

Испит спремати по овом тексту.

Делове текста између маркера

и

прочитати информативно (из тог дела градива се неће постављати питања на испиту)

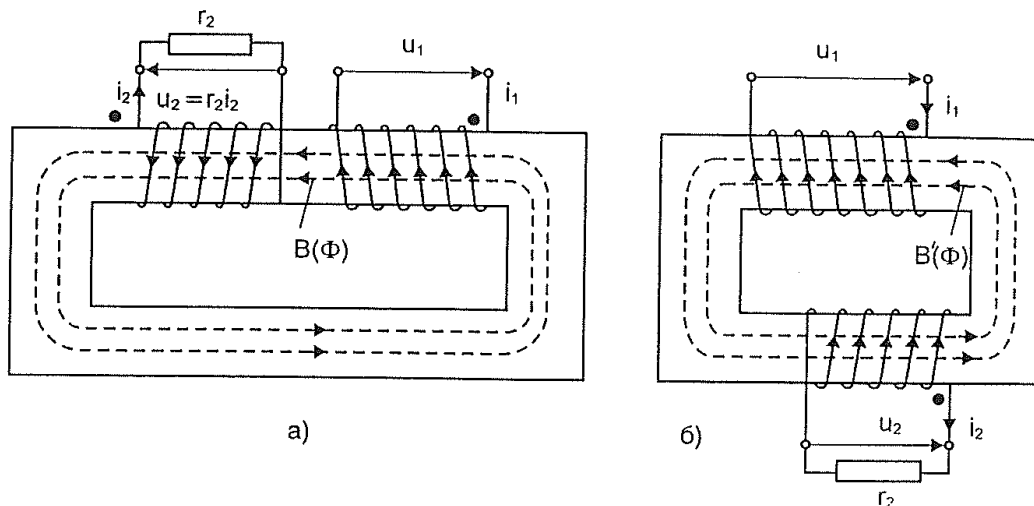
3. ТРАНСФОРМАТОР ПОД ОПТЕРЕЋЕЊЕМ И У КРАТКОМ СПОЈУ

3. 1. Идеални оптерећени трансформатор

При објашњавању принципа рада трансформатора погодно је, у циљу лакшег разумевања, усвојити извесна занемарења. Појам *идеалног трансформатора* подразумева следеће идеализације:

- 1) Активни отпор намотаја примара (R_1) и секундар (R_2) су једнаки нули
- 2) Комплетан магнетни флуks пролази кроз све навојке примара и кроз све намотаје секундар
- 3) Магнетни отпор магнетног кола је једнак нули, односно може се занемарити струја и магнетопобудна сила потребна за стварање магнетног флуksа у језгру.
- 4) Нема губитака у гвожђу

У циљу сагледавања фазних ставова напона на примару и секундару трансформатора погодно је увести **појам хомологни крајева**. За трансформатор чији је примар прикључен на напон напајања, а на секундар прикључено оптерећење (импеданса), хомологни крајеви се дефинишу на следећи начин: хомологни крај за примар је крај намотаја у који струја улази у намотај примара, а хомологи крај за секундар је крај намотаја из кога струја излази из намотаја секундар. Овако дефинисани хомологи крајеви су приказани тачкама на слици 3.1 (u_1 представља напон напајања, а r_2 оптерећење).



Слика 3.1

Слика 3.1 се може протумачити и на следећи начин. Прикључење напона на намотај примара ће довести до појаве струје кроз намотај у смеру од тачке која се налази на вишем потенцијалу (ка коме је усмерена стрелица). Ова струја кроз примар ће довести до појаве магнетног флукса, чији је смер повезан са смером струје кроз примар по правилу десне завојнице (или десне руке). Промена овог флукса у времену доводи до индуковања напона на намотају секундар трансформатора, при чему крај намотаја секундар који је на вишем потенцијалу зависи од смера мотања намотаја секундар. Струја кроз оптерећење ће протицати од краја намотаја секундар који је на вишем потенцијалу (овај крај је означен тачком) ка оптерећењу. Смер струје секундар је увек такав да ствара флукс који тежи да поништи флукс који ствара струја примара.

