slaganih jezgara	149

5.7.2. Izvedbe trofaznih slaganih jezgara	149
5.7.3. Tehnologija izrade slaganih jezgara	150
5.7.4. Motane jezgre	152
5.7.4.1. Amorfne jezgre	153
5.7.4.2. Prostorne jezgre	154
6. NAMOTI I GUBICI TERETA	157
6.1. Vrste namota prema funkciji	157
6.1.1. Raspored namota u prozoru transformatora	158
6.1.2. Uloge pojedinih namota	158
6.2. Regulacija napona	159
6.2.1. Regulacija napona distribucijskih transformatora	160
6.2.1.1. Regulacija napona u beznaponskom stanju (DT)	160
6.2.1.2. Regulacija napona pod teretom (DT)	161
6.2.2. Regulacija napona energetskih transformatora	162
6.2.2.1. Regulacija napona u beznaponskom stanju (ET)	162
6.2.2.2. Regulacija napona pod teretom i regulacijska sklopka (ET)	163
6.3. Vrste vodiča	168
6.3.1. Folijski vodič	169
6.3.2. Okrugla i valjana lak žica	169
6.3.3. Profilni vodič	171
6.3.4. Dvostruki i trostruki (profilni) vodič	173
6.3.5. Transponirani vodič (TSV)	175
6.3.6. Upotreba pojedinih vrsta vodiča po snagama i naponima	176
6.4. Vrste namota prema načinu namatanja	179
6.4.1. Folijski namot	180
6.4.2. Slojni namot	183
6.4.3. Spiralni namot	185
6.4.4. Regulacijski namot (FR)	186
6.4.4.1. Viševojni spiralni namot	186
6.4.4.2. Spiralni namot u dvije paralelne grane s odcjepima	188
6.4.5. Preloženi namot	188
6.4.6. Upleteni namot	192
6.4.7. Uporaba pojedinih vrsta namota po snagama i naponima	194
6.5. Bakar ili aluminij?	196
6.6. Gubici tereta	198
6.6.1. Gubici u omskim otporima namota	199
6.6.2. Dodatni gubici u namotu zbog skin efekta u vodičima	199
6.6.2.1. Analitički izračun aksijalnog skin efekta u vodiču i namotu ($B=0$)	200
6.6.2.2. Analitički izračun aksijalnog skin efekta u namotu ($B\neq 0$)	205
6.6.2.3. Koeficijenti skin efekta namota distribucijskih transformatora	212
6.6.2.4. Aksijalni koeficijenti skin efekta u pojedinim dijelovima namota	213
6.6.2.5. Numerički izračun skin efekta	215
6.6.2.6. Usporedba aksijalnog i radijalnog koeficijenta skin efekta	217
6.6.3. Dodatni gubici zbog struja izjednačenja u paralelnim vodičima	217
6.6.4. Dodatni gubici u vodljivim konstrukcijskim dijelovima	219

6.6.5. Problem dodatnih gubitaka kod većih snaga	222
6.7. Korisnost transformatora	224
6.8. Eko dizajn i razine gubitaka	226
6.8.1. Eko dizajn	226
6.8.2. Direktiva 2009/125/EC (eko direktiva)	226
6.8.3. Primjena eko dizajna na transformatore	226
7. IZOLACIJSKI SUSTAV TRANSFORMATORA I ISPITNI NAPONI	229
7.1. Izolacijski materijali u transformatoru	230
7.1.1. Papir	230
7.1.2. Lak izolacija vodiča	233
7.1.2.1. Vodiči bez lak izolacije	233
7.1.2.2. Vodiči s lak izolacijom	233
7.1.3. Drvo	234
7.1.4. Porculan, araldit i silikonska guma	234
7.1.5. Izolacijske tekućine (ulja i esteri)	234
7.1.5.1. Svojstva izolacijskih tekućina	234
7.1.5.2. Mineralno ulje	238
7.1.5.3. Silikonsko ulje	238
7.1.5.4. Esteri	238
7.1.5.5. Usporedba najvažnijih svojstava izolacijskih tekućina	239
7.2. Definicija proboja, preskoka i parcijalnih izbijanja	240
7.2.1. Proboj	240
7.2.2. Preskok	240
7.2.3. Parcijalna izbijanja	240
7.2.3.1. Impregnacija celulozne izolacije uljem	241
7.3. Ispitni naponi	241
7.3.1. Ispitivanje udarnim naponom (LI, LIC)	242
7.3.2. Ispitivanje sklopnim naponom (SI)	245
7.3.3. Ispitivanje stranim naponom (AV)	247
7.3.3.1. Ispitivanje stranim naponom jednoliko izoliranih namota	247
7.3.3.2. Ispitivanje stranim naponom postupno izoliranih namota	247
7.3.4. Ispitivanje induciranim (dvostrukim nazivnim) naponom (IVW)	248
7.3.4.1. Ispitivanje jednofaznim induciranim naponom za postupno izolirane namote (LTAC)	248
7.3.5. Ispitivanje parcijalnih izbijanja (IVPD)	249
7.4. Dozvoljena električna polja u izolacijskim materijalima	250
7.4.1. Dozvoljeno električno polje u lak izolaciji vodiča	250
7.4.2. Dozvoljeno električno polje u papiru	251
7.4.3. Dozvoljeno električno polje u uljnom kanalu (Kappelerova istraživanja)	252
7.5. Dimenzioniranje izolacije unutar namota	253
7.5.1. Primjer određivanja prirasta izolacije vodiča VN namota	254
7.5.2. Prirast papirne izolacije vodiča	255
7.5.3. Dimenzioniranje slojne izolacije	255
7.6. Dimenzioniranje glavne izolacije i izolacije izvoda namota	256
7.6.1. Mjerodavni napon	256

