

Ivan Sitar
KONČAR–Distributivni i specijalni transformatori d.d.
ivan.sitar@koncar-dst.hr

IZVEDBE I KARAKTERISTIKE TRANSFORMATORA ZA VUČNE PODSTANICE

SAŽETAK

U referatu su prikazane najčešće izvedbe transformatora za vučne podstanice. Opisana su rješenja trofaznih, jednofaznih i ispravljačkih transformatora za napajanje izmjenične i istosmjerne kontaktne mreže.

Analizirani su različiti zahtjevi na preopteretivost te ukazano na nužnost usklađenja postojećih specifikacija s najnovijim evropskim standardom transformatora za napajanje vučnih podstanica.

Obrađeni su jednofazni autotransformatori čija je primjena sve češća kod napajanja novoizgrađenih mreža 25 kV/50 Hz. Na primjeru autotransformatora 15 MVA pokazan je postupak određivanja ispitne struje kratkoga spoja.

Navedene su specifičnosti projektiranja ispravljačkih transformatora te ukazano na mjesta koncentracije dodatnih gubitaka uzrokovanih višim harmonicima u struji tereta. Na osnovu rezultata proračuna dodatnih gubitaka u namotima transformatora i mjerenja ukupnih gubitaka u kratkom spoju predložen je način računanja ekvivalentne struje za pokus zagrijanja ispravljačkih transformatora.

Ključne riječi: transformator za vuču, autotransformator, ispravljački transformator, preopteretivost, otpornost na kratki spoj, dodatni gubici, ispitivanje zagrijanja

DESIGN AND CHARACTERISTICS OF TRACTION TRANSFORMERS FOR FIXED INSTALLATIONS

SUMMARY

The report shows most common transformer designs for traction substations. Solutions are given for three-phase, single-phase and rectifier transformers supplying alternating and direct current rail networks.

Various demands for overloading are analyzed and the need for the existing specifications to agree with the latest European standards is pointed out.

Single-phase transformers increasingly used to supply newly built 25kV/50Hz networks are elaborated. On an autotransformer example the procedure for determining the short-circuit test current is demonstrated.

Specific features of rectifier transformer design are presented as well as the locations of additional losses concentration due to higher harmonics in the load current. Based on the results of calculation of additional losses in transformer windings and the measurement of total short-circuit losses a method is proposed for the calculation of the equivalent current of the transformer temperature rise test.

Key words: traction transformer, autotransformer, rectifier transformer, overloading, short-circuit ability, additional losses, temperature rise test

1. UVOD

Napajanje izmjenične kontaktne mreže naponima industrijske frekvencije se primjenjuje od dvadesetih godina prošloga stoljeća. Ranije građene mreže napajane su iz izvora niže frekvencije tako da se još i danas u nekoliko država koriste frekvencije 16,7 Hz i 25 Hz. Kao izvor napajanja kontaktne mreže obično služi silazni jednofazni transformator koji se spaja između dviju faza prijenosne mreže.

Za napajanje modernih linija gdje voze vlakovi velikih brzina (većih od 200 km/h) potrebna je veća snaga koja može doseći i 20 MW. Da se smanje negativne posljedice na rad vozila zbog velikog pada napona duž linije, danas, ako se gradi nova mreža gotovo standardno rješenje je ugradnja autotransformatora. Napajanje autotransformatora iz visokonaponske mreže ide preko punog transformatora veće snage (na primjer 60 MVA) čiji sekundarni namot $2 \times 27,5$ kV ima odcjep na sredini koji se spaja na tračnicu (rail), dok se jedan kraj sekundara veže na kontaktni vod (catenary) a drugi kraj na povratni vod (feeder). Autotransformatori $55/27,5$ kV su manje snage (na primjer 15 MVA), postavljaju se na više mjesta uzduž kontaktne mreže da bi omogućili raspodjelu struje na kontaktni i povratni vod i tako se smanjio pad napona od transformatora do vozila.

Istosmjerna kontaktna mreža napona 0,6-3 kV napaja se iz ispravljačkih vučnih podstanica gdje transformatori povezuju prijenosnu mrežu i ulaznu stranu ispravljača i zbog toga se na njih osim standarda za vučne transformatore primjenjuju i standardi koji vrijede za ispravljačke transformatore.