За идеализовани трансформатор, дефинисан на почетку поглавља, могу се написати следеће једначине напонске равнотеже:

- За примар

$$u_1 - e_1 = 0, \quad (3.1)$$

где је

$$e_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.2)$$

$$u_1 = e_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.3)$$

- За секундар

$$u_2 = e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} = r_2 i_2 \quad (3.4)$$

Дељењем једначина (3.3) и (3.4) добија се већ познати израз за однос трансформације, односно преносни однос:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} = n, \quad (3.5)$$

односно познати закон да трансформатор врши промену напона тако да је однос напона на примару и секундару једнак односу броја навојака на примару и броја навојака на секундару.

Имајући у виду претпоставке 3) и 4) које су уведене при дефиницији идеалног трансформатора, укупна магнетопобудна сила је једнака нули, из чега следи

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0, \quad (3.6)$$

одакле се добија већ познати израз

(3.7)

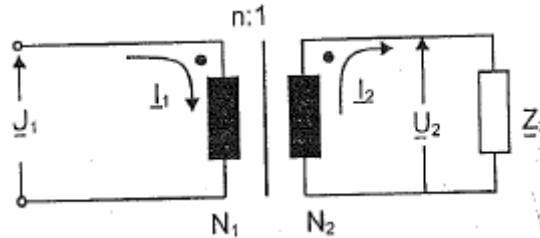
$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{n}.$$

Израз (3.7) се може добити и преко Закона о одржању енергије ($u_1 i_1 = u_2 i_2$) и израза (3.5). Сви претходни изрази су општег карактера, односно важе за произвољни временски облик напона.

3. 2. Случај синусоидалног напона и свођење импеданси

Разматрања у овом одељку ће се вршити полазећи од претпоставке да су напони и струје простопериодични, те да се може применити комплексни рачун. На овај начин се поједностављују (скраћују) запис, а не губи се на општости добијених резултата.

Шема са слике 3.1 се може приказати у комплексном домену приказати као на слици 3.2.



Слика 3.2

У складу са једначинама (3.5) и (3.7), може се написати

(3.8)

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

(3.9)

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

Дељењем израза (3.8) и (3.9) добија се

(3.10)

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

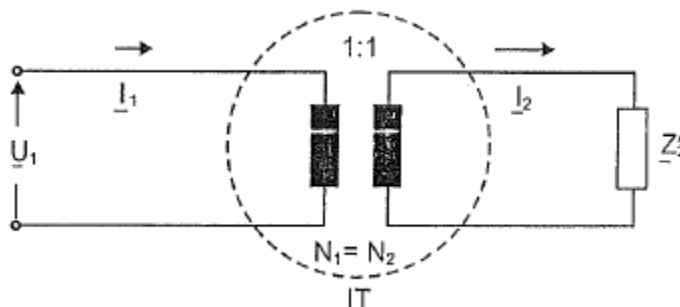
Однос напона и струје на секундару трансформатора је једнак импеданси прикљученог оптерећења ($\underline{U}_2 / \underline{I}_2 = \underline{Z}_2$). Импеданса која се “види” са примара (са мреже), $\underline{U}_1 / \underline{I}_1 = \underline{Z}_1$ једнака је

(3.11)

$$\underline{Z}_1 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \underline{Z}_2 = n^2 \underline{Z}_2 = \underline{Z}'_2.$$

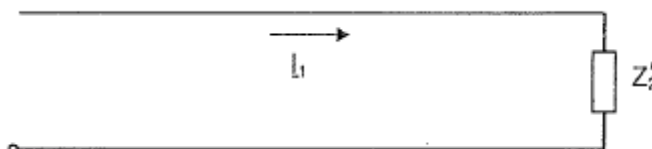
Термин који се уобичајено користи за импедансу која се види са примара је *импеданса секундара сведена на примар*. Свођење импедансе секундара на примар се врши њеним множењем са квадратом односа броја навојака n .

