

Mislav Ilijašević
KONČAR – Distributivni i specijalni transformatori d.d.,
Zagreb
mislav.iliasevic@koncar-dst.hr
Stjepan Baršun
KONČAR – Distributivni i specijalni transformatori d.d.,
Zagreb
stjepan.barsun@koncar-dst.hr

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

ISPITIVANJE I PRORAČUN MEHANIČKE IZDRŽLJIVOSTI TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA IZ VALOVITOG LIMA (VALOVITIH KOTLOVA)

SAŽETAK

Hermetički zatvoreni valoviti kotlovi su u svom životnom vijeku izvrgnuti naprezanjima uslijed pojave pretlaka i potlaka, koji nastaju zbog temperaturnog rastezanja transformatorskog ulja. Norma EN 50464-4 definira da valoviti kotao mora izdržati 2000 ciklusa (promjena od minimalne temperature (-25 °C) do maksimalne temperature (88 °C) i natrag). Za potrebe ispitivanja prema normi projektiran je uređaj za ispitivanje, koji ima mogućnost zadavanja svih ulaznih podataka i praćenja svih kontrolnih parametara prilikom ispitivanja.

Tlak koji se javlja u valovitom kotlu izaziva deformacije kotla, prvenstveno rebara koja su njegov najelastičniji dio.

Odabran je jedan tip transformatora za koji je napravljena analiza modela transformatora pomoću metode konačnih elemenata čime su dobivene vrijednosti za naprezanja i deformacije. Napravljena je usporedba proračunskih i izmjerenih vrijednosti, uz dobro podudaranje podataka stiže se osnova da se svaka nova konstrukcijska izvedba prvo provjeri proračunski, prije ispitivanja na uređaju.

Ključne riječi: transformator, valoviti kotao, ispitivanje životnog vijeka, metoda konačnih elemenata

ENDURANCE TESTING AND CALUCATION OF CORRUGATED TANKS

SUMMARY

Hermetically sealed corrugated tanks are subjected to overpressure and underpressure cycles due to temperature dilatation of transformer oil during transformer operation. Standard EN 50464-4 defines that a corrugated tank shall withstand 2000 cycles of oil temperature variation from -25°C to 88°C. For testing purposes stipulated in the standard new testing equipment has been designed and built.

A pressure which appears in hermetically sealed transformer produces deformations, primary of the ribs which are the most elastic part of a corrugated tank.

To obtain values of tank stresses and deformations a transformer model analyses has been made by finite element analysis method for the selected transformer type. Testing on equipment tank ribs deformations were measured. Comparison and good agreement of calculated and measured values are the bases for new tank design verification by calculation before laborious testing procedure.

Key words: transformer, corrugated tank, endurance test, finite element analysis

1. UVOD

Početkom sedamdesetih godina prošlog stoljeća većina proizvođača distributivnih transformatora uvodi kotlove iz valovitog lima [1]. Osnovni razlozi za to su bili automatizirana i jeftinija proizvodnja te mogućnost izvedbe transformatora bez konzervatora i zračnog jastuka prema poklopcu kotla. Rješenje bez konzervatora je hermetički zatvoren transformator u kojem je ulje u potpunosti odvojeno od okolne atmosfere, a ulogu ekspanzione posude (konzervatora) preuzimaju elastična rebra valovitog kotla.

Budući da su rebra, valovite stranice i kotao stalno izloženi naprezanjima uslijed temperaturnog rastezanja ulja, njihovo pravilno mehaničko dimenzioniranje je od presudnog značaja za siguran i pouzdan rad transformatora. Dosadašnja praksa je bila da su proizvođači kod uvođenja tehnologije napravili proračune i ispitivanja kotlova od kojih se jedino tražila nepropusnost.

Pojavom europske norme EN 50464-4 [2] definiraju se zahtjevi na mehaničku izdržljivost i ispitivanja valovitih kotlova. Da bi se moglo napraviti takvo ispitivanje, napravljen je uređaj za ispitivanje koji se osim za ispitivanje prema normi može koristiti i za vrednovanje efikasnosti pojedinih konstrukcijskih rješenja pri konstruiranju kotla. Isto tako je razvijen proračun naprezanja u kotlu pomoću metode konačnih elemenata koji je dodatni alat za provjeru i iznalaženje optimalne konstrukcije kotlova iz valovitog lima.