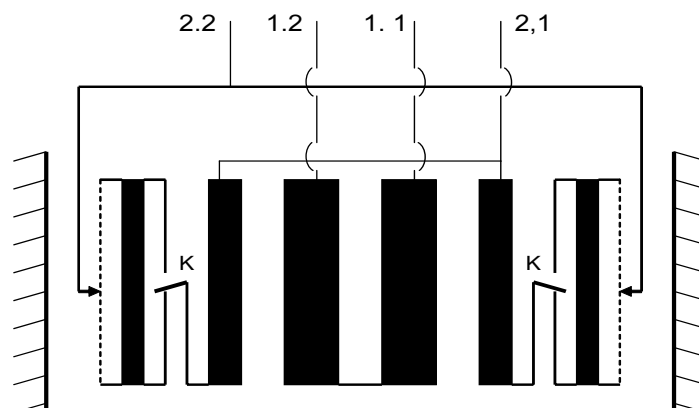
Referat opisuje specifičnosti gradnje ove tri grupe transformatora i daje neke od smjernica za projektiranje i ispitivanje takve vrste transformatora.

2. IZVEDBE TRANSFORMATORA

2.1. Puni jednofazni transformatori

Transformatori koji se danas u Hrvatskoj naručuju za napajanje izmjeničnih vučnih podstanica su nazivne snage 7,5 MVA i 15 MVA, prijenosnog omjera $110/27,5$ kV $\pm 10 \times 1,5\%$, dakle s regulacijom pod teretom na niskonaponskoj strani, [1].

To je uljni transformator standardnog ispitnog napona LI550 AC230 / LI170 AC70. Hlađenje je ONAN a rasladni sistem je dimenzioniran za preopterećenje 50 % u trajanju 15 minuta ili 100 % u trajanju od 5 minuta. Preopterećenje se računa i ispituje nakon stacionarnog zagrijanja s nazivnim teretom. Nakon preopterećenja i pri temperaturi okoline 40 °C zagrijanja namota i ulja mogu biti 5 °C veća u odnosu na dozvoljena standardom, odnosno ulje 105 °C a namot 110 °C. Također se zahtijeva da transformator u pogonu radi u režimu stalno promjenjivog opterećenja od $I = 0$ do $I = 2 I_n$, i mora izdržati 200 kratkih spojeva godišnje. Dakle mehanička izvedba transformatora treba biti takova da izdrži dinamička naprezanja uzrokovana promjenjivim opterećenjem i strujama kratkoga spoja bez da se ugrozi normalan životni vijek transformatora. Slika 1 prikazuje raspored namota na stupu jezgre transformatora 15 MVA.



Slika 1: raspored namota na jezgri transformatora 15 MVA

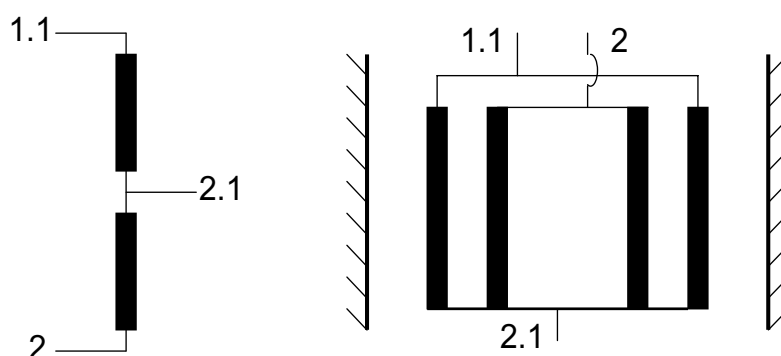
Transformator je jezgraste izvedbe s dvostupnom jezgrom i namotima smještenim na oba stupa. Niskonaponski namot 2.1-2.2 spojen je u paralelu, pri čemu se regulacija koja je izvedena preokretanjem nalazi uz jezgru. Visokonaponski namot 1.1-1.2 je vanjski i spojen u seriju. Osnovni nazivni podaci su dani u tablici 1.