Ако се посматрају појаве само на страни примара, идеални трансформатор се може представити и на начин приказан на слици 3.3, као идеални трансформатор преносног односа 1: 1, на који је прикључена импеданса сведена на примар.



Слика 3.3

Пошто су струје у примару и секундару идеалног трансформатора преносног односа 1 исте, идеални трансформатор преносног односа 1 се може сасвим изоставити, након чега се добија шема на слици 3.4.



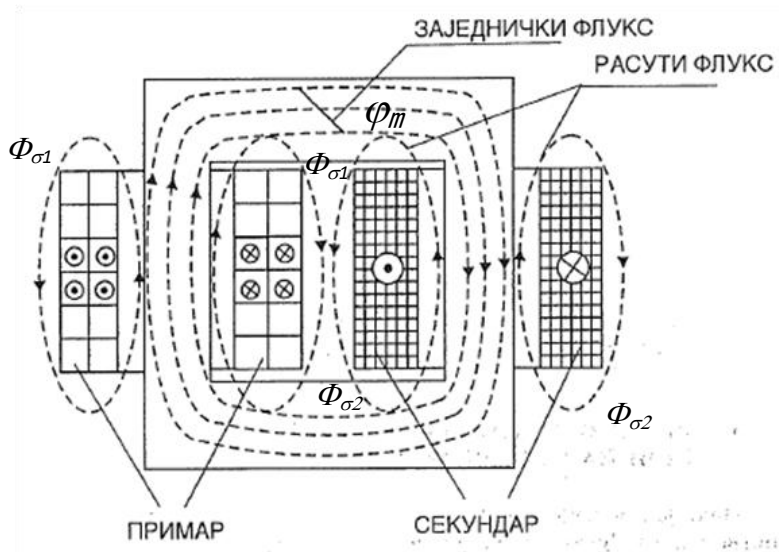
Слика 3.4

3. 3. Реални трансформатор и његове еквивалентне шеме

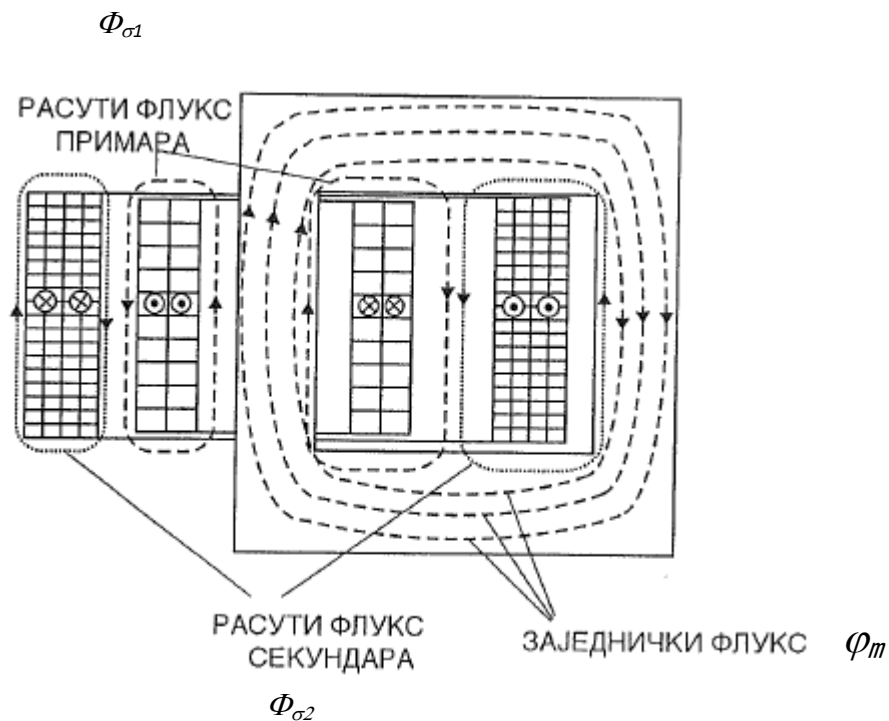
Еквивалентна шема реалног трансформатора се може поставити полазећи од напонских једначина за индукционо спрегнуте намотаје примара и секундара.