2. ZAHTJEVI NORME EN 50464-4

Norma EN 50464-4 definira proceduru ispitivanja kojom se dokazuje mehanička izdržljivost kotlova distributivnih transformatora iz valovitog lima koji su potpuno napunjeni uljem i hermetički zatvoreni.

Tijekom rada transformatora temperatura ulja se mijenja s promjenom opterećenja i temperature okoline. Budući da je transformator hermetički zatvoren uslijed toplinskog rastezanja ulja u kotlu nastaje pretlak ili potlak koji uzrokuju deformacije stranica kotla. Da bi se simulirala promjena temperature ulja, norma [1] definira da se srednja temperatura ulja mijenja između $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (minimalna temperatura okoline, transformator nije u pogonu) i $+88\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zbroj temperature okoline $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ i maksimalnog dozvoljenog srednjeg zagrijanja ulja $0,8 \cdot 60\text{ K} = 48\text{ K}$).

Prilikom zatvaranja transformatora srednja temperatura ulja treba biti između 15 i $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (t_0). Manometar spojen na kotao nakon punjenja ulja treba podesiti na vrijednost 0 bara. Koeficijent temperaturnog rastezanja iznosi $0,00075\text{ K}^{-1}$ za mineralno ulje, i ta vrijednost se koristi pri izračunu promjene volumena od početnog (nakon punjenja transformatora) do temperaturnih maksimuma ($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $+88\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Volumen ulja koji je potrebno utisnuti u transformator iznosi:

$$V^+ = V_0 \cdot (88 - t_0) \cdot 0,00075 \quad (1)$$

Volumen ulja koji je potrebno istisnuti iz transformatora iznosi:

$$V^- = V_0 \cdot (-25 - t_0) \cdot 0,00075 \quad (2)$$

gdje je V_0 volumen ulja u transformatoru prilikom zatvaranja transformatora nakon punjenja.

Ispitivanje se obavlja na način da se u transformator utisne količina ulja V^+ te se zabilježi pretlak p^+ , te se istisne količina ulja V^- i zabilježi se potlak p^- . Takav jedan ciklus treba trajati minimalno 120 s, kako bi se izbjegli mogući mehanički ili hidraulički udari. Broj ciklusa iznosi 2000. Nakon završetka ispitivanja očita se tlak u transformatoru kada se volumen ulja u transformatoru vrati na V_0 , te se zabilježi eventualna razlika tlaka nakon ispitivanja u odnosu na početno stanje prije ispitivanja. Zatim se u kotao doda ulja da bi se završni tlak izjednačio s početnim, te se taj volumen ulja zapiše (ΔV). Ukoliko ΔV postoji, to je znak da je u kotlu došlo do trajne (plastične) deformacije.

Nakon testa mehaničke izdržljivosti pristupa se testu nepropusnosti u trajanju 24 sata. Ispitni tlak iznosi $1,2 \cdot p^+$.

Kotao je zadovoljio ispitivanje ako su zadovoljeni sljedeći kriteriji prihvatljivosti:

- nema curenja ulja iz kotla
- na kotlu se nisu pojavile pukotine
- prilikom ispitivanja nisu zabilježena veća odstupanja u očitanjima tlakova p^+ i p^-
- dogovorom između kupca i proizvođača, može se definirati maksimalni iznos ΔV kako bi se ograničila dozvoljena trajna deformacija kotla.

3. OPIS UREĐAJA ZA ISPITIVANJE KOTLOVA

Za potrebe ispitivanja transformatora prema EN 50464-4 projektiran je uređaj za ispitivanje, prikazan na slici 1.



Slika 1. Uređaj za ispitivanje transformatorskih kotlova

Uređaj se sastoji od kućišta, spremnika za ulje, upravljačkog ormara, crpke za ulje, filtera za ulje, elektromagnetskih ventila, mjernih uređaja za mjerenje volumena ulja, tlaka i temperature.