Tablica 1: osnovni nazivni podaci transformatora 7,5 MVA i 15 MVA

Transformator	7,5 MVA	15 MVA
Gubici praznog hoda (kW)	10	15
Gubici zbog tereta (kW)	45	62
Napon kratkog spoja (%)	9,25-10,75	9,25-10,75
Ukupna masa (kg)	27000	31000

2.2. Jednofazni autotransformatori

Danas se većina novoizgrađenih mreža za napajanje pruga velikih brzina grade s kontaktnom mrežom 25 kV – 0 – 25 kV u koje se ugrađuju autotransformatori na više mjesta između glavnih transformatora za napajanje kontaktne mreže, [2] i [3]. Autotransformatori najčešće imaju nazivnu snagu 10 MVA ili 15 MVA a njihova je namjena raspodijeliti struju između kontaktnog i povratnog voda da bi se smanjio pad napona od glavnog transformatora do vozila. Autotransformator ima fiksni prenosni omjer 55/27,5 kV. Na slici 2 prikazani su spoj i raspored namota na jezgri autotransformatora 15 MVA. Krajnji priključci 1.1 i 2 spajaju se na povratni i kontaktni vod, dok se srednji priključak 2.1 spoji na tračnicu.



Slika 2: spoj i smještaj namota na jezgri autotransformatora 15 MVA

Transformator su izvode kao uljni, ispitnih napona LI250 AC 95 / LI 40 AC 18,5 ili LI325 AC 140 / LI 50 AC 23, gdje se viši ispitni napon odnosi na krajnje priključke 1.1 i 2, a niži na priključak 2.1. Nivo ispitnog napona određuje kupac ovisno o naponskim prilikama i postavljenoj naponskoj zaštiti željezničke mreže. Hlađenje je ONAN i rashladni sistem se dimenzionira za preopterećenje 50 % u trajanju 15 minuta ili 100 % u trajanju od 5 minuta. Ciklus preopterećenja je iterativni i ponavlja se nakon 2 sata trajne struje nazivnog tereta. Nakon nekoliko ciklusa opterećenja kada se zagrijanje stabiliziralo srednja temperatura namota ne smije prelaziti 130 °C, a maksimalno ulje 110 °C. U pogledu otpornosti na kratki spoj traži se da je transformator sposoban izdržati maksimalnu struju kratkoga spoja koja se može pojaviti tijekom pogona. Budući da se radi o autotransformatorima izuzetno malog napona kratkog spoja (1-1,2%), obično se traži dinamičko ispitivanje na kratki spoj sa strujom unaprijed definiranom od strane kupca.

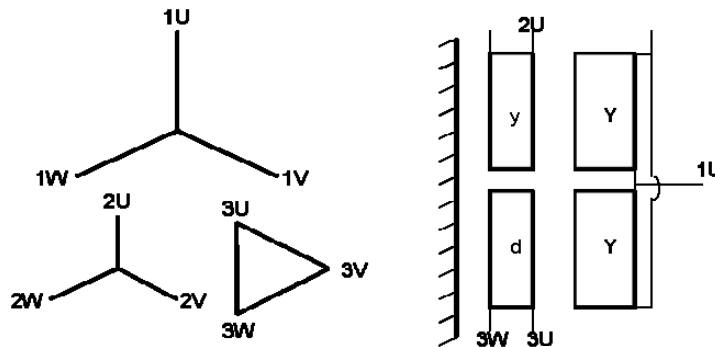
Autotransformatori te namjene najčešće se grade s dvostupnom jezgrom i imaju namote smještene na oba stupa. Polunamoti serijskog i paralelnog namota spojeni su paralelno i dimenzionirani za istu struju i isti napon. Osnovni nazivni podaci autotransformatora 10 MVA i 15 MVA prikazani su u tablici 2.

