



Zdenko Godec
Elektrotehnički fakultet u Osijeku
zgodec@etfos.hr

Tomislav Kelemen
Končar Institut za elektrotehniku, Zagreb
tomislav.kelemen1@zg.t-com.hr

UPRAVLJANJE HLAĐENJEM ULJNIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

SAŽETAK

Pokusom zagrijavanja se, prilikom preuzimanja transformatora, dokazuje da transformator ima ugovorene nazivne snage pri svim ugovorenim vrstama i stupnjevima hlađenja pri čemu izmjerena zagrijanja ulja i namota ne smiju prijeći ugovorena granična zagrijanja. Standardni način upravljanja sustavom hlađenja transformatora s više stupnjeva hlađenja provodi se aktiviranjem kontakata kontaktnog termometra (mjeri temperaturu ulja u najvišem sloju) ili kontakata termoslike (simulira temperaturu najtoplije točke namota) pri graničnim temperaturama. Proizvođač transformatora obično namješta temperature aktiviranja releja termoslike ili kontaktnog termometra tako da se djelotvornije hlađenje uključuje tek onda kad je postignuta temperatura koja odgovara graničnoj temperaturi manje djelotvornog načina hlađenja. To međutim nije najbolji način korištenja transformatora. Korisnik transformatora nije ničim ograničen da transformator koristi na način koji omogućuje produženje vijeka transformatora, manje ukupne gubitke i veće kratkotrajno preopterećenje. Predložena su dva načina povoljnijeg korištenja transformatora. Jedan je, da se učinkovitiji način hlađenja uključuje pri nižim temperaturama od graničnih, a drugi, da se učinkovitiji način hlađenja uključuje tako da se ukupni gubici (suma gubitaka praznog hoda, kratkog spoja i sustava hlađenja) održavaju na minimumu. Dok se prvi način može postići jednostavnim novim namještanjem i podešavanjem termoslike i kontaktnog termometra, za drugi način je potreban sustav za motrenje s posebnim algoritmom.

Ključne riječi: energetske transformatori, upravljanje hlađenjem, sustav za motrenje

CONTROL OF OIL-IMMERSED POWER TRANSFORMER COOLING SYSTEM

SUMMARY

In transformer acceptance procedure the temperature rise test is used to prove that a transformer has the contractual power ratings at all the cooling types and stages. It must be proven that the measured oil and winding temperature rises will not exceed the limiting values. The standard control of transformer cooling system with several cooling stages uses the actuation of relays of the oil temperature indicator (it measures the oil temperature in the top layer), or better of winding temperature indicator (it simulates winding hot spot temperature), at limiting temperatures. Transformer manufacturers usually set the actuation temperatures of winding temperature indicator (WTI) or oil temperature indicator (OTI) relays so that a more efficient cooling is running only when the limiting temperature of the less efficient cooling stage has been reached. However, this is not the best way to use a transformer. For the user of a transformer there are no limitations whatsoever to use the transformer in the manner that will extend its residual life, reduce total loss, and increase the overload capacity. In the paper two methods of improved transformer usage are proposed. One is to switch on the more efficient type of cooling at temperatures lower than the limiting ones, and the other is to switch it on and off so that the total loss (the sum of no-load, load and cooling system losses) is kept on its minimum. While the first method can be attained by a simple new setting and adjusting of the WTI and OTI, the other method requires additional equipment: a monitoring system with a special algorithm.

Key words: power transformers, cooling control, on-line monitoring

1. UVOD

Uljni energetski transformatori se hlade na razne načine [1]:

- a) ONAN (prirodnim strujanjem ulja i zraka),
- b) ONAF (prirodnim strujanjem ulja i prisilnim strujanjem zraka),
- c) OFAF (prisilnim strujanjem ulja i zraka),
- d) OFWF (prisilnim strujanjem ulja i vode),
- e) ODAF (prisilnim usmjerenim strujanjem ulja i prisilnim strujanjem zraka), ili
- f) ODWF (prisilnim usmjerenim strujanjem ulja i prisilnim strujanjem vode).

Svaka od nabrojanih vrsti hlađenja ima prednosti i mane. Zato se često koriste i kombinacije hlađenja na istom transformatoru, kao npr. ONAN/ONAF, ONAN/ONAF/OFAF, ONAN/ODAF, itd.