7.6.1.1. Naponska slika transformatora	258
7.6.2. Izračun električnog polja	260
7.6.3. Određivanje faktora sigurnosti	260
7.6.3.1. Kumulativna metoda za određivanje faktora sigurnosti	260
7.6.4. Primjer dimenzioniranja glavne izolacije	261
7.6.4.1. Model pločastog kondenzatora	261
7.6.4.2. Model cilindričnog kondenzatora	264
7.6.4.3. FEM model	266
7.6.5. Izolacijski razmaci	267
7.7. Izračun raspodjele udarnog napona po namotu	268
7.7.1. Nadomjesna shema za izračun udarnog napona	268
7.7.2. Izračun kapaciteta u nadomjesnoj shemi	270
7.7.2.1. Primjer izračuna kapaciteta elemenata	273
7.7.3. Izračun induktiviteta i međuinaktiviteta u nadomjesnoj shemi	276
7.7.3.1. Primjer izračuna induktiviteta i međuinaktiviteta elemenata	276
7.7.4. Postavljanje diferencijalnih jednačbi	278
7.7.5. Izračun serijskog (vlastitog) kapaciteta namota u svicima	282
7.7.5.1. Serijski kapacitet preloženog namota	283
7.7.5.2. Serijski kapacitet preloženog namota s jednim pasivnim vodičem po svitku	284
7.7.5.3. Serijski kapacitet upletenog namota	285
7.7.5.4. Primjer izračuna serijskog kapaciteta namota u svicima	288
7.7.6. Gradacija serijskog kapaciteta u nehomogenom namotu	289
7.8. Toplinske klase izolacijskih materijala	290
7.9. Vijek trajanja izolacije	291
8. BUKA	295
8.1. Osnovni pojmovi i definicije vezani za buku	295
8.2. Karakteristične vrijednosti buke	297
8.3. Mjerenje buke transformatora	298
8.3.1. Prilagođavanje mjerene buke karakteristikama ljudskog uha	298
8.3.2. Metode za mjerenje buke	299
8.3.2.1. Metoda mjerenja buke u točkama (<i>point by point</i>)	299
8.3.2.2. Metoda mjerenja buke duž mjerne konture (<i>walk around</i>)	299
8.3.3. Mjerenje zvučnog tlaka i intenziteta te određivanje zvučne snage	300
8.3.3.1. Mjerenje razine zvučnog tlaka i intenziteta	300
8.3.3.2. Određivanje razine zvučne snage	300
8.4. Izvori buke kod transformatora	300
8.4.1. Procjena buke jezgre	301
8.4.2. Procjena buke namota	301
8.4.3. Ukupna buka transformatora	301
8.5. Primjer izračuna buke	302
9. SILE I NAPREZANJA U KRATKOM SPOJU	305
9.1. Udarne struja kratkog spoja	305
9.2. Djelovanje sila na namote	309