Tablica 2: osnovni nazivni podaci autotransformatora 10 MVA i 15 MVA

Autotransformator	10 MVA	15 MVA
Gubici praznog hoda (kW)	6	12,5
Gubici zbog tereta (kW)	8	16
Napon kratkog spoja (%)	1,15	1
Ispitni naponi	LI 250 AC95 / LI 40 AC18,5	LI 325 AC140 / LI 50 AC23
Ukupna masa (kg)	14100	24000

2.3. Trofazni ispravljački transformatori

Istosmjerna kontaktna mreža napaja se iz ispravljačkih podstanica gdje trofazni transformator koji povezuje prijenosnu mrežu i ispravljačko postrojenje predstavlja jednu od najvažnijih komponenti. Ovisno o naponu mreže to su uljni transformatori ako je mreža izolacionog nivoa 52 kV ili višeg, odnosno uljni ili suhi (viskonaponski namot zaliven u araldit) u mrežama izolacionog nivoa 36 kV ili nižeg. Kako je obično ispravljačko postrojenje 12 pulsno, transformator na sekundarnoj strani ima dva sekundara s međufaznim pomakom sekundarnih napona 30° . To se postiže tako da se jedan od sekundara spoji u zvijezdu a drugi u trokut. Primarni namot izvodi se također u dva dijela koji se spajaju paralelno i postavljeni su svaki sa svojim sekundarom aksijalno jedan iznad drugoga. Time se dobivaju praktički dva neovisna sistema, dakle slaba elektromagnetska veza između sekundara. Na slici 3 prikazani su shema trofaznog spoja Yy0d11 i namoti faze U na stupu jezgre.



Slika 3: grupa spoja Yy0d11 i smještaj namota stupu faze U

Najčešće zastupljene trofazne snage transformatora koji napajaju 3 kV ispravljačko postrojenje su 3880/2x1940 kVA i 5750/2x2875 kVA, prenosnog omjera X/2x2,7 kV, gdje X ovisi o naponu visokonaponske mreže iz koje se napaja postrojenje. Ovisno o naponu mreže ispitni naponi visokonaponskog namota su LI 750 AC 275 ili niži dok se ventilski namoti 2,7 kV ispituju sa LI 40 AC 20. Regulacija se izvodi na visokonaponskoj strani pod teretom ili u beznaponskom stanju. Hlađenje je ONAN a rashladni sistem se dimenzionira za tri ciklusa opterećenja $2I_n \times 2h + 2,33I_n \times 5' + I_n \times 5h55'$ tijekom 24 sati pogona transformatora. Tehnička specifikacija [5] također definira ciklus opterećenja za pokus zagrijanja. Zagrijanja namota i ulja na kraju pokusa ne smiju biti viša od dozvoljenih za energetske transformatore. Jezgra je trostupna, niskonaponski namoti su do jezgre i izvedeni iz transponiranog vodiča (TSV-a). Broj i dimenzije elementarnih vodiča se odabiru prema sadržaju i iznosu viših harmonika u struji opterećenja. Viskonaponski namot je vanjski i izveden u dva dijela koji su spojeni paralelno. U tablici 3 prikazani su osnovni nazivni podaci transformatora 3,88 MVA i 5,75 MVA.

Tablica 3: osnovni nazivni podaci ispravljačkih transformatora 3,88 MVA i 5,75 MVA

Transformator	3,88/2x1,94 MVA	5,75/2x2,875 MVA
Gubici praznog hoda (kW)	< 10,5	< 10,5
Gubici zbog tereta (kW)	< 28	< 35
Napon kratkog spoja (%)	8,5-10,0	10,5-13,5
Ispitni naponi	LI 650 AC 275 / LI 40 AC20	LI 650 AC275 / LI 40 AC20
Ukupna masa (kg)	21500	29500

3. SPECIFIČNOSTI TRANSFORMATORA ZA VUČNE PODSTANICE

3.1 Preopterećenje

Transformatori za napajanje kontaktne mreže izloženi su značajnim i čestim promjenama opterećenja po iznosu i trajanju. Zbog toga kupac treba kod naručivanja transformatora definirati dnevni dijagram opterećenja ili ekvivalentno preopterećenje kako bi se mogao napraviti optimalni transformator koji odgovara stvarnim uvjetima pogona. Prema iskustvu kupci najčešće naručuju transformator za ciklus preopterećenja $1,5I_n$ u trajanju 15' ili $2I_n$ u trajanju 5'. Važeća norma [6] preporuča nekoliko standardnih

ciklusa preopterećenja i u dodatku D daje relacije za računanje maksimalnog ulja i srednje temperature namota i navodi 15 K za dozvoljeno povišenje temperature namota u slučaju kratkotrajnih preopterećenja, dok na kraju dugotrajnih preopterećenja iste ne bi smjele biti više od vrijednosti pri nazivnom teretu za energetske transformatore.

