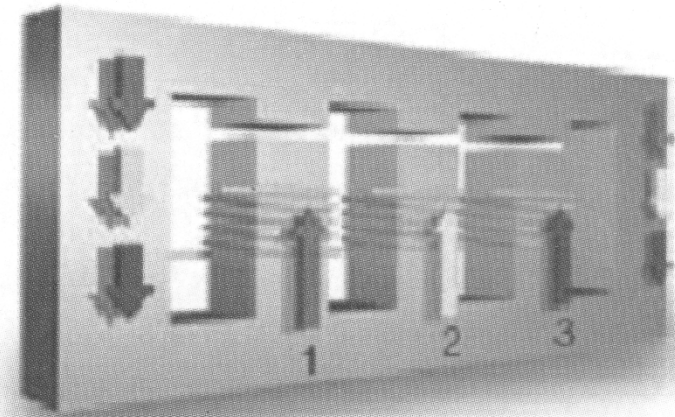
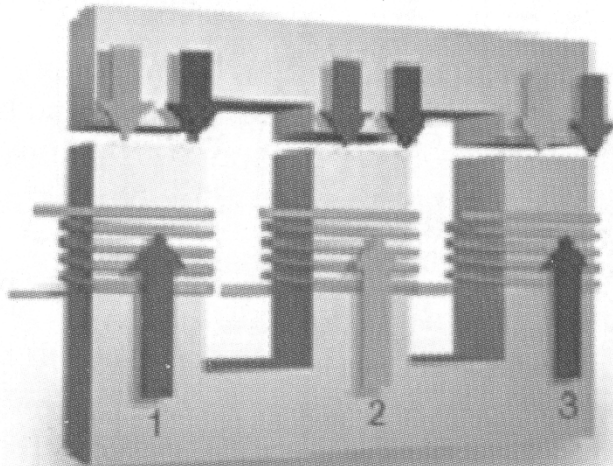


TRANSFORMATORI

Literatura:

1. Petar Matić, “Električne mašine 1”, Akademska misao, Beograd.
2. Đorđe Kalić, Radovan Radosavljević “Transformatori”, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd.
3. Momir Đurović “Transformatori”, Unireks, Podgorica.

TRANSFORMATORI – Prigušnice

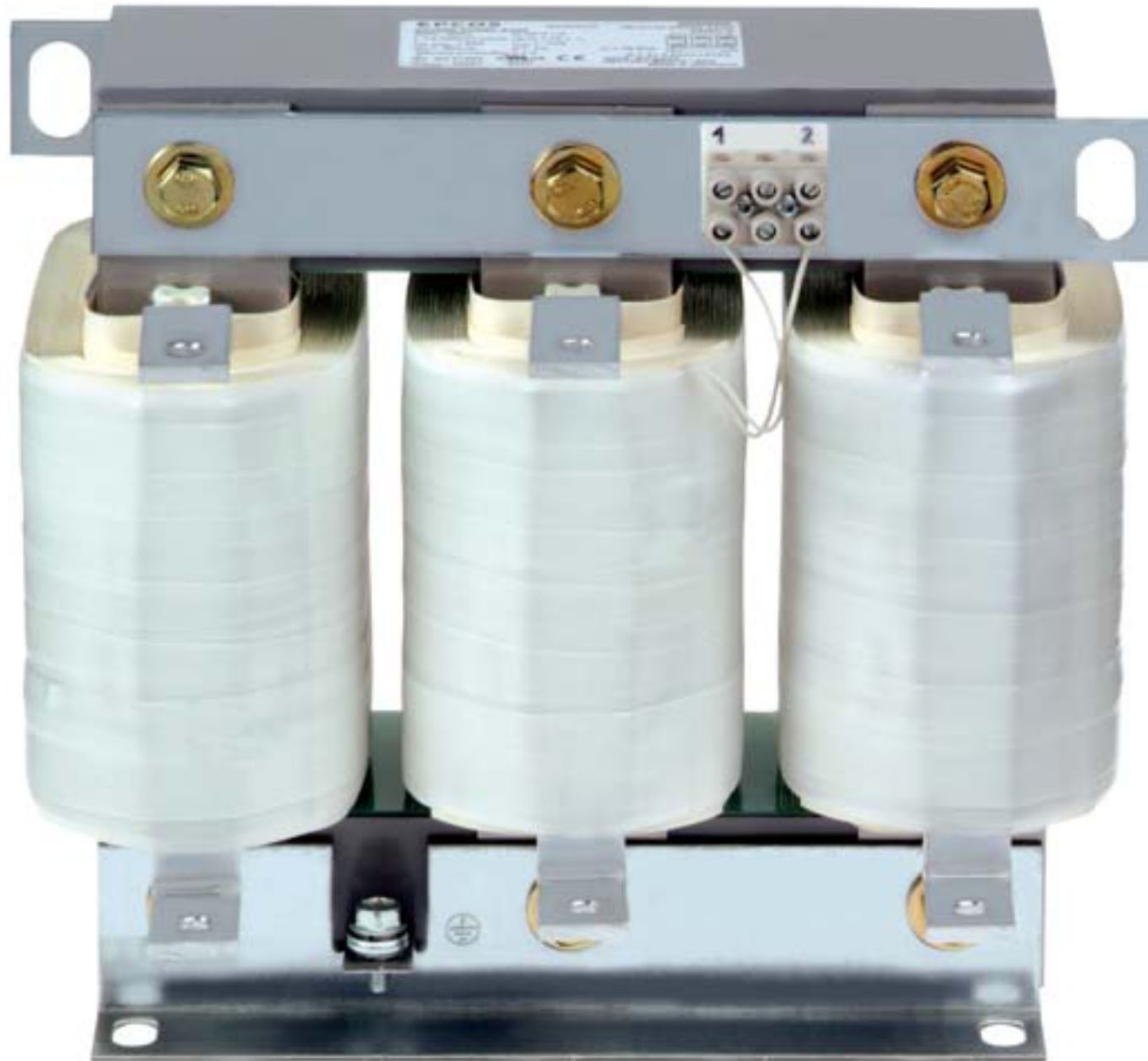


Magnetna spregnutost namotaja jaka/slaba.
Sila u vazдушnom zazoru 100tona/m².

Namotaj na feromagnetnom jezgru – prigušnica .

- Monofazne,
- Trofazne,
- Kolima jednosmerne struje,
- Kolima naizmenične struje.

TRANSFORMATORI - Prigušnice



Aktivni deo:

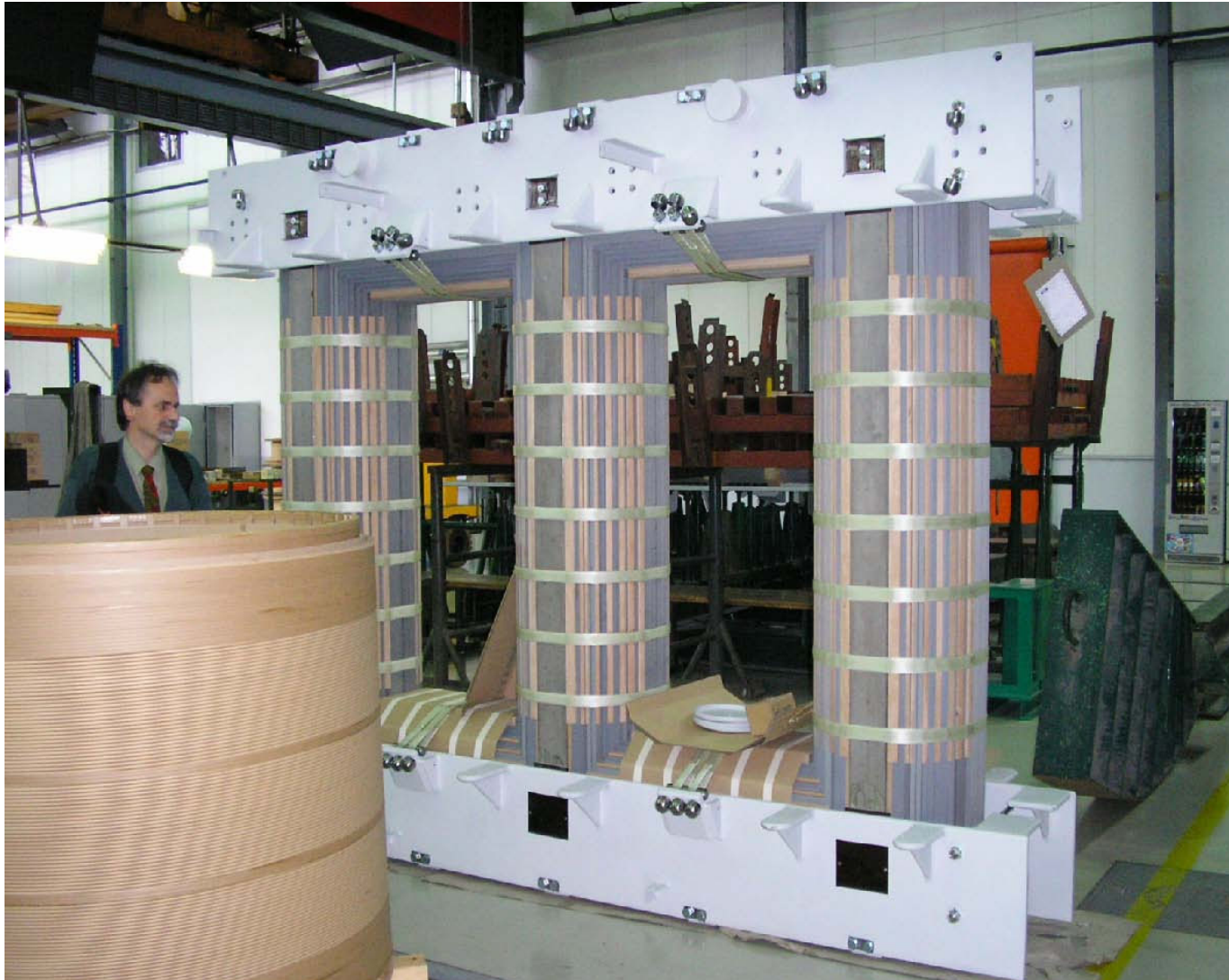
- Feromagnetno jezgro,
- Namotaj

Primena:

- Otočna reakt.za $>200\text{kV}$,
- Redna reaktansa za ograničenje struje k.s.
- Reaktansa u zvezdištu
- U LC filtru



400kV, 150MVA_r



4.1.2 VRSTE TRANSFORMATORA

Energetski transformatori, transformatori snage, (Power transformer):

- Distributivni - manjih snaga (Distribution transformer)
- Energetski, mrežni – srednjih i velikih snaga - veliki, (Power transformer)
- Bloktransformator (Generator transformer)
- Tronamotajni transformatori
- Specijalni transformatori (autotransformatori, suvi, transformatori za elektrolučno zavarivanje, transformatori za napajanje električne vuče.)

Merni transformatori:

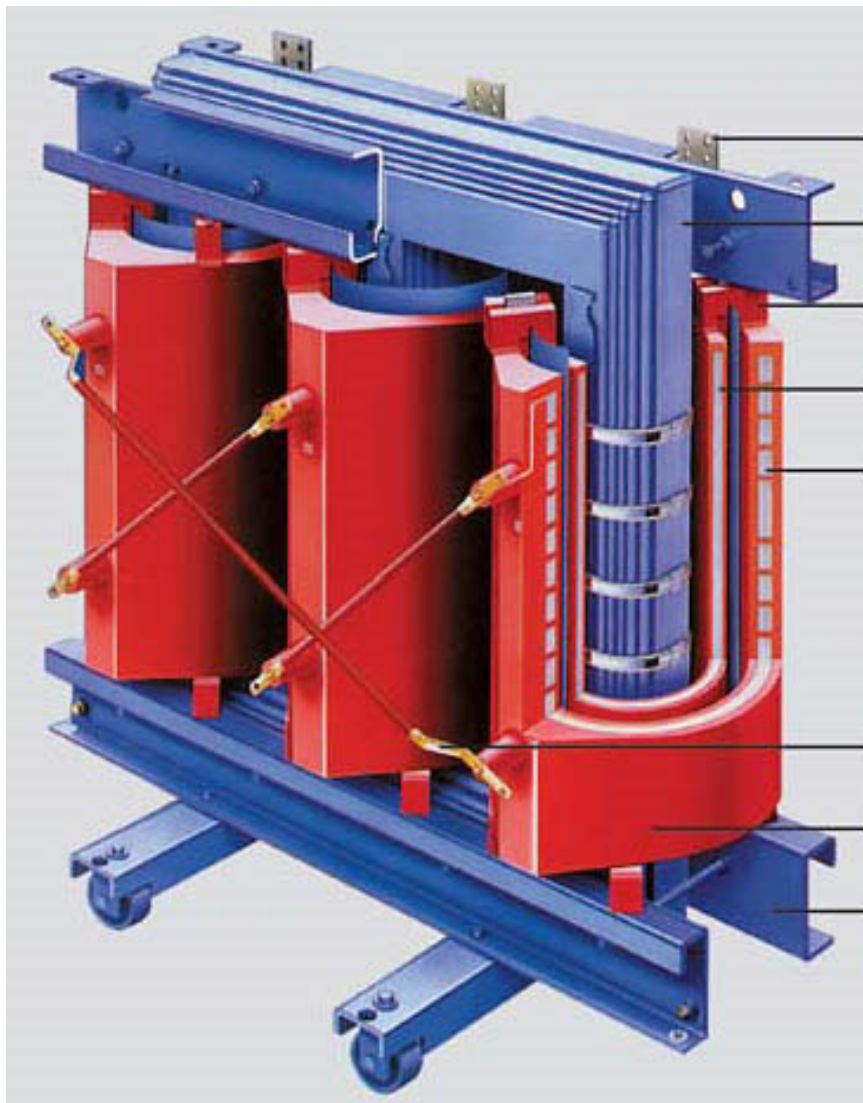
- Naponski
- Strujni

Za potrebe merenja struje i napona u eksploataciji i pri zaštiti. Prenose informaciju o naponu ili struji sa primara na sekundar i galvanski odvajaju merne krugove od naponskog nivoa primara.

VRSTE TRANSFORMATORA - Uljni/suvi.

Aktivni deo:

- Feromagnetno jezgro,
- Namotaji:niskonaponski i visokonaponski



Niskonaponski priključci

Feromagnetno jezgro

Odstojnici

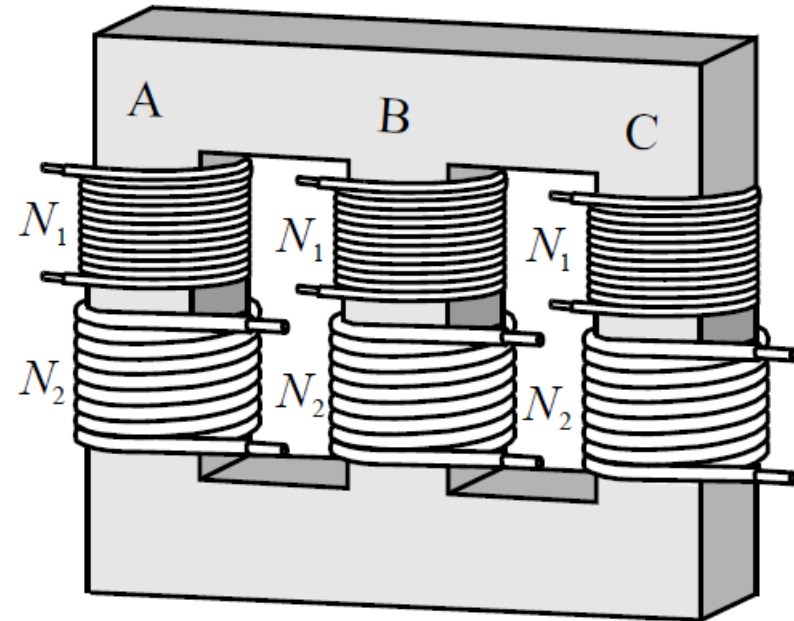
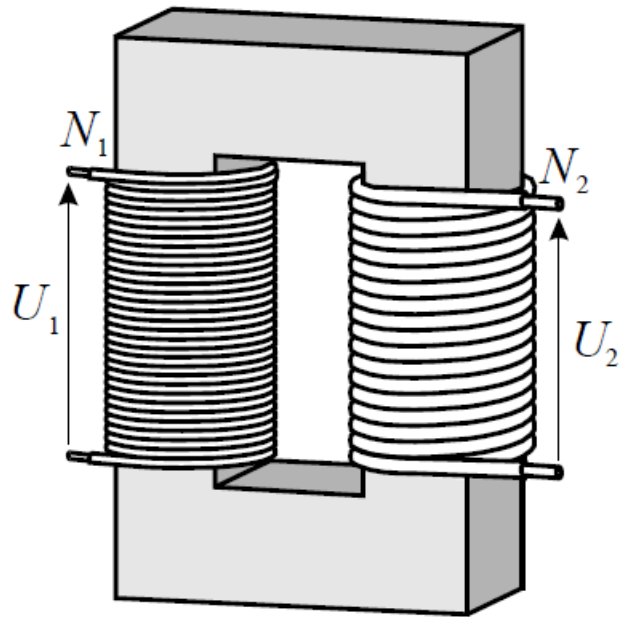
Namotaj niskog napona

Namotaj visokog napona

Visokonaponski priključci

Cast-resin livena smola

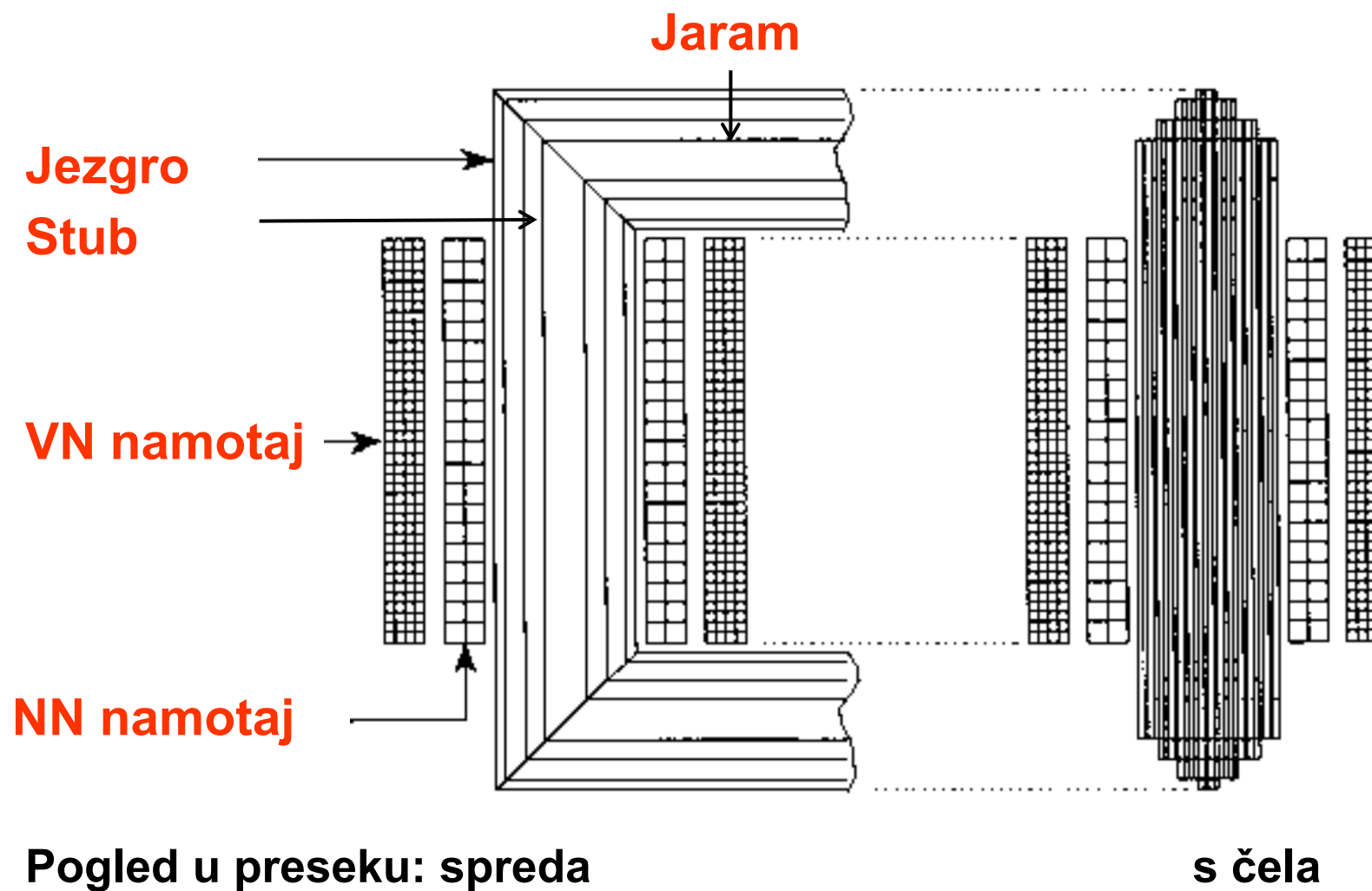
4.2. ELEMENTI KONSTRUKCIJE - delovi



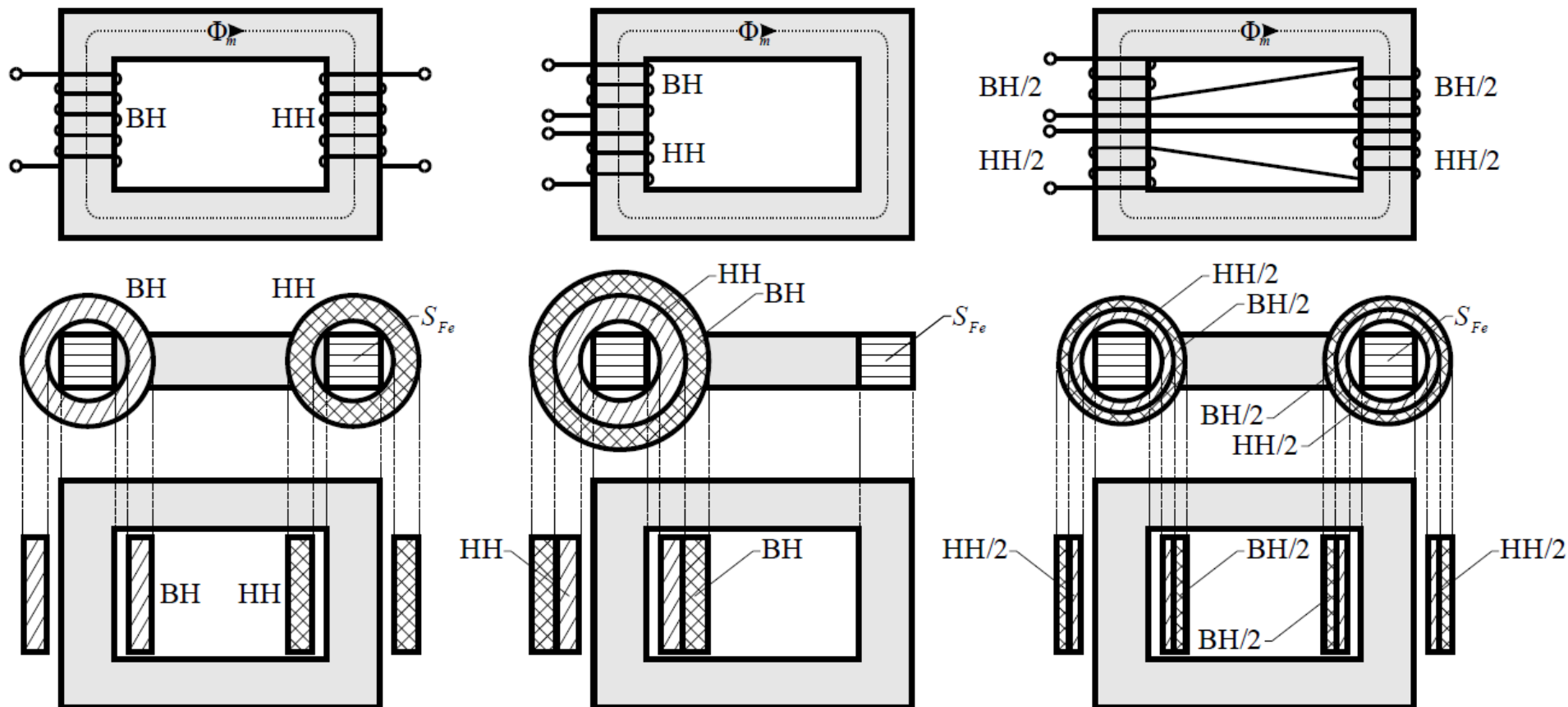
Izgled transformatora **jednofaznog** i **trofaznog**. Školski tip jednofaznog transformatora ima primarni namotaj (N_1 navojaka) na jednom stubu, a sekundarni (N_2) na drugom stubu.

