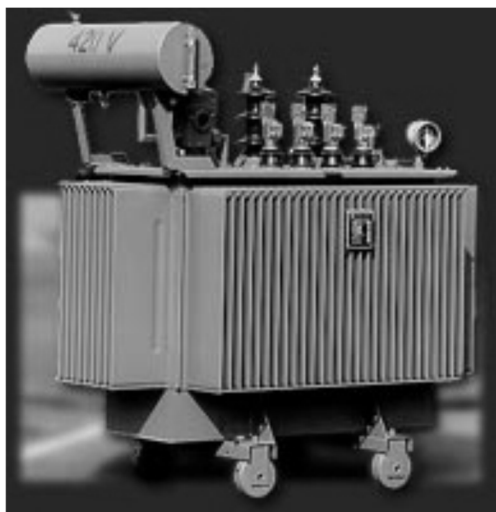


## TRANSFORMATORI

### ➤ DEFINICIJA, ULOGA, ZNAČAJ!

Transformator je *statički* elektrotehnički aparat koji, pomoću *elektromagnetne indukcije*, pretvara jedan sistem naizmjeničnih struja u jedan ili više sistema naizmjeničnih struja iste učestanosti i obično različitih vrednosti struja i napona. Uloga transformatora u elektroenergetskom sistemu je veoma značajna jer on omogućuje ekonomičnu, pouzdanu i bezbednu proizvodnju, prenos i distribuciju električne energije pri najprikladnijim naponskim nivoima. Dakle, njegovom primenom se, uz veoma male gubitke energije, rešavaju problemi raznih naponskih nivoa i međusobne izolovanosti kola koje se nalaze na različitim naponskim nivoima. Ovde će, pre svega, biti reči o *energetskim transformatorima* (slika ispod).



*Trofazni distributivni transformator*

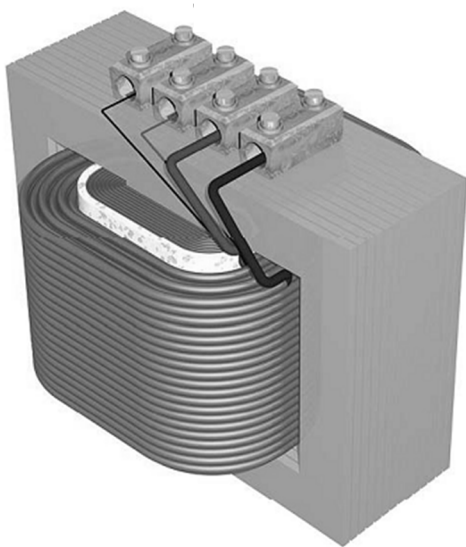
Transformator treba da bude projektovan i izrađen tako da izdrži moguća naprezanja kojima je izložen tokom svog životnog veka. Naprezanja u osnovi možemo da svrstamo u tri glavne grupe: električna, mehanička i toplotna. Kod električnih naprezanja pre svega treba obratiti pažnju na prenapone koji se javljaju kao posledica prekidanja u kolu, atmosferskih pražnjenja, lukova prema zemlji, kratkih spojeva, kao

i ispitnih napona. Pojave praćene velikim strujama u odnosu na naznaćene (nominalne, nazivne) (kratki spojevi u mreži, kao i ukljućenje transformatora u praznom hodu), opasne su sa stanovišta mehaničkih i toplotnih naprezanja (ova naprezanja su proporcionalna sa kvadratom struje). Do povećanih toplotnih naprezanja dolazi i kod preopterećenja transformatora. Takođe treba obratiti pažnju i na buku transformatora.

### ➤ ELEMENTI KONSTRUKCIJE TRANSFORMATORA

U pogledu konstrukcije, transformator se sastoji iz sledećih osnovnih delova:

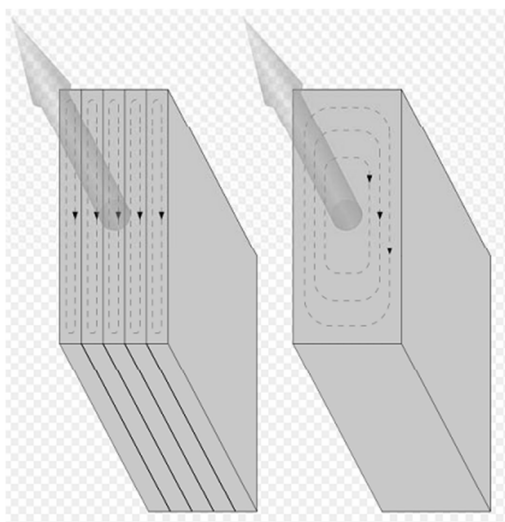
- *magnetskog kola;*
- *namotaja;*
- *izolacije;*
- *transformatorskog suda;*
- *pomoćnih delova i pribora.*



