

# EFEKTI PORASTA TEMPERATURE OPREME U PREFABRIKOVANIM TRANSFORMATORSKIM STANICAMA

Ljubiša ČIČKARIĆ, Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla" Beograd  
Branko PEJOVIĆ, Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla" Beograd  
Jovan MRVIĆ, Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla" Beograd

## KRATAK SADRŽAJ

Realni radni vek električnih aparata i opreme u elektroenergetskim postrojenjima kao i broj kvarova tokom njihovog rada značajno zavise od vrste i uslova pogona. Izolacioni sistemi elektroenergetske opreme su sačinjeni od organskih i neorganskih materijala i oni su tokom pogona izloženi uticajima delovanja električnog polja, parcijalnih pražnjenja i drugih električnih fenomena kao i posledicama njihovog dejstva. Temperatura se može smatrati posebno značajnim pogonskim faktorom, koji utiče na degradaciju izolacionog sistema elektroenergetske opreme.

Tokom dugih perioda u letnjim mesecima sa izuzetno visokim temperaturama u uslovima punog opterećenja, temperatura značajno povećava stopu starenja izolacionog sistema elektroenergetske opreme.

Izuzetno visoke spoljne temperature u dužim vremenskim periodima mogu dovesti do pregrevanja tehnoloških zgrada, transformatorskih stanica, a u nekim slučajevima i zemljišta na većim dubinama, što može ponekad imati uticaj čak i na podzemnu kablovsku mrežu.

U radu su razmatrani uticaji povećanja temperature na elektroenergetskoj opremi u prefabrikovanim transformatorskim stanicama uslovljeni povećanom temperaturom tokom pogona. Naglašen je značaj ispitivanja ubrzanog starenja kao i ispitivanja granica zagrevanja nove opreme i praćenja stanja zagrejanosti transformatora tokom pogona.

**Ključne reči:** prefabrikovana transformatorska stanica, elektroenergetska oprema, transformator, porast temperature, klasa kućišta

## SUMMARY

The real lifetime of power electrical devices and the number of failures during their operation are strongly dependent on mode of operation and service conditions. Power devices usually contain the organic or inorganic insulation system. During operation they are exposed to the effects of electric field, partial discharges and other electrical phenomena, as well as the consequences of their effect. The temperature can be considered as a particularly important ageing factor that affects the degradation of the insulation system of power equipment.

During the long-term extremely hot summer months and at the full loaded equipment, the temperature significantly increases the rate of aging of the insulation system of electrical equipment.

Extremely high long-term external temperatures can overheat technological buildings, transformer stations, and in some cases even the soil into the deeper depths, which can sometimes affect even the underground cable network.

The paper examines the effects of temperature rise on the electrical equipment in prefabricated substation. The importance of temperature rise test of new equipment and monitoring transformer heating during the operation was emphasized.

**Key words:** prefabricated substation, electrical power equipment, transformer, temperature rise, class of enclosure

Kontakt informacije: [ljubisa.cickaric@ieent.org](mailto:ljubisa.cickaric@ieent.org)

## UVOD

Prefabrikovana transformatorska stanica je sklop energetskog transformatora, visokonaponskog (VN) i niskonaponskog (NN) rasklopnog bloka, međuveza između tih blokova sa transformatorom i pomoćne opreme za merenje i kontrolu, kompletiranih u zaštitnom kućištu. Osnovna namena ovakvog sklopa je transformacija električne energije sa visokog na niski napon radi snabdevanja potrošačkih konzuma različitih profila, domaćinstava, manjih industrijskih pogona, poslovnih objekata, gradilišta i drugo. Pored toga, prefabrikovane transformatorske stanice se koriste i za transformaciju sa niskog na visoki napon pri povezivanju na distributivnu mrežu solarnih fotonaponskih i drugih elektrana, zasnovanih na obnovljivim izvorima energije.

Široka primena i velika rasprostranjenost na tržištu su usloveli pojavu velikog broja tipova prefabrikovanih transformatorskih stanica sa veoma različitim karakteristikama ugrađene opreme.

Aktuelna regulativa koja specificira karakteristike, opšte strukturalne zahteve i metode ispitivanja prefabrikovanih transformatorskih stanica za napone iznad 1 kV do i uključujući 52 kV je međunarodni standard IEC 62271-202:2014 [1]. Osnovna pretpostavka standarda je da su glavne komponente prefabrikovane transformatorske stanice, VN razvodno postrojenje, transformator i NN razvodno postrojenje, projektovane i tipski ispitane u skladu sa zahtevima svojih relevantnih standarda. Dizajn i performanse transformatorske stanice kao celine se potvrđuju na osnovu dodatnih tipskih ispitivanja, koja uključuju ispitivanja porasta temperature, dielektrična ispitivanja, ispitivanje podnosivosti na struje kratkog spoja, ispitivanje delovanja unutrašnjeg luka, potvrdu elektromagnetne kompatibilnosti, potvrdu IP i IK koda, proveru nivoa buke, funkcionalna ispitivanja.

Za potrebe ovog rada je razmatrano samo ispitivanje porasta temperature prefabrikovane transformatorske stanice, pri čemu se pretpostavlja da su prethodno obavljena tipska ispitivanja zagrevanja svih glavnih komponenata (energetskog transformatora, VN i NN rasklopnog bloka). Sem toga, razjašnjen je pojam „temperaturne klase kućišta“ i razmatrano prilagođavanje snage transformatora realnim uslovima rada respektujući naznačene karakteristike instalirane opreme.