Gvozdeno magnetno kolo transformatora poseduje veliku magnetnu provodnost koja omogućava dobijanje **velike magnetne indukcije** sa relativno slabim magnetnim poljem – malom strujom magnećenja.

Međusobni položaj namotaja i magnetnog kola.



Jednofazni transformator jezgrastog (stubnog) tipa



a) školski,

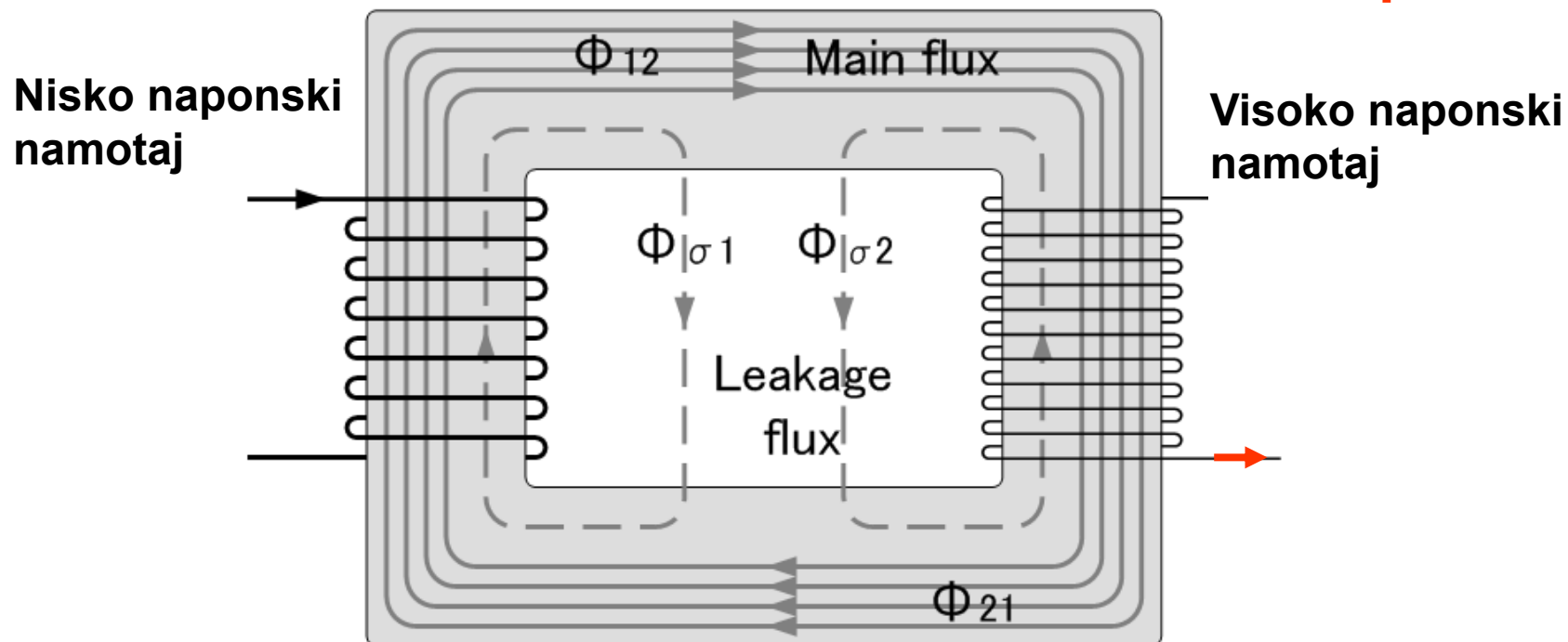
b) lančasti

c) Uobičajeni jezgrasti tip

U sva tri slučaja fluks magnetćenja je isti kroz sve delove magnetnog kola pa je ono konstanog poprečnog preseka.

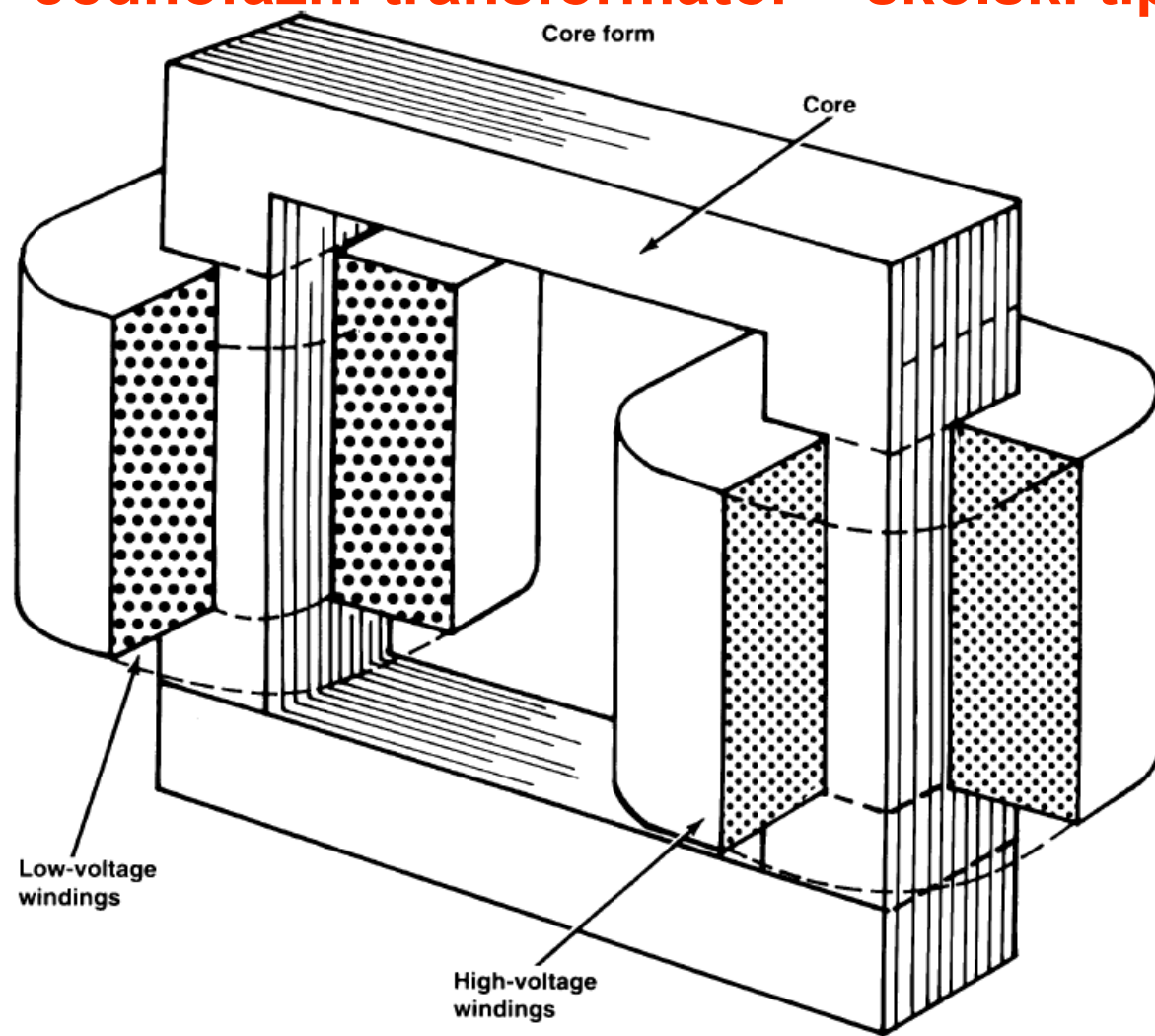
Kod stvarno izvedenih transformatora oba namotaja su razmeštena oko istog ili istih stubova b), c).

Jednofazni transformator – školski tip



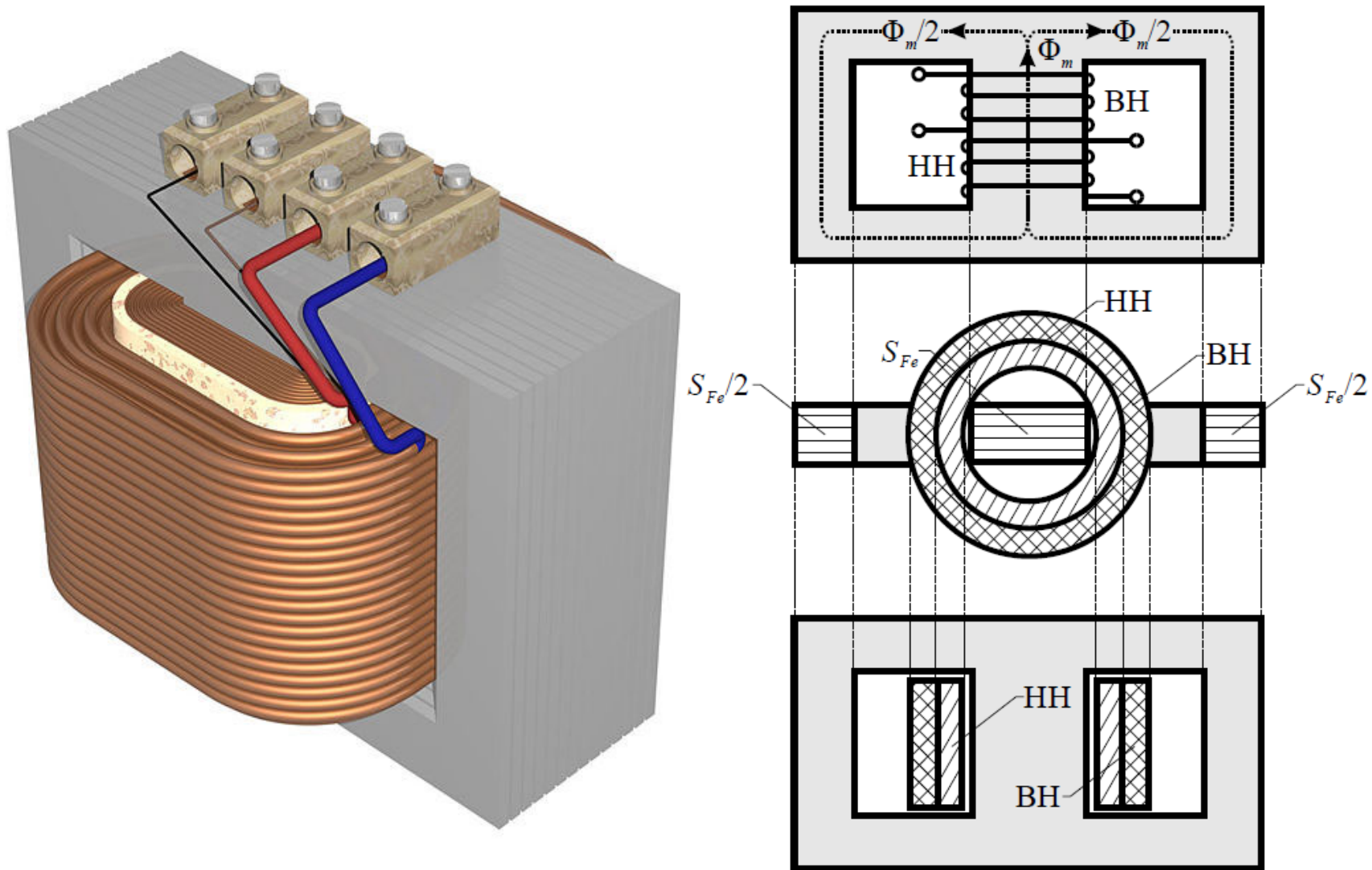
Namotaji primara i sekundara su smešteni na dva stuba. Mana školskog tipa transformatora je **VELIKI rasipni fluks**.

Jednofazni transformator – školski tip



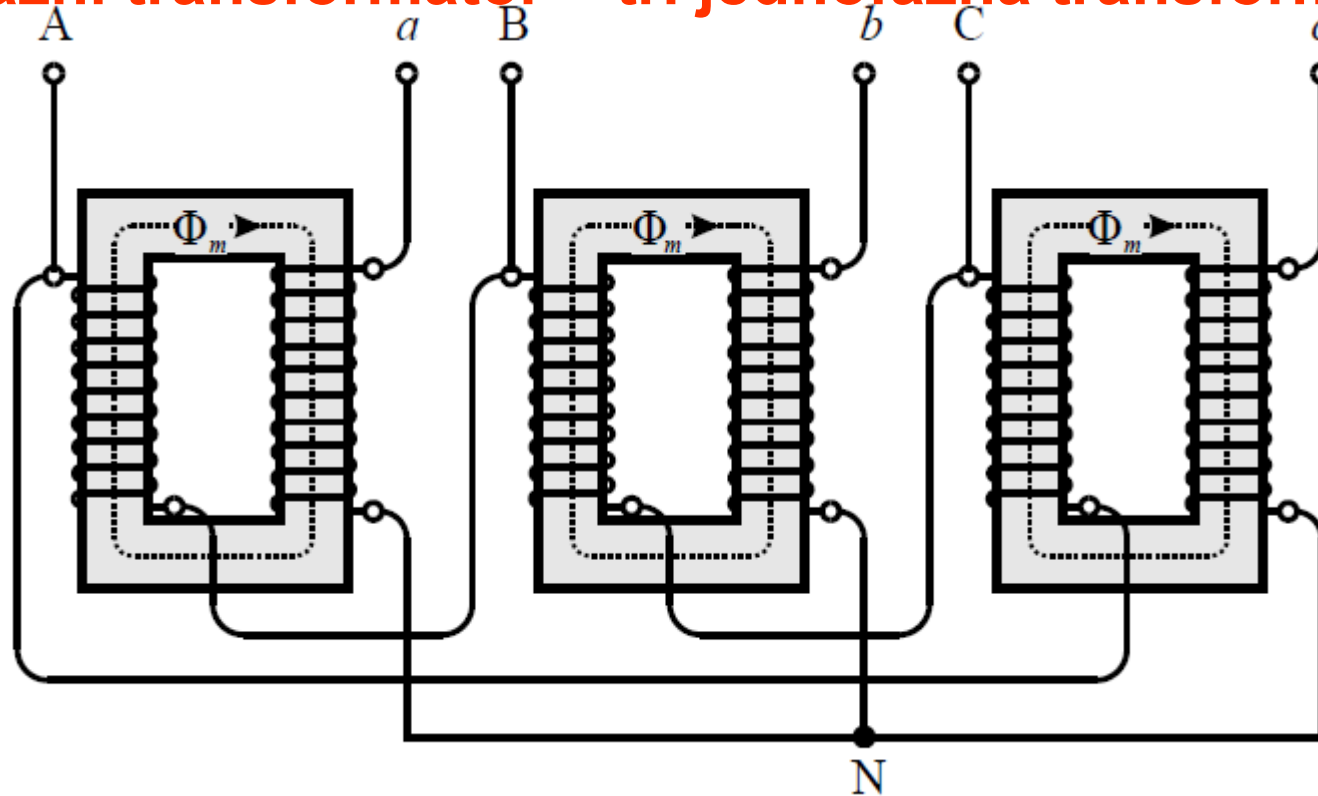
Zbog preglednosti ovaj tip se često koristi za izvođenje matematičkih relacija koje opisuju rad transformatora.

Jednofazni transformator – ogrnutog tipa



U cilju smanjenja rasipnog fluksa oba namotaja se postavljaju jedan preko drugog na jednom stubu a fluks se deli na dva jednaka dela i zatvara kroz bočne stubove.

Trofazni transformator – tri jednofazna transformatora



Princip povezivanja tri jednofazna transformatora školskog tipa u trofazni transformator – **Američki spoj**.

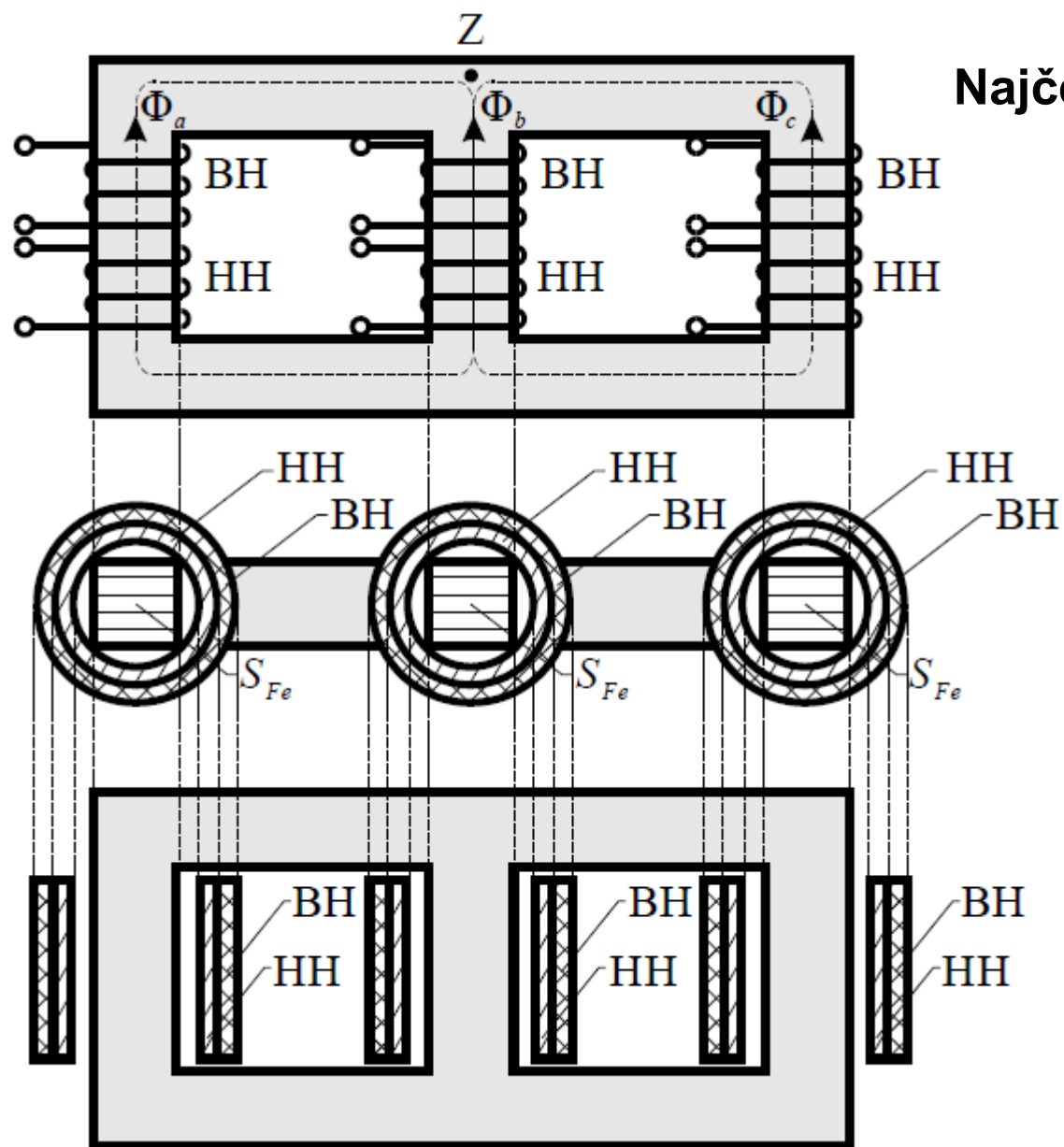
Prednosti: lakši transport, stopostotna rezerva sa još jednim transformatorom. Mane: skuplje rešenje od jednog trofaznog transformatora.

Trofazni transformator – tri jednofazna transformatora



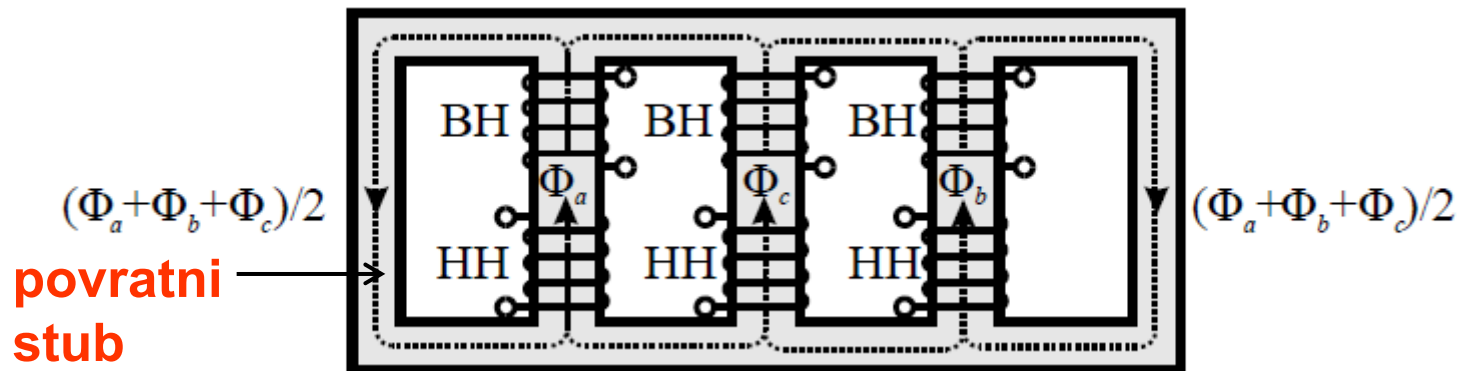
Primena jednofaznih transformatora 115MVA, $15,75/(400/\sqrt{3})\text{kV}$

Trofazni transformator - trostubni



Najčešće se koriste u EES-u.

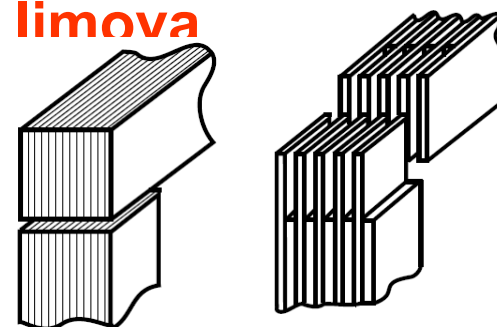
Trofazni transformator - petostubni



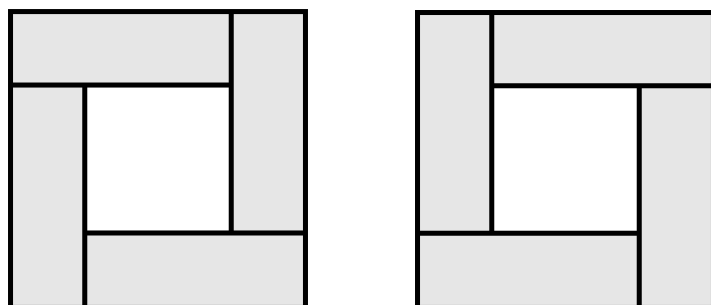
Može se pokazati da je kod petostubnog transformatora fluks kroz jaram 57% od onog kroz stubove. Zbog toga je za istu indukciju u magnetnom kolu jaram petostubnog niži od jarma trostubnog transformatora. Visina stuba petostubnog transformatora je 2/3 visine trostubnog transformatora. Zbog toga se transformatori najveće snage (u prenosu) izrađuju kao petostubni radi lakšeg transporta, čak i u slučaju simetričnog opterećenja transformatora. Transformator ima veliku nultu impedansu. Skuplji je od trostubnog transformatora.

4.2.1 Magnetno kolo - Načini slaganja limova

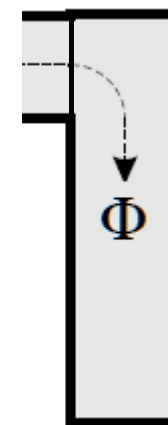
Magnetno kolo se slaže od više delova. Slaganje limova u jezgru je takvo da se limovi prekrivaju (preklapaju). Limovi jednog sloja prekrivaju vazdušni zazor drugog sloja – ukalemljeni spoj. Prekrivanjem limova postiže se manji vazdušni zazor u jezgru. Manji vazdušni zazor – manja struja magnećenja.