Главна компонента магнетног флуksа се затвара кроз све навојке намотаје примара и кроз навојке намотаја секундара – за овај део магнетног флуksа ће се користити термин заједнички флуks (φ_m). За овај флуks важе разматрања из одељка о празном ходу, са једином разликом што се овај флуks не ствара струјом празног хода I_0 кроз грану магнећења (слика 2.22) већ разликом струје примара (I_1) и струје секундара сведена на примар $I_1 - I_2'$ ($I_2' = (N_2 / N_1) I_2$).

Део магнетног флуksа $\varphi_{\sigma 1}$ се затвара само кроз намотаје примара (не и кроз намотаје секундара), а део магнетног флуksа $\varphi_{\sigma 2}$ ће се затварати само кроз намотаје секундара (не и кроз намотаје примара). За овај део магнетног флуksа ће се користити термин расути флуks, тачније расути флуks примара и расути флуks секундара. Упрошћени приказ, за случај да се намотај примара налази на једном стубу, а секундар на другом стубу, дат је на слици 3.5. Упрошћени приказ за случај да су намотаји примара и секундара на истом стубу је дат на слици 3.6.



Слика 3.5



Слика 3.6

Компоненте расутог магнетног флуksа у намотају примара су сразмерне са струјом примара, а расутог флуksа у намотају секундарa са струјом секундарa ($\Phi_{\sigma 1} = L_{\sigma 1} i_1$, $\Phi_{\sigma 2} = L_{\sigma 2} i_2$; $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ представљају индуктивности расипања примара, односно секундарa. Одређивање вредности реактанси расипања $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ ће се размотрити у каснијем делу поглавља 3.

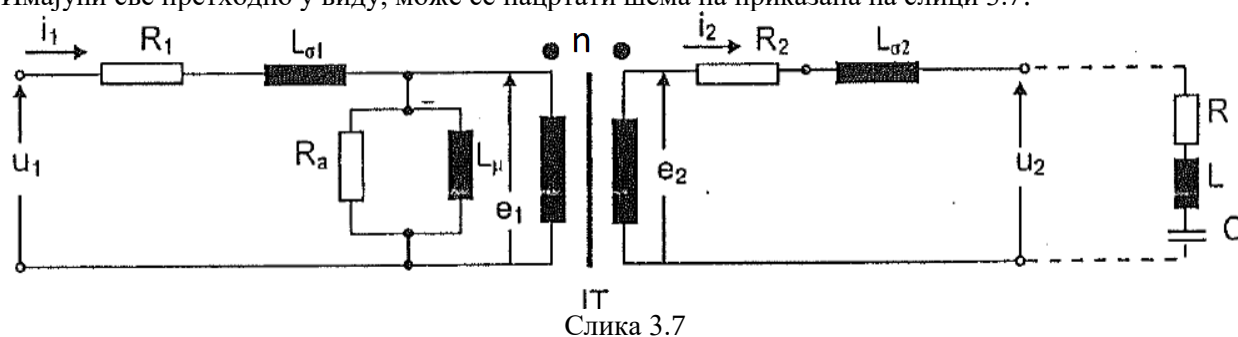
Компоненте флуksа које се затварају само кроз намотаје примара (секундарa) изазивају падове напона који су за $\pi/2$ фазно померени у односу на струју ($d\Phi/dt$). Поред ових падова напона, постоји и пад напона на активним отпорностима намотаја примара (R_1) и секундарa (R_2).

У складу са претходним, може се написати

$$u_1 - R_1 i_1 - L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} - e_1 = 0 \quad (3.12)$$

$$e_2 - R_2 i_2 - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} - u_2 = 0 \quad (3.13)$$

Имајући све претходно у виду, може се нацртати шема на приказана на слици 3.7.