Preporuča se postojeću normu [1] koja datira još iz 1985 godine i koja je bila privremenog karaktera uskladiti s evropskom normom [6]. Pri tome bi svakako trebalo predvidjeti mogućnost primjene i drugačijih izolacijskih sistema (miješani, poluhidridni i hibridni), odnosno upotrebu materijala više toplinske klase (nomex, ester ili silikonsko ulje) koji dozvoljavaju više temperature ulja i namota [7]. Time bi se izbjeglo nepotrebno povećanje dimenzija i mase transformatora u slučaju većih preopterećenja. Analize provedene na transformatorima izolacionog nivoa 36 kV su pokazale da aktivni dio transformatora toplinske klase A (105°C) može biti i do 20 % teži u odnosu na transformator iste nazivne snage i napona kratkoga spoja građen iz materijala toplinske klase F (155°C). Međutim zbog viših cijena izolacijskih materijala i ulja, transformator klase F je do 15 % skuplji u odnosu na transformator iste snage klase A.

3.2 Otpornost na kratki spoj

Budući da su transformatori koji napajaju kontaktnu mrežu izloženi čestim kratkim spojevima na strani potrošača, gotovo je pravilo da se kao tipsko ispitivanje zahtijeva ispitivanje na kratki spoj. Standard [8] za transformatore I i II kategorije (do 100 MVA) predviđa ispitati jednofazni transformator s tri udarca, a trofazni s devet udaraca struje kratkoga spoja. Ponekad kupac traži ispitivanje transformatora s povećanim brojem udaraca, i do 25, naravno ne svi s maksimalnom strujom kratkoga spoja. To ne samo da poskupljuje ispitivanja koja se mogu provesti u specijalno opremljenim laboratorijima velikih snaga (CESI, KEMA, IPH), već i zahtijeva robustniju mehaničku izvedbu, brižljiviji postupak izrade aktivnog dijela, manje tolerancije dimenzija u odnosu na uobičajene te čini transformator težim i skupljim.

Posebnu pažnju treba pokloniti određivanju struje kratkoga spoja kojom će se ispitati na kratki spoj autotransformatora koji imaju mali napon kratkoga spoja, (vidi tablicu 2). U tom slučaju impedancija kratkog spoja punog transformatora koji napaja kontaktnu mrežu ima veći utjecaj na iznos struje kratkoga spoja autotransformatora nego njegova vlastita impedancija. Uzmimo za primjer slučaj autotransformatora 15 MVA napona kratkoga spoja 1% kojega iz mreže prividne snage 15000 MVA napaja puni jednofazni transformator nazivne snage 60 MVA napona kratkoga spoja 10%. Ako se zanemare radne komponente napona kratkoga spoja ($u_{ra}=0,106\%$, $u_{xa}=0,994\%$), na 55 kV impedancije pojedinih komponenti koje ulaze u izračun struje kratkoga spoja iznose:

a) autotransformatora

$$Z_{AT} = \frac{1 \cdot 55^2}{100 \cdot 15} = 2,017 \quad \Omega \quad (1)$$

b) punog transformatora

$$Z_{TR} = \frac{10 \cdot 55^2}{100 \cdot 60} = 5,042 \quad \Omega \quad (2)$$

c) mreže

$$Z_m = \frac{55^2}{15000} = 0,201 \quad \Omega \quad (3)$$

Dakle trajna struja kratkoga spoja na naponu 55 kV koji napaja autotransformator iznosi:

$$I_{kAT} = \frac{55000}{2,017 + 5,042 + 0,201} = 7575 \quad A \quad (4)$$

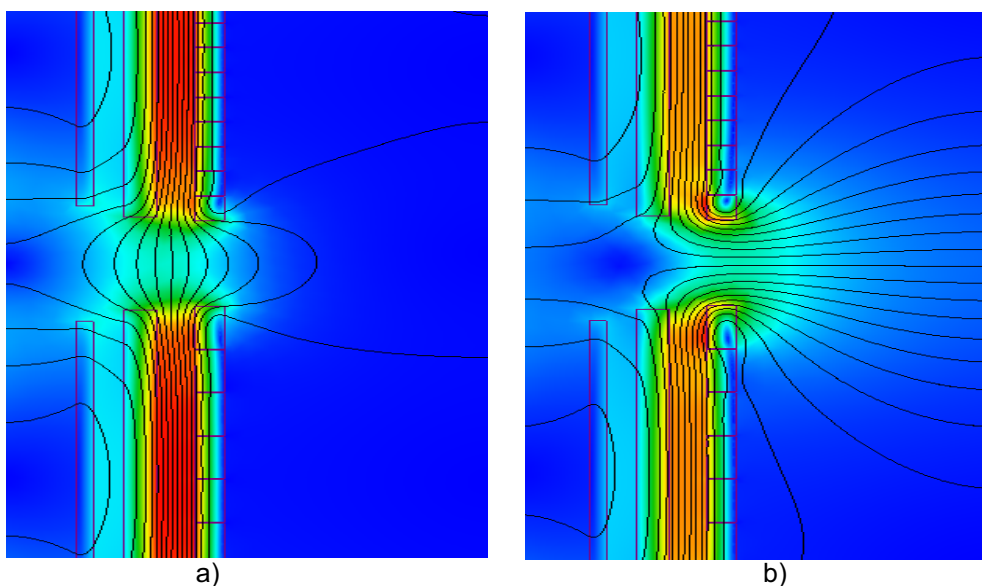
Autotransformator je ispitan s 7,5 kA ($I_{kAT}/I_{NAT}=27,5$) i pri tom su serijski i paralelni namot ispitani svaki sa po dva udarca struje kratkoga spoja.

3.3 Dodatni gubici u ispravljačkom transformatoru

Ispravljački transformator napaja iz trofazne mreže ispravljačko postrojenje. Najčešće je to 12 pulsno postrojenje pa transformator ima dva sekundarna namota s naponima međusobno pomaknutima

za 30°. Jedan od sekundara spojen je u zvijezdu a drugi u trokut, pri čemu su sekundarni namoti svaki sa svojim primarom smješteni aksijalno jedan iznad drugoga na istom stupu trofazne trostupne jezgre. Primarni namoti se spajaju paralelno, dobivajući na taj način praktički dva nezavisna sistema s relativno slabom magnetskom vezom ($K < 0,2$).

Kroz sekundarne namote ispravljačkog transformatora osim osnovnog harmonika struje teku i višiharmonici čiji iznos i fazni pomak ovise o radu ispravljača. I dok se istofazni harmonici zbrajaju u namotu mreže i proizvode osim $I^2 R_{DC}$ gubitaka i dodatne gubitke uslijed viših harmonika, utjecaj harmonika u protufazi na gubitke u primarnom namotu i dodatne gubitke u oba namota ovisi o izvedbi jezgre transformatora i spoju primarnog namota. Zbog paralelno spojenih primara koji su međusobno u slaboj magnetskoj vezi (jedan iznad drugoga), u oba primara teći će i istofazni i harmonici u protufazi. Rasipno magnetsko polje koje stvaraju harmonici u protufazi biti će drugačijeg oblika od rasipnog polja stvorenog harmonicima u fazi (slika 4), osobito u području između namota gdje je izražena radijalna komponenta polja. Ako je aksijalna dimenzija vodiča prevelika, dodatni gubici mogu se znatno povećati na rubovima namota u sredini stupa, uzrokujući lokalna zagrijanja (hot-spot) i ubrzano starenje izolacije što može dovesti do kvara i ispada transformatora iz pogona. Zbog toga je kod većih jedinica neophodna detaljnija studija rasipnog magnetskog polja i dodatnih gubitaka, da bi se, ako su gubici i lokalna zagrijanja prevelika, namot na krajevima izveo iz vodiča manjih dimenzija.