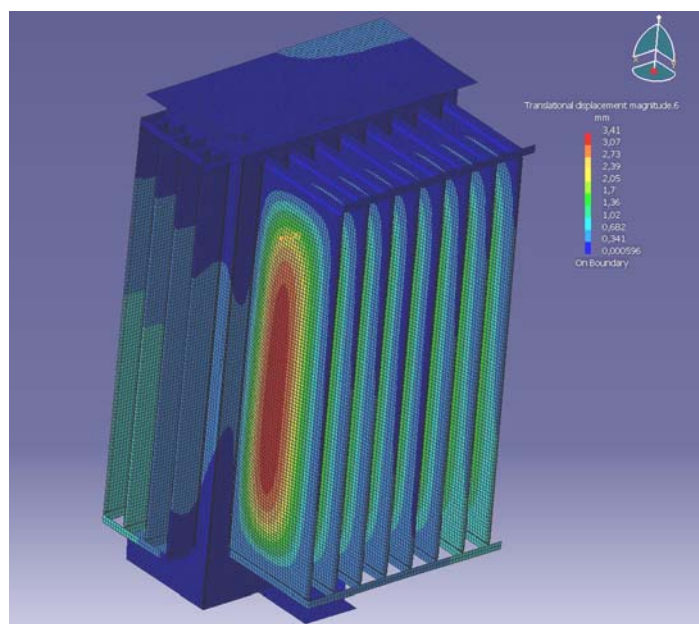
Upravljački ormar se sastoji od upravljačke jedinice u kojoj se nalazi programski kod (ispitivanje je u potpunosti automatizirano) i zaslona koji služi za unošenje podataka i ispis parametara pri ispitivanju. Svi podaci o tlaku, volumenu i temperaturi pri ispitivanju se zapisuju, te ih je nakon ispitivanja moguće prenijeti na računalo radi obrade i kontrole.

Crpka za ulje ima mogućnost regulacije protoka, kako bi se mogao podesiti protok ulja da se zadovolji zahtjev da jedan ciklus traje 120 s. Ukupna količina ulja koja stane u spremnik uređaja iznosi 150 l.

4. PRORAČUN MEHANIČKIH NAPREZANJA U KOTLU POMOĆU METODE KONAČNIH ELEMENATA

Jedan od najvažnijih parametara pri mehaničkom dimenzioniranju kotla je izračun koliki će biti tlak u kotlu za traženo povećanje volumena ulja V^+ . Takav izračun nije moguće napraviti analitičkim putem. Programski paket za analizu konačnim elementima je pogodan alat za rješenje problema. Karakteristika programa za analizu konačnim elementima je da omogućava izračun deformiranog volumena umreženog modela. Nakon što se kotao izmodelira, zadaju opterećenja tlaka, dobije se deformirani model za koji se očitava koliki mu je volumen.

Kao primjer je uzet transformator 250 kVA. Transformator je izmodeliran (zbog simetrije je dovoljna samo četvrtina modela), opterećen tlakom te su očitani volumeni deformiranog modela. Umreženi model prikazan je na slici 2. Na slici 2. je vidljiva i raspodjela pomaka modela pri tlaku unutar transformatora u iznosu 0.25 bara.



Slika 2. Umreženi model transformatora 250 kVA

Rezultati očitavanja su dani u tablici I. Napravljeni su proračuni za pojedine vrijednosti tlakova, te su očitani volumeni uslijed deformacije kotla.

Tablica I. Ovisnost tlaka i volumena za kotao 250 kVA

p [bar]	-0,20	-0,15	-0,10	-0,05	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
V [l]	-7,84	-5,88	-3,92	-1,96	0	1,96	3,92	5,88	7,84	9,80

Ako se vrijednosti iz tablice 1 prikazu grafički, vidi se da je ovisnost tlaka i volumena linearna.

$$V = x \cdot p \quad (3)$$

gdje je x [l/bar] koeficijent elastičnosti kotla, a računa se prema:

$$x = \sum_{i=1}^4 n_i \cdot x_i + x_k \quad (4)$$

gdje su:

i - broj stranica kotla, ($i = 1, 2, 3, 4$),

n_i - broj rebara na pojedinoj stranici kotla,

x_i - koeficijent elastičnosti rebara na pojedinoj stranici kotla,

x_k - koeficijent elastičnosti konstrukcije kotla.