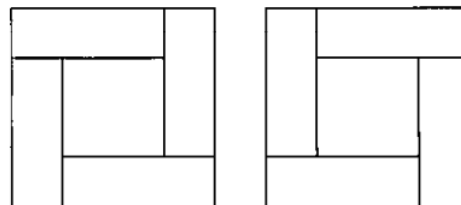
#### *Konstrukcija monofaznog energetskog odvojnog transformatora*

*Magnetsko kolo* se gradi od visokokvalitetnih hladnovaljanih transformatorskih limova (lamelirana struktura umesto jedinstvenog masivnog komada gvožđa). Da bi se smanjila struja magnećenja (pobudna struja) teži se uzimanju što kvalitetnijeg lima, sa velikom relativnom permeabilnošću (*feromagnetik*), i primenjuju se odgovarajuća konstrukciona (*slaganje limova, stezanje...*) i tehnološka rešenja (*nanošenje sloja oksida za izolaciju lamela, dopiranje silicijumom – hipersil lim (ugljenik do 0.1% i silicijum do 3%)...*) u izradi magnetskog kola. Radi smanjenja gubitaka usled vihornih

(vrtložnih) struja, koriste se međusobno izolovani limovi male debljine (0.30, 0.27 i 0.23mm).



*Lamelirana struktura (levo) i struktura sa masivnim komadom feromagnetika*

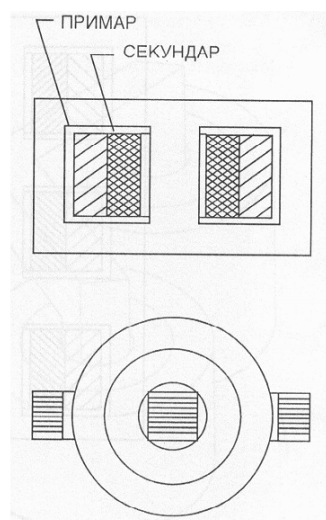
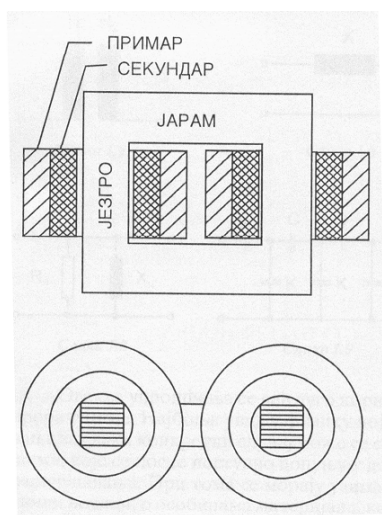


*Parni (levo) i neparni (desno) nivo*



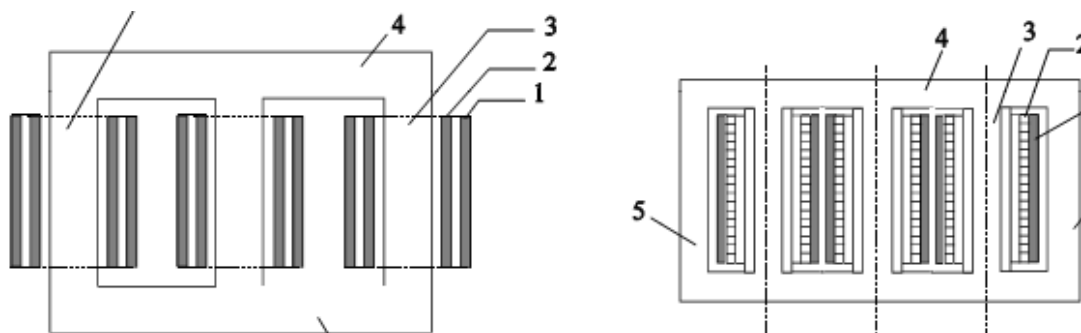
*Slaganje limova (prekrivanje zazora po nivoima – efektivno smanjenje zazora i struje magnetisanja)*

Osnovni fizički elementi magnetskog kola su stubovi (*jezgra*), oko kojih su smešteni namotaji i jarmovi (donji i gornji). Varijante monofaznog transformatora podrazumevaju magnetsko kolo sa jezgrima (slika levo) ili u obliku oklopa (slika desno).