Kad se predviđa kombinirano hlađenje transformatora, naručitelj osim nazivne snage transformatora kod najučinkovitijeg hlađenja definira i snage pri manje učinkovitim vrstama hlađenja. Primjerice, kod transformatora s ONAN/ONAF hlađenjem definiraju se nazivne snage pri ONAN i pri ONAF hlađenju.

Prilikom završnih ispitivanja (preuzimanja transformatora), pokusom zagrijavanja se dokazuje da transformator ima ugovorenu nazivnu snagu (npr. pri ONAF hlađenju), ali i ugovorenu snagu pri manje učinkovitim hlađenju (npr. ONAN), tako što izmjerena zagrijanja ulja i namota ne smiju prijeći ugovorene granične vrijednosti pri ugovorenim snagama. Naime, pri višim temperaturama uljno-papirna izolacija brže gubi električka i mehanička svojstva (brže stari), pa ograničavanje temperatura ulja i izolacije vodiča namota posredno jamči vijek trajanja transformatora od približno 40 godina.

U pogonu, transformator u pravilu nije opterećen konstantnim nazivnim teretom, nego promjenjivim teretom koji je određen trenutnom potrošnjom priključenih trošila. Standardna oprema energetskih uljnih transformatora sadrži kontaktni termometar koji mjeri temperaturu ulja u najvišem sloju, i termosliku koja simulira temperaturu najtoplije točke papirne izolacije namota [2]. Odgovarajući dio rashladnog sustava se uključuje automatski s pomoću releja kontaktnog termometra ili termoslike pri unaprijed namještenim temperaturama. Upravljanje rashladnog sustava termoslikom je bolje, jer je trajnost izolacijskog sustava transformatora određena uglavnom temperaturom najtoplijeg mjesta namota.

Proizvođač transformatora najčešće namješta temperature aktiviranja kontakata termoslike tako da se efikasniji način hlađenja uključuje tek onda kad je postignuta granična dozvoljena temperatura namota. Na taj način transformator radi u nižem stupnju hlađenja pri terećenju snagama manjim, jednakim, a ponekad i višim od nazivne snage transformatora nižeg stupnja hlađenja - što skraćuje vijek trajanja transformatora zbog rada na visokim temperaturama.

Dakle proizvođač, da bi izbjegao eventualni prigovor kupca da transformator u pogonu u nižem stupnju hlađenja nema ugovorenu snagu, upravljanje rashladnim sustavom namješta tako da se cijelo vrijeme pogona transformatora na mjestu ugradnje dokazuje kako transformator ima ugovorenu snagu i pri nižem stupnju hlađenja. Posljedica toga je nepotrebno i stalno visoko zagrijavanje dijelova transformatora i zbog toga brže starenje izolacije. Takav način upravljanja rashladnim sustavom nije povoljan niti za trajnost transformatora, niti za ukupne gubitke energije, niti za mogućnost kratkotrajnih preopterećenja. Drugim riječima, nije ekonomičan.

Jednom dokazane snage transformatora pri svim stupnjevima hlađenja u sklopu završnih ispitivanja nije potrebno stalno nanovo dokazivati u pogonu, jer se to „plaća“ skraćivanjem vijeka trajanja transformatora.

S druge strane vlasnik transformatora nije ničim prisiljen da transformator koristiti na opisani nepovoljan način, nego može primijeniti njemu povoljniji način pogona transformatora. Ako želi produžiti vijek trajanja transformatora, onda će namjestiti uključivanje djelotvornijeg hlađenja pri nižim temperaturama, jer je starenje izolacije približno upola sporije za svakih 6 K sniženja temperature. Ukoliko se predviđa kratkotrajno preopterećenje transformatora, povoljnije je da je transformator na početku preopterećenja hladniji. I konačno, odgovarajućim upravljanjem rashladnim sustavom moguće je održavati minimalne ukupne gubitke (sumu gubitaka u namotima i jezgri kao i onih za pogon ventilatora i uljnih crpki rashladnog sustava). Naime, učinkovitije hlađenje troši odgovarajuću snagu za pogon ventilatora i uljnih crpki, ali se istovremeno smanjuju gubici tereta u namotima zbog smanjenja djelatnog otpora pri nižim temperaturama.

U radu su opisana dva načina štedljivog upravljanja rashladnim sustavom transformatora. Jedan je univerzalan način namještanja temperatura aktiviranja releja termoslike i kontaktnog termometra sa svrhom produljenja vijeka trajanja transformatora, a drugi je individualan način određivanja optimiranog hlađenja sa svrhom postizanja minimalnih ukupnih gubitaka. S oba opisana načina upravljanja hlađenjem transformatora postiže se produljenje vijeka trajanja transformatora u usporedbi s do sada prakticiranim načinom podešavanja i namještanja termoslike i kontaktnog termometra.