где e_1 представља контраелектромоторну силу услед заједничког флукса (φ_m) која „се противи“ напону примара, а e_2 електромоторну силу индуковану на секундару као резултат заједничког флукса. Однос e_1 / e_2 је једнак односу броја навојака N_1 / N_2 .

Отпорности примара (R_1) и секундара (R_2) су веће од вредности отпорности једносмерној струји ($R_{DC} = \rho l/S$), и зависе од учестаности струје, као што ће бити детаљније разматрано у поглављу 4. Ове отпорности су једнаке односу укупних губитака у проводницима посматраног намотаја и квадрата струје (посебно у намотају примара, а посебно у намотају секундара). У поглављу 4. је објашњена природа додатних губитака и презентован је начин израчунавања разлике укупних губитака и губитака који би се имали при протицању једносмерне струје чија је вредност једнака ефективној вредности стварне наизменичне струје.

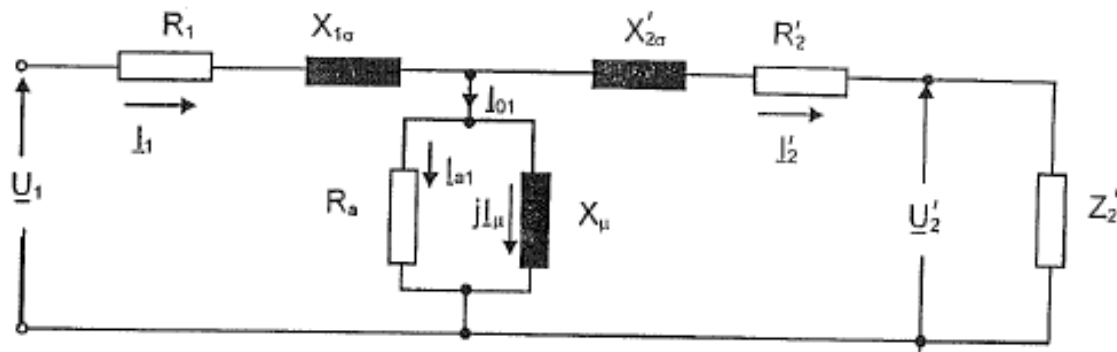
На слици 3.7 је приказана потпуна (комплетна) заменска шема трансформатора, којом се може анализирати велики број радних режима, како оних у раду на мрежи, тако и оних који се срећу током огледа испитивања на трансформатору (кратак спој / празан ход). За неке радне режиме, пре свега за оне током огледа испитивања, могуће је упростити шему без практичног губитка тачности.

Задржавајући претпоставку о линеарности магнетске карактеристике, о чему је дискутовано у поглављу 2, за простопериодични напон на примару, може се прећи у комплексни домен. Облик шеме са слике 3.7 остаје исти, при чему се уместо малих слова уводе комплексне величине:

$$u \rightarrow \underline{U}, i \rightarrow \underline{I}, e \rightarrow \underline{E}$$

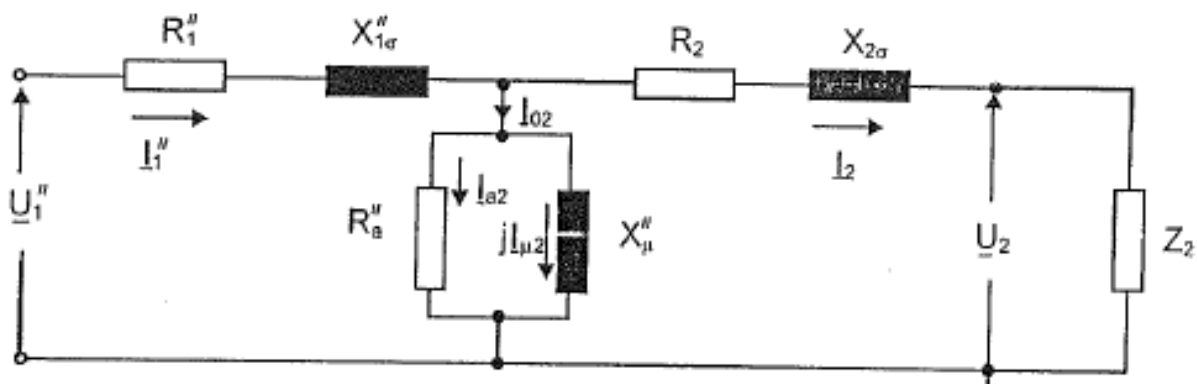
Уместо вредности L и C се уводе реактансе $X_L = \omega L$, $X_C = 1 / (\omega C)$; $\omega = 2 \pi f$, где је f учестаност простопериодичног напона. Након означавања комплексне редне R , L и C импедансе секундара сведене на примар са $\underline{Z}_2'$ ($\underline{Z}_2' = n^2 \underline{Z}_2 = (N_1/N_2)^2 \underline{Z}_2$), долази се до шеме приказане на слици 3.8 (у овом