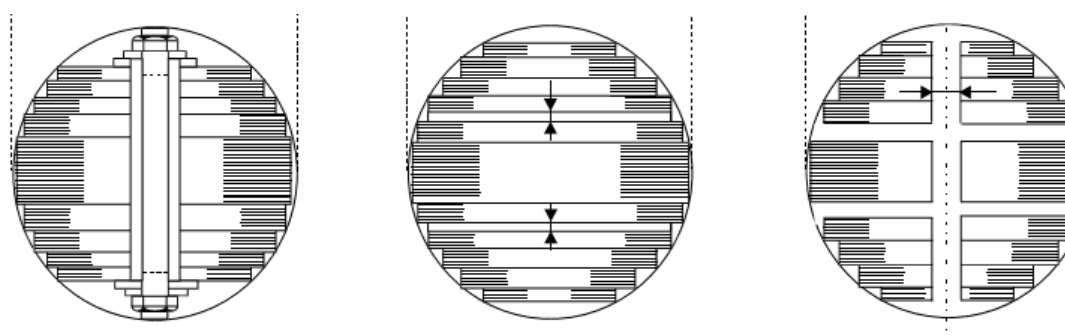
*Primeri magnetskog kola monofaznog transformatora; sa jezgrima (levo) i u obliku oklopa (desno)*

Trofazni transformator sa jezgrima se konstruiše u varijanti trostubnog ili petostubnog magnetkog kola!



*Primeri magnetskog kola trofaznog transformatora; sa tri struba (levo) i pet stubova (desno) – 1. Namotaj VN; 2. Namotaj NN; 3. Stub; 4. Jaram; 5. Povratni stub*

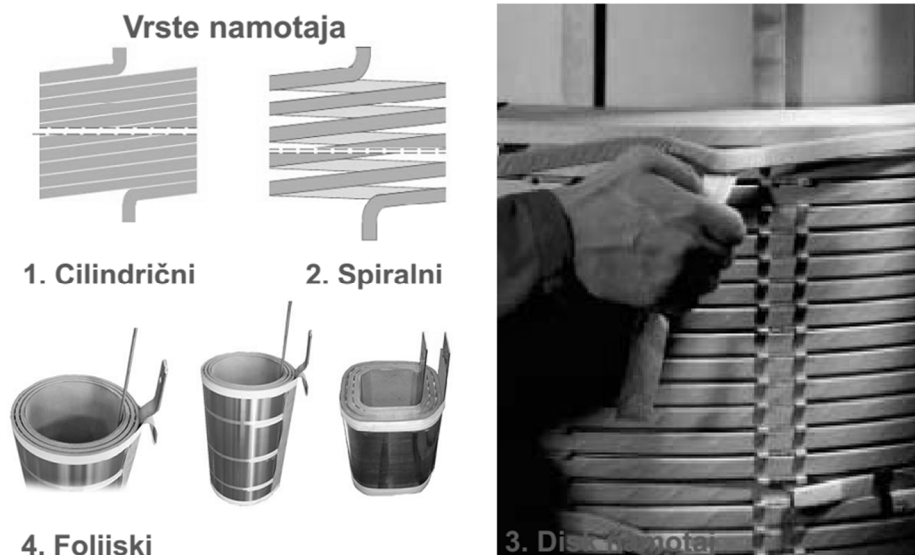
Stubovi imaju stepeničasti oblik i popunjavaju se paketima limova odgovarajuće širine, kako bi ispuna prostora opisanog kruga bilo što bolja. Kod transformatora velikih snaga, u jezgra se stavljaju kanali (podužni, širine  $6\text{mm}$ ) i prema potrebi jedan poprečni (širine  $10 - 15\text{mm}$ ), kako bi kroz njih moglo da cirkuliše ulje i hladi magnetsko kolo. Magnetsko kolo se priteže odgovarajućim steznim sistemom kako bi se dobila što bolja mehanička kompaktnost.