Tup i ukalemljen spoj

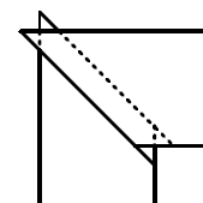
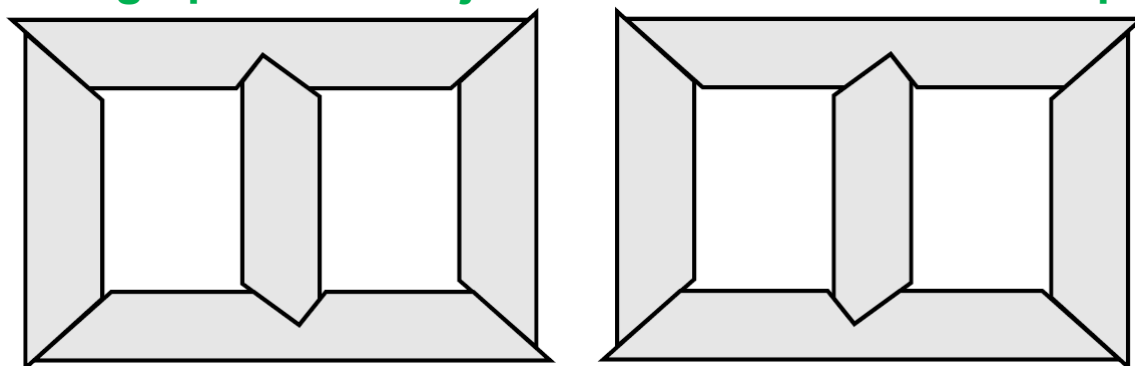


Upotrebom “orijentisanih” limova pri pravom sečenju lima fluks nailazi na povećan magnetni otpor na prelazu stub – jaram.

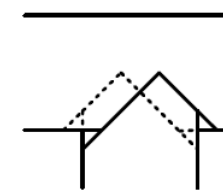


Raspored slaganja neparnih i parnih slojeva za ukalemljni spoj

Zbog upotrebe “orijentisanih” limova umesto “pravog” koristi se “koso” slaganje.



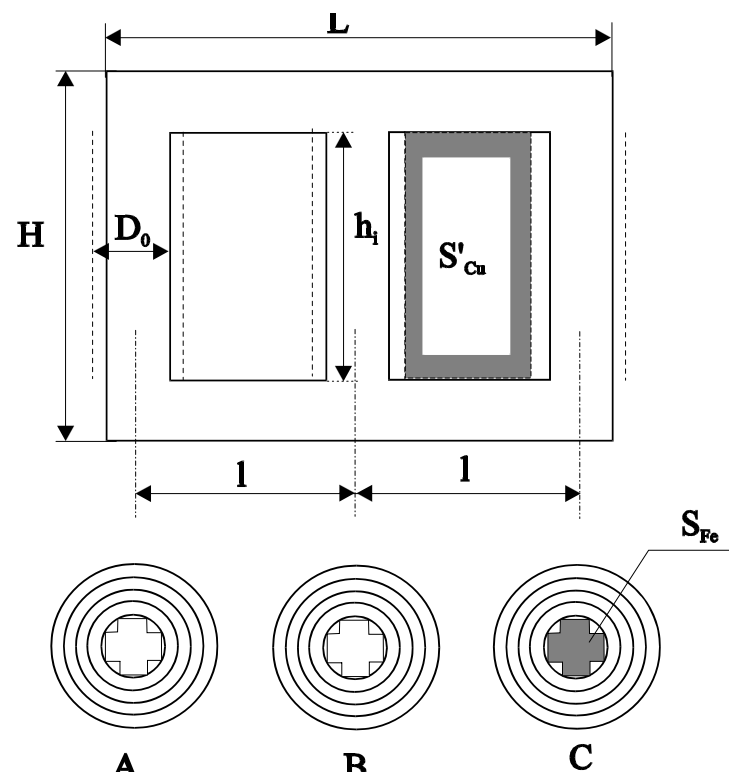
45° - preklop



V - isječak

“Koso” slaganje limova sa prekalapanjem u neparnim i parnim slojevima.

OSNOVNE MERE MAGNETNOG KOLA



Osnovne dimenzije transformatora su visina jezgra (h_i) i prečnik opisanog kruga oko jezgra (D_0), odnosno površina preseka jezgra (S_{Fe}). Ove dimenzije zavise od snage, ali njihovom varijacijom podešavaju se željene karakteristike. Spoljna mera (L), odnosno osni razmak (l) bira se na osnovu potrebne površine S_{cu} , za smeštaj namotaja.

Oblik preseka feromagnetnog jezgra.

Poprečni presek aktivnog dela magnetnog kola S_{Fe} sa N limova manji je od ukupnog geometrijskog preseka S za

Koeficijent ispune gvožđa:

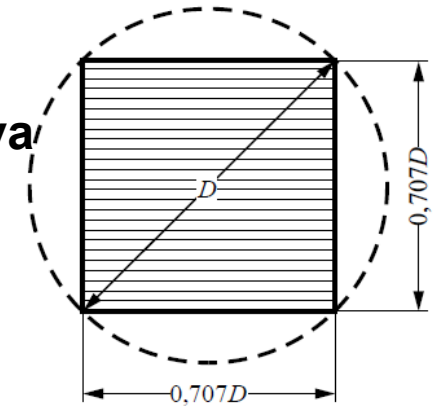
$$K_{Fe} = \frac{S_{Fe}}{S} = 0,945 \div 0,96$$

Provodnici od kojih se gradi namotaj se ne mogu savijati pod ostrim uglom zato se namotaji grade u obliku kruga. Jezgro magnetnog kola se slaže da bude u opisnom krugu.

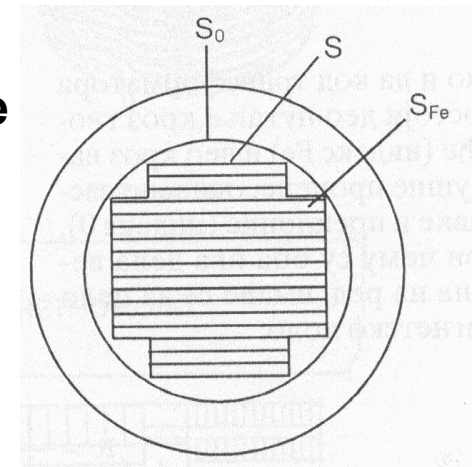
Koeficijent ispune kruga:

$$\alpha_{Fe} = \frac{S_{Fe}}{S_0}$$

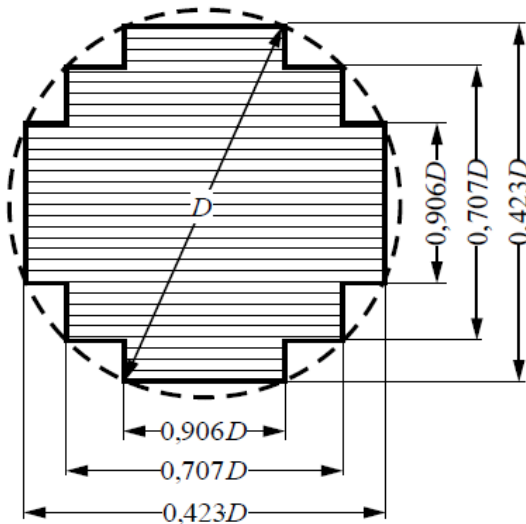
Da bi se povećao koeficijent ispune kruga magnetno kolo se gradi sa više stepenica i sve je bliže namotaju čime se smanjuje rasipni fluks i bolje koristi raspoloživi prostor.



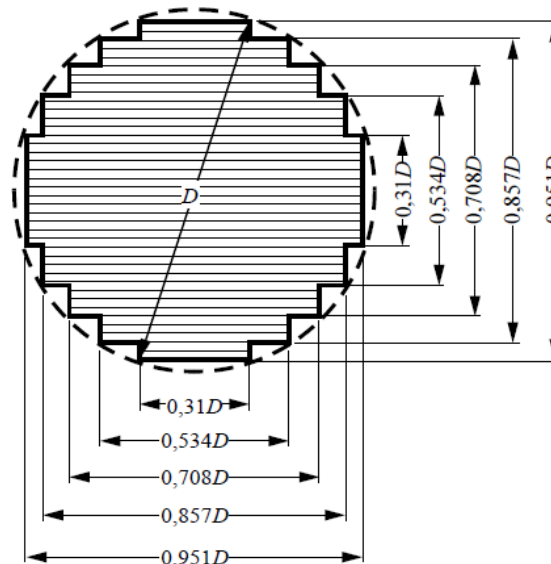
1. Najmanji TR



2. Nešto veći TR

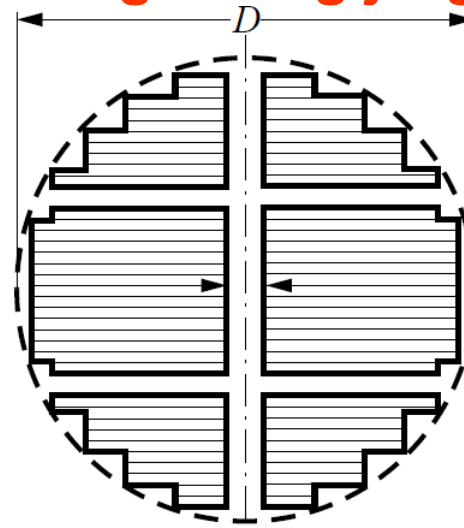
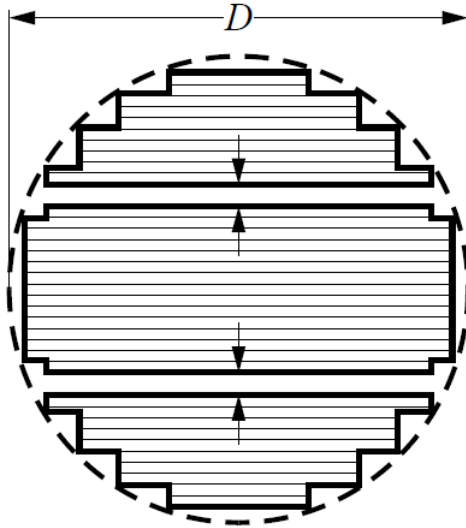


3. Srednji TR



4. Najveći TR

Oblik preseka feromagnetnog jezgra



Stepeničasti oblik jezgra magnetnog kola:

Za toplo-valjane limove -magnetno kolo je stegnuto zavrtnjevima, za hladno valjane limove -magnetno kolo se steže termoplastičnom trakom

- a) Podužni kanali za hlađenje,
- b) Podužni i poprečni kanali za hlađenje.

Za transformatore srednjih snaga predviđaju se kanali, podužni, zbog hlađenja magnetnog kola. Kada se radi o najvećim snagama onda se pored više podužnih kanala predviđa jedan poprečni kanal. Širina podužnog kanala mora biti najmanje 6mm, ako je manja onda neće cirkulisati ulje i jezgro se ponaša kao da nema kanal za hlađenje. Širina poprečnog kanala uobičajeno je 10 ÷ 15mm.

Jaram je manje stepeničast, ne mora biti u okviru opisanog kruga. Vrlo često jaram ima 5% veći presek, da bi se smanjila ukupna snaga gubitaka u gvožđu.

Načini slaganja limova u feromagnetnom jezgru.

Petostubno magnetno kolo. Koso sečenje.



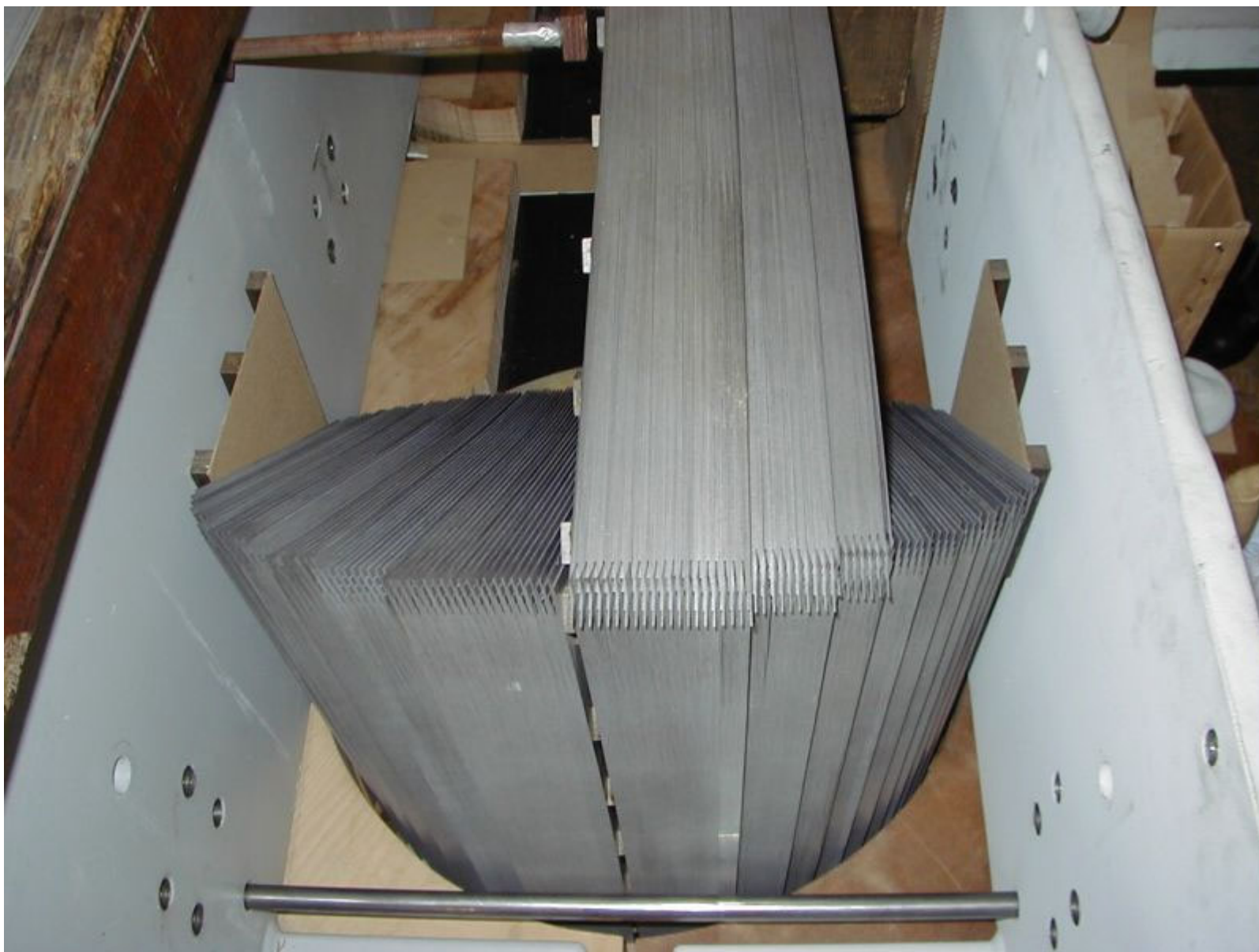
Izrada namotaja.



Ukalemljeno slaganje sa pravim sečenjem lima



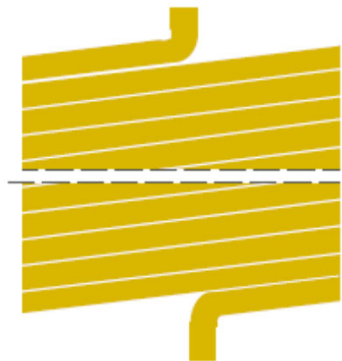
Ukalemljeno slaganje sa kosim sečenjem lima



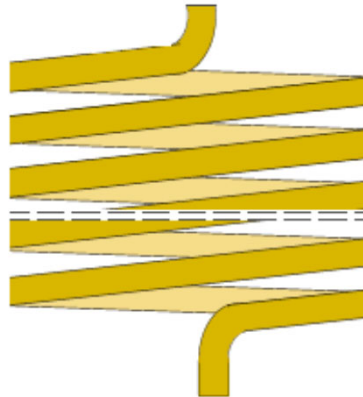
Magnetno kolo transformatora sa čeličnim steznicima



4.2.2 Namotaji transformatora



1. Cilindrični



2. Spiralni



4. Folijski

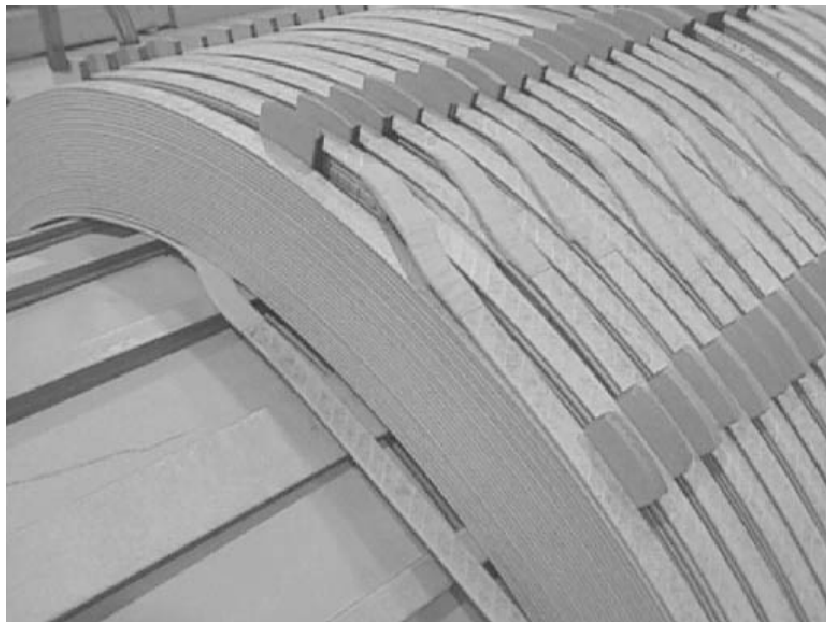


3. Disk namotaj

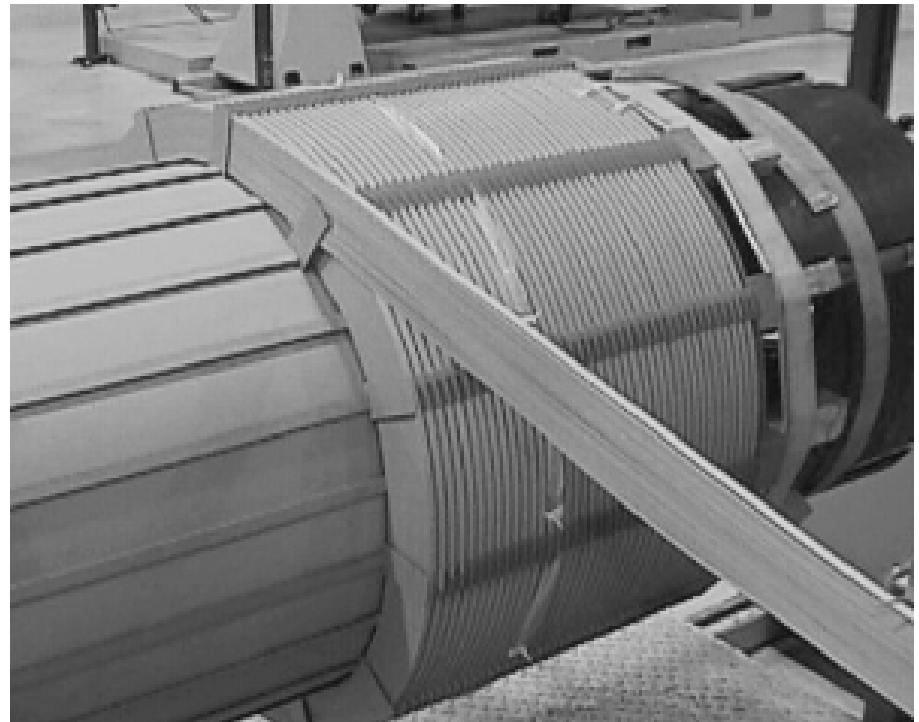
Izolacija provodnika je najčešće papir (za uljni TR) ili lak (za uljni do 35kV, suvi).

Vrste namotaja

Disk namotaj



Spiralni namotaj

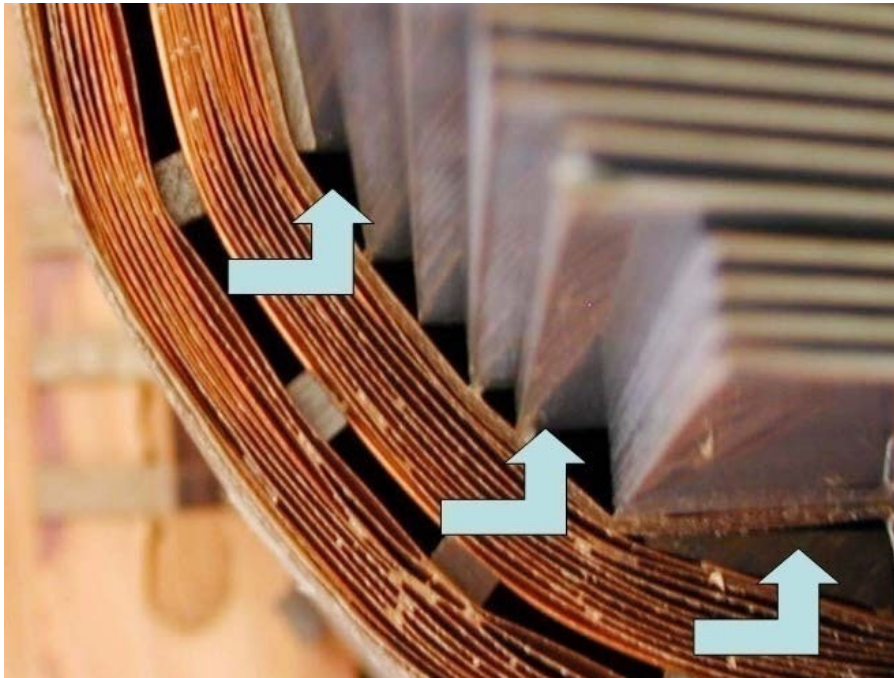


4.3 Uljni transformatori

Uljni transformatori su energetska tr. kod kojih se kao rashladno sredstvo koristi tr. ulje. Grade se za sve napone i obavezno preko 35kV. Tr. ulje ima dvojaku ulogu: rashladnog sredstva, izolaciona svojstva.

Jezgro se hladi strujanjem ulja u prostoru između magnetnog kola i namotaja najbližeg jezgra (obično NN).

- Najviša dozvoljena temperatura jezgra iznosi 140 °C (IEC 60076-7)
- Rashladni kanal se formira i u sredini stuba jezgra





Trafo sud ima:

- 1. glatke bočne strane za snage do 50kVA, površina suda je dovoljna za hlađenje TR,**
- 2. bočne strane od valovitog lima,**
- 3. cevi ili radijatore.**



Aktivni deo transformatora (jezgro i namotaj) smeštaju se u tr. sud (kotao, kazan).



4.3.2 NAČINI HLAĐENJA TRANSFORMATORA PREMA IEC

Snaga tr. raste sa četvrtim stepenom linearnih dimenzija, gubici sa trećim a površina hlađenja samo sa drugim. Zbog toga se veći tr. teže hlade pa moraju posedovati složenije sisteme za hlađenje.

Unutrašnjost tr. (jezgro i namotaji) se hladi rashladnim sredstvom (ulje, Oil - **O** ili vazduh, air - **A**) koje može da struji prirodno (Natural - **N**) ili forsirano(prisilno) (Forced - **F**). Postoji konvencija o označavanju načina hlađenja transformatora.

Oznaka načina hlađenja transformatora sastoji se od 4 slova:

- 1. Rashladno sredstvo namota**
- 2. Način hlađenja namota**
- 3. Rashladno sredstvo spoljašnjeg hlađenja**
- 4. Način hlađenja za spoljašnje rashladno sredstvo**

Rashladno sredstvo:

O – mineralno ulje,
L – sintetsko ulje,
G – gas,
W – voda,
A – vazduh,
S – kruti materijali

Način hlađenja:

N – prirodno,
F – prisilno,
D – dirigovano.

Primeri oznake hlađenja transformatora:

ONAN – hlađenje prirodnim strujanjem ulja oko namota, i vazduha kao sekundarnog rashladnog sredstva (uljni transformatori do 20 MVA).

ONAN/ONAF – do 80% snage ONAN, dalje se automatski uključuju ventilatori.

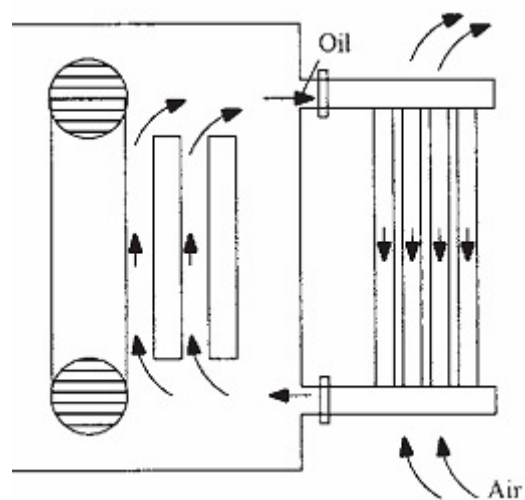
ODWF - hlađenje namota dirigovanim strujanjem ulja u kotlu, te sekundarnim rashladnim krugom u kojem prisilno struji voda (najveći transformatori).