## STARENJE ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Glavna komponenta prefabrikovanih transformatorskih stanica su energetski transformatori. Njihova uloga u distributivnim sistemima i investiciona vrednost nameću potrebu adekvatnog održavanja, kojim se obezbeđuje siguran i pouzdan rad tokom životnog veka. Generalno, transformatori se smatraju visoko pouzdanom opremom sa srednjim vremenom između kvarova (MTBF - Mean Time Between Failure) većim od 100 godina [2]. Konstrukcija namotaja zasnovana na tehnologiji primene bakarnih provodnika, obmotanih celuloznom izolacijom impregnisanom izolacionim uljem se potvrdila tokom višedecenijske upotrebe.

Kvarovi u transformatoru su rezultat složenog uticaja velikog broja faktora. Iskustveno je potvrđeno da najveći broj kvarova nastaje usled različitih mehanizama starenja. S obzirom da starenje pojedinih podsistema transformatora nije uniformno, potrebno je sprovoditi određene parcijalne aktivnosti na održavanju i proveriti stanja pojedinih komponenata transformatora.

Razvojem tehnologije i primenom raspoloživog znanja o načinima degradacije izolacionog sistema transformatora, proces proizvodnje postaje sve sofisticiraniji. Da bi se što verodostojnije odredilo trajanje opreme pristupa se ogledima ubrzanog starenja. Cilj ovakvih ispitivanja je procenjivanje životnog veka izabrane grupe materijala, komponenata, proizvoda ili opreme. Ispitivanje se sprovodi u definisanim pooštrenim radnim uslovima u tehnički prihvatljivom vremenskom intervalu.

Starenje papirno-uljnog izolacionog sistema transformatora je vremenska funkcija temperature, sadržaja vlage i kiseonika. Kvalitativna i kvantitativna procena ostarelosti izolacije je, kao vrlo značajno tehničko pitanje, konstantno u fokusu interesovanja eksperata i naučnika.

Najintenzivniji procesi starenja unutar transformatora događaju se u zoni najviše temperature izolacije [3] (eng. hot-spot temperature), koja se može meriti ili proračunavati koristeći termički model transformatora. Polazni podaci za proračun su termički parametri transformatora, u koje spadaju i način hlađenja i ambijentalni uslovi rada, a ulazni proračunski podaci su istorijat opterećivanja sa pratećim temperaturama ulja ili spoljašnjeg rashladnog fluida.

Najpouzdanija metoda za procenu ostarelosti izolacionog sistema transformatora se zasniva na određivanju prosečnog broja molekula glukoze u lancu celuloze odn. stepenu polimerizacije (DP). Prednost ove metode je što se kvantitativno meri razgradnja celuloznih makro molekula kao nepovratnog procesa, koju prati pad mehaničke čvrstoće izolacije. S obzirom na dominantan uticaj temperature, starenje čvrste izolacije se aproksimativno može predstaviti jednačinom prvog reda:

$$\frac{1}{DP_{\tau}} - \frac{1}{DP_0} = k * \tau \quad (1)$$

gde je:  $DP_{\tau}$  – stepen polimerizacije nakon vremena, t  
 $DP_0$  – početni stepen polimerizacije  
 $\tau$  – vreme starenja, h  
 $k$  – konstanta brzine reakcije

Konstanta brzine reakcije definisana je Arenijusovom jednačinom:

$$k = A * e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

gde je:  $A$  – predeksponencijalni faktor, 1/h  
 $E_a$  – energija aktivacije, kJ/mol,  
 $R$  – univerzalna gasna konstanta, kJ/molK

Uvodeći (1) u (2), uz  $E = 111$  kJ/mol, dobija se jednačina iz koje je moguće izračunati starenje čvrste izoalcije izraženo u godinama:

$$\frac{1}{DP_{\text{, krajnje}}} - \frac{1}{DP_0} = \tau_{\text{,uzgumno}} \cdot 24 \cdot 365 \cdot A \cdot e^{-\left(\frac{13351}{T+273}\right)} \quad (3)$$

Jednačina (3) objedinjuje uticaj svih relevantnih parametara: temperature  $T$  kroz eksponencijalnu zavisnost, prisutnost vode i kiseonika kroz vrednosti konstanti  $E_a$  i  $A$ . Vrednosti navedenih konstanti različitih autora u dostupnoj literaturi variraju u zavisnosti od uslova eksperimenta.

Većina energetskih transformatora koji su sada u pogonu imaju predviđeni životni vek od oko 30 godina. Stalni rast potrošnje električne energije je praćen odgovarajućim porastom srednjih opterećenja transformatora. Rezultat tako promenljivih radnih uslova je povećano termičko naprezanje, što značajno utiče na pouzdanost i životni vek transformatora.