*Oblici preseka feromagnetskog jezgra; stezanje zavrtnjevima (levo); stezanje termoplastičnom trakom i podužni kanal za hlađenje (sredina); varijanta sa podužnim i poprečnim kanalima za strujanje rashladnog fluida (desno)*

Namotaji se prave od okruglog, profilnog ili trakastog provodnika od bakra ili aluminijuma, materijala koji imaju mali električni otpor. Namotaj koji se priključuje na napajanje se naziva primar, dok se namotaj koji je spojen na prijemnik naziva sekundar. Visokonaponski namotaj predstavlja sistem od mnogo redno vezanih navojaka *tanke* žice dok niskonaponski namotaj ima malo navojaka *debele* žice. Visokonaponski namotaj obmotava niskonaponski namotaj prilikom postavljanja na stubove transformatora!

Osnovni oblici namotaja prema načinu izrade su: spiralni, cilindrični, disk namotaj, folijski... Gustine struje za namotaje uljnih transformatora su  $2 - 4.5 \text{ A/mm}^2$ .



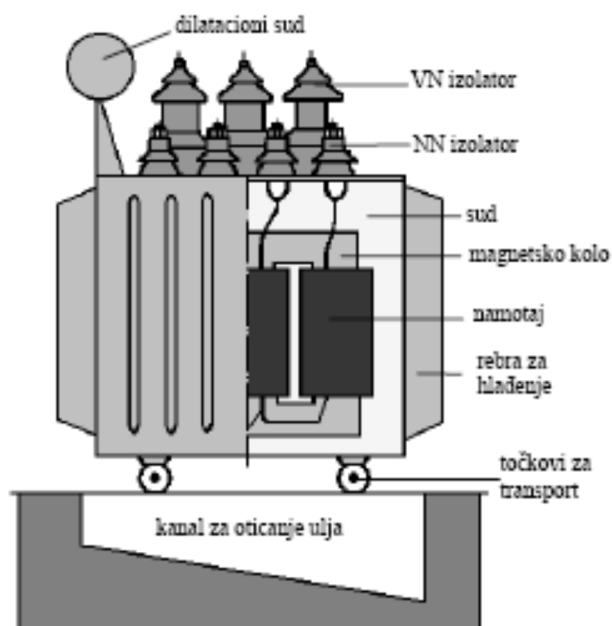
*Oblici namotaja transformatora prema načinu izrade*

Usled nejednake raspodele gustine struje po radijanoj širini u namotajima transformatora usled indukovanih vrtložnih struja u električnom kolu, pravi se presloženi disk namotaj sa transponovanim provodnicima (*rebel štap*)!

*Izolacija* predstavlja kombinaciju celuloze (papir, prešpan) i izolacionog ulja u slučaju uljnih transformatora, odnosno čvrste izolacije (staklene tkanine impregnirane epoksidnim, silikonskim ili drugim sintetičkim smolama) u kombinaciji sa vazduhom kod suvih transformatora (do 36kV). Izolaciono (transformatorsko) ulje, osim poboljšanja izolacionih svojstava, obezbeđuje i hlađenje transformatora, jer zbog svog velikog specifičnog toplotnog kapaciteta mnogo bolje odvodi toplotu sa magnetskog kola i namotaja na sud i rashladni sistem. Međutim, treba imati u vidu da je ulje zapaljivo i da lako gori. Izolacija provodnika je najčešće lak ili papir.

*Transformatorski sud* postoji kod uljnih transformatora i izrađuje se od kvalitetnog čelika sa ojačanjima. Oblik suda zavisi od načina hlađenja, pa bočne strane mogu biti glatke, valovite ili sa cevima za hlađenje.

*Pomoćni delovi i pribor transformatora*: natpisna pločica, provodni izolatori za povezivanje sa mrežom, dilatacioni sud (konzervator), regulator napona, priključak za uzemljenje, džep termometra, pokazivač nivoa ulja, slavina za ispuštanje ulja...



Osnovni delovi uljnog distributivnog transformatora

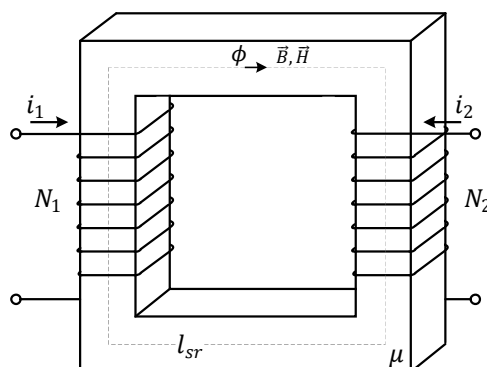
### ➤ PRINCIP RADA, OSNOVNE JEDNAČINE!