AN – suvi transformatori bez zaštitnog kućišta.

ANAN – suvi transformatori sa zaštitnim kućištem i prirodnim strujanjem vazduha unutar i izvan kućišta.

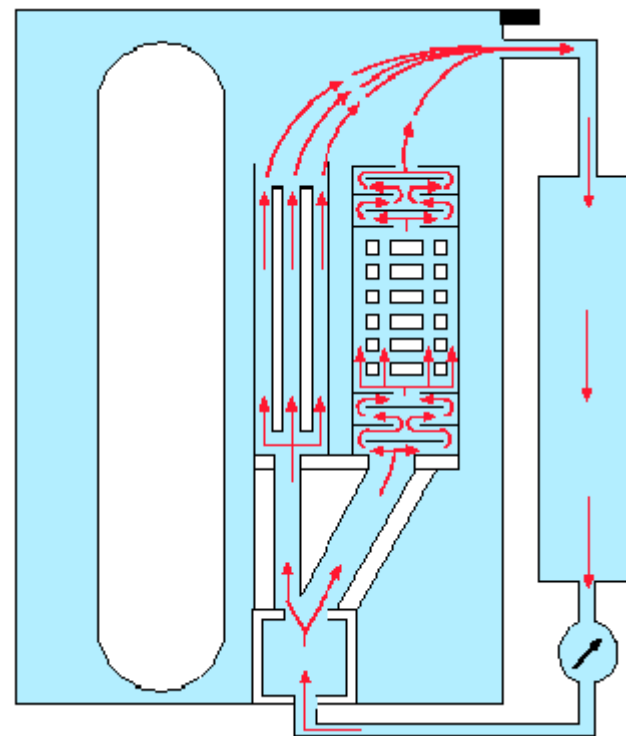
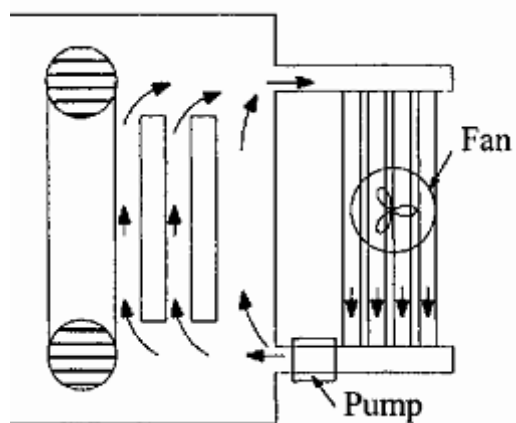
AF – suvi transformatori za veće snage.

ONAN



OD hlađenje – ulje direktno prolazi kroz rashladne kanale u namotu

OFAF





TRANSFORMER to specification EN 60076-1:1997

Type TNOSCTCS-1000/20PNS DTSP-L3M128

No. of phases 3 No. 1LPL350515

Rated power 1000 kV·A Year of manufacture 2005

Rated voltage [kV] Current [A] Insulation level

HV 20 ± 2x2.5% 28.9 LI125AC50

LV 0.42 1375 AC3

Tap no.	HV voltage [V]
1	21000
2	20500
3	20000
4	19500
5	19000

Connection symbol Dyn5

Short-circuit imp. 5.99 %

Load losses 14136 W

No-load losses 1618 W

Cooling ONAN

Rated frequency 50 Hz

Ambient temp. 40 °C

Mass of oil 482 kg

Temperature rise of: Mass of core and wdgs 1270 kg

Windings 65 K Oil 60 K Total mass 2390 kg

Type of oil NYNAS-NYTRO 10GBN Oil to IEC-296

Načini HLAĐENJE Prema IEC :

- ONAN Oil natural air natural
- ONAF Oil natural air forced
- OFAF Oil forced air forced
- OFWF Oil forced water forced

Schneider
Electric

Trihal

SN: 1453056

CAST RESIN TRANSFORMER

N **908603-01**

5000 / 7000 kVA

3 Phased **50** Hz

Vector group

Dyn05 -

IK

IP **00**

Year

2019

According to

IEC 60076-11

Temp. Classes	F	HV	LV
Rated Voltage (V)		35000	10500
Currents (A)	AN	82.5	274.9
	AF	115.5	384.9
Insulation levels (kV)		LI185 AC85	LI75 AC28

Position of tappings	Connect	High Voltage (V)
35000	1-4 5-7	36750
	2-4 5-7	35875
	3-4 5-7	35000
	2-4 6-7	34125
	3-4 6-7	33250

class IEC 60076-11 & 16
climatic
environment
fire behaviour
(*) C2 Thermal shock test carried out at -50°C

C3*
E3
F1

Nota : HV connection

Maximum tractive effort on connection bar : 500 N

Torque $\pm 20\%$ on adjustment and connection screws

HV	LV
20 N.m	Dia:12 → 45N.m
	Dia:14 → 70N.m

Cooling	AN/AF
Impedance (%)	5.64
P0 (W)	12199.0
PK (W)	18373.0
Windings material	AL/CU
CU weight (kg)	1343
Al weight (kg)	608
Core mass (kg)	10899
Core material	
Grain oriented magnetic steel	
Weight without enclosure (kg)	16350
Weight enclosure (kg)	
Weight with enclosure (kg)	

NAL-265693 (anglais)



made by france transfo - France (Ennery)





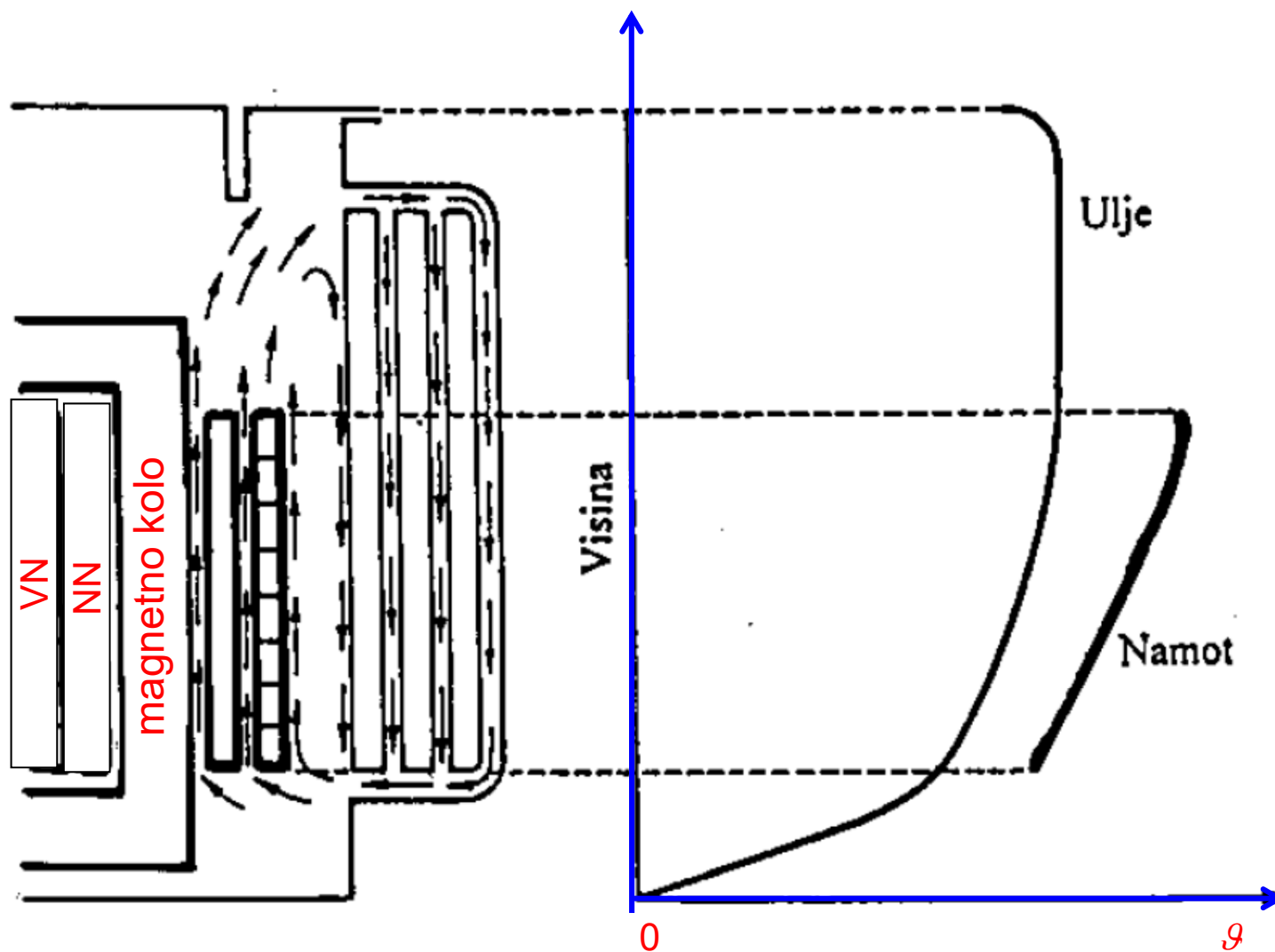
Ventilatori za prinudnu ventilaciju

Dopušteno zagrevanje transformatora prema IEC normi

Dio	Dopušteno zagrijanje (K)
<i>Uljni transformatori</i> namoti	65 za prirodno i prisilno strujanje ulja 70 za dirigirano strujanje ulja
ulje u najvišem sloju	65 ako je ulje zaštićeno od pristupa zraka 55 ako ulje nije zaštićeno od pristupa zraka
<i>Suhi transformatori</i> namoti	toplinska klasa 60 A 75 E 80 B 100 F 125 H 150 C
Jezgra, metalni i ostali dijelovi	Temperatura ne smije biti tolika da može oštetiti jezgru ili susjedne dijelove

Uljni transformatori spadaju u TKI A. Za zaštitu transformatora ugrađuje se kontaktni termometar koji signalizira temperaturu od 85°C a pri 95°C deluje na isključenje transformatora.

Zagrevanje u transformatoru po vertikali



4.1.3. NAPONSKA RAVNOTEŽA KOD TRANSFORMATORA.

Ako se na krajeve primarnog namota idealnog tr. priključi naizmenični (prostoperiodični) napon mreže: tada se u feromagnetnom jezgru uspostavi naizmenični fluks.

Ovaj fluks u namotajima indukuje elektromotornu silu.

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

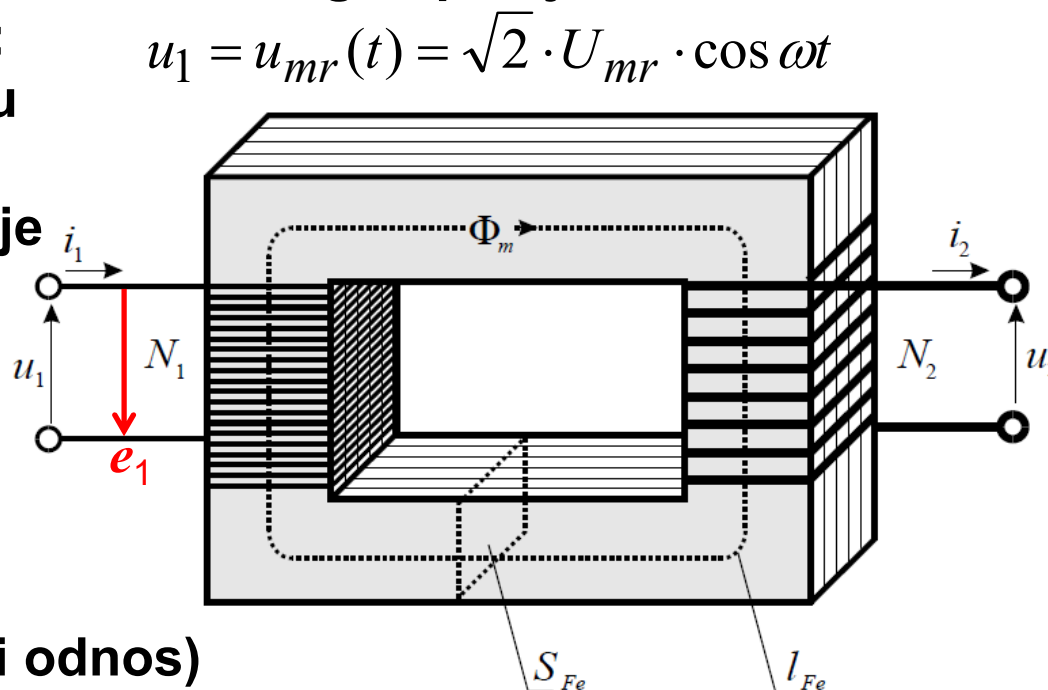
$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Odnos transformacije (prenosni odnos)

transformatora definisan je kao **količnik indukovanih EMS u faznim namotajima:**

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Transformatori transformišu napon proporcionalno broju navojaka.



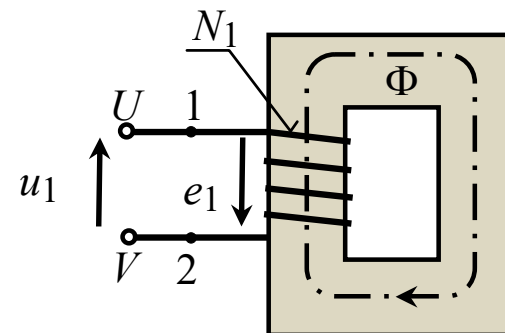
Za strujno kolo definisano mrežom i transformatorom važi:

$$u_1 + e_1 = 0$$

$$\sqrt{2} \cdot U_{mr} \cdot \cos \omega t - N_1 \frac{d\Phi}{dt} = 0$$

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} U_{mr}}{\omega \cdot N_1} \sin \omega t$$

$$\Phi = \frac{U_{mr}}{4,44 f \cdot N_1} \sin \omega t$$



Šta se dešava sa promenom N1?

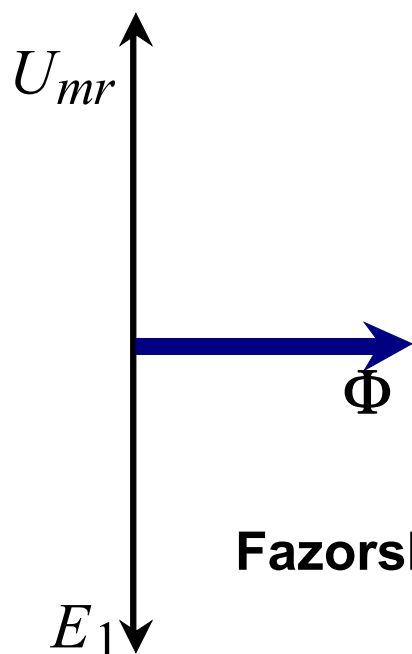
EMS primara i sekundara.

$$U_{f\ eff} = E_{1\ eff} = 4,44 \Phi \cdot f \cdot N_1 = 4,44 B_m S_{Fe} f \cdot N_1$$

$$E_{2\ eff} = 4,44 B_m S_{Fe} f \cdot N_2$$

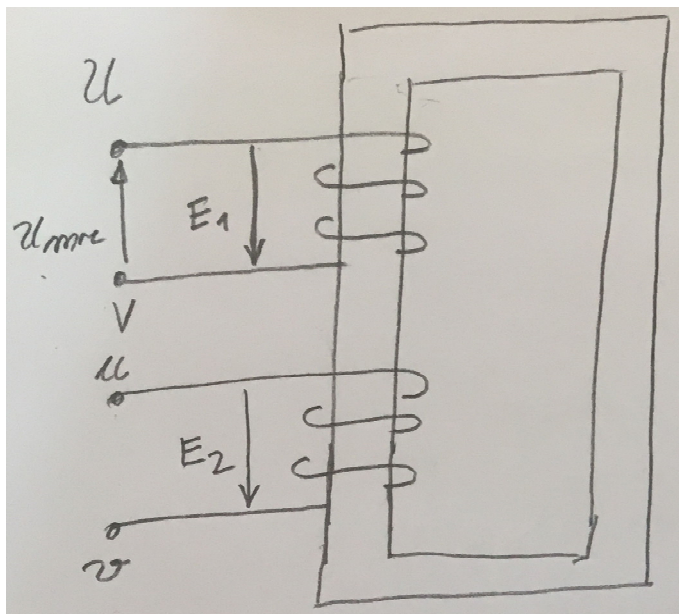
EMS po navojku primara i sekundara je ista:

$$E_{navojka} = 4,44 B_m S_{Fe} f$$

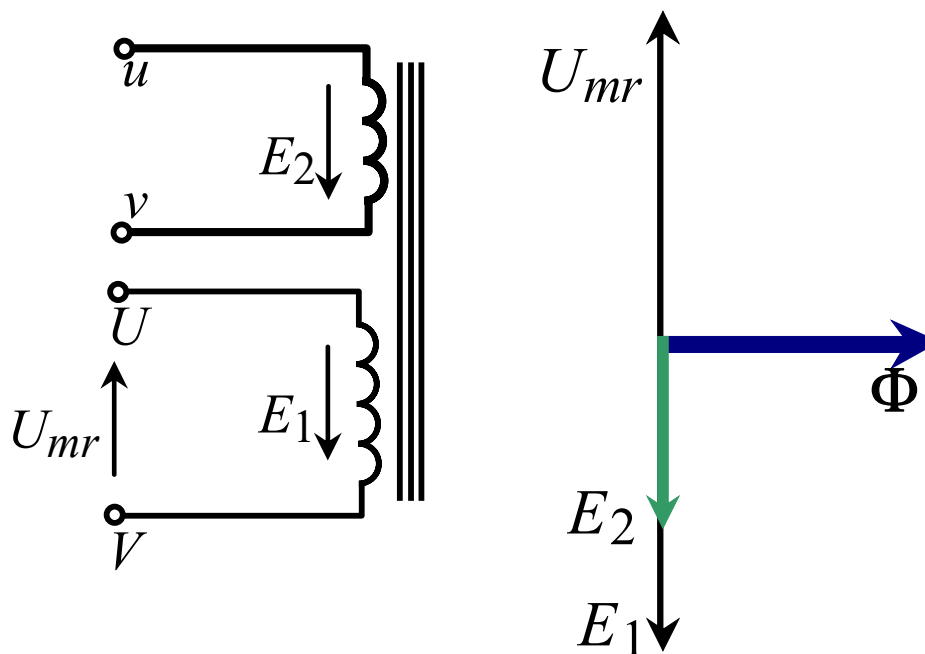
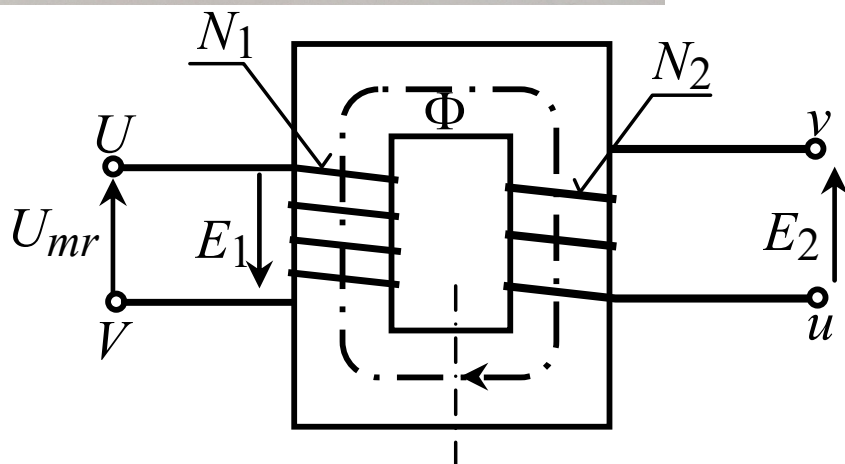


Fazorski dijagram idealne prigušnice.

Fazorski dijagram idealnog transformatora u praznom hodu

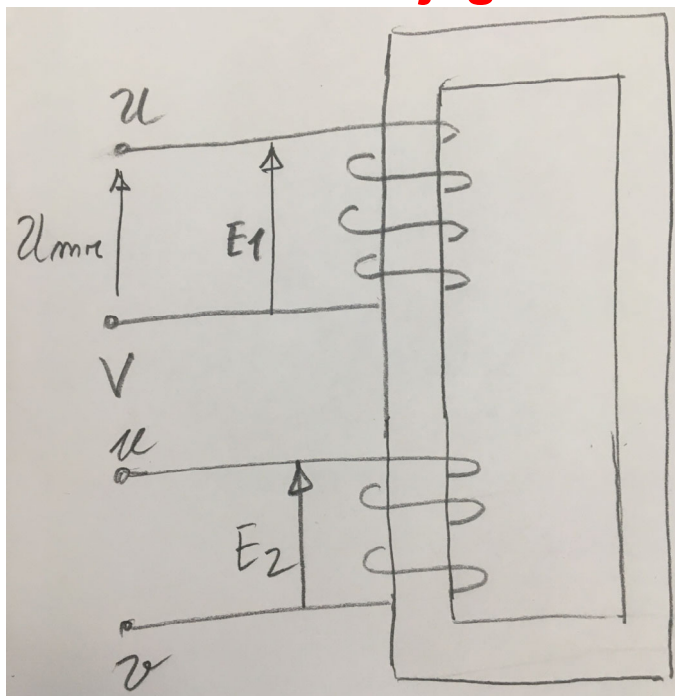


Namotaji su motani u istom smeru. Prožeti su zajedničkim fluksom koji u njima indukuje elektromotorne sile istog smera.

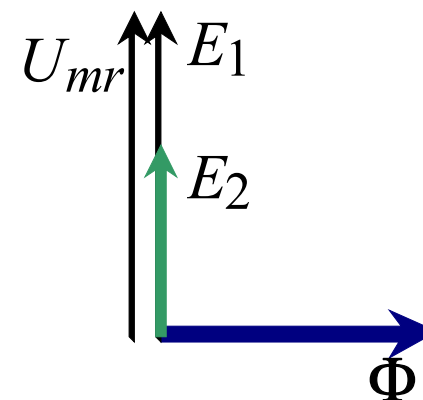
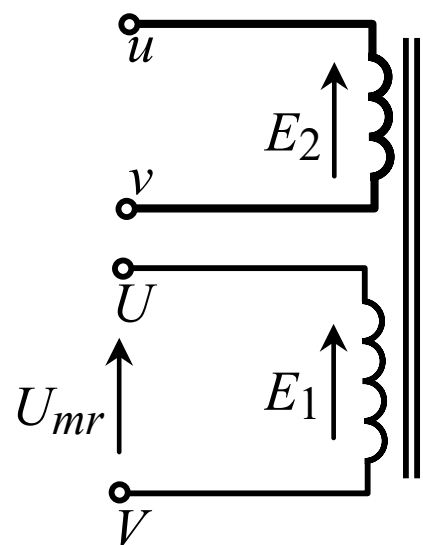
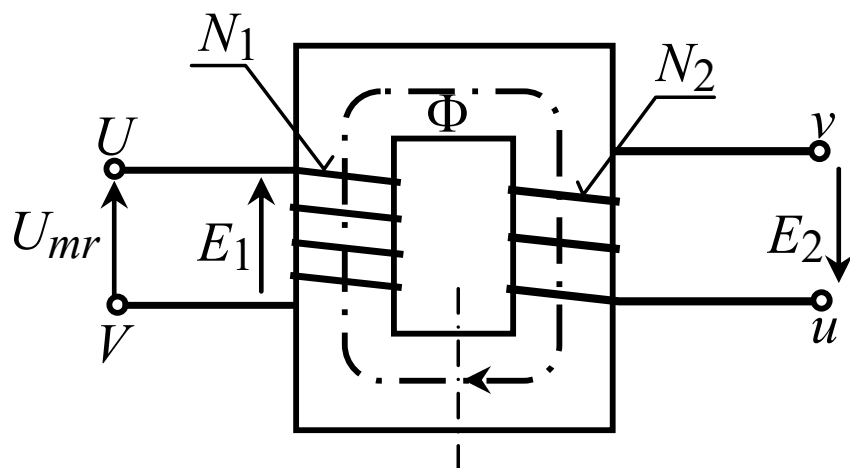


Velikim slovom se označavaju stezaljke VN namotaja a sa istim malim slovom stezaljke NN namotaj koje imaju isti polaritet.

Fazorski dijagram idealnog transformatora u praznom hodu



Namotaji su motani u istom smeru. Prožeti su zajedničkim fluksom koji u njima indukuje elektromotorne sile istog smera. Usvojen je referentni smer primereno **kontraelektromotornoj sili**.