## TEMPERATURNNA KLASA KUĆIŠTA PREFABRIKOVANE TRANSFORMATORSKE STANICE

Prefabrikovana transformatorska stanica je predviđena za rad u normalnim ambijentalnim uslovima definisanim u standardu [4]. Osnovana je pretpostavka da se temperatura vazduha unutar kućišta znatno razlikuje od temperature okolnog slobodnog prostora. Pri tome, treba imati u vidu da su prefabrikovane transformatorske stanice u najvećem broju slučajeva projektovane za rad sa prirodnom ventilacijom vazduha. Zbog toga, specifični zahtevi, kao što je veći IP kôd, mogu imati značajan uticaj na temperaturu ambijenta unutar kućišta, a samim tim i na povećanje temperature opreme. To je, naročito, izraženo u uslovima povećanog zagađenja, kada se zahteva veći stepen mehaničke zaštite od prodora čvrstih čestica i vode. Ako je temperatura vazduha unutar zašitnog kućišta veća od granica utvrđenih za komponente u njihovim odgovarajućim standardima, može se pojaviti potreba za smanjenjem snage transformatora. Ukoliko je transformator u kućištu opterećen naznačenom strujom javlja se porast temperature, koji je veći nego kada se isti transformator opereti istom strujom u uslovima slobodnog proticanja okolnog vazduha van kućišta transformatorske stanice. Maksimalna temperatura „vruće tačke“ namotaja transformatora ne sme biti prekoračena bez obzira da li se transformator nalazi u zatvorenom kućištu ili ne. Zbog toga, može se javiti neophodnost za smanjenjem opterećenja transformatora do nivoa, koji obezbeđuje da temperatura „vruće tačke“ transformatora neće biti prekoračena.

Izbor klase kućišta se sprovodi na osnovu podataka o ambijentalnim uslovima na lokaciji transformatorske stanice, profila potrošačkog konzuma i termičkih performansi transformatora. Razumevanje pojma „temperaturne klase kućišta“ je važno da bi se znalo zašto u pojedinim uslovima određena prefabrikovana transformatorska stanica ne može kontinuirano da isporuči snagu u skladu sa deklarisanim vrednostima transformatora.

Iz navedenog sledi da je moguće da određeno kućište transformatorske stanice ima više različitih vrednosti „temperaturne klase“ zavisno od snage i gubitaka transformatora. Na primer, kućištu se može potvrditi temperaturna klasa 5 ukoliko se koristi transformator snage 315 kVA, dok se istom kućištu može potvrditi klasa 10 ukoliko se u njemu nalazi transformator snage 1000 kVA, koji ima veće ukupne gubitke. Isto tako, kućištu se može potvrditi klasa 10 za transformator 1000 kVA sa dozvoljenim porastom temperatura 60-65 K (za ulje i namotaj) i klasa 5 za transformator 1000 kVA sa porastom temperatura 40-45 K. Zbog toga sledi da, ako se kućište transformatorske stanice ispita za najveću snagu i gubitke transformatora, potvrđena klasa kućišta se

može automatski dodeliti za sve transformatore koji imaju manju deklarisanu snagu i gubitke - bez potrebe za dodatnim ispitivanjima. [5]

Postoji šest naznačenih klasa kućišta - 5, 10, 15, 20, 25 i 30, koje odgovaraju maksimalnoj vrednosti razlike u porastu temperature transformatora od 5 K, 10 K, 15 K, 20 K, 25 K i 30 K.

Za određivanje mogućnosti opterećenja transformatora u prefabrizovanoj transformatorskoj stanici neophodno je poznavanje naznačene klase kućišta, vrednosti maksimalnog dozvoljenog porasta temperature transformatora i uslova rada.

Ambijentni uslovi rada transformatora su zavisni od mikroklimatskih karakteristika lokacije i definišu se na osnovu sledećih vrednosti:

- srednje godišnje temperature okolnog vazduha, računane kao dvanaestina zbira srednjih mesečnih temperatura. Za uljne transformatore sa vazдушnim hlađenjem ova vrednost ne sme preći 20°C;
- srednje mesečne temperature, računane kao polovina zbira srednje maksimalne i srednje minimalne temperature tokom određenog meseca. Ova vrednost se računa za svaki mesec u godini. Za uljne transformatore sa vazдушnim hlađenjem srednja mesečna temperatura za najtopliji mesec ne sme preći 30°C;
- maksimalne ambijentalne temperature vazduha kao gornje granice dozvoljenih vrednosti temperature ambijenta. Za uljne transformatore sa vazдушnim hlađenjem ova vrednost ne sme preći 40°C.

U tabeli 1 su dati podaci relevantni za proračun temperaturne klase kućišta, koji se odnose na uslove ambijenta u nekoliko mesta u Srbiji.

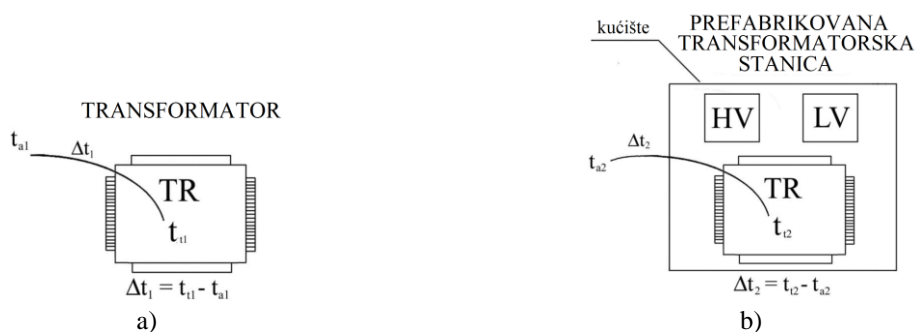
TABELA. 1 - SREDNJE I MAKSIMALNE VREDNOSTI TEMPERATURA IZMERENE U NEKIM MESTIMA U SRBIJI (IZVOR RHMZ)

Lokacija	Srednja godišnja temperatura [°C]	Srednja mesečna temperatura (najtopliji mesec) [°C]	Maksimalna izmerena temperatura [°C]
Granične vrednosti (IEC 60076-2)	20	30	40
Beograd	12	22	42
Novi Sad	11	21	40
Niš	12	22	42
Zlatibor	8	16	34

Ovako utvrđene vrednosti temperatura ambijenta su usvojene pri definisanju maksimalnih dozvoljenih porasta temperature transformatora [6]. Navedene vrednosti se odnose na granični porast temperature transformatora od 60 K i 65 K za gornje ulje i namotaje, respektivno.