2. UPRAVLJANJE SUSTAVOM HLAĐENJA NA OSNOVI TEMPERATURA

Pri ovom jednostavnom i univerzalnom načinu upravljanja sustavom hlađenja prvi stupanj hlađenja (najmanje učinkovit) je stalno djelotvoran (ONAN), ili se uključuje automatski pri stavljanju transformatora u pogon (pri svim ostalim vrstama hlađenja). Drugi stupanj (ili viši) uključuju kontakti releja termoslike ili kontaktnog termometra pri - na novi način namještenim - (nižim) temperaturama.

Tradicionalno se sustavom hlađenja upravlja s pomoću termoslike, dok kontaktni termometar služi kao rezerva u slučaju kvara termoslike. Kada transformator nema termosliku, sustavom hlađenja može upravljati kontaktni termometar.

2.1. Transformatori s ON.. i OD.. hlađenjem

Temperatura ulja u džepu (temperatura ulja u najvišem sloju) koju mjeri kontaktni termometar na transformatorima s prirodnim strujanjem ulja kroz namote (ON..) i na transformatorima s prisilnim usmjerenim strujanjem ulja kroz namote (OD..), bez obzira na vanjski rashladni sustav (..AN, ..AF, ili ..WF), približno je jednaka temperaturi ulja na izlazu iz namota. Kako se temperatura najtoplije točke namota određuje na temelju temperature ulja na izlazu iz namota kojoj se pridodaje simulirana temperatura zagrijanja najtoplije točke namota prema ulju [2], temperatura koju pokazuje termoslika približno odgovara stvarnoj temperaturi najtoplije točke namota.

Kontakte termoslike treba namjestiti tako da se uključuju pri nižim temperaturama nego je bilo uobičajeno. Ukoliko je jedini cilj produljenje vijeka trajanja transformatora, drugi stupanj hlađenja treba ukopčati već pri 70 °C. Ukoliko bi se uzelo u obzir samo termičko starenje uljem impregnirane papirne izolacije, dovoljno niska bi bila temperatura od 80 °C, jer se starenje izolacije pri toj temperaturi može smatrati dovoljno sporo (približno 8 puta sporije od normalne brzine starenja pri 98 °C [3]). Međutim, vlaga i kisik ubrzavaju starenje izolacije. Uzimajući tu činjenicu u obzir svrsishodno je još smanjiti temperaturu uključivanja drugog stupnja hlađenja za 10 K, kako bi očekivani vijek trajanja transformatora pri ovlaženosti uljem impregnirane izolacije od 2 % bio približno 40 godina [4].

Temperatura za isključenje transformatora iz pogona se namješta prema važećim normama. Npr. prema IEC normi [3] za kratkotrajno preopterećenje u slučaju nužde dozvoljena je granična temperatura najtoplije točke namota od 160 °C, pa se s obzirom na mjernu nesigurnost određivanja temperature klasičnom termoslikom [5] preporučuje temperaturu iskapčanja namjestiti na 150 °C.

Za normalno cikličko terećenje je prema [3] dozvoljena granična temperatura najtoplije točke namota 120 °C, pa se s obzirom na mjernu nesigurnost temperatura za uzbunjivanje preporučuje namjestiti na 110 °C.

Kontakti kontaktnog termometra koji mjeri temperature ulja u najvišem sloju služe kao rezerva u slučaju kvara termoslike, te se obično namještaju na 10 K niže temperature od kontakata termoslike za upravljanje rashladnim sustavom. To vrijedi i onda kada transformator nema ugrađenu termosliku. Dozvoljena granična temperatura ulja u najvišem sloju je prema [3] 115 °C za kratkotrajno i dugotrajno preopterećenje u slučaju nužde, pa se s obzirom na mjernu nesigurnost preporučuje temperaturu iskapčanja namjestiti na 105 °C. Za normalno cikličko terećenje transformatora dozvoljena granična temperatura ulja u najvišem sloju prema [3] iznosi 105 °C, pa se s obzirom na mjernu nesigurnost preporučuje temperaturu za uzbunjivanje namjestiti na 95 °C.

U tablici I prikazane su temperature na koje treba namjestiti kontakte termoslike i kontaktnog termometra na ON.. i OD.. transformatorima s dva stupnja hlađenja, a u drugoj tablici na transformatorima s tri stupnja hlađenja.