кораку је потпуно изостављен идеални трансформатор, преносног односа n , а импедансе које су на слици 3.7 биле везане на његов секундар сведене су на примар множењем фактором n^2). Напони на секундару се свде на примар множењем са n , а вредности струја на секундару се свде на примар дељењем са n .



Слика 3.8

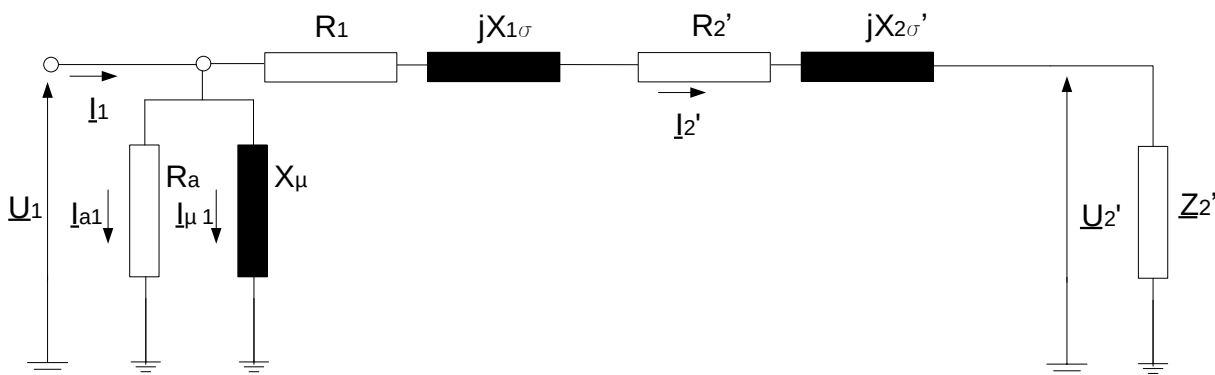
За потребе одређивање вредности на секундарној страни трансформатора, погодно је вредности напона, струје и импеданси свести на секундар (слика 3.9). Импедансе које су на слици 3.7 биле везане на примарну страну су сведене на секундар дељењем са n^2 , напони на примару се свде на секундар дељењем са n , а вредности струја на примару се свде на секундар множењем са n .



Слика 3.9

Шеме на сликама 3.8 и 3.9 се називају Т шеме трансформатора. Уобичајено је коришћење ових шема уз **примену константних параметара шеме**. Оваква њихова примена даје доста тачне резултате за струје и напоне када се трансформатор користи као елемент у електроенергетској мрежи (50Hz или 60Hz, на пример). Као што је већ поменуто у досадашњим излагањима, X_{μ} и R_a зависе од напона на примару, R_a и од учестаноти, а R_1 , R_2 и R_a од учестаности, односно параметри шеме у општем случају зависе од радног стања трансформатора. У раду на мрежи напон, а поготову учестаност, не мењају се много, па је оправдана примена константних вредности за елементе у заменској шеми.

Поред Т шеме трансформатора у пракси се примењују и Г шеме трансформатора – на слици 3.10 је приказана Г шема трансформатора за случај за који је на слици 3.8 приказана Т шема трансформатора.