## METODE ISPITIVANJA PORASTA TEMPERATURE

Tipsko ispitivanje porasta temperature i provera granica zagrejanosti prefabrizovane transformatorske stanice se sprovodi u skladu sa standardom [1]. Ispitivanjem se verifikuje temperaturna klasa kućišta odn. potvrđuje se da porast temperature transformatora unutar kućišta ne prelazi vrednost temperature istog transformatora van kućišta za iznos, koji definiše klasu kućišta. Prikazi merenja temperature transformatora u ta dva slučaja su dati na slici 1.



Slika 1 Prikazi merenja temperature transformatora a) u slobodnom prostoru van kućišta i b) unutar kućišta transformatorske stanice

$t_{a1}, t_{a2}$  - ambijentne temperature vazduha u ispitnoj laboratoriji

$t_{t1}, t_{t2}$  - temperature transformatora izmerene u skladu sa standardima IEC 60076-2:2011 i IEC 60076-11:2004

$\Delta t_1$  - porast temperature transformatora van kućišta

$\Delta t_2$  - porast temperature transformatora unutar kućišta

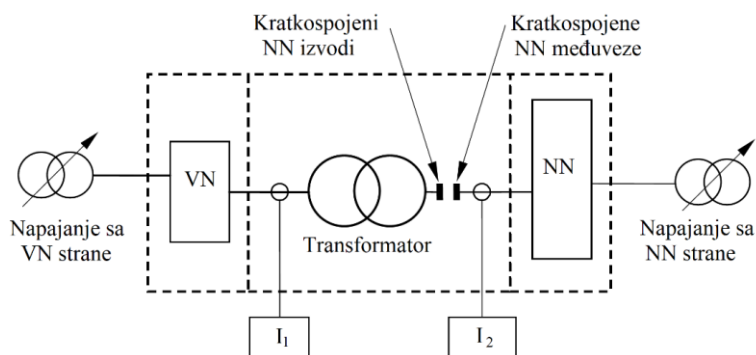
Naznačena klasa kućišta odgovara naznačenoj maksimalnoj snazi transformatorske stanice odn. maksimalnoj naznačenoj snazi transformatora sa uključenima ukupnim gubicima [7].

Standard [1] predviđa dve metode ispitivanja radi provere granica zagrevanja. Metoda koja se preporučuje podrazumeva dvostrano napajanje (Slika 2), pri kojem se NN priključci transformatora kratko spajaju a VN priključci povezuju za VN rasklopni blok. Napajanje sa VN strane se sprovodi tako da generiše naznačene gubitke transformatora, koji su jednaki zbiru gubitaka kratkog spoja pri naznačenoj struji, svedeni na referentnu temperaturu (75°C), i gubitaka u praznom hodu pri naznačenom naponu.

$$P_w = P_{k75} + P_0 \quad (4)$$

Ukupni naznačeni gubici transformatora se dobijaju na osnovu prethodno izvedenih oglada kratkog spoja i praznog hoda transformatora i imaju vrednost od nekoliko kilovata.

Napajanjem sa NN strane se ostvaruje struja, koja je jednaka naznačenoj sekundarnoj struji transformatora.

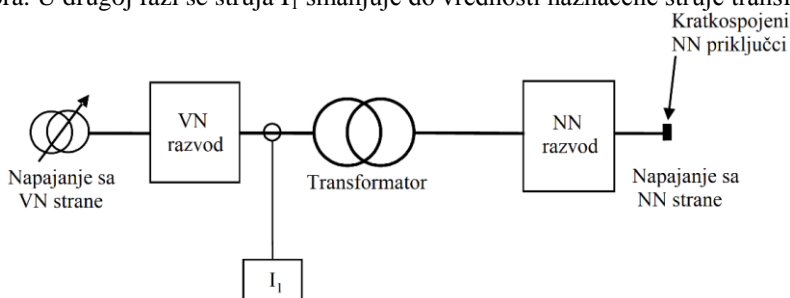


Slika 2 Šema preporučene metode napajanja kod ispitivanja granica zagrevanja

$I_1$  je struja dovoljna da generiše ukupne gubitke uljnog transformatora odn. jednaka je naznačenoj VN struji suvog transformatora

$I_2$  je naznačena NN struja transformatora

Alternativna metoda podrazumeva jednostrano napajanje sa VN strane prema šemi na slici 3. Ispitivanje se odvija u dve faze. U prvoj fazi ispitivanja se ostvaruje struja  $I_1$  dovoljna da generiše ukupne naznačene gubitke uljnog transformatora. U drugoj fazi se struja  $I_1$  smanjuje do vrednosti naznačene struje transformatora.