Tablica I. Temperature prorade kontakata termoslike (TS) i kontaktnog termometra (KT) na ON.. i OD.. transformatorima s dva stupnja hlađenja

Stupnjevi hlađenja	TS	KT
I	-	-
II	70 °C	60 °C
Uzbunjivanje	110 °C	95 °C
Isključenje transformatora	150 °C	105 °C

Tablica II. Temperature prorade kontakata termoslike (TS) i kontaktnog termometra (KT) na ON.. i OD.. transformatorima s tri stupnja hlađenja

Stupnjevi hlađenja	TS	KT
I	-	-
II	65 °C	55 °C
III	70 °C	60 °C
Uzbunjivanje	110 °C	95 °C
Isključenje transformatora	150 °C	105 °C

2.2. Transformatori s OF.. hlađenjem

Kod ove vrste hlađenja transformatora termoslika i kontaktni termometar pogrešno pokazuju niže temperature najtoplije točke namota i temperature ulja na izlazu iz namota (približno 10 °C), jer se zagrijano ulje iz namota miješa s većom količinom hladnog ulja koje ima temperaturu približno jednaku temperaturi ulja na ulazu u namot [6]. Zbog toga kod ovih transformatora treba primijeniti poseban način podešavanja termoslike i namještanja kontaktnog termometra.

Sve granične temperature kontaktnog termometra za zaštitu i upravljanje treba smanjiti za 10 °C.

Simulaciju termoslike treba podesiti na poseban način, tako da se zagrijanje najtoplije točke namota prema ulju poveća za 10 K u odnosu na izmjerene ili računске vrijednosti. Temperature aktiviranja releja za zaštitu i upravljanje rashladnim sustavom treba namjestiti jednako kao kod ON.. i OD.. hlađenja.

Prvi stupanj hlađenja (najmanje učinkovit) se uključuje automatski pri stavljanju transformatora u pogon. Ventilatore i uljne crpke drugog stupnja hlađenja uključuje relej termoslike na temperaturi 70 °C.

U tablici III i IV su pregledno dane temperature aktiviranja releja termoslike i kontaktnog termometra.

Tablica III. Temperature aktiviranja releja termoslike (TS) i kontaktnog termometra (KT) na transformatorima s dva stupnja hlađenja OFAF1/OFAF2, ili OFWF1/OFWF2,

Stupnjevi hlađenja	TS	KT
I	-	-
II	70 °C	50 °C
Uzbunjivanje	110 °C	85 °C
Isklop transformatora	150 °C	95 °C

Tablica IV. Temperature aktiviranja releja termoslike (TS) i kontaktnog termometra (KT) na transformatorima s tri stupnja hlađenja OFAF1/OFAF2/OFAF3, ili OFWF1/OFWF2/OFWF3, ili ONAN/ONAF/OFAF

Stupnjevi hlađenja	TS	KT
I	-	-
II	65 °C	45 °C
III	70 °C	50 °C
Uzbunjivanje	110 °C	85 °C
Isklop transformatora	150 °C	95 °C

3. UPRAVLJANJE SUSTAVOM HLAĐENJA NA OSNOVI GUBITAKA

Upravljanje hlađenjem sa svrhom održavanja minimalnih ukupnih gubitaka je individualno, t.j. za svaki transformator drugačije. Temelji se na računu razlike ukupnih gubitaka (u transformatoru i za pogon rashladnog sustava) kad se transformator hladi manje učinkovitim stupnjem hlađenja (j) i kad se hladi sljedećim učinkovitijim stupnjem hlađenja ($j+1$).

Kad je razlika ukupnih gubitaka pozitivna, treba uključiti učinkovitiji stupanj hlađenja jer se time postižu manji ukupni gubici. Gubici za pogon određenog stupnja hlađenja su konstantni, dok gubici u transformatoru ovise o opterećenju, srednjem zagrijanju namota, položaju regulacijske sklopke i

temperaturi okoline. Gubitke u transformatoru treba dakle računati u svakom trenutku, pa je za upravljanje rashladnim sustavom na ovaj način najpogodniji sustav za motrenje [7] s odgovarajućim algoritmom za račun razlike ukupnih gubitaka.