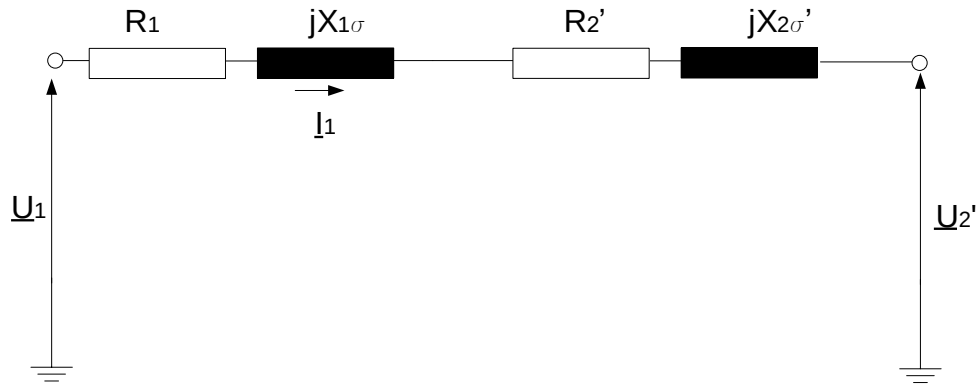
Слика 3.10

У свим до сада приказаним разматрањима имплицитно је подразумевано да се на примар доводи мрежни напон, а да је на секундар везано оптерећење. У већини ситуација, пре свега код електродистрибутивних трансформатора (типично, средњенапонска страна, напонског нивоа 10kV, прикључена је на електродистрибутивну мрежу, а на нисконапонску страну 0.4kV је прикључена кабловска мрежа са које се напајају нисконапонски потрошачи електричне енергије (импеданса Z_2')), има се управо оваква ситуација.

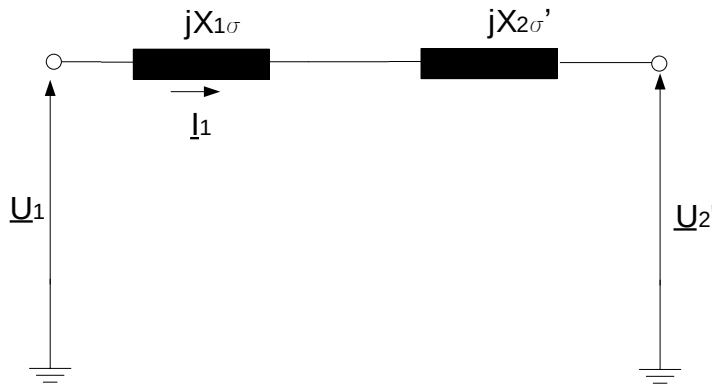
Постоје трансформатори који повезују и две активне мреже. У том случају, и прикључак на секундар се приказује као напонски прикључак, а не као импедансни прикључак Z_2' (слика 3.10). Један од могућих приступа за случај да трансформатор повезује две активне мреже је да се свака од мрежа представе преко њихових еквивалентних Тевененових генератора.

Као трећи случај се може навести блок трансформатор у електрани, на чији се примар (оријентационог номиналног напона 20kV) прикључује генератор, а на секундар (оријентационог номиналног напона 220kV) високонапонска мрежа.

Претходно анализирана *Т шема трансформатора* може се упростити тако што се потпуно уклони попречна грана. Тако добијена шема се у пракси користи за анализу кратких спојева (кратко спојени крајеви секундара) и за одређивање промене напона (најчешће је случај да се напон смањује, а не повећава, тако да се уместо „промене напона“ каже „пада напона“). У ове две примене уклањање попречне гране не доводи до значајне грешке у прорачунима. Главни разлог је што су струја магнећења и струја за покривање губитака у гвожђу значајно мање од сведене струје секундара. Ово посебно важи у кратком споју, када је и напон на грани магнећења мали (око половине напона напајања примара), јер тада расту и вредности L_μ и R_a , па се, иначе мале, додатно смањују i_μ и i_a . Шема које настају након уклањање попречне гране је приказана на слици 3.11, а након изостављања и отпорности намотаја (овакво занемарење је оправдано код великих трансформатора, код којих је расипања много већа од активне отпорности намотаја).