Velikim slovom se označavaju stezaljke VN namotaja a sa istim malim slovom stezaljke NN namotaj koje imaju isti polaritet.

Broj navojaka N_1 i površina poprečnog preseka gvožđa S_{Fe} .

PRIMER 1. Neka je $B=1,6T$ koliko treba da ima navojaka trofazna prigušnica sprege Y za 20kV?

$$N_1 = \frac{U_{fazno}}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_{Fe}} = \frac{20000/\sqrt{3}}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot S_{Fe} [m^2]}$$

$S_{Fe} [cm^2]$	10000	348	1
N_1	33	935	325084

4.1.3. STRUJNA RAVNOTEŽA KOD TRANSFORMATORA.

Kada se priključi potrošač na sekundar pojaviće se struja i_2 . Prema Amperovom zakonu mora postojati **jednakost strujnih obuhvata** pri opterećenju:

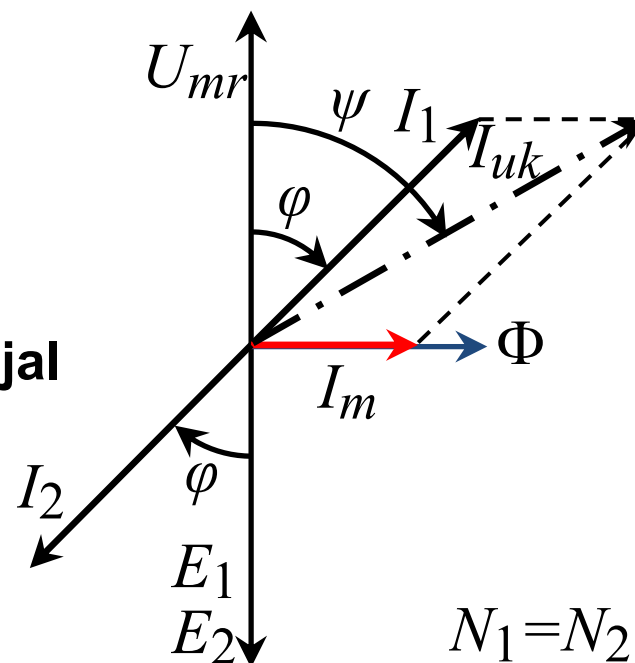
$$i_1 N_1 - i_2 N_2 = H \cdot l_{Fe} = 0,$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Transformatori transformišu struju obrnuto proporcionalno broju navojaka.

Kod realnih transformatora magnetni materijal ima konačnu permeabilnost što uslovljava pojavu struje magnećenja. Kada se uzme u obzir ukupna primarna struja a ne samo struja opterećenja

$$I_{1uk} \cdot N_1 - I_2 \cdot N_2 = I_m \cdot N_1.$$



A pošto je I_m malo: $I_{1uk} \cdot N_1 \approx I_2 \cdot N_2$

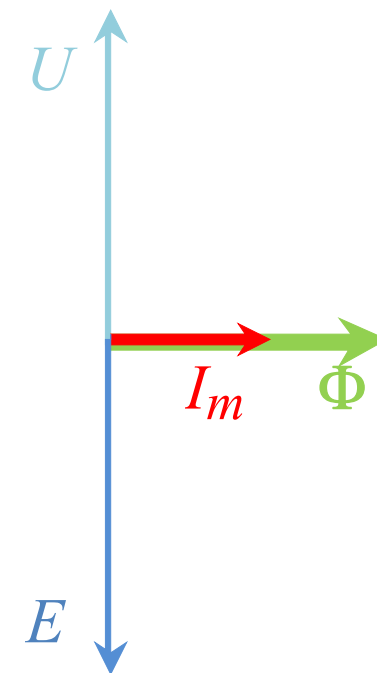
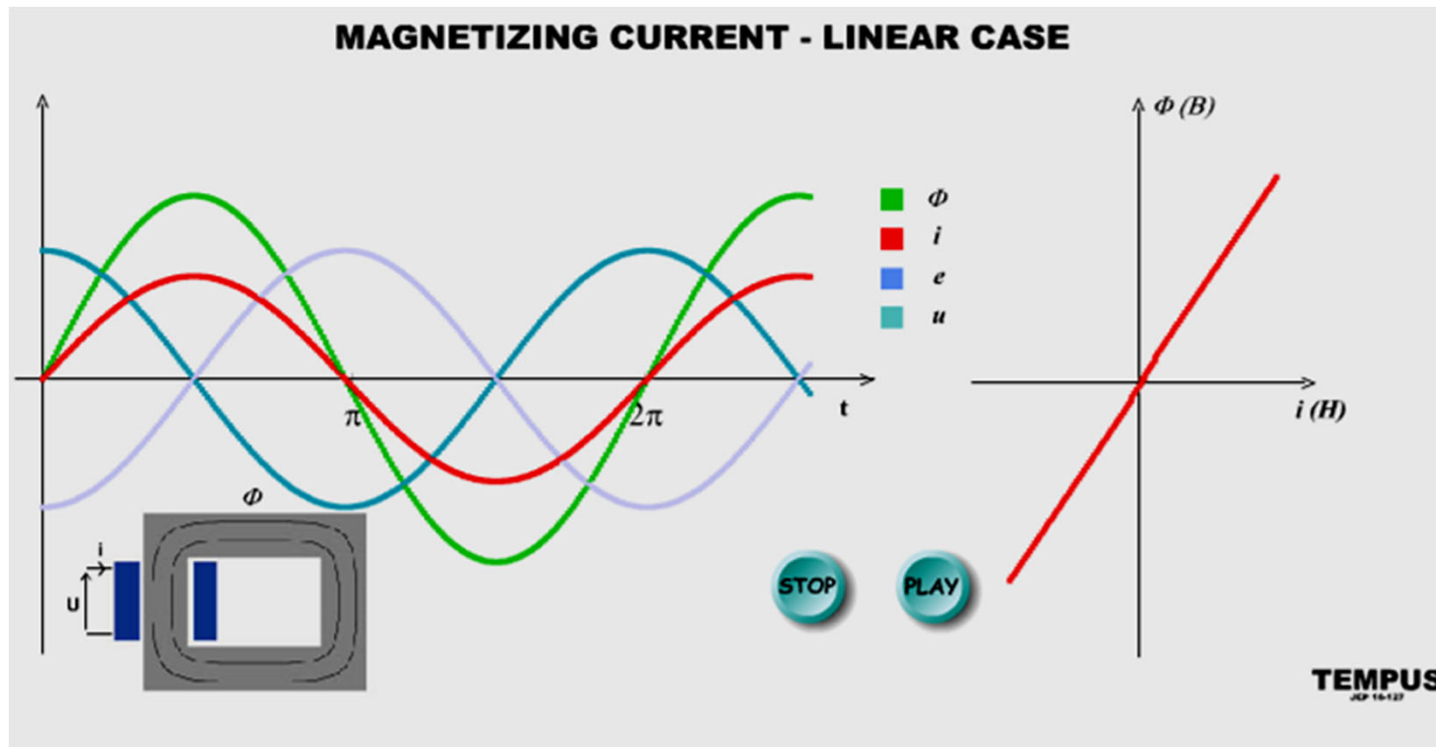
Fazorski dijagram opterećenog tr.

Struja magnećenja je u fazi sa fluksom. Ako se pretpostavi linearna karakteristika magnećenja, tada je struja magnećenja prostoperiodična. U stvarnosti nije tako.

Primetiti da faktor snage transformatora određuje potrošač koji je priključne na njegov sekundar.

4.6.1 OSNOVNI HARMONIK STRUJE MAGNEĆENJA

Linearna karakteristika magnećenja



Za linearno magnetno kolo struja magnećenja je prostoperiodična.
Struja magnećenja magneti magnetno kolo, ima vrednost $0,01 \div 0,02 I_n$.

$$I_m = \frac{H l_{Fe}}{N} \sim l_{Fe} \sim \sqrt[4]{S_n}$$

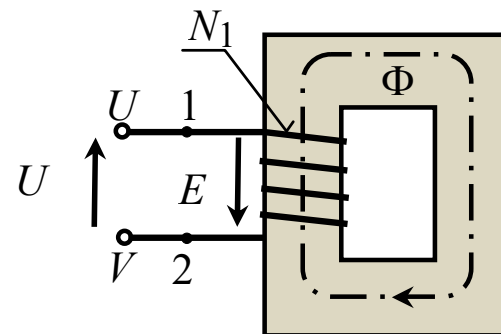
$$I_n = J S_{Cu} \sim l^2 \sim (\sqrt[4]{S_n})^2$$

$$I_m [\%] = \frac{I_m}{I_n} 100 \sim \frac{1}{\sqrt[4]{S_n}}$$

Struja magnećenja opada kako nominalna snaga transformatora raste.

STRUJE MAGNEĆENJA - Linearna karakteristika magnećenja

KOLIKI ĆE SE STRUJA MAGNEĆENJA USPOSTAVITI ?



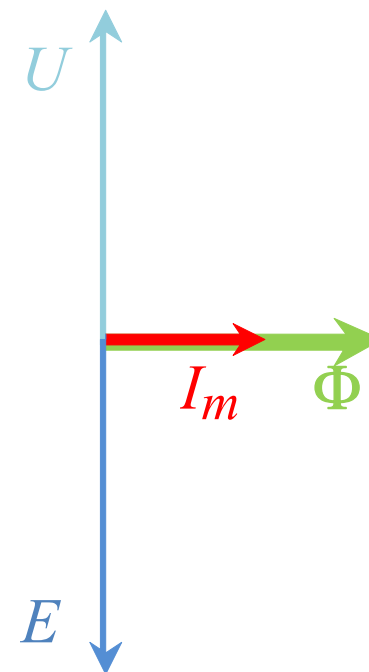
U mehanizmu uspostavljanja naponske ravnoteže uz zanemarene termogene otpornosti:

-Indukovani napon mora dostići veličinu nametnutog napona mreže. $U = E = 4,44 f \cdot N_1 \cdot \Phi$

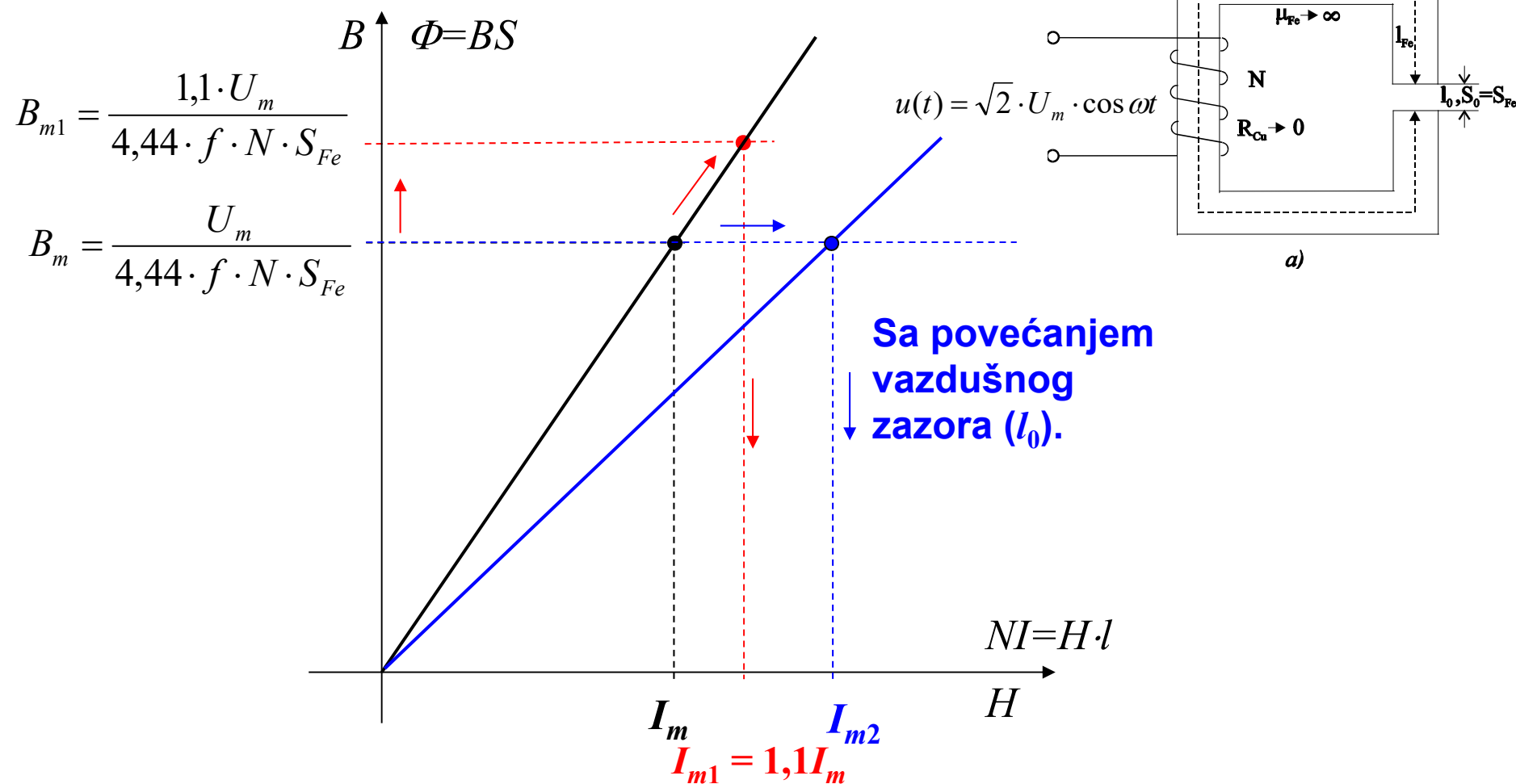
-Toliki indukovani napon se uspostavlja sam po sebi jer struja magnećenja pod dejstvom napona mreže raste dok se ne uspostavi dovoljno veliki naizmenični fluks.

-Vrednost potrebne struje I_m definsana je potrebnom MPS ($N_1 \cdot I_m$) da bi se u magnetnom kolu imala potrebna indukcija (fluks) da bi indukovani napon bio jednak sa naponom mreže.

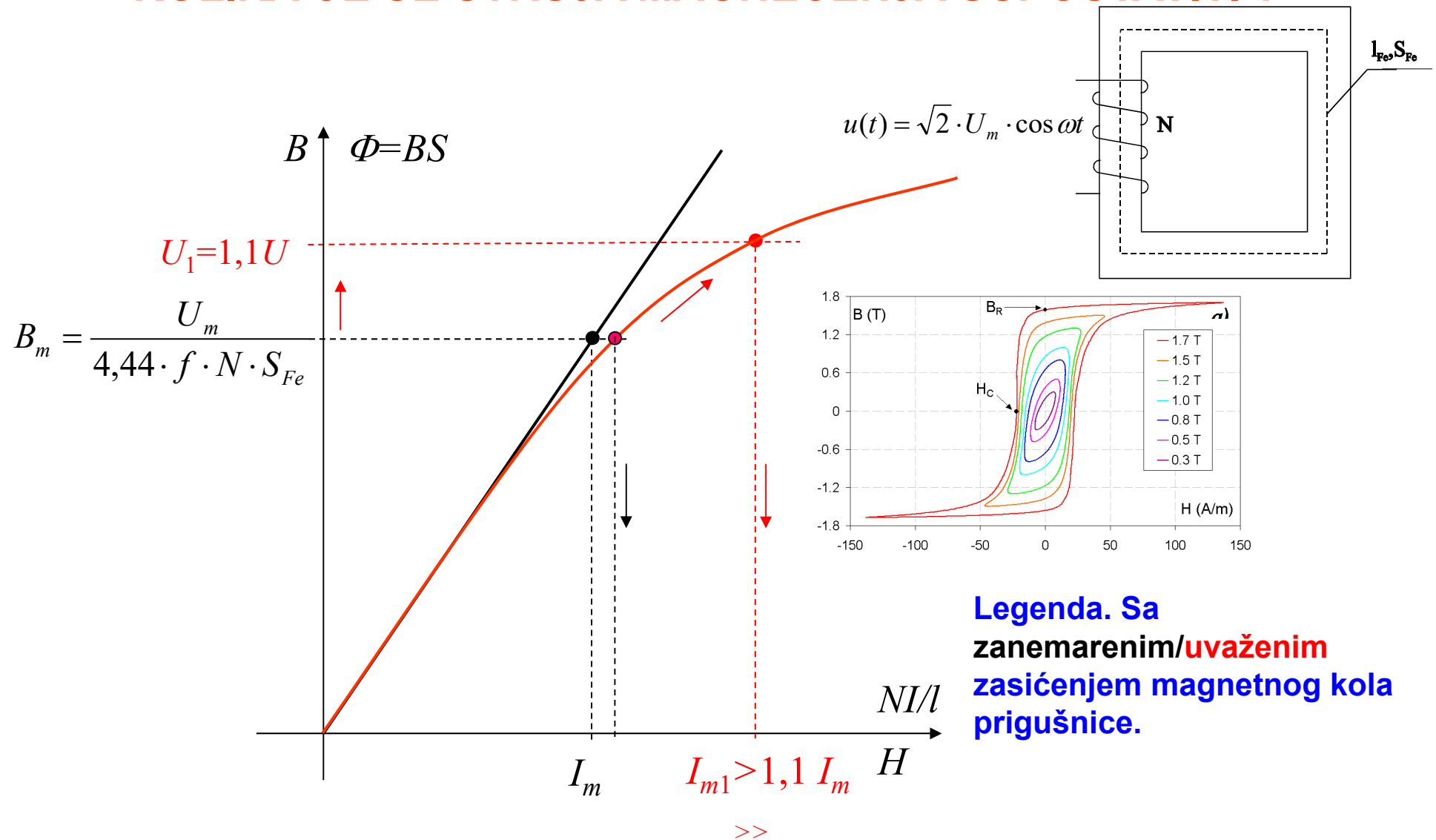
$$\Phi = \frac{N_1 I_m}{\mathfrak{R}_m}$$



KOLIKA ĆE SE STRUJA MAGNEĆENJA USPOSTAVITI ?



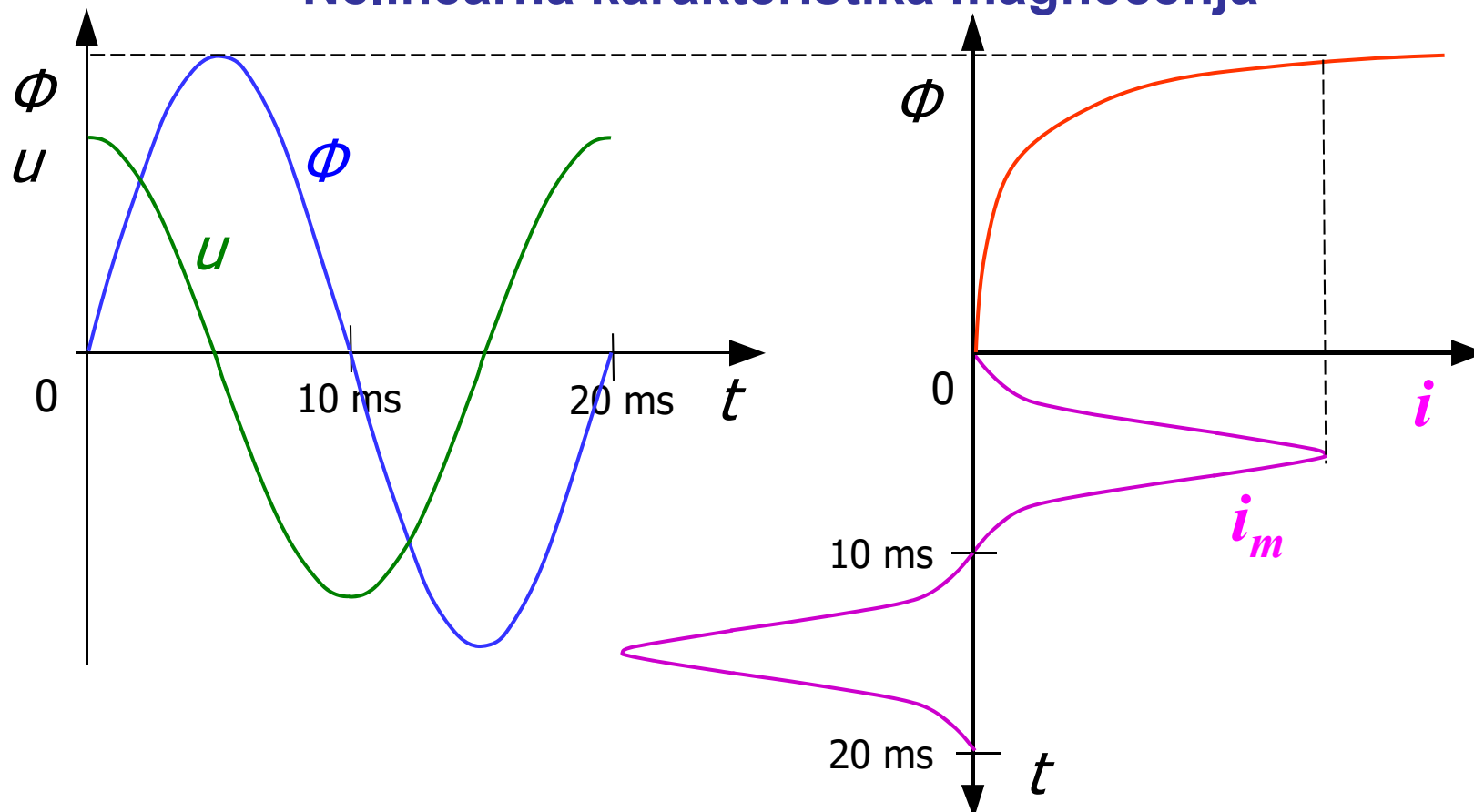
KOLIKA ĆE SE STRUJA MAGNEĆENJA USPOSTAVITI ?



Ako je radna tačka postavljena visoko na kolenu k-ke magnećenja pri porastu napona mreže može se pojaviti prevelika struja koja će prouzrokovati pregrevanje.

4.6.2. TRANSFORMATORI KAO IZVORI VIŠIH HARMONIKA

Nelinearna karakteristika magnećenja



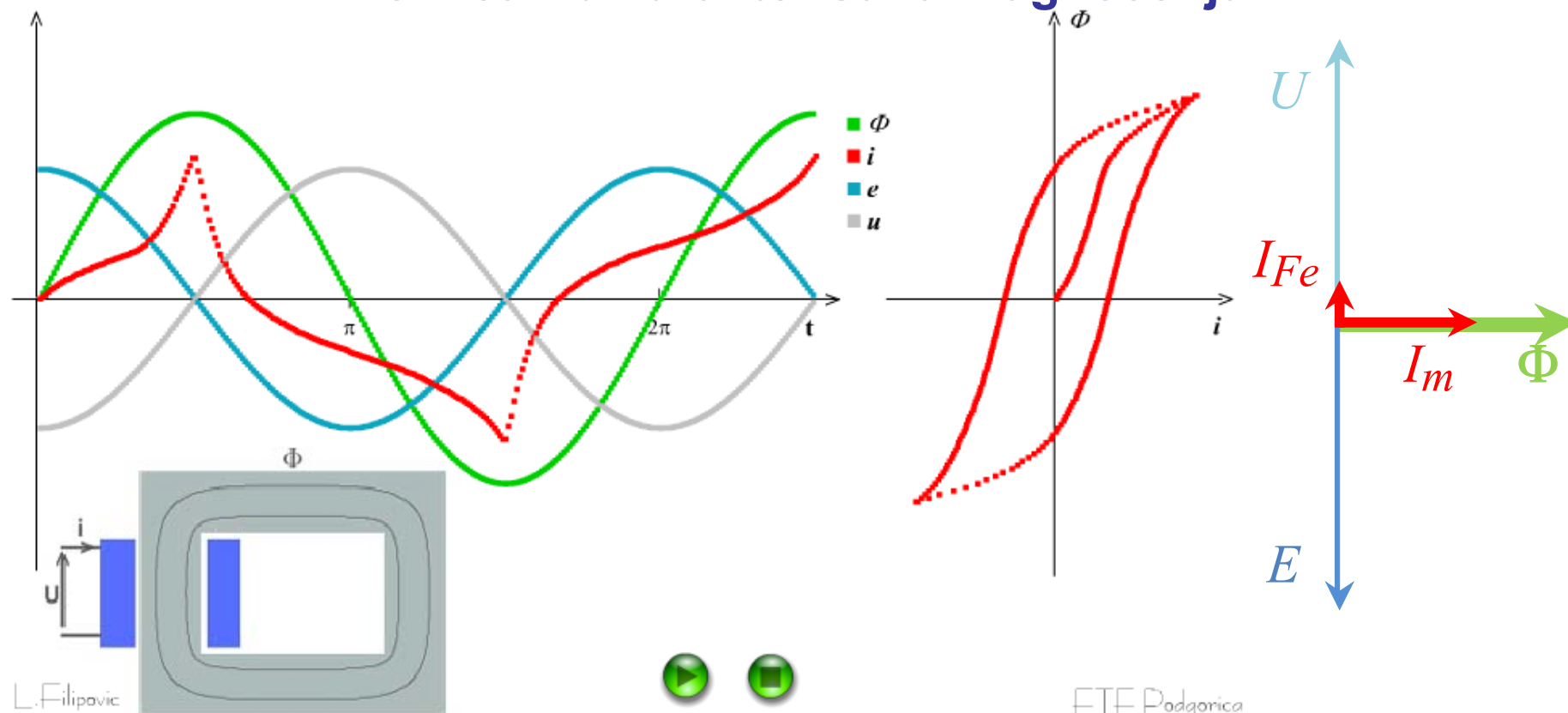
Napon mreže je pp. → Fluks je pp. “Fluks igra kako napon svira” → Indukovani napon u sekundaru TR je pp (pp znači prostoperiodičan).