Ukupni gubici P_{uk} su zbroj gubitaka praznog hoda P_{ph} , gubitaka zbog djelatnog otpora namota P_{I^2R} , dodatnih gubitaka P_d i gubitaka stupnja rashladnog sustava u pogonu P_{rs} :

$$P_{uk} = P_{ph} + P_{I^2R} + P_d + P_{rs} \quad (1)$$

Kako gubici praznog hoda ne ovise o stupnju hlađenja, razlika ukupnih gubitaka ΔP ovisno o stupnju hlađenja iznosi:

$$\Delta P = P_{I^2R;j} + P_{d;j} + P_{rs;j} - (P_{I^2R;j+1} + P_{d;j+1} + P_{rs;j+1}) \quad (2)$$

Gubici zbog djelatnih otpora namota P_{I^2R} ovise o strujama kroz i – te namote $I(i)$ i o djelatnom otporu svakog namota, $R_{\vartheta}(i, p)$ koji pak ovisi o srednjoj temperaturi namota ϑ , te položaju regulacijske sklopke (p):

$$P_{I^2R} = 1,5 \sum_i [I(i)]^2 R_{\vartheta}(i, p) \quad (3)$$

Djelatni otpor i – tog namota $R_{\vartheta}(i, p)$ koji ovisi o srednjoj temperaturi namota $\vartheta(i)$ jednak je:

$$R_{\vartheta}(i, p) = R_{ref}(i, p) \frac{235 + \vartheta(i)}{235 + \vartheta_{ref}} \quad (4)$$

gdje je ϑ_{ref} referentna temperatura namota jednaka 75 °C [8].

Dodatni gubici također ovise o temperaturi, ali obrnuto proporcionalno od djelatnog otpora, pa je

$$P_{d;\vartheta} = P_{d;\vartheta_{ref}} \frac{235 + \vartheta_{ref}}{235 + \vartheta} \quad (5)$$

gdje je, jednostavnosti radi, ϑ srednja temperatura oba namota (niskonaponskog i , te visokonaponskog $i+1$):

$$\vartheta = \frac{\vartheta(i) + \vartheta(i+1)}{2} \quad (6)$$

Srednja temperatura i – tog namota jednaka je zbroju temperature okoline $\vartheta_{okoline}$, srednjeg zagrijanja ulja Θ_{mc} i zagrijanja namota prema ulju $\Theta_{nu}(i)$:

$$\vartheta(i) = \vartheta_{okoline} + \Theta_{mc} + \Theta_{nu}(i) \quad (7)$$

Srednje zagrijanje ulja Θ_{mc} jednako je srednjoj vrijednosti zagrijanja ulja u džepu $\vartheta_t - \vartheta_{okoline}$ i ulja na izlazu iz hladnjaka $\vartheta_b - \vartheta_{okoline}$:

$$\Theta_{mc} = \frac{\vartheta_t + \vartheta_b}{2} - \vartheta_{okoline} \quad (8)$$

a zagrijanje i – tog namota prema ulju $\Theta_{nu}(i)$ jednako je

$$\Theta_{nu}(i) = \Theta_{nu}(i)_N \cdot k^y \quad (9)$$

gdje je $\Theta_{nu}(i)_N$ zagrijanje namota prema ulju pri nazivnoj struji, a faktor opterećenja k je

$$k = \frac{I}{I_N} \quad (10)$$

gdje je I trenutna struja terećenja, a I_N je nazivna struja.

Eksponent y ovisi o vrsti hlađenja (prema [3] je za ON.. i OF.. 1,6, a za OD.. je 2).

Dodatni gubici pri referentnoj temperaturi $P_{d:\vartheta_{ref}}$ određuju se pri završnom ispitivanju transformatora kao razlika ukupnih izmjerenih gubitaka i gubitaka P_{I^2R} preračunatih na referentnu temperaturu namota [8].

Eventualne nestabilnosti (neprekidno iskapčanje i ukapčanje kontakata) mogu se izbjeći na dva načina: tako da razlika gubitaka treba biti veća od neke unaprijed zadane vrijednosti, ili da se razlike gubitaka računaju u vremenskim intervalima od npr. 30 min.

4. DISKUSIJA

Dok se prvi način upravljanja rashladnim sustavom (na osnovi temperatura) može postići jednostavnim pre-podešavanjem termoslike (pri OF..) i novim namještanjem temperatura prorade releja termoslike i kontaktnog termometra, za drugi način je potreban sustav za motrenje s posebnim algoritmom.