Slika 4: rasipno magnetsko polje u prostoru između namota; a) zbog harmonika u fazi, b) zbog harmonika u protufazi

Kod pokusa zagrijanja ispravljačkih transformatora moraju se uzeti obzir gubici zbog viših harmonika. Kako se dodatni gubici u namotima mijenjaju s kvadratom frekvencije a dodatni gubici u ostalim metalnim dijelovima transformatora s frekvencijom na eksponent 0,8, preporuča se gubitke u namotima izračunati nekim od verificiranih programa za računanje dodatnih gubitaka u transformatoru (račun je zadovoljavajuće točnosti). Tako izračunate gubitke treba oduzeti od ukupnih dodatnih gubitaka izmjerenih pokusom kratkoga spoja da bi se dobila komponenta gubitaka koja se mijenja s frekvencijom na eksponent 0,8. Postupak za računanje ekvivalentne struje pokusa zagrijanja ispravljačkih transformatora je opisan u [9].

Ipak na kraju treba napomenuti da se pravi pokus zagrijanja ispravljačkih transformatora može napraviti jedino u postrojenju gdje je izložen stvarnim uvjetima pogona.

4. ZAKLJUČAK

Opisane su najčešće izvedbe transformatora za napajanje izmjenične i istosmjerne kontaktne mreže. To su jednofazni puni transformatori, jednofazni autotransformatori i trofazni ispravljački transformatori.

Na osnovu provedene analize proizlazi da postojeće norme [1] treba uskladiti s najnovijim evropskim standardom [6], osobito u pogledu preopteretivosti i definiranja otpornosti transformatora na kratki spoj.

Prikazan je postupak računanja struje kratkoga spoja autotransformatora i pokazano da najveći utjecaj na njen iznos ima puni transformator koji napaja jednofazni sistem 25 kV – 0 – 25 kV.

Analiza rasipnog magnetskog polja uslijed viših harmonika u struji tereta ispravljačkih transformatora pokazuje da polje od harmonika u protufazi ima izraženu radijanu komponentu na sredini stupa. Zbog toga se, kod ispravljačkih transformatora koji napajaju 12 pulsni ispravljač i imaju dva sekundara na istom stupu bez međujarma, predlaže detaljnija analiza dodatnih gubitaka i zagrijanja na tim dijelovima namota, sve sa ciljem da se izbjegnu eventualna pregrijanja namota i osigura kvalitetno rješenje.

Na osnovu računa dodatnih gubitaka u namotima i izmjerenih ukupnih gubitaka u pokusu kratkoga spoja predložen je postupak određivanja ekvivalentne struje zagrijanja ispravljačkih transformatora.

5. LITERATURA

- [1] ZJŽ 14 broj 28/85-128 Privremene odredbe o tehničkim uslovima za izradu, ispitivanje, prijem i isporuku jednofaznih transformatora 110/27,5 kV za ugradnju u elektrovočne podstanice monofaznog sistema. prosinac 1985.
- [2] E. Carpenter, A. Glaise. Le projet Channel Tunnel Rail Link (CTRL), Revue Générale de Chemins de Fer. juillet/aout 2001.
- [3] D. Levermann-Vollmer, W. Eberling. Autotransformer bei der Deutschen Bahn. Elektrische Bahnen 100 (2002) 1-2.
- [4] FS A104 Specifica tecnica Autotransformatore 15 MVA-55/27,5 kV. Revisione D, srpanj 1996.
- [5] FS IE.TE 193 Norme tecniche del servizio I.E. delle F.S. per la fornitura di trasformatori trifasi con la regolazione automatica della tensione sotto carico per l'alimentazione di raddrizzatori al silicio da 5400 kW per tensioni nominali di esercizio 3000 V e 6000 V corrente continua. A.005 Edizione 1988.
- [6] EN50329 Railway applications - Fixed installations - Traction transformers. ožujak 2003.
- [7] IEC TS 60076-14 Power transformers - Part 14 Design and application of liquid immersed power transformers using high-temperature insulation materials. First edition 2004-14.
- [8] IEC 60076-5 Power transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit. Third edition 2006-02.
- [9] IEC 61378-3 Converter transformers – Part 3: Application guide.