9.3. Objašnjenje mehaničkih pojmova	311
9.4. Radijalna naprezanja	312
9.4.1. Radijalna sila	312
9.4.2. Naprezanje na radijalno savijanje	314
9.4.3. Naprezanje na tlak i vlak	315
9.4.4. Izvijanje	316
9.4.4.1. Slobodno izvijanje	316
9.4.4.2. Prisilno izvijanje	317
9.4.4.3. Oblik deformacije namota prilikom izvijanja	317
9.4.4.4. Kriteriji za izbjegavanje izvijanja namota	318
9.4.4.5. Izvijanje namota ovalnog oblika	319
9.5. Aksijalna naprezanja	319
9.5.1. Aksijalna sila	319
9.5.2. Pritisak na izolaciju vodiča i podložne pločice	321
9.5.3. Aksijalno savijanje	321
9.5.4. Izvrtanje vodiča (<i>tilting</i>)	321
9.6. Primjer izračuna sila i naprezanja	322
10. ZAGRIJAVANJE I HLAĐENJE TRANSFORMATORA	325
10.1. Mehanizmi prijenosa topline	325
10.1.1. Kondukcija (provođenje topline)	326
10.1.2. Konvekcija (prijenos topline strujanjem)	326
10.1.2.1. Konvektivni prijelaz topline u transformatoru	327
10.1.3. Zračenje	329
10.1.3.1. Toplinsko zračenje transformatora	330
10.2. Pregled sustava hlađenja transformatora	330
10.2.1. ONAN	331
10.2.2. ONAN/ONAF	332
10.2.3. OFAF	332
10.2.4. OFWF	333
10.2.5. ODAF	333
10.3. Temperaturni dijagram za ONAN i ONAF hlađenje	334
10.4. Nadtemperatura namot-ulje	335
10.4.1. Prijelaz topline s izoliranog vodiča uronjenog u ulje	335
10.4.2. Prijelaz topline s izolirane grupe vodiča uronjenih u ulje	337
10.4.3. Nadtemperatura segmenta namota prema ulju	339
10.4.4. Nadtemperatura sekcije namota prema ulju	341
10.4.5. Nadtemperatura namota prema ulju	342
10.4.6. Pojednostavljeni izračun nadtemperature za distribucijske transformatore	342
10.5. Hladnjak i valovite stranice	344
10.6. Dimenzioniranje sustava hlađenja za ONAN	345
10.6.1. Određivanje rashladne površine hladnjaka i valovitih stranica	346
10.6.2. Određivanje visine, broja članaka i mase hladnjaka	351
10.6.3. Određivanje broja i dubine valovitih stranica te mase valovitog kotla	351
10.7. Izračun najtoplije točke u namotu (<i>hot-spot</i>)	355
10.8. Primjer dimenzioniranja hladnjaka za ONAN	355

11. PROJEKT DISTRIBUCIJSKOG TRANSFORMATORA	359
11.1. Princip projektiranja i dijagram toka	359
11.2. Funkcije zaokruživanja	361
11.3. Ulazni podaci za izračun	361
11.4. Minimalne i maksimalne vrijednosti ulaznog napona	361
11.5. Nazivne linijske i fazne vrijednosti napona i struja	361
11.5.1. Fazne vrijednosti napona	362
11.5.2. Linijske vrijednosti struja	362
11.5.3. Fazne vrijednosti struja	362
11.6. Broj zavoja i pogreška prijenosnog omjera	362
11.7. Vrste i početne dimenzije vodiča te broj kanala u namotima	363
11.8. Početni razmaci i debljine	363
11.9. Gustoća struje, širina i visina NN namota (folijski)	365
11.10. Gustoća struje, širina i visina VN namota (slojni)	365
11.11. Popunjavanje presjeka ovalne jezgre	367
11.12. Dimenzije i masa ovalne jezgre	372
11.13. Magnetska indukcija, gubici i buka jezgre	373
11.14. Opsezi, dimenzije i mase namota	374
11.15. Otpori namota	376
11.16. Gubici tereta	376
11.16.1. Izračun I^2R gubitaka	376
11.16.2. Izračun gubitaka zbog skin efekta u namotima	376
11.16.3. Izračun dodatnih gubitaka	377
11.16.4. Ukupni gubici tereta	378
11.17. Napon kratkog spoja	378
11.18. Izračun nadtemperature namota prema ulju	379
11.19. Provjera na kratki spoj	380
11.20. Interpretacija rezultata inicijalnog izračuna	381
11.21. Utjecajne veličine na gubitke, napon kratkog spoja i nadtemperaturu namot-ulje ..	382
11.22. Izračun nadtemperature ulja	385
11.22.1. Unutrašnje dimenzije valovitog kotla	385
11.22.2. Dimenzioniranje valovitog kotla i srednja nadtemperatura ulja	385
11.23. Izračun mase valovitog kotla	387
11.24. Izračun mase ulja	388
11.25. Izračun mase transformatora	388
11.26. Izračun ukupnih dimenzija transformatora	389
 III. TRANSFORMATORI U PRIMJENI	 393
12. STRUJA UKLJUČENJA	395
13. PARALELNI RAD TRANSFORMATORA	401
13.1. Raspodjela snage među paralelno spojenim transformatorima	406
14. AUTOTRANSFORMATOR	409
14.1. Snaga autotransformatora	411
14.2. Napon kratkog spoja autotransformatora	413