Transformator je uređaj koji pomoću elektromagnetske indukcije transformiše električnu energiju napona  $U_1$  i struje  $I_1$  na primarnoj strani u električnu energiju napona  $U_2$  i struje  $I_2$  na sekundarnoj strani, pri čemu frekvencija  $f$  ostaje ista.

Prva konstrukciona relacija transformatora podrazumeva da isti ne unosi gubitke niti aktivne niti reaktivne snage, što se matematički zapisuje na sledeći način:

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 \approx U_2 \cdot I_2 = S_2$$

Prividna snaga primara  $S_1$  je približno jednaka prividnoj snazi na sekundaru  $S_2$ !



Principska šema monofaznog odvojnog transformatora (školski primer transformatora)

Na primarni namotaj transformatora dovodi se električna energija u obliku naizmeničnog napona, koja u magnetno spregnutom sekundarnom namotaju indukuje odgovarajuću naizmeničnu elektromotornu silu, odnosno struju, koja se koristi za napajanje prijemnika. Pod pretpostavkom zanemarenja efekata rasipanja magnetskog fluksa namotaja, u magnetskom kolu se uspostavlja zajednički fluks u jezgri  $\phi$  (fluks po navojku) koji je posledica dejstva struja u namotajima transformatora. Na primarnom namotaju se dešava pojava *samoindukcije* dok se na sekundarnom namotaju dešava *međuinukcija*! Prenos energije sa primara na sekundar je isključivo magnetskim putem, a ne galvanskim spojem!

Zbog *Faradejevog* zakona elektromagnetne indukcije, transformator može da transformiše samo naizmenične napone (struje).

$$e = - \frac{d\psi}{dt}$$

Fluksni obuhvati namotaja primara  $\psi_1$  i sekundara  $\psi_2$  redom iznose:

$$\psi_1 = N_1 \cdot \phi, \quad \psi_2 = N_2 \cdot \phi$$

Jednačine naponske ravnoteže za namotaje primara i sekundara su:

$$U_1 = R_1 \cdot I_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = R_1 \cdot I_1 + N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}, \quad U_2 = R_2 \cdot I_2 + \frac{d\psi_2}{dt} = R_2 \cdot I_2 + N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

Namotaji se izrađuju od bakarnih provodnika čiji je presek izabran tako da otpornosti namotaja budu zanemarive u odnosu na članove indukovanih elektromotornih sila namotaja, što uz pretpostavku o idealnom magnetskoj sprezi namotaja predstavlja *drugu konstrukcionu relaciju* transformatora:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 \cdot I_1 + N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}}{R_2 \cdot I_2 + N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}} \approx \frac{N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}}{N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

Transformacija napona kod transformatora se postiže specifičnim izborom odnosa brojeva navojaka primara i sekundara koji se naziva odnos transformacije  $m$ .

*Konstrukciona posledica* transformatora se izvodi na osnovu dve konstrukcione pretpostavke i matematički se zapisuje na sledeći način:

$$U_1 \cdot I_1 \approx U_2 \cdot I_2 \rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \rightarrow N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = 0$$

Ukupna magnetopobudna sila koja se troši na magnećenje transformatora iznosi približno 0. Magnetno polje i fluks u jezgri transformatora  $\phi$  nastaje kao posledica zajedničkog sadejstva struja u namotajima transformatora. Magnetna indukcija u feromagnetnim limovima ne može imati vrednost veću od  $1.8T$ , pa je za transformaciju veće snage potreban transformator veće mase, jer mora imati magnetno kolo i namotaje većeg poprečnog preseka.

### ➤ **ENERGETSKI BILANS TRANSFORMATORA!**

U odnosu na idealni transformator, realan transformator prilikom procesa unutrašnje konverzije električne energije troši deo ulazne aktivne snage. Taj deo energije predstavlja gubitke transformatora jer se pretvara kroz nepovratne procese u toplotnu energiju koja zagreva samu mašinu. U zavisnosti od mesta nastanka, gubici unutar transformatora su dvojaki:

- *gubici u bakru*: gubici usled nenulte otpornosti namotaja primara i sekundara (*Džulov efekat*) kao i dodatni gubici u bakru usled indukovanih struja u namotaju koji prouzrokuju nejednaku raspodelu gustine struje (*površinski efekat* i *efekat blizine*);
- *gubici u gvožđu*: gubici u feromagnetnim limovima koji se sastoje od gubitaka usled histerezisa i gubitaka usled vrtložnih struja.