Slika 3 Šema alternativne metode napajanja kod ispitivanja granica zagrevanja

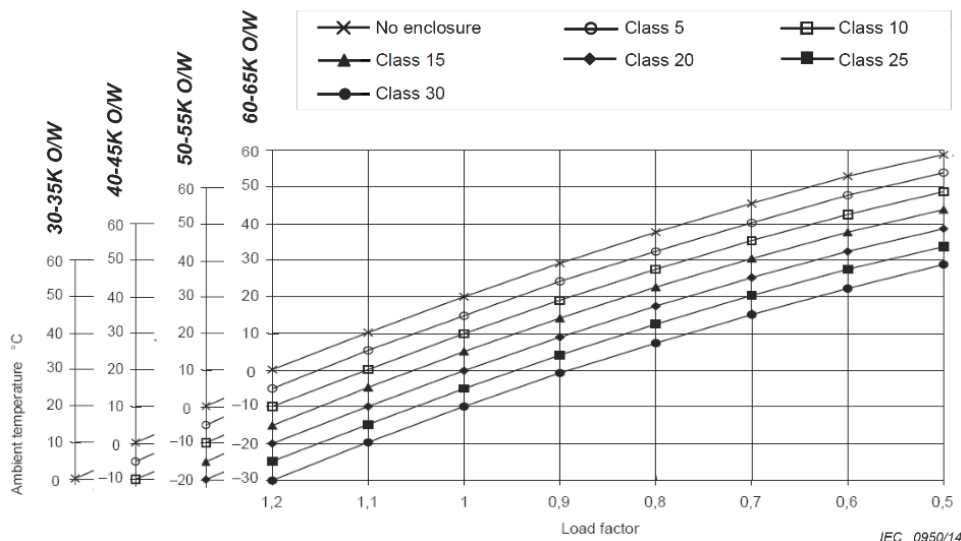
Izmerene temperature gornjeg ulja transformatora tokom dva oglada zagrevanja unutar i van kućišta pokazuju razliku koja definiše temperaturnu klasu kućišta. Sem toga, ispitni objekat mora da zadovolji kriterijume prihvatljivosti rezultata merenja, koja se odnose na međuveze i NN blok. Porasti temperatura i absolutne temperature VN međuveza, NN međuveza, NN rasklopnog bloka i dostupnih površina kućišta ne smeju da pređu dozvoljene vrednosti, definisane relevantnim standardima.

### Određivanje naznačene snage transformatora u kućištu

Koristeći smernice iz standarda [1], moguće je utvrditi koliko je, u određenim slučajevima, potrebno smanjiti snagu transformatora imajući u vidu vrednosti klase kućišta i godišnje prosečne temperature okoline na mestu instalacije transformatorske stanice. Postupak je sledeći:

1. Na dijagramu na slici 4 se izabere kriva koja odgovara izabranoj klasi kućišta;

- Na ordinatnoj osi se izabere odgovarajuća vrednost godišnje srednje temperature okoline za datu lokaciju. Ordinratne ose odgovaraju transformatorima sa različitim graničnim vrednostima porasta temperatura gornjeg ulja i namotaja (O/W).
- Presek krive klase kućišta i prave koja odgovara temperaturi okoline daje vrednost dozvoljenog faktora opterećenja transformatora.



Slika 4 Dijagram krivih faktora opterećenja u kućištu transformatorske stanice (za uljne transformatore)

Postoje dva načina korišćenja grafika.

- Prvi je kada je poznata prosečna temperatura okoline, koja je viša od jedne od standardnih vrednosti temperatura [6]. Na primer, maksimalna temperatura okoline je 50°C (tj. 10°C više od maksimalno dozvoljene temperature ambijenta od 40°C). U ovom slučaju dozvoljene granice porasta temperature transformatora se smanjuju za 10 K, do 50 K i 55 K za gornje ulje i namotaje, respektivno. Na osnovu toga se odabere odgovarajuća Y-osa, da bi se, potom, odredio dozvoljeni faktor opterećenja za izabranu klasu kućišta.
- Alternativno, ako su stvarne vrednosti porasta temperature transformatora niže od onih koje dozvoljava standard [6] (npr. 50 K i 55 K za gornje ulje i namotaj), onda za standardnu temperaturu okoline dozvoljeni faktor opterećenja može biti veći od 1.

Na osnovu navedenog sledi da u nepovoljnim uslovima rada se može javiti potreba za smanjenjem opterećenja transformatora da ne bi došlo po prekoračenja granica zagrevanja i ubrzane degradacije njegovog izolacionog sistema. Ovo je u direktnoj vezi sa izborom klase kućišta i naznačenih karakteristika transformatora. U slučaju povoljnih ambijentalnih uslova, transformator bi mogao raditi sa snagom većom od naznačene.

### Primer prefabrikovane transformatorske stanice 1600 KVA

Lokacija je okarakterisana sledećim ambijentalnim uslovima:

- srednja godišnja temperatura ambijenta 12°C,
- srednja ambijentna temperatura tokom zime je 4°C,
- srednja ambijentna temperatura tokom leta je 20°C.

Profil potrošačkog konzuma je izražen preko prosečnih vrednosti snage potrošnje:

- prosečna snaga potrošnje u toku godine je 1440 kVA,
- prosečna snaga potrošnje u toku zime je 1600 kVA,
- prosečna snaga potrošnje u toku leta je 1120 kVA.