Danas se na mnoge transformatore ugrađuju sustavi za motrenje koji omogućuju: otkrivanje grešaka u nastanku i sprječavanje ili smanjenje posljedica kvara, stalni uvid u uvjete pogona i stanje transformatora, održavanje komponenti transformatora na osnovi stanja, povećanje raspoloživosti (pouzdaniji pogon, t.j. manje neplaniranih ispada i bolje planiranje namjenskih isključivanja), optimizaciju gospodarenja transformatorom (kontrolirano preopterećivanje, procjenu preostalog vijeka trajanja, produljenje vijeka trajanja, odgađanje zamjene, itd.) i detaljnu analizu uzroka kvara.

Nabrojanim, sad već tradicionalnim, funkcijama sustava motrenja može se dodati i funkcija upravljanja sustavom hlađenja. U tom slučaju, ugradnjom u prethodnom poglavlju opisanog algoritma, osim što će se ukupni gubici održavati na minimumu, produljit će se i vijek trajanja transformatora, a termoslike i kontaktni termometar će preuzeti funkciju zaštite i rezerve. Pri tome kontakti termoslike i kontaktnog termometra trebaju uključivati pri višim temperaturama od onih pri kojima pojedine stupnjeve hlađenja uključuje sustav za motrenje, kako ne bi preuzeli upravljanje rashladnim sustavom od sustava za motrenje.

5. ZAKLJUČAK

Pokusom zagrijavanja se, prilikom preuzimanja transformatora, dokazuje da transformator ima ugovorene nazivne snage pri svim vrstama i stupnjevima hlađenja na taj način što izmjerena zagrijanja ulja i namota ne smiju biti viša od ugovorenih graničnih vrijednosti zagrijanja pri ugovorenim snagama i načinima hlađenja.

Standardni način upravljanja sustavom hlađenja transformatora provodi se aktiviranjem kontakata kontaktnog termometra ili kontakata termoslike pri graničnim temperaturama. Proizvođač transformatora obično namješta temperature aktiviranja releja tako da se djelotvornije hlađenje uključuje tek onda kad je postignuta granična temperatura najtoplije točke namota ili ulja u najvišem sloju. To međutim nije najbolji način korištenja transformatora.

Korisnik transformatora nije ničim ograničen da transformator koristi na način koji omogućuje produženje vijeka transformatora, manje ukupne gubitke i veće kratkotrajno preopterećenje.

Predložena su dva načina povoljnijeg korištenja transformatora. Jedan je da se učinkovitiji način hlađenja uključuje pri nižim temperaturama od graničnih, a drugi je da se učinkovitiji način hlađenja uključuje tako da se ukupni gubici održavaju na minimumu. Dok se prvi način može postići jednostavnim novim namještanjem releja termoslike i kontaktnog termometra, za drugi način je potreban sustav za motrenje s posebnim algoritmom. Danas se na mnoge transformatore ugrađuju sustavi za motrenje koji

omogućuju niz vrlo korisnih funkcija od otkrivanje grešaka u nastanku i sprječavanja ili smanjenja posljedica kvara do optimizacije gospodarenja transformatorom. Tradicionalnim funkcijama sustava motrenja može se dodati i funkcija upravljanja sustavom hlađenja. U tom slučaju, ugradnjom u ovome radu opisanog algoritma, osim što će se ukupni gubici održavati na minimumu, produžit će se i vijek trajanja transformatora, a termoslika i kontaktni termometar će preuzeti funkciju zaštite i rezerve.

6. LITERATURA

- [1] IEC 60076-2, Power transformers – part 2: Temperature rise, travanj 1993.
- [2] Godec, Z.: „Zaštita uljnih energetskih transformatora termoslikom“, Energija 42(1993)6, 371-375
- [3] IEC 60076-7, Power transformers – part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers, prosinac, 2005.
- [4] Lungaard L.E., Hansen, W., Linhejll, D., Painter, J.: „Aging of oil-impregnated paper in power transformers“, IEEE Trans. Power Delivery, 19(2004)1, 230-239
- [5] Godec, Z.: „Preobrazba motrenja: Od praćenja promjena u mjerenje“, 8. savjetovanje HRO CIGRE, 4.-8. studenoga 2007, Cavtat , A2-09,
- [6] Godec, Z., Šarunac, R.: „Steady state temperature rises fo ONAN/ONAF/OFAP transformers, IEE Proc. 139(1992)5, 448-454
- [7] Banović, M.: „Sustava motrenja energetskih transformatora“, magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2007
- [8] IEC 60076-1, Power transformers – part 1: General, travanj 2000