Potrebno je obratiti pažnju da kod transformatora ne postoje mehanički gubici iz razloga što nema nikakvih pokretnih delova (transformator je *statički* aparat).

Zbog postojanja gubitaka unutar transformatora stepen iskorišćenja ne može biti jednak 1 već je uvek manji. Za energetske transformatore on je blizak 1 i tipično iznosi između 0.9 i 0.95.

$$\eta[\%] = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} \cdot 100 = \frac{P_{ul} - P_{gub}}{P_{ul}} \cdot 100 = \frac{P_{iz}}{P_{iz} + P_{gub}} \cdot 100$$

$$P_{gub} = P_{Cu} + P_{Fe}$$

gde je:

- $\eta$  – stepen iskorišćenja (izražava se u procentima);
- $P_{ul}$  – ulazna aktivna snaga [W];
- $P_{iz}$  – izlazna aktivna snaga [W];



- $P_{gub}$  – ukupni gubici [W];
- $P_{Cu}$  – gubici u bakru [W];
- $P_{Fe}$  – gubici u gvožđu [W].

➤ **VRSTE TRANSFORMATORA!**

- *energetski, standardni*: po broju faza trofazni ili jednofazni;
- *autotransformatori*: imaju samo jedan namotaj; primar i sekundar su fizički (*galvanski*) sjedinjeni, ali postoji visokonaponska i niskonaponska strana;
- *regulacioni transformatori*: koriste se tamo gde je potrebno da se odnos transformacije menja; u elektrolučnim pećima radi prilagođenja napona proizvodnom ciklusu, odnosno u elektroenergetskim sistemima radi održavanja napona u propisanim granicama jer se padovi napona znatno menjaju sa opterećenjem. To se tehnički sprovodi promenom "*aktivnog*" broja navojaka jednog namotaja. Biranje izvoda se vrši u beznaponskom stanju ili pod opterećenjem, što je složenije jer se struja ne sme prekidati, niti se dva susedna navojka ili grupe navojaka smeju direktno spojiti, jer bi u tom slučaju njima tekla struja kratkog spoja;
- *merni transformatori*: osnovna funkcija im je svođenje velikih struja (*strujni*) i napona (*naponski*) na one struje i napone koji se mogu meriti standardnom mernom opremom i povećanje sigurnosti rada putem galvanskog odvajanja od kola sa velikim strujama i naponima. Oni moraju verno da prenose, sa što manjom greškom, amplitudu i fazni pomeraj primarnih struja, odnosno napona;
- *transformatori pretvarači broja faza*: (3 u 2, 6, 12);
- *transformatori za energetske pretvarače*: sa nesinusoidalnim naponima i strujama;
- *suvi transformatori* – porast potrošnje i cene električne energije i ograničavanje građevinskog prostora za smeštaj trafo stanice, nametnuli su zahtev da se transformator umesto u posebnim i udaljenim trafo stanicama ugrađuje u samim centrima potrošnje, kao što su veliki stambeni, poslovni, sportski, industrijski i drugi objekti. U ovakvim objektima postavljaju se veoma strogi zahtevi za ne zapaljivost transformatora, smanjenje smeštajnog prostora, nižu buku,

jednostavnu i jeftinu montažu i održavanje i zaštitu prirodne sredine. Radikalan razvoj izolacionih materijala u visokim termičkim klasama (*nomex, delmat, vitroplast, teflon...*), kao i izolacionih lakova za impregnaciju namotaja, omogućio je postizanje viših temperatura namotaja nego kod uljnih (viša klasa izolacije). Međutim, uz iste parametre (snaga, naponi), obično su nekoliko puta skuplji nego uljni. Veliku pažnju treba posvetiti tehnologiji izrade namotaja.