FLUKS (napon) šeta radnu tačku po karakteristici magnećenja. Do vremenske zavisnosti za struju se dolazi kada se pp. fluks preslika preko nelinearne k-ke magnećenja. Struja magnećenja je složenoperiodična funkcija.

Kada je k-ka magnećenja nelinearna → struja magnećenja i_m je neprostoperiodična (ima neparne harmonike).

4.6.2. TRANSFORMATORI KAO IZVORI VIŠIH HARMONIKA

Nelinearna karakteristika magnećenja

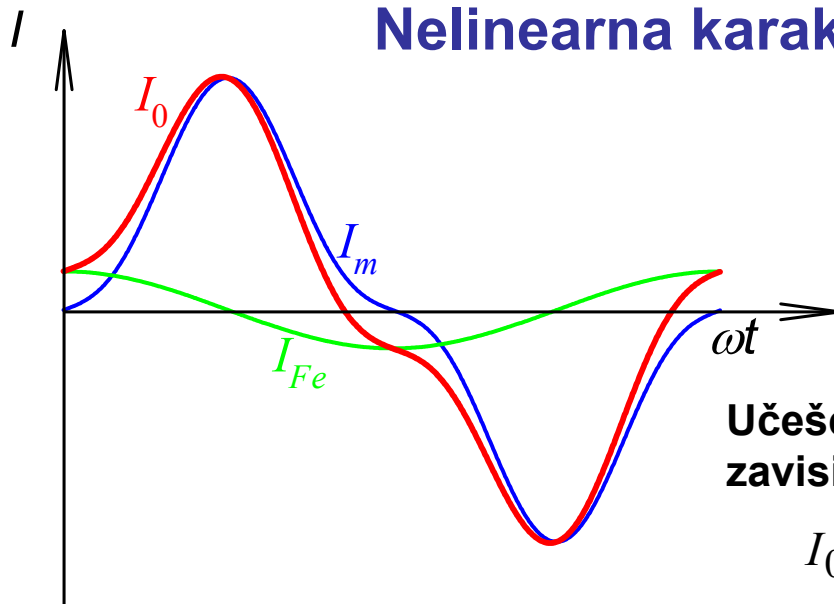


Talasni oblici struje, fluksa i EMS zavise od nelinearnosti magnetnog kola i izobličenja su sve veća što se radna tačka na B-H k-ci kreće bliže zasićenju. Na oblik struje i fluksa trofaznih transformatora veoma utiču **sprega primara i sekundara** i **konstrukcija magnetnog kola**.

Sl.2.6.04. -Kada je feromagnetni kostur zasićen, struje magnećenja (I_m) postiže velike vrednosti. Ta struja fazno zaostaje za naponom mreže za $\pi/2$. Komponenta (I_{Fe}) je u fazi sa naponom mreže i nadoknađuje gubitke u gvožđu.

4.6.2. TRANSFORMATORI KAO IZVORI VIŠIH HARMONIKA

Nelinearna karakteristika magnećenja



Struja magnećenja I_m zbog karakterističnog oblika ima samo neparne harmonike:

I_m sadrži $\sin \omega t, \sin 3\omega t, \sin 5\omega t, \dots$ I_{Fe} sadrži $\cos \omega t$

$$I_0 = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{3m}^2 + I_{5m}^2 + I_{7m}^2 + I_{Fe}^2}$$

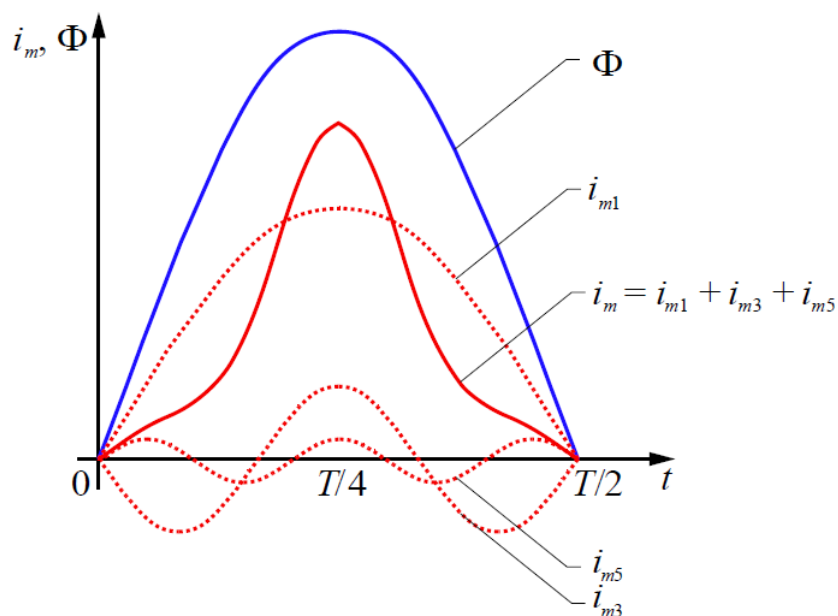
Učešće pojedinih harmonika u struji magnećenja zavisi od oblika krive magnećenja i stepena zasićenja.

$$I_0 = I_{1m} \sqrt{1^2 + 0,5^2 + 0,1^2 + 0,02^2 + 0,4^2} = 1,193 I_{1m}$$

- I_0 – Struja praznog hoda transformatora pored dominantne reaktivne komponente I_m , zbog histerezisa ima i aktivnu komponentu I_{Fe} ;
- I_m – karakteriše magnećenje (reaktivna komponenta);
- I_{Fe} – karakteriše gubitke u gvožđu (aktivna komponenta);

Ukidanje 3-harmonika I_m izaziva deformaciju oblika fluksa tj. pojavljuje se 3-harm. fluksa koji indukuje 3-harm. EMS. Ovo ima za posledicu pojavu napona na namotaju koji je veći od maksimalne vrednosti osnovnog harmonika.

4.6.2.1 Treći harmonik struje magnećenja



Harmonici struje magnećenja:

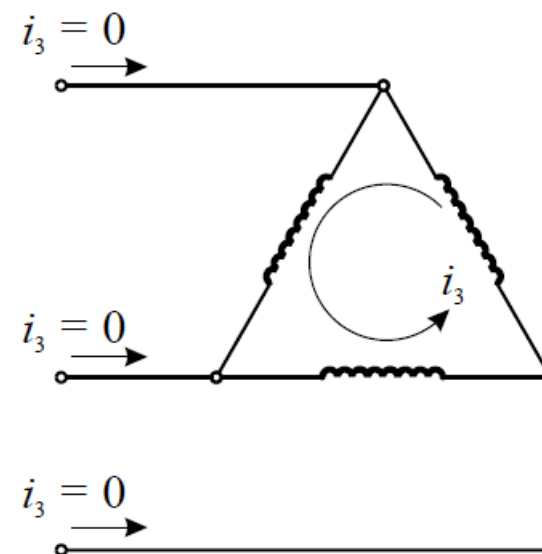
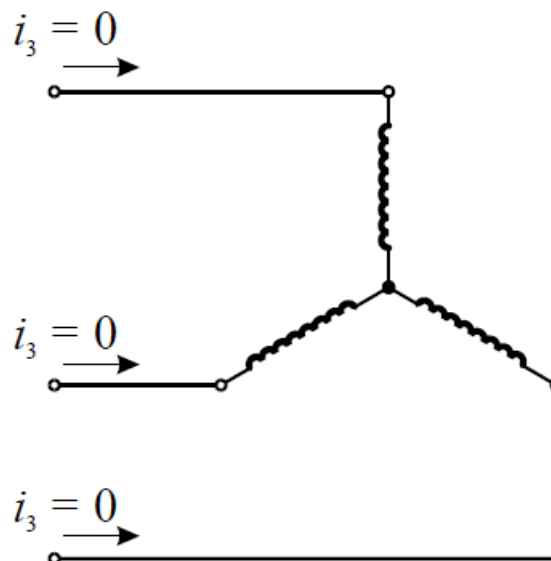
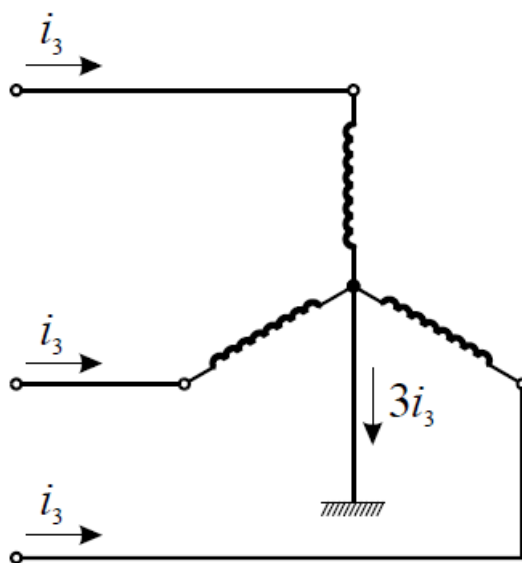
$$i_{a\nu} = I_{m\nu} \sin(\nu\omega t)$$

$$i_{b\nu} = I_{m\nu} \sin(\nu\omega t - \nu \cdot 2\pi / 3)$$

$$i_{c\nu} = I_{m\nu} \sin(\nu\omega t - \nu \cdot 4\pi / 3)$$

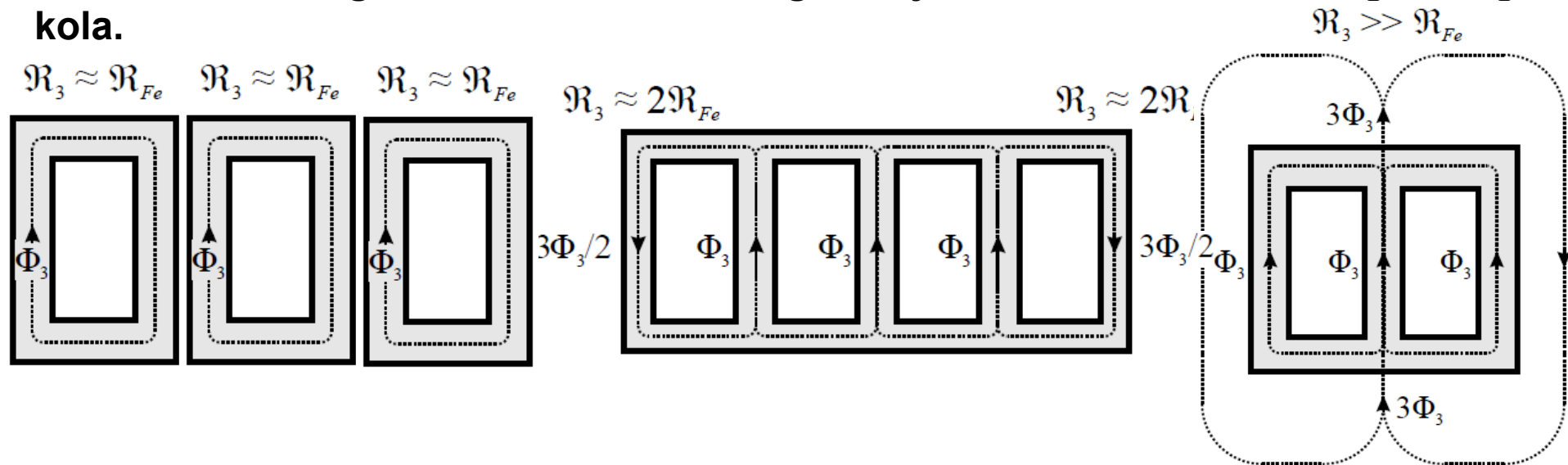
Harmonici struje magnećenja reda $\nu=3k$ su istofazni- **harmonici nultog redosleda**. $i_3 = I_{m3} \sin(3\omega t)$

Na uspostavljanje trećeg harmonika struje magnećenja utiče tip sprege namotaja.



4.6.2.2 Treći harmonik fluksa magnetenja

Ako izostane treći harmonik struje magnetenja pojaviće se treći harmonik fluksa. Na veličinu trećeg harmonika fluksa i odgovarajuće EMS utiče oblik magnetnog kola.



Kod tri jednofazna transformatora i kod ogrnutog (petostubni) transformatora postoji povratni put kroz magnetno kolo za fluks trećeg harmonika → Φ_3 može da poprimi velike vrednosti zbog malog magnetnog otpora.

Kod trostubnog transformatora fluks trećeg harmonika može da se zatvori samo kroz vazduh i trafo sud koji imaju veliki magnetni otpor → Φ_3 je znatno manji.

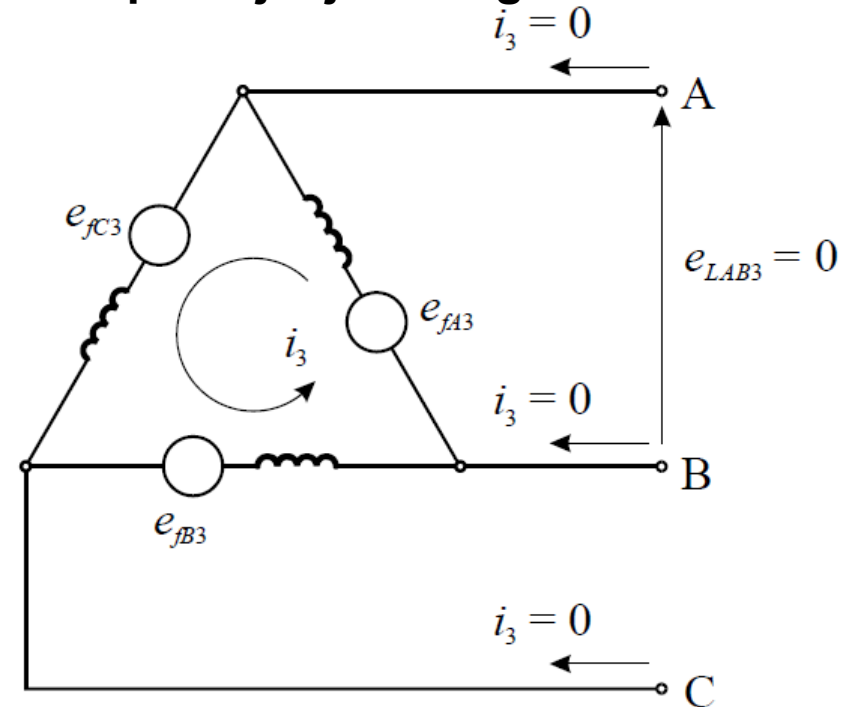
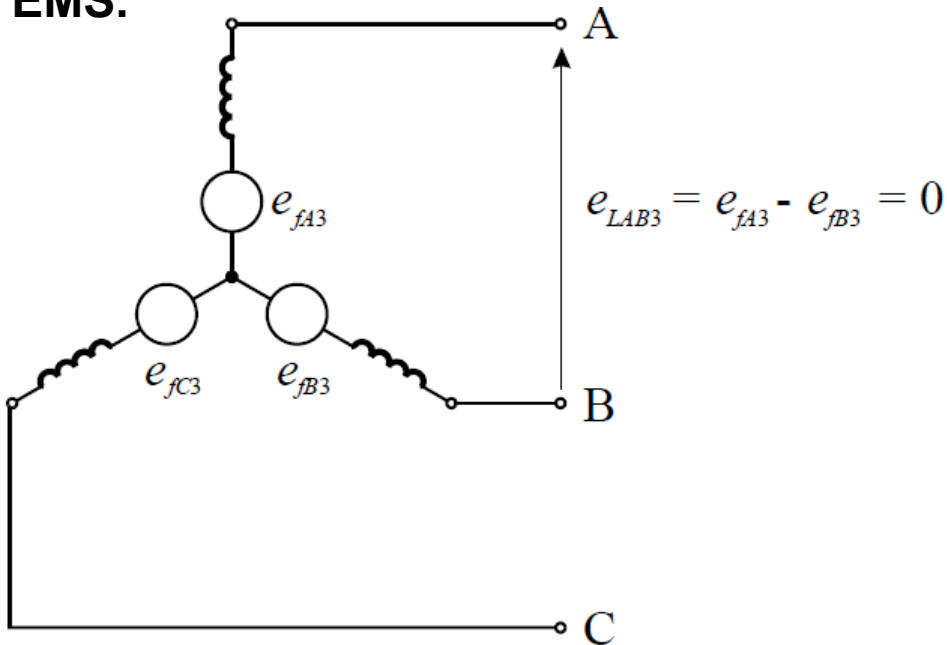
$$\Phi_3 = \frac{N_1 I_{m3}}{\mathcal{R}_{m3}}$$

4.6.2.1 Treći harmonik indukovane elektromotorne sile

Ukoliko postoji treći harmonik fluksa on indukuje treći harmonik EMS srazmerno svojoj amplitudi. Treći harmonika indukcije ima amplitudu $B_{3m} \approx 0,3B_{1m}$ i trostruku učestanost. Efektivna vrednost fazne EMS trećeg harmonika može iznositi čak:

$$E_{3eff} = 4,44B_{m3} \cdot S_{Fe} \cdot N \cdot 3f_1 \approx 0,9E_{1eff}$$

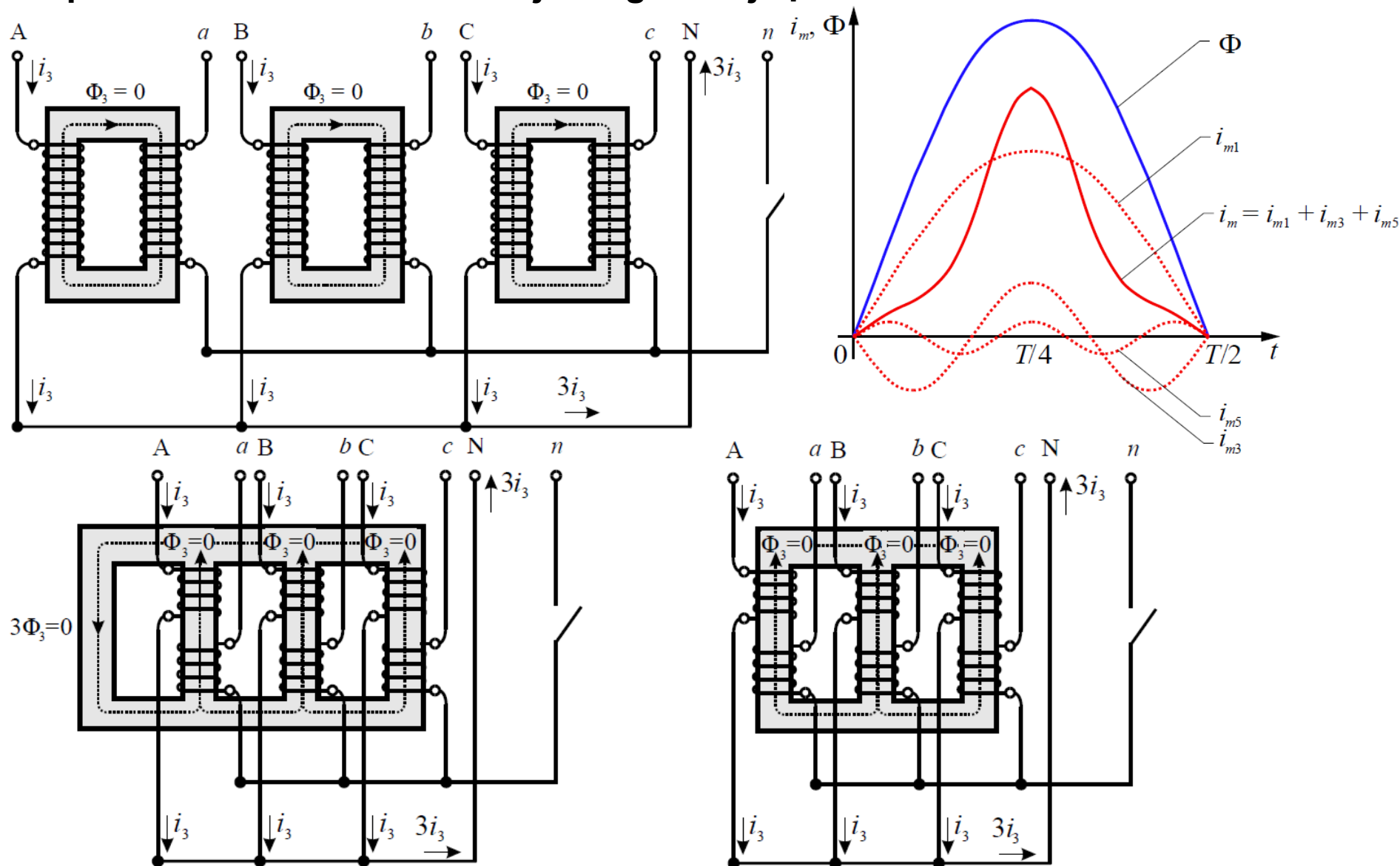
Zbog toga je veoma bitno da se kod transformatora onemogući uspostavljanje trećeg harmonika fluksa kako bi se onemogućilo postojanje trećeg harmonika EMS.



U linijskom naponu nema trećeg harmonika. U sprezi trougao treći harmonik faznog napona tera treći harmonik struje u trouglu.