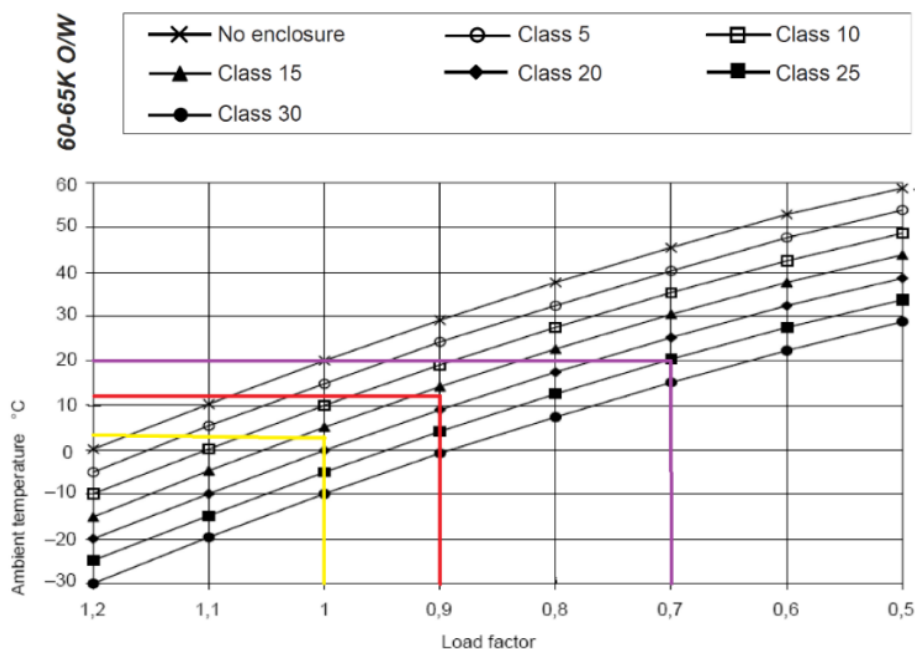
Tehnički podaci transformatora su:

- prividna snaga  $S = 1600$  kVA,
- dozvoljeni porasti temperatura transformatora ( $\Delta\theta$ ) za gornje ulje i namotaje su 60 K i 65 K, respektivno,
- ukupni gubici transformatora su  $P_w = 20$  kW.

### 1. Određivanje naznačene temperaturne klase kućišta

- Za srednju godišnju temperaturu na lokaciji od 12 °C i faktor opterećenja 0,9 preporučena klasa kućišta je 15 (crvena linija);
- Za srednju ambijentnu temperaturu tokom zime od 4°C i faktor opterećenja 1,0 preporučena klasa kućišta je 15 (žuta linija);
- Za srednju ambijentnu temperaturu tokom leta od 20°C i faktor opterećenja 0,7 preporučena klasa kućišta je 25 (ljubičasta linija).

Za navedeni transformator od 1600 kVA sa ukupnim gubicima od 20 kW jedino kućišta sa temperaturnim klasama 5, 10 i 15 mogu zadovoljiti potrebe potrošačkog konzuma.

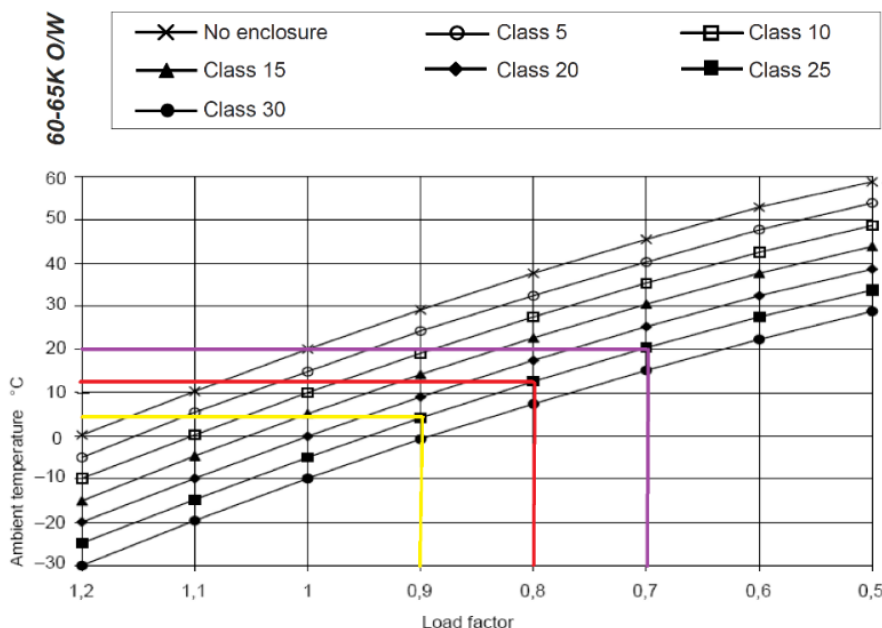


Slika 5 Dijagram krivih faktora opterećenja u kućištu transformatorske stanice, za uljne transformatore sa dozvoljenim porastima temeperatura 60 K i 65 K (O/W – ulje/namotaj)

## 2. Opterećenje transformatora pri korišćenju kućišta nepovoljnije temperaturne klase

Ukoliko se umesto preporučenih vrednosti klasa kućišta upotrebi kućište klase 25, maksimalno dozvoljeni faktori opterećenja bi iznosili:

- Za srednju godišnju temperaturu od 12 °C i kućište klase 25, maksimalni faktor opterećenja je 0,8 (crvena linija);
- Za srednju ambijentnu temperaturu tokom zime od 4°C i kućište klase 25, maksimalni faktor opterećenja je 0,9 (žuta linija);
- Za srednju ambijentnu temperaturu tokom leta od 20°C i kućište klase 25, maksimalni faktor opterećenja je 0,7 (ljubičasta linija).