Što je x veći, kotao je elastičniji, tj. za isti volumen deformacije tlak u kotlu će biti manji. Poželjno je da x bude što veći, kako bi tlak u kotlu bio što manji.

Faktori koji utječu na koeficijent elastičnosti kotla su sljedeći:

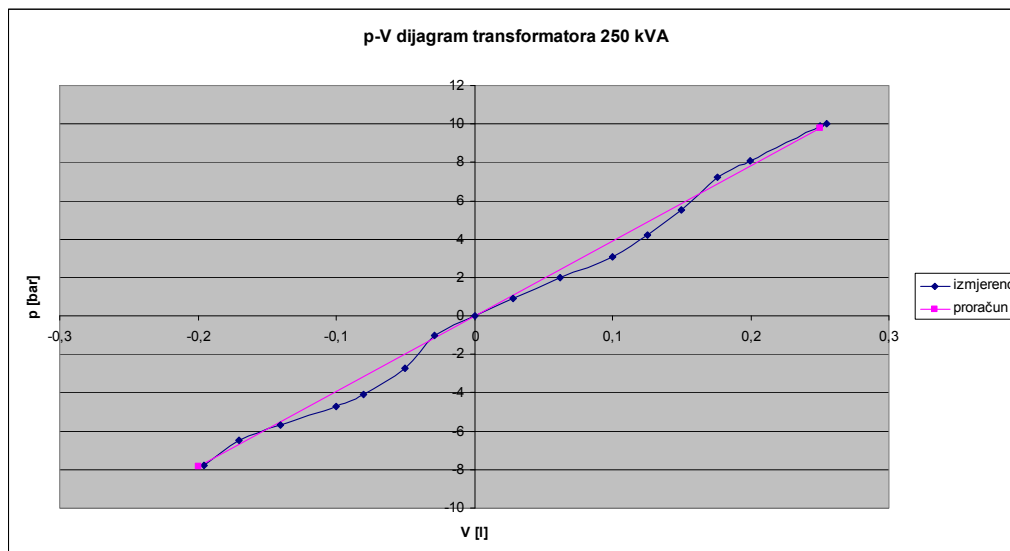
- broj rebara - veći broj rebara povećava koeficijent x
- dubina rebara - veća dubina rebara povećava koeficijent x
- visina rebara - veća visina rebara povećava koeficijent x
- elastičnost konstrukcije kotla - kotao se također deformira pri tlaku (deformacija stranica, dna i poklopca). Veća elastičnost konstrukcije kotla također povećava koeficijent x .

Koeficijent elastičnosti kotla ne treba predimenzionirati, jer povećanje broja rebara, visine i dubine rebara utječe na masu kotla, a time i na cijenu transformatora.

Za transformator 250 kVA iz (3) slijedi da je koeficijent elastičnosti kotla $x = 39.2$ [l/bar].

5. USPOREDBA P-V DIJAGRAMA ZA IZMJERENE I PRORAČUNSKE VRIJEDNOSTI

Budući da uređaj za ispitivanje valovitih kotlova ima mogućnost mjerenja promjene volumena ulja u kotlu i mjerenja tlaka u kotlu, transformator 250 kVA je spojen na uređaj. U transformator je crpkom ubačena i isisana određena količina ulja, te je za tu količinu izmjeren tlak u kotlu. Na taj način je dobivena ovisnost tlaka i volumena za kotao, a prikazana je na slici 3.