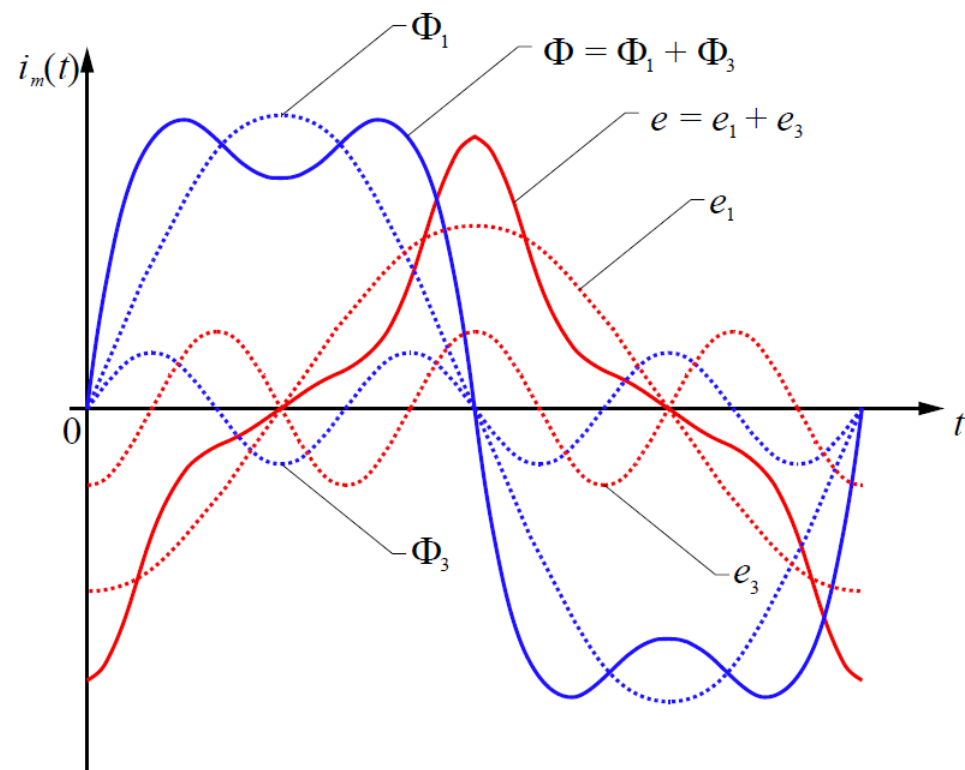
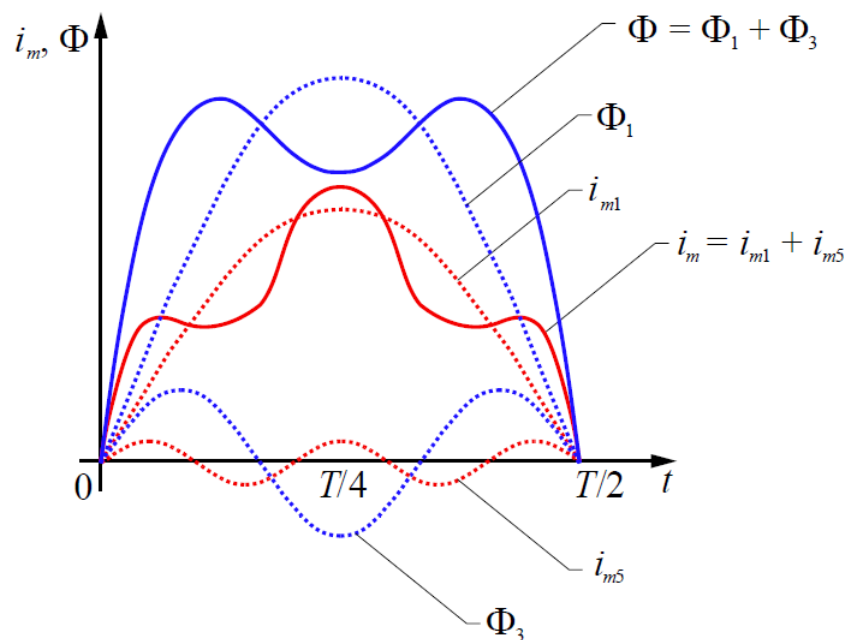
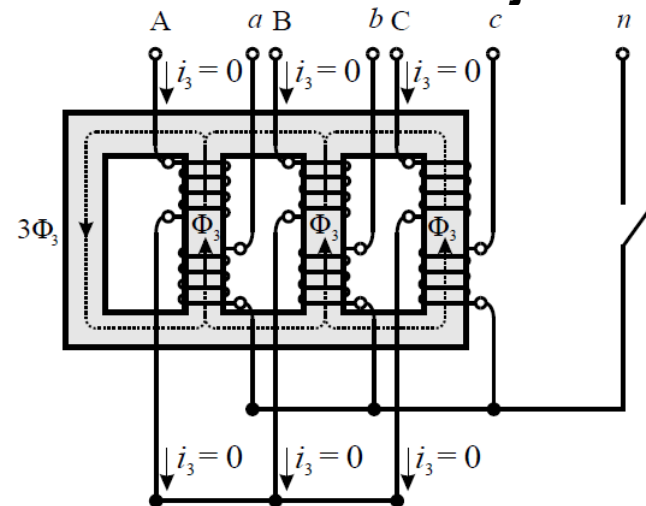
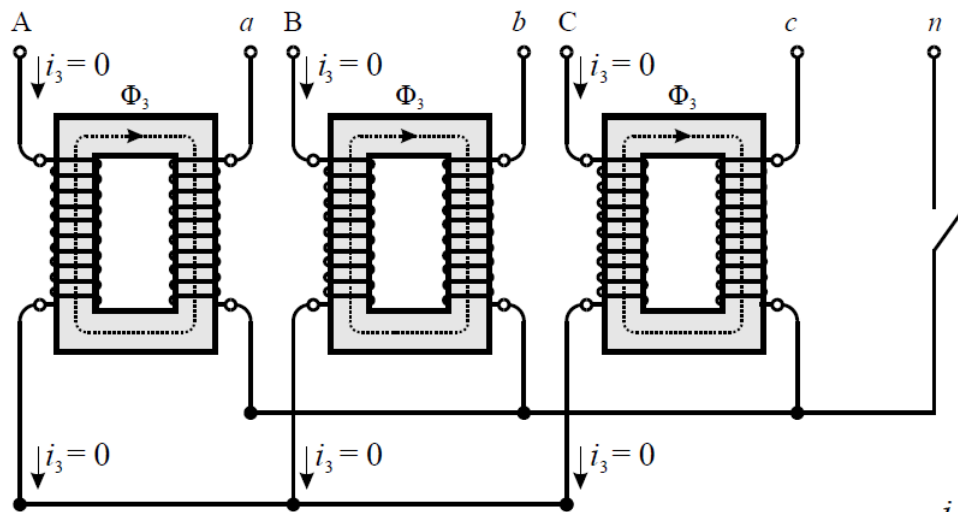
4.6.3 Magnećenje transformatora sprege YNyn i YNy

Transformatori koji na primaru imaju uzemljeno zvezdište, sekundar je u zvezdi sa uzemljenim ili izolovanim zvezdištem. Kako je zvezdište primara uzemljeno može da potekne treći harmonik struje magnećenja pa fluks i EMS nisu izobličene.



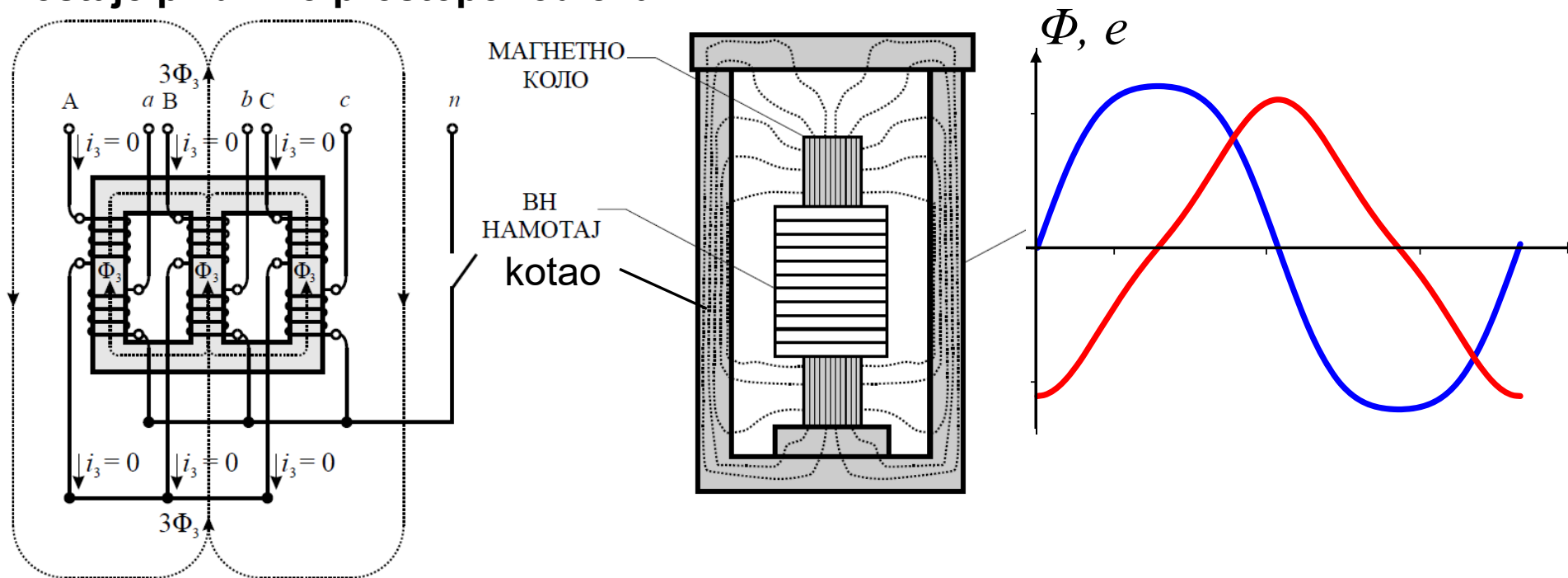
4.6.4 Magnećenje transformatora sprege Yyn ili Yy

Zvezdište primara je izolovano, ne može da potekne treći harmonik struje magnećenja pa su fluks i EMS izobličeni.



4.6.4 Magnećenje transformatora sprege Yyn ili Yy

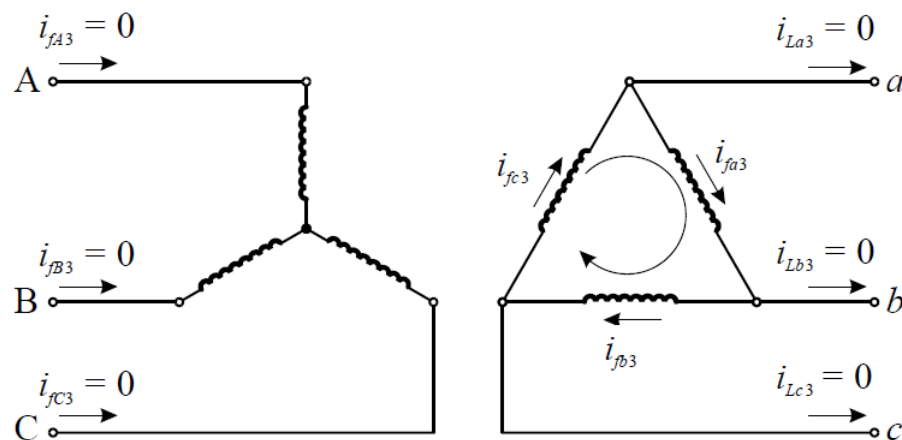
Zvezdište primara je izolovano, ne može da potekne treći harmonik struje magnećenja, pa je fluks izobličen. Magnetna otpornost za treći harmonik fluksa je veoma velika jer se treći harmonik fluksa može zatvoriti od jarma prema jarmu kroz ulje, transformatorski sud i kroz vazduh – putem rasipnog fluksa. Pošto je magnetna otpornost te sredine velika treći harmonik fluksa je znatno manje vrednosti nego kod tri monofazna ili ogrnutog tipa transformatora. Zato EMS ostaje približno prostoperiodična.



Zaključak. Tri monofazna transformatora i transformator ogrnutog tipa (4-stubni, 5-stubni) ne primenjuju se u sprezi neuzemljena zvezda na primaru.

4.6.5 Magnećenje transformatora sa namotajem u trouglu

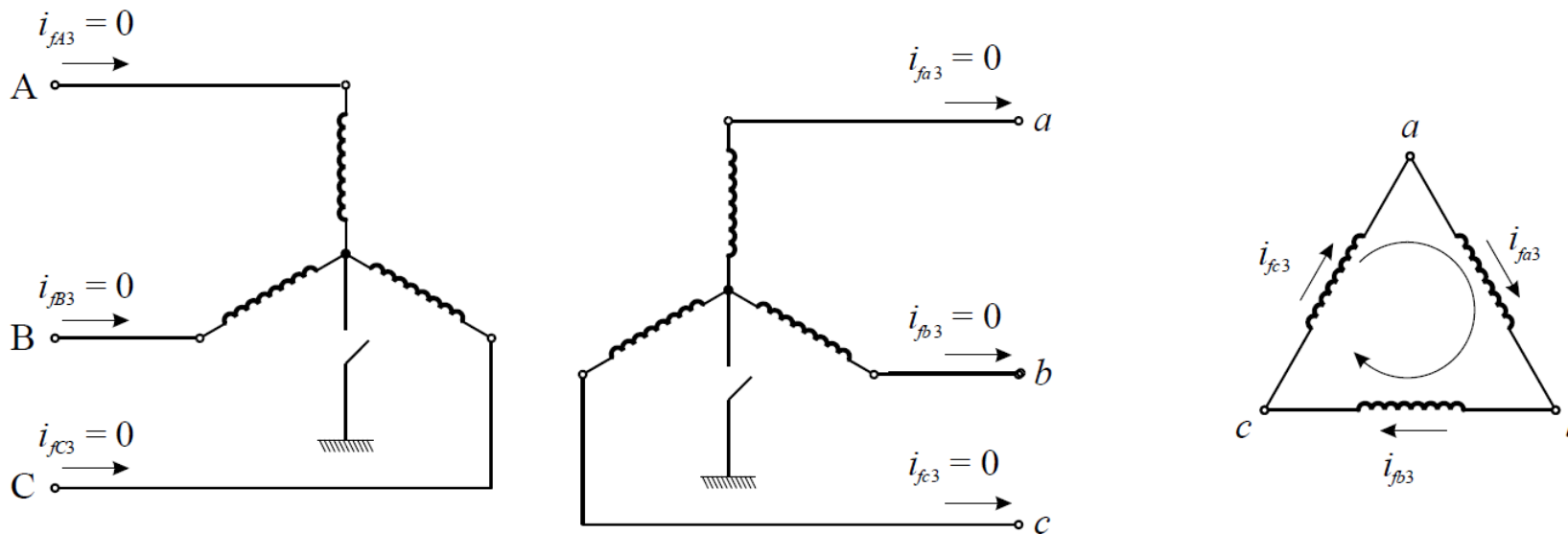
Kada god postoji treći harmonik fluksa (jer je primarna strana neuzemljena zvezda), a barem jedan namotaj transformatora je u trouglu, tada se kroz trougao uspostavlja struja trećeg harmonika. Treći harmonik fluksa će indukovati treći harmonik EMS u trouglu, koji će poterati treći harmonik struje kroz trougao, ova struja je praćena svojim fluksom koji je u protiv fazi sa fluksom koji ga je izazvao. Na taj način reakcija trećeg harmonika struje u sekundaru u trouglu poništava izobličenje talasnog oblika fluksa, pa EMS ostaju sinusoidalne.



Zaključak. Prisustvo sprege trougao na bar jednoj strani transformatora eliminiše problem izobličenja fluksa.

4.6.6 Tercijarni namotaj

Zbog osobine sprege trougao da se unutar trougla uspostavlja fazna struja trećeg harmonika koja poništava treći harmonik fluksa većina transformatora ima bar jednu stranu spregnutu u trougao. U nekim slučajevima je poželjno da obe strane budu u zvezdi transformatori 400/220kV/kV, 400/110kV/kV jer je jeftinija izolacija namotaja u zvezdi tada se na stubove transformatora dodaje i treći namotaj – tercijar spregnut u trougao.



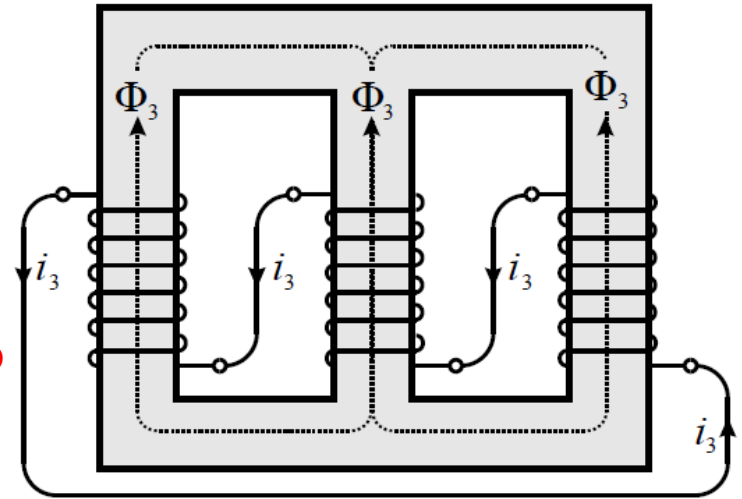
Može se koristiti i za priključak potrošača, u elektrani ili transformatorskoj stanici gde su potrebna 3 različita napona.

Ako se ne koristi za napajanje potrošača naziva se i stabilizacijski namot i nalazi se u praznom hodu.

Primer tronamotajnog transformatora s tercijarom: YNyn0d5

4.6.6 Tercijarni namotaj

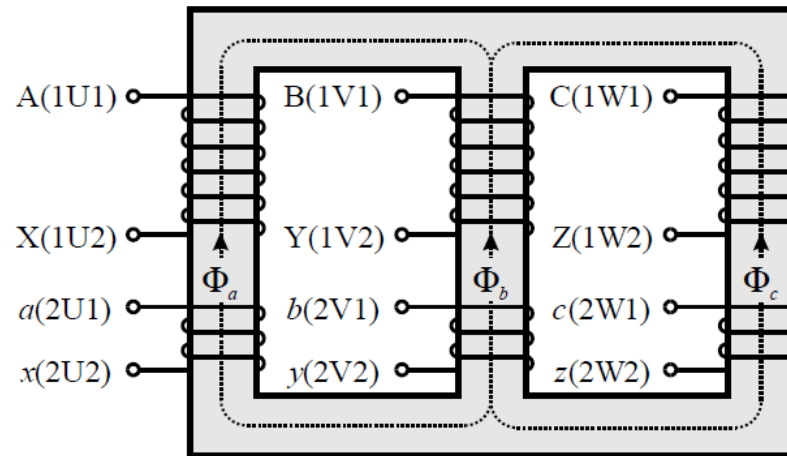
Tercijar je kratkospojeni namot malog otpora, jednoliko razdeljen na sva 3 stuba tako da su svi navojci spojeni na red—**namotaja spojen u trougao**. Tercijar je namotan prvi do stuba i sprečava zatvaranje 3.harmonika flukasa u prostoru između magnetnog kola i kotla. Φ_3 u magnetnom kolu, u tercijaru će indukovati istofazne EMS koji će kroz taj namotaj proterati struju trećeg harmonika. Ta struja će svojim fluksom poništiti delovanje flukasa koji ju je indukovao tako da u magnetnom kolu preostane samo mala komponenta Φ_3 potrebna za indukovanje struje u tercijaru. Svi drugi namotaji (primar i sekundar) namotani oko istih stubova više neće biti prožeti sa Φ_3 pa neće doći do deformacije napona u njima.



U slučaju **nesimetričnog opterećenja** transformatora po fazama, kada nema nultog voda javljaju se istofazni fluksevi u jezgru- nulta komponenta. Naponi indukovani tim fluksevima menjaju-izobličili bi fazne napone. No u tercijaru će poteći struja indukovana od istofaznih flukseva u jezgru koja će svojim delovanjem poništiti delovanje istofaznih struja opterećenja.

Nulta reaktansa jednaka je direktnoj reaktansi i zato kažemo da tercijar ruši nultu reaktansu od iznosa bliskog reaktansi praznog hoda na iznos blizak reaktansi kratkog spoja.

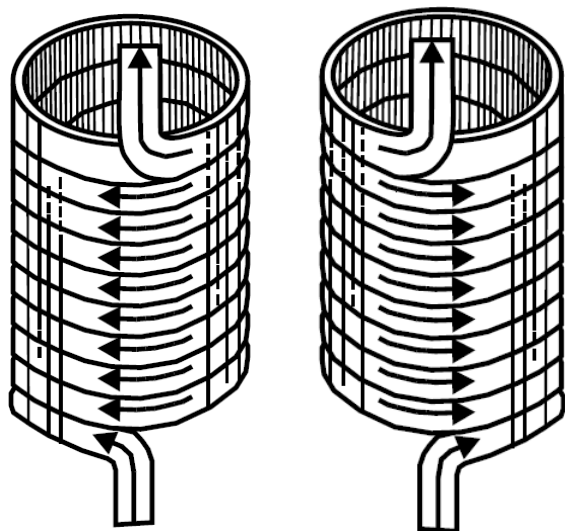
4.2.2.2 Označavanje namotaja



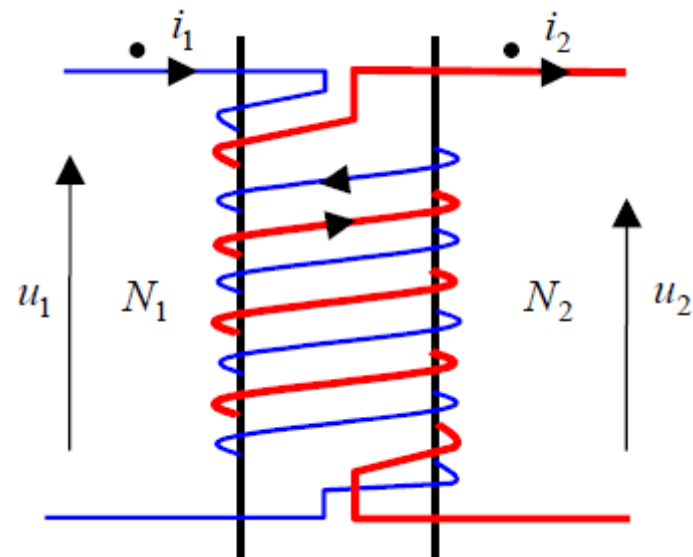
Prema važećim IEC standardima faze 3-faznih namotaja tr. označavaju se sa U, V, W ispred kojih se nalazi 1 ili 2 (1–visoko naponski, 2–nisko naponski namotaj). Iza slovne oznake se nalazi cifra 1 ili 2 (1–početak, 2–završetak namotaja). Sreću se i ranije oznake prema VDE standardu.

	IEC		VDE	
	BH	HH	BH	HH
Почетак	1U1, 1V1, 1W1	2U1, 2V1, 2W1	A, B, C	a, b, c
Завршетак	1U2, 1V2, 1W2	2U2, 2V2, 2W2	X, Y, Z	x, y, z

Pregled označavanja namotaja primara i sekundara.



4.2.2.2 HOMOLOGNI KRAJEVI NAMOTAJA

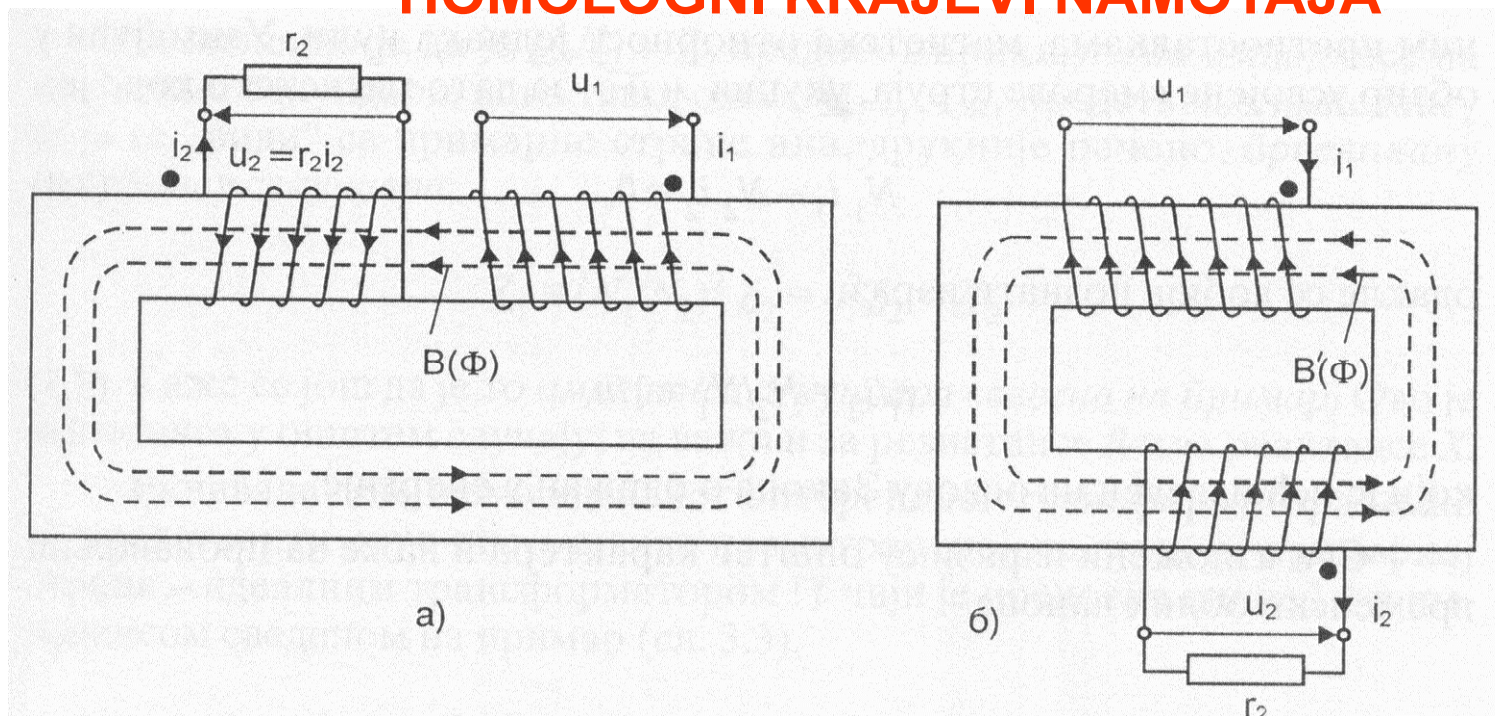


Namotaji transformatora spregnuti su zajedničkim fluksom, pa je potrebno voditi računa o smerovima indukovanih EMS, a koji zavise od smera namotavanja namotaja. Ako pretpostavimo da su oba namotaja namotani u istom smeru (nalaze se na istom stubu), tada promenljivi magnetski fluks indukuje između početnog i krajnjeg priključka jednog i drugog namotaja napon istog polariteta (smera). U slučaju da su ovi namotaji suprotno motani, indukovani naponi bili bi u protiv fazi. **Homologi – istorodni (saglasni) krajevi primarnog i sekundarnog namotaja su krajevi istog polariteta. Homologi krajevi su u el. kolu označeni tačkicom.**

Koji je smer struje sekundara?