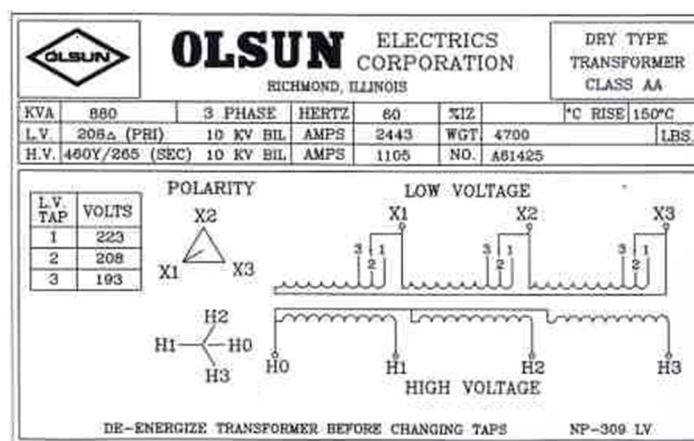
- *transformatori za zavarivanje*: osnovna uloga je da smanje napon mreže ( $400V/220V$ ), na siguran napon od  $50V$ , koji je dovoljan za paljenje električnog luka, a bezopasan je za rukovaoca.

### ➤ NATPISNA PLOČICA TRANSFORMATORA!

Natpisna pločica ima na sebi označene najvažnije pogonske podatke transformatora. Mora biti smeštena na kućištu na vidljivom mjestu i bitna je kod ugradnje ili popravki. Najčešće navedeni podaci (pogotovo za veće trofazne jedinice) na pločici su

- *simbol i ime proizvođača*
- *tip i godina proizvodnje te serijski broj*
- *nazivni primarni i sekundarni naponi (trougao/zvezda)*
- *nazivne struje primara i sekundara*
- *nazivna snaga u kVA*
- *nazivna frekvencija u Hz*
- *broj faza i satni broj*
- *napon kratkog spoja u procentima*
- *vrsta hlađenja*
- *masa ulja, ukupna masa itd*

## Primeri natpisne pločice transformatora



energetski transformator  $\Rightarrow$  nema podataka o faktoru snage i brzini obrtanja

trofazni  $\Rightarrow$  3 PHASE, sprega namotaja Dy: visokonaponska strana zvezda, niskonaponska strana trougao

suvi transformator  $\Rightarrow$  DRY TYPE

termička klasa izolacije  $\Rightarrow$  A

regulacioni transformator sa promenom aktivnog broja navojaka u beznaponskom stanju, 3 regulaciona izvoda

Nazivna prividna snaga (opterećenje) 880 kVA

Nazivna frekvencija 60 Hz

Nazivni napon primara 205 V (niskonaponska strana), nazivni napon sekundara 460 V (visokonaponska strana)

Nazivna struja primara 2443 A (niskonaponska strana), nazivna struja sekundara 1105 A (visokonaponska strana)

RADE KONČAR - ZAGREB			
Tip	2 TBN 100 - 12 A	Broj	00124
Godina	1983.	JUS N. H1.010	
Snaga	100 KVA		
1	10 500	Vrsta	ET
2	10 250	Frekv.	50 Hz
3	10 000	Sprega	Yzn 5
4	9 750	U <sub>k</sub>	4,0 %
5	9 500		
I	12	Aktivni dio	0,12 t
	300/173 A	Ulje	0,11 t
		Transf masa	0,56 t
		Ukupno	0,56 t

energetski transformator  $\Rightarrow$  nema podataka o faktoru snage i brzini obrtanja

trofazni  $\Rightarrow$  broj faza 3, sprega namotaja Yz: visokonaponska strana zvezda, niskonaponska strana cik cak sprega

uljni transformator  $\Rightarrow$  hlađenje ONAN (Oil Natural Air Natural) – primarni rashladni krug za hlađenje namotaja i jezgra Ulje, način hlađenja Prirodno –

*sekundarni rashladni krug za hlađenje transformatorskog suda Vazduh, način hlađenja Prirodno*

*regulacioni transformator sa promenom aktivnog broja navojaka u beznaponskom stanju, 5 regulaciona izvoda*

*Nazivna prividna snaga (opterećenje) 100 kVA*

*Nazivna frekvencija 50 Hz*

*Nazivni napon primara 10 kV (visokonaponska strana), nazivni napon sekundara 400 V (niskonaponska strana)*

*Nazivna struja primara 12 A , nazivna struja sekundara 300 A. Nazivni pad napona transformatora 4.0 %*