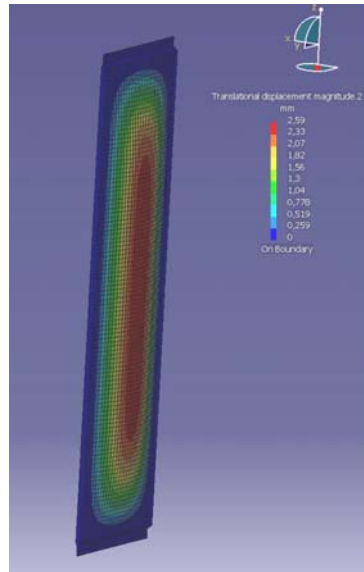
Slika 3. Usporedba p-V dijagrama transformatora 250 kVA za izmjerene i proračunske vrijednosti.

Vidljivo je da je proračunska ovisnost tlaka i volumena linearna, dok izmjerene vrijednosti prate taj pravac, ali u sebi imaju određenu nelinearnu komponentu. Uzroci te nelinearnosti mogu biti zaostala naprezanja i trajne deformacije pri vrućem cinčanju kotla i slično. Iz slike 3. može se zaključiti da se proračunski model jako dobro slaže sa izmjerenim vrijednostima te se takav proračun može koristiti kao podloga pri projektiranju transformatora.

Prilikom ispitivanja kotla transformatora, osim mjerenja tlaka i volumena napravljena su i mjerenja deformacije rebra na kotlu. Da bi se utvrdilo kako se proračunske vrijednosti slažu sa izmjerenim, napravljen je model rebra koji je prikazan na slici 4. Model je opterećen sa tlakovima koji odgovaraju onima pri ispitivanju, a rezultati proračunskih i izmjerenih deformacija dani su u tablici II. Deformacije su mjerene na mjestu gdje imaju maksimalni iznos, na sredini rebra. Iz tablice II. je vidljivo da postoji jako dobro slaganje izmjerenih i proračunskih vrijednosti.

Tablica II. Usporedba izmjerenih i proračunskih deformacija rebra

	tlak $p=0.15$ [bar]	tlak $p=0.25$ [bar]
Izmjerena deformacija [mm]	1,50	2,45
Proračunska deformacija [mm]	1,55	2,59



Slika 4. Model rebra

6. ANALIZA NAPREZANJA KOTLA I ISPITIVANJE ŽIVOTNOG VIJEKA

Za ispitivanje životnog vijeka kotla transformatora prema [2] odabran je transformator 400 kVA. Masa ulja u transformatoru iznosi 220 kg. Temperatura ulja pri punjenju i zatvaranju transformatora iznosila je 27 °C. Volumen ulja koji je potrebno utisnuti i istisnuti iz transformatora tijekom ispitivanja prema (1) i (2) iznosi:

$$V^+ = 11.5 \text{ l}$$

$$V^- = 9.8 \text{ l}$$

Transformator je spojen na uređaj za ispitivanje, što je prikazano na slici 5. Ispitivanje je trajalo 2000 ciklusa. Maksimalni tlak za vrijeme ispitivanja je iznosio $p^+ = 0.205$ bara.



Slika 5. Ispitivanje životnog vijeka transformatora

Nakon testa mehaničke izdržljivosti kotao je ispitivan na nepropusnost, u trajanju 24 sata. Ocjena ispitivanja je da kotao zadovoljava zahtjeve prema EN 50464-4, budući da nakon ispitivanja:

- nema curenja ulja iz kotla
- na kotlu se nisu pojavile pukotine
- prilikom ispitivanja nisu zabilježena odstupanja u očitanjima tlakova p^+ i p^-

- nakon ispitivanja nije bilo potrebno doliti ulje da se tlak u kotlu izjednači sa početnim stanjem, tj. $\Delta V=0$ što znači da kotao nije doživio trajnu (plastičnu) deformaciju.