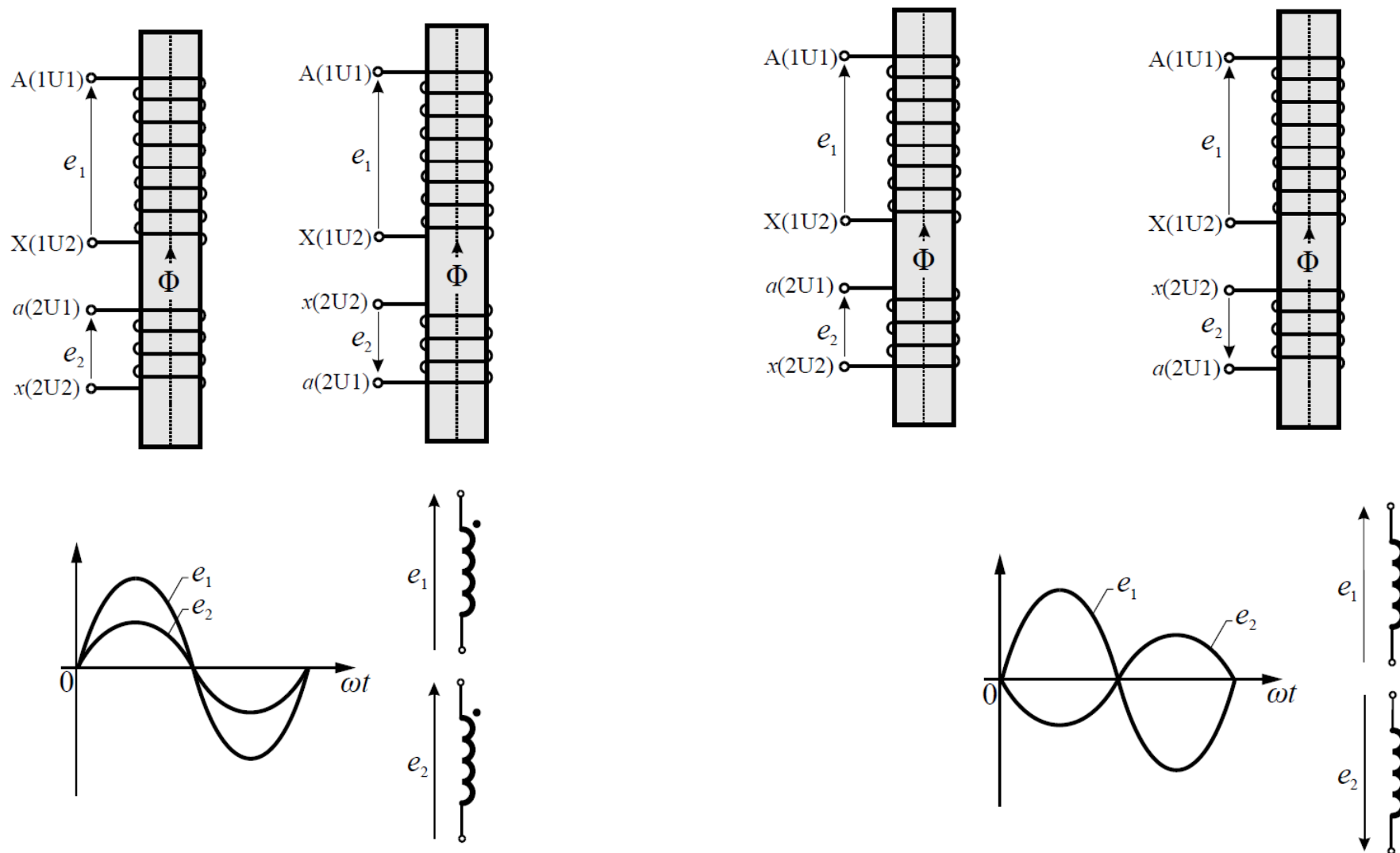
Struja sekundara potekne kada se zatvori strujni krug sekundara i ona ima DEMAGNETIŠUĆE dejstvo.

HOMOLOGNI KRAJEVI NAMOTAJA



Posledica ovako definisanih homolognih krajeva je: **homologni kraj za primar je onaj gde struja ulazi u namotaj**, a za **sekundar onaj kraj gde struja izlazi iz namotaja**.

Homologni krajevi su počeci oba namotaja ako su motani u istom smeru, odnosno početak i kraj namotaja ako su motani u suprotnim smerovima. S obzirom na način izvođenja izuzetno retko je moguće ustanoviti smer motanja namotaja. Mi možemo, međutim, eksperimentalno proizvesti promenu fluksa i utvrditi polaritet indukovano napona u oba namota u cilju određivanja homolognosti krajeva namotaja.



Smerovi namotavanja namotaja, trenutne vrednosti EMS i oznake pomoću tačke za slučaj homolognih i nehomolognih krajeva.

PRIMER 2. Neka je $B=1,6T$ koliko treba da ima navojaka trofazna prigušnica sprege Y za 20kV?

$$N = \frac{U_{fazno}}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_{Fe}} = \frac{20000/\sqrt{3}}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot S_{Fe} [m^2]}$$

$S_{Fe} [cm^2]$	10000	348	1
N_1	33	935	325084

Koliko navojaka treba da bude na sekundaru vezanom u Y da bi se dobio napon od nominalnih 400V?

$$N_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot N_1 = \frac{400/\sqrt{3}}{20000/\sqrt{3}} \cdot 935 = 19$$

PRIMER 3. Sekundarni namot jednog TR je spojen zvezdu (y) a drugog u Δ (d). Oba TR su priključena na istu mrežu i imaju jednake fluksove. Odredi koji TR treba da ima više navojaka i koliko.

Kada je sekundar spojen u Δ tada je fazni napon namotaja jednak linijskom naponu mreže $U_{fazno\Delta} = U_{linijsko}$

Kada je sekundar spojen u Y tada je fazni napon namotaja $U_{faznoY} = U_{linijsko}/\sqrt{3}$. Iz j-ne. za indukovani napon $U_{fazno} = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi$ sledi da je za spregu Δ potrebno $\sqrt{3}$ puta više navojaka nego u Y.

IDEALNI TRANSFORMATOR

Transformator je idealan ako je:

1. $R_1 = R_2 = 0$

2. $\Phi_1 = \Phi_2$

Namotaji primara i sekundara su idealno spregnuti.

3. Nema magnetnog otpora kola.

Feromagnetno jezgro ima beskonačnu permeabilnost pa nije potrebna struja magnećenja da bi se uspostavio fluks u magnetnom kolu.

4. $P_{Fe} = 0$

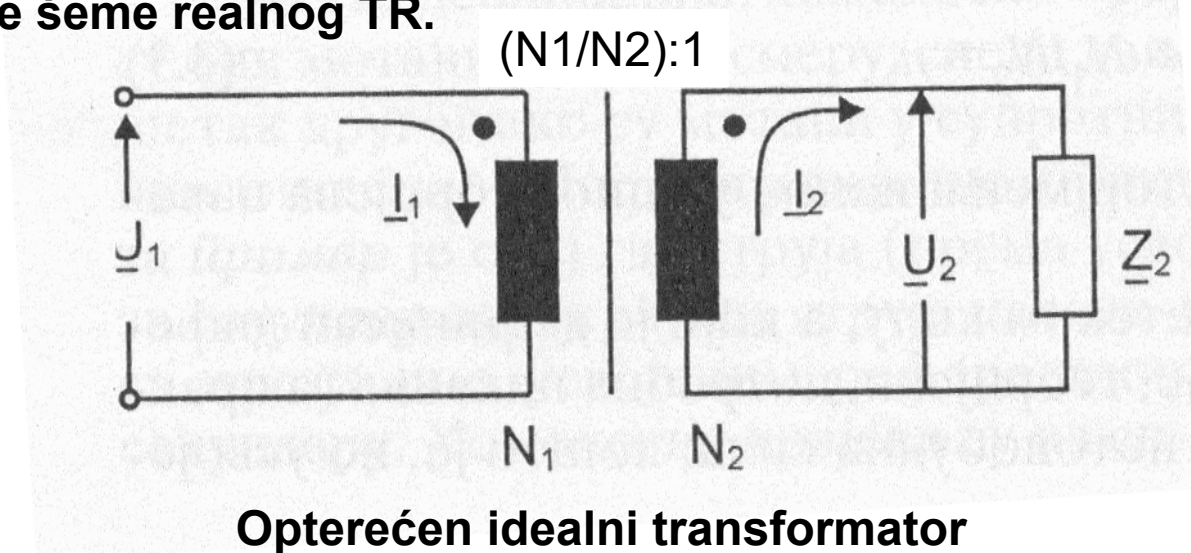
4.7. EKVIVALENTNA ŠEMA IDEALNOG TRANSFORMATORA

Do ekvivalentnog kola TR može se doći preko teorije magnetno spregnutih kola, sopstvenih i međuinduktivnosti → [knjiga](#).

Radi lakšeg shvatanja ovde će se poći od ekvivalentnog kola idealnog TR (IT), pa će se postupno ukidati usvojena uprošćenja. Tako će se postupno graditi sve složenije ekvivalentne šeme realnog TR.

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} = \frac{N_1}{N_2}$$



Opterećen idealni transformator

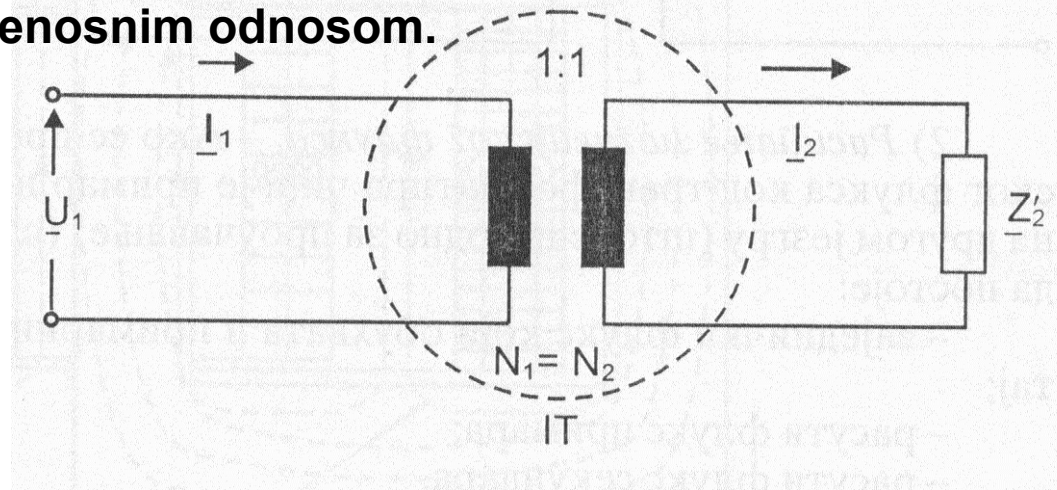
Ako se podele prethodne j-ne dobija se svedena impedansa sa sekundara na primar (preslikana impedansa sekundara).

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2}$$

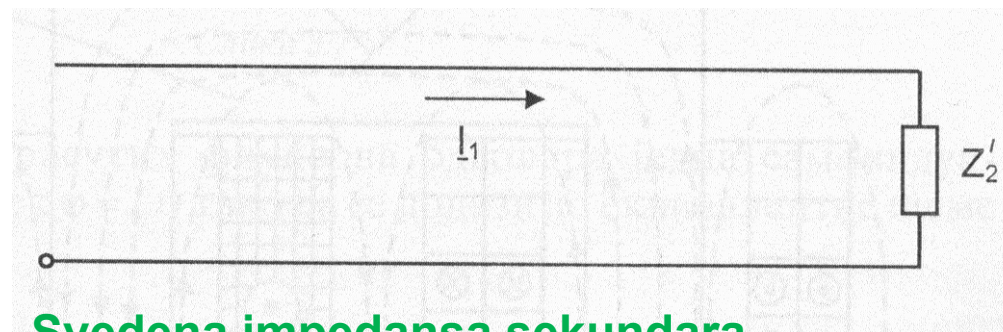
$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot Z_2 = Z'_2$$

4.7. EKVIVALENTNA ŠEMA IDELANOG TRANSFORMATORA

Ako se posmatraju pojave samo na primarnoj strani idealnog TR, tada se ekvivalentna šema idealnog opterećenog TR, može se predstaviti i ovako sa IT sa jediničnim prenosnim odnosom.



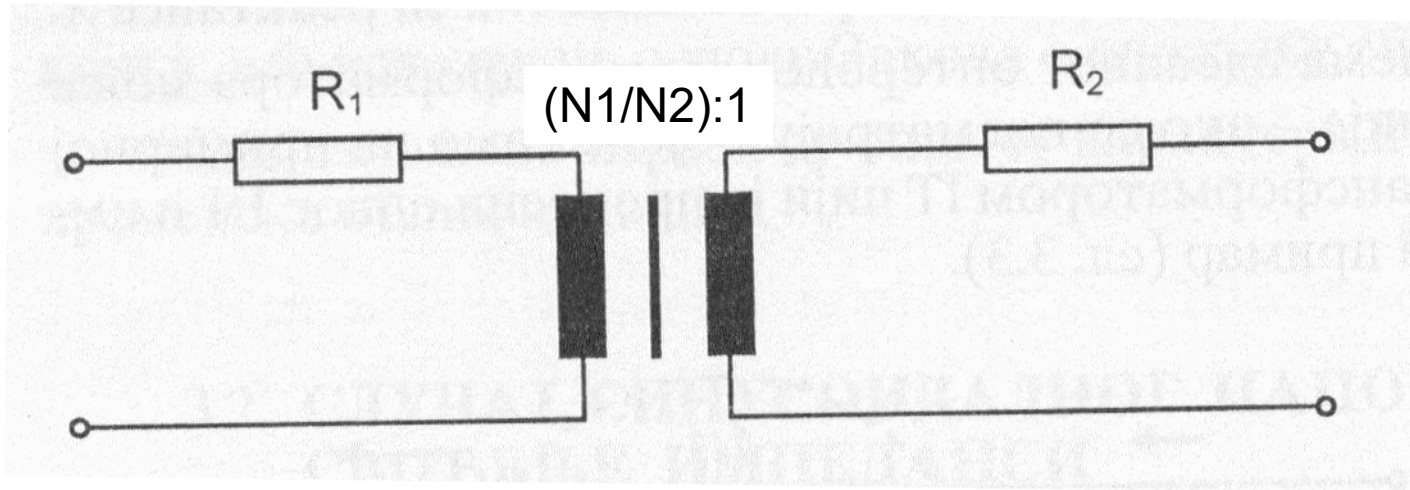
Kako je sada struja primara i sekundara ista, ništa se ne gubi ako se idealni TR sasvim izostavi. U ovoj ekviv. šemi TR uopšte nema idealnog TR, a struja je određena svedenom impedansom sekundara.



Svedena impedansa sekundara.

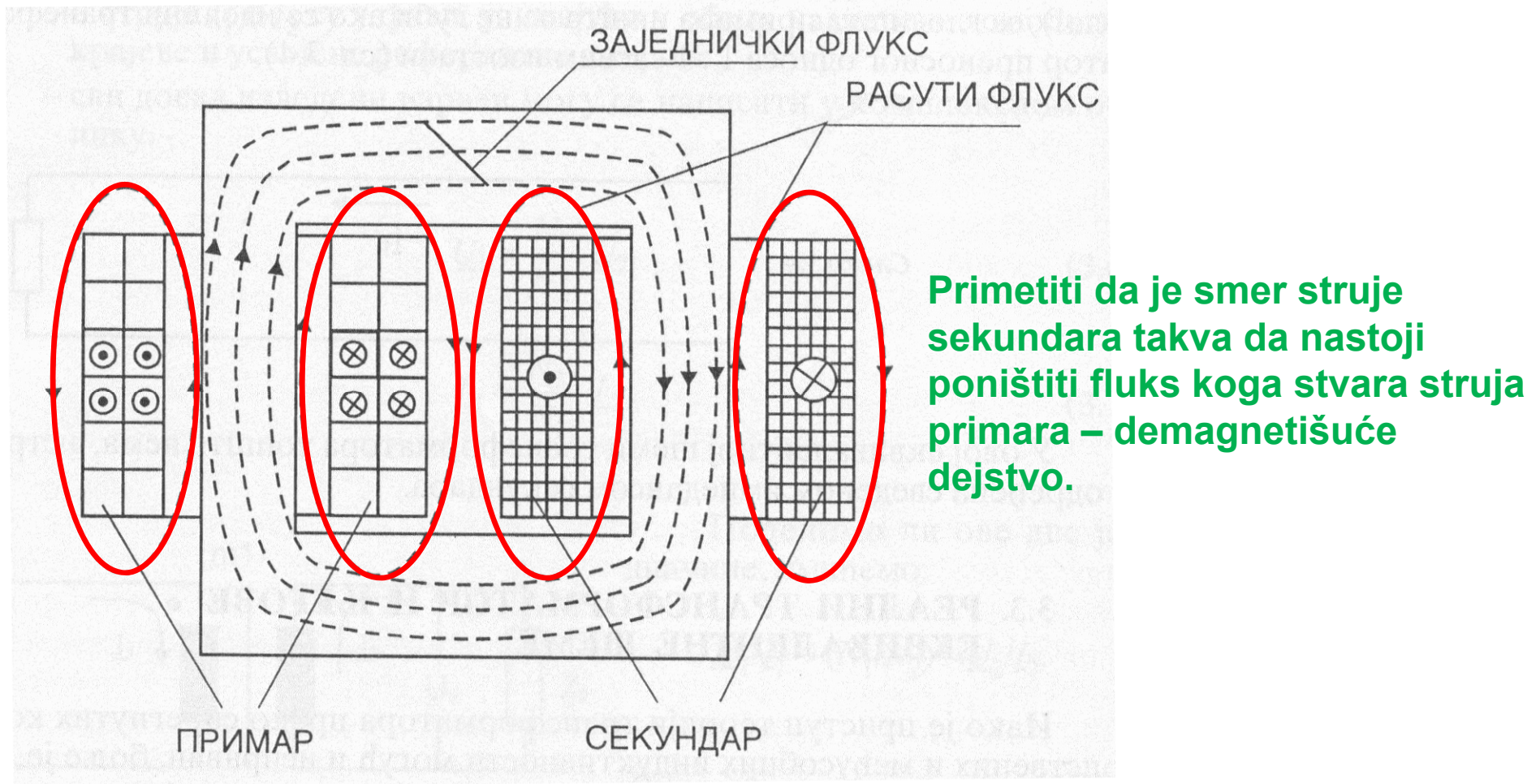
4.7. EKVIVALENTNA ŠEMA TRANSFORMATORA

Kada postoji **aktivna otpornost namotaja**.



4.7. EKVIVALENTNA ŠEMA TRANSFORMATORA

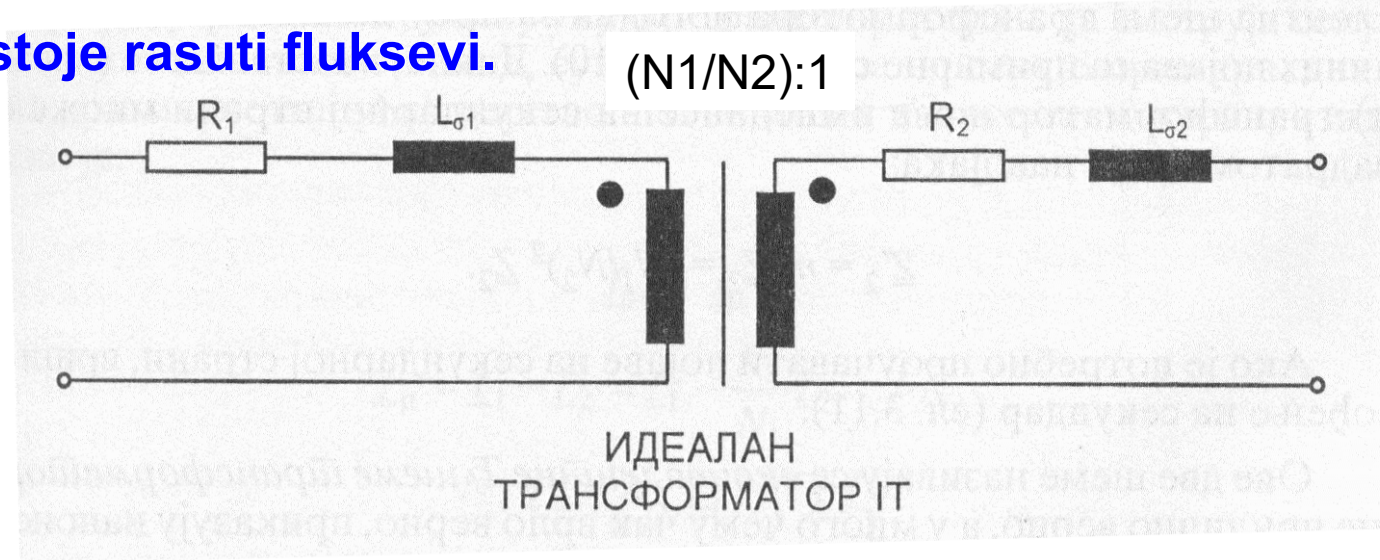
Pored zajedničkog fluksa **postoje** rasipni fluksevi.



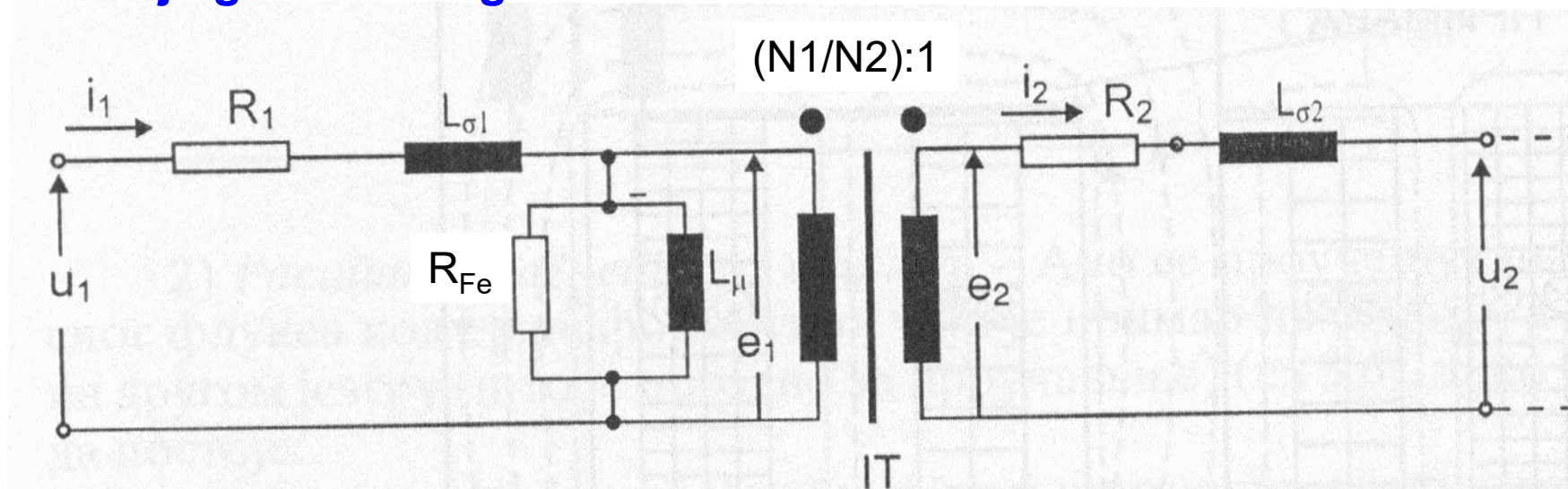
Svakom od ovih rasipnih flukseva odgovara induktivnost rasipanja L_γ (pošto je $\phi = L \cdot i$).

4.7. EKVIVALENTNA ŠEMA TRANSFORMATORA

Postoje rasuti fluksevi.



Postoje gubici u magnetnom kolu.



Za održavanje fluksa u feromagnetiku potrebna je struja magnećenja, a zbog snage gubitaka u magnetnom kolu i aktivna komponenta struje.