14.3. Primjena autotransformatora	414
14.4. Regulacija napona autotransformatora	415
14.4.1. Regulacija napona autotransformatora u nultočki	415
14.4.2. Regulacija napona autotransformatora uz konstantan napon VN strane.....	416
14.4.3. Regulacija napona autotransformatora uz promjenjivi napon VN strane.....	417
14.4.4. Autotransformator s uzdužnom i poprečnom regulacijom napona u nultočki ..	417
15. ZAŠTITNI UREĐAJI NA TRANSFORMATORU	421
15.1. Pregled zaštitnih uređaja na distribucijskim transformatorima	421
15.1.1. Zaštitni uređaji na hermetički zatvorenim transformatorima.....	421
15.1.2. Zaštitni uređaji na distribucijskim transformatorima koji imaju konzervator ..	422
15.1.3. Zaštitni uređaji na energetskim transformatorima koji imaju konzervator	423
16. ZAŠTITA TRANSFORMATORA OD KOROZIJE.....	427
17. KAPITALIZIRANA CIJENA TRANSFORMATORA.....	429
18. DIJAGNOSTIKA I MOTRENJE TRANSFORMATORA	431
18.1. Dijagnostička ispitivanja transformatora	431
18.1.1. Vizualni pregled transformatora	432
18.1.2. Električna mjerenja	433
18.1.2.1. Mjerenje struje magnetiziranja pri sniženom naponu.....	434
18.1.2.2. Mjerenje prijenosnog omjera	434
18.1.2.3. Mjerenje otpora namota u svim položajima regulacijske sklopke.....	434
18.1.2.4. Mjerenje otpora izolacije jezgre prema steznicima i zemlji.....	436
18.1.2.5. Mjerenje otpora izolacije namota	436
18.1.2.6. Mjerenje kapaciteta namota i faktora dielektričnih gubitaka.....	440
18.1.2.7. Dielektrična spektroskopija u frekvencijskoj domeni.....	445
18.1.2.8. Spektroskopija u vremenskoj domeni	445
18.1.2.9. Mjerenje obnovljenog napona	447
18.1.2.10. Mjerenje kapaciteta i faktora dielektričnih gubitaka provodnika	449
18.1.2.11. Mjerenje parcijalnih izbijanja u izolaciji transformatora	451
18.1.2.12. Mjerenje rasipnog induktiviteta transformatora	452
18.1.2.13. Mjerenje frekvencijskog odziva transformatora	452
18.1.2.14. Mjerenje frekvencijskog odziva dodatnih gubitaka	455
18.1.3. Termovizijska ispitivanja	455
18.1.4. Ultrazvučna ispitivanja	457
18.1.5. Ispitivanja papirne izolacije	457
18.1.5.1. Mjerenje stupnja polimerizacije	457
18.1.5.2. Mjerenje udjela vlage u papiru Karl-Fisherovom titracijom	458
18.1.5.3. Određivanje udjela vlage u papiru iz izotermnih krivulja ravnoteže ...	459
18.1.6. Ispitivanja ulja	460
18.1.6.1. Kromatografska analiza plinova otopljenih u ulju.....	460
18.1.6.2. Analiza furana otopljenih u ulju	470
18.1.6.3. Fizikalno-kemijske, toplinske i električne karakteristike ulja	471
18.2. Kontinuirano motrenje transformatora	477
18.2.1. Napon i struja transformatora	478
18.2.2. Temperatura namota i ulja transformatora	478

18.2.3. Parcijalna izbijanja	480
18.2.4. Udio vlage i plinovi otopljeni u ulju	483
18.2.5. Kapacitet i faktor dielektričnih gubitaka provodnika	484
18.2.6. Tlak ulja u provodnicima	488
19. PRILOZI	489
19.1. Popis ispitivanja novih transformatora	489
19.1.1. Rutinska ispitivanja	489
19.1.2. Tipska ispitivanja	490
19.1.3. Specijalna ispitivanja	490
19.1.4. Ispitivanja prilikom montaže transformatora na terenu	491
19.2. Natpisna pločica	491
19.2.1. Dodatne informacije na natpisnoj pločici	492
19.2.2. Primjeri natpisnih pločica	493
LITERATURA	497
POPIS OZNAKA	507
KAZALO POJMOVA	529