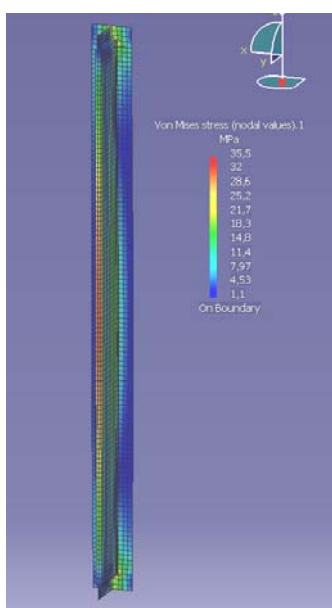
U programskom paketu za analizu konačnim elementima je napravljen model rebara transformatora, budući su rebra mehanički najopterećeniji dio kotla jer na sebe preuzimaju većinu deformacije od toplinskog rastezanja ulja. Transformator ima dvije vrste rebara, dubine 50 i 220 mm, te su napravljeni modeli oba rebra.

Rebra su izrađena iz čelika Fe P 03 prema EN 10130 [2] debljine 1.25 mm. Mehanička svojstva materijala su dana u tablici III. Radi se o stvarnim svojstvima iz atesta za isporuku materijala iz kojeg je izrađen kotao.

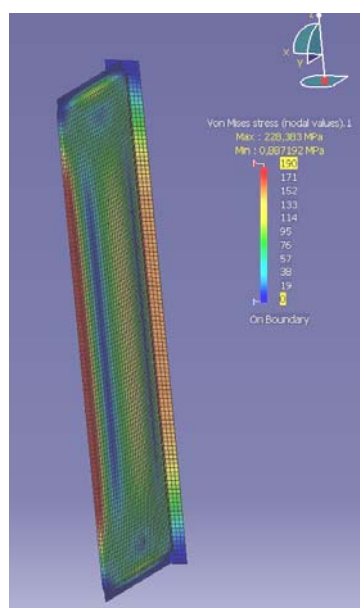
Tablica III. Mehanička svojstva lima Fe P 03 iz kojeg su izrađena rebra

Granica razvlačenja $R_{p0.2}$	190 MPa
Vlačna čvrstoća	305 MPa
Produljenje	42 %

Rezultati analize naprezanja prikazani su na slici 6. za rebro dubine 50 mm i slici 7. za rebro dubine 190 mm.



Slika 6. Naprezanja u rebro dubine 50 mm



Slika 7. Naprezanja u rebro dubine 190 mm

Iz slika 6. i 7. je vidljivo da su naprezanja u rebro dubine 50 mm vrlo mala. Nasuprot tome, naprezanja u rebro dubine 190 mm su visoka, s maksimalnim iznosom 228 MPa. Granica razvlačenja materijala rebra iznosi 190 MPa, što znači da je došlo do plastične deformacije materijala. Važno je napomenuti da programski paket s kojim je rađena analiza nema nelinearni modul, tako da vrijednost 228 MPa nije točna u apsolutnom iznosu, ali pokazuje da je došlo do plastične deformacije. Ispitivanje životnog vijeka transformatora je pokazalo da nije došlo do trajne deformacije kotla, što znači da je plastična deformacija rebra lokalnog karaktera.

7. ZAKLJUČAK

Norma EN 50464-4 postavlja zahtjeve na ispitivanje životnog vijeka valovitih kotlova. Također su sve češći zahtjevi kupaca da se mehanička izdržljivost valovitog kotla verificira ispitivanjem, u skladu s normom. Zbog toga je izrađen uređaj za ispitivanje, koji osim ispitivanja po normi EN 50464-4 služi i za ispitivanja novih konstrukcijskih rješenja valovitog kotla. Rezultati proračuna metodom konačnih elemenata pokazuju dobro slaganje sa izmjerenim vrijednostima na ispitanim transformatorima, čime je verificiran novi, moćan alat koji se koristi pri optimizaciji konstrukcije valovitog kotla.

LITERATURA

- [1] I. Sitar, "Hermetički zabrtvljeni distributivni transformatori bez konzervatora", Energija God. 30 (1981.) br. 1-2, 33-35
- [2] EN 50464-4 Three phase oil-immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV - part 4: requirements and tests concerning pressurised corrugated tanks, April 2007.
- [3] EN 10130 Cold-rolled low-carbon steel flat products for cold forming, February 1999.