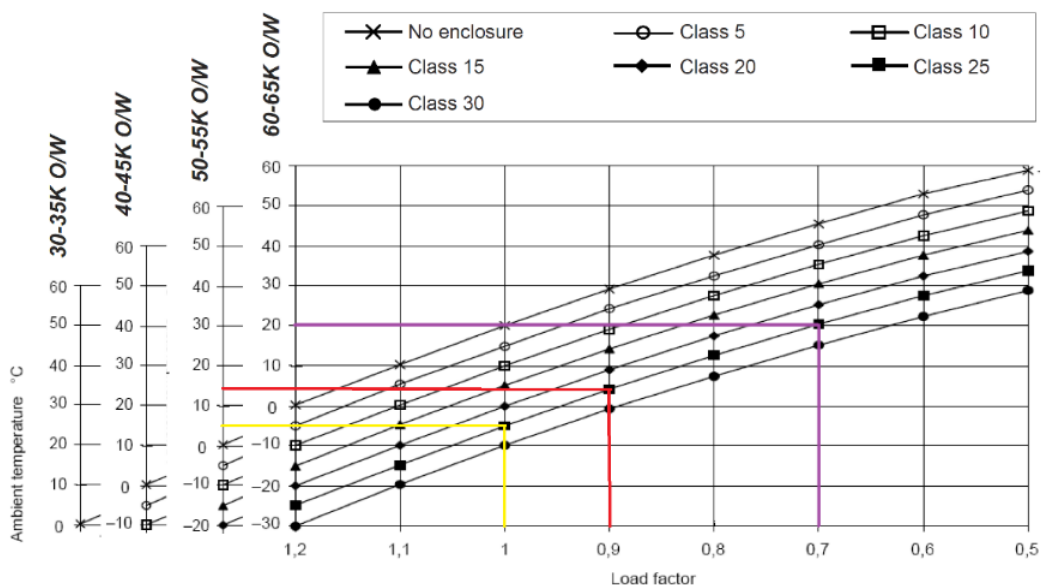
Slika 6 Dijagram krivih faktora opterećenja u kućištu transformatorske stanice za uljne transformatore sa dozvoljenim porastima temperatura 60 K i 65 K (O/W – ulje/namotaj)

Zaključak je da izbor kućišta temperaturne klase 25, nameće potrebu ograničenja izlazne snage transformatora, izuzev tokom leta.

### 3. Izbor transformatora za manjim dozvoljenim porastima temperatura

Ukoliko bi se koristilo kućište temperaturne klase 25 i zahtevali prvobitno definisani faktori opterećenja, bilo bi neophodno koristiti transformator sa nižim dozvoljenim vrednostima porasta temperature ulja i namotaja.

- Za srednju godišnju temperaturu ambijenta od 12 °C, kućište klase 25 i maksimalni faktor opterećenja 0,9 bio bi potreban transformator snage sa dozvoljenim porastima temperature 50 K i 55 K (crvena linija).
- Za srednju ambijentnu temperaturu tokom zime od 4°C , kućište klase 25 i maksimalni faktor opterećenja 1,0 bio bi potreban transformator snage sa dozvoljenim porastom temperature 50 K i 55 K (žuta linija).
- Za srednju ambijentnu temperaturu tokom leta od 20° C, kućište klase 25 i maksimalni faktor opterećenja 0,7 bio bi dovoljan transformator snage sa dozvoljenim porastom temperature 60 K i 65 K (ljubičasta linija).



Slika 7 Dijagram krivih faktora opterećenja u kućištu transformatorske stanice za uljne transformatore različitih vrednosti dozvoljenih porasta temperature (O/W – ulje/namotaj)



Dakle, transformator od 1600 kVA, koji bi imao dozvoljene poraste temperature ulja i namotaja 50 K i 55 K, respektivno, bi zadovoljio sve zahteve potrošačkog konzuma u kućištu temperaturne klase 25.

## ZAVRŠNA RAZMATRANJA

Umereni klimatski uslovi u Srbiji podrazumevaju niže vrednosti godišnjih i mesečnih srednjih temperatura u poređenju sa graničnim vrednostima definisanim u standardu [6], što je prikazano u Tabeli 1 za neke lokacije u Srbiji. Ova povoljna okolnost omogućava dodatno povećanje izlazne snage transformatorske stanice.

Profil potrošačkog konzuma značajno utiče na mogućnosti opterećivanja transformatorske stanice. U slučajevima snabdevanja rezidencijalnog konzuma odn. domaćinstava, tipični profil opterećenja je pretežno cikličan. To znači da između jutarnjeg i večernjeg vršnog opterećenja, transformator ima dovoljno vremena da se ohladi, u periodu kada je opterećenje daleko ispod naznačene vrednosti. Zbog relativno velikih temperaturnih vremenskih konstanti transformatora se može desiti da, kada se opterećenje povećava i čak prevaziđe naznačenu vrednost, temperature ulja i namotaja ostanu unutar granica dozvoljenih vrednosti.

Znatno nepovoljniji slučajevi se mogu javiti kada transformatorska stanica snabdeva industrijske ili poslovne potrošače, gde je profil opterećenja ravnomerniji odn. kad transformator nema periode smanjenog opterećenja. Pored toga, problemi se mogu javiti i na lokacijama gde temperature ambijenta veće od dozvoljenih, definisanih u standardu [6]. Posebno nepovoljan slučaj se odnosi na lokacije izložene visokim nivoima sunčevog zračenja, što je najčešće dešava kod fotonaponskih solarnih elektrana. U tim slučajevima se posebna pažnja mora obratiti na orijentaciju u prostoru odn. izloženosti površina kućišta sunčevom zračenju kao i na boju kućišta.

Tokom pogona se javlja značajan gradijent temperature unutar kućišta transformatorske stanice. Proračuni i merenja sprovedeni tokom ispitivanja potvrđuju razlike u temperaturama čak do 30°C između najnižih i najviših slojeva vazduha u kućištu [8]. Imajući to u vidu, opšta je preporuka da se osetljiva NN i elektronska oprema montira na nižim nivoima. Pored toga, PVC izolovani provodnici, čija je maksimalna dozvoljena temperatura provodnika 70°C, mogu biti u nepovoljnim okolnostima izloženi ubrzanoj degradaciji, zbog čega se mora voditi računa o njihovoj lokaciji unutar kućišta.

Faktor koji je zanemaren u standardima, koji definišu zahteve za proveru granica zagrevanja transformatora i razvodne opreme na visokom i niskom naponu, je insolacija. Skoro intuitivno je moguće pretpostaviti da solarno zračenje na kućištu prefabrikovane transformatorske stanice ima direktan uticaj na unutrašnju temperaturu i time povećanje temperature različitih komponenata - naročito transformatora i NN rasklopnog bloka. Zbog toga, bi u tipskim ispitivanjima kojima se potvrđuje klasa kućišta bilo logično uvesti simulaciju sunčevog zračenja primenom odgovarajuće postavke izvora zračenja sa intenzitetima, koje bi trebalo izračunati uzimajući u obzir mikroklimatske uslove lokacije. Pored toga, ukoliko pri izboru kućišta transformatorske stanice postoji razlika u boji spoljašnje površine, ispitivanje se mora sprovesti na kućištu sa najtamnijom bojom, jer to predstavlja najnepovoljniji slučaj.

## ZAKLJUČAK

Široka primena i konkurentnost na tržištu su usloveli pojavu velikog broja tipova prefabrikovanih transformatorskih stanica sa veoma različitim karakteristikama ugrađene opreme. U radu je razmatran pojam „temperaturne klase kućišta“, koji je zasnovan na potrebi uslovnog smanjenja opterećenja transformatora odn. definisanja radnih parametara transformatora prema lokalnim ambijentalnim uslovima i potrebama potrošačkog konzuma. Naglašena je potreba ispitivanja, čija je svrha provera da li konstrukcija prefabrikovane transformatorske stanice ispravno funkcioniše i da li kućište umanjuje životni vek ugrađenih komponenata. Uticaj na očekivani životni vek ne postoji ako nisu premašena dozvoljena ograničenja razaranja kroz toplotne uticaje određene relevantnim standardima. Pri tome je ispravan rad transformatora u tom smislu kritičan. Dokazano je da je životni vek organske izolacije sa porastom temperature od 7°C smanjen na pola.

Poznato je da su distributivni transformatori retko opterećeni punom naznačenom snagom. Ova "prednost" u vreme globalnog zagrevanja i sve veće upotrebe uređaja za klimatizaciju tokom letnjih meseci postaje sve manje izražena. Dugotrajne visoke temperature vazduha mogu dovesti do pojave čestih kvarova na transformatorima. Rešenje se nalazi u izboru adekvatne lokacije i neprekidnom praćenju temperaturnog stanja transformatora i ostale opreme u prefabrikovanim transformatorskim stanicama.

## LITERATURA

1. IEC 62271-202:2014 High-voltage switchgear and controlgear - Part 202: High-voltage/low-voltage prefabricated substation (Edition 2),
2. B. D. Sparling, J. Aubin „Power Transformer Life Extension Through Better Monitoring“, GE Energy, Technical Paper, 2005,
3. R.Radosavljević, Z.Radaković i dr. „Kompatibilnost procene ostarelosti izolacije energetskih transformatora preko savremenih dijagnostičkih tehnika i proračuna na bazi temperaturnih merenja i istorijata terećenja“, 29. Sesija CIGRE Srbija, 2009.,
4. IEC 62271-1:2007 High-voltage switchgear and controlgear - Part 1: Common specifications
5. M.Bidaut, T.Cormenier „MV/LV Prefabricated Substations : Lessons Learned with IEC 62271-202“, MATPOST 2011
6. IEC 60076-2:2011 Power transformers - Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers
7. IEC 60076-1:2011 Power transformers - Part 1: General
8. R.Kelly, G.Whyte “Miniature substations. What they are really capable of delivering“, 66th AMEU Convention 2017