Слика 3.11



Слика 3.12

3. 4. Огледи кратког споја и празног хода

Помоћу ова два огледа проверавају се гарантоване вредности губитака услед протицања струје кроз намотаје (у огледу кратког споја) и губитака у магнетном колу (у огледу празног хода). Поред тога, на основу резултата ових огледа могу се одредити параметри заменске шеме трансформатора.

По правилу, оглед кратког споја се изводи у испитној станици фабрике, и то тако да се кратко споји ниженапонска страна, на вишенапонску страну доведе напон, и то такав да се струја кроз трансформатор подеси на вредност што ближе номиналној струји. Вредност напона при којој се остварује номинална струја при кратко спојеној другој страни трансформатора је мала, оријентационо 2% до 10% номиналног напона напајане стране трансформатора.

Празан ход се по правилу изводи тако што се прикључци на вишенапонској страни оставе отворени, а напон напајања, што ближе номиналном, доведе на ниженапонску страну.

Уколико се огледи изведу на горе наведени начин, приближно иста опрема се може користити у оба огледа – огледу кратког споја и огледу празног хода.

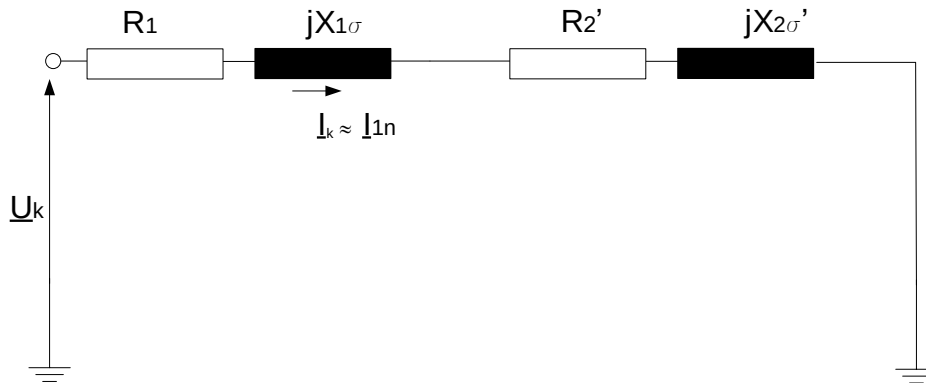
Оглед кратког споја

Током огледа кратког споја (намотаји секундара се кратко споје, а на примар се доводи напон) се мере следеће величине:

- Напон напајања (примара), за који се користи термин „напон кратког споја“ (U_k)

- Струја (примара) I_k , чија се вредност, подешавањем напона U_k , подешава на вредности што ближеј номиналној струји примара (I_{1n})
- Снага која се преузима из мреже P_k – снага кратког споја мреже

Струја кроз грану магнећења, како њена реактивна компонента i_μ , тако и њена активна компонента i_a , услед малог напона и малог магнетног флуksа кроз магнетног кола, су мале. Због тога се струја I_0 , односно њене компоненте i_μ и i_a могу занемарити у односу на струју која протиче кроз трансформатор (она је приближно једнака номиналној). Ово практично значи да се у општој заменској шеми на слици 3.10 може изоставити грана магнећења, после чега се шема своди на облик приказан на слици 3.13.



Слика 3.13

Из измерених вредности се одређују:

- Импеданса кратког споја

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \left(= \frac{U_{kn}}{I_{1n}} \right) \quad (3.14)$$

- Активна отпорност кратког споја

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2} \left(= \frac{P_{kn}}{I_{1n}^2} \right) \quad (3.15)$$

- Реактанса кратког споја

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (3.16)$$

На основу заменске шеме може се написати

$$R_k = R_1 + R_2' \quad (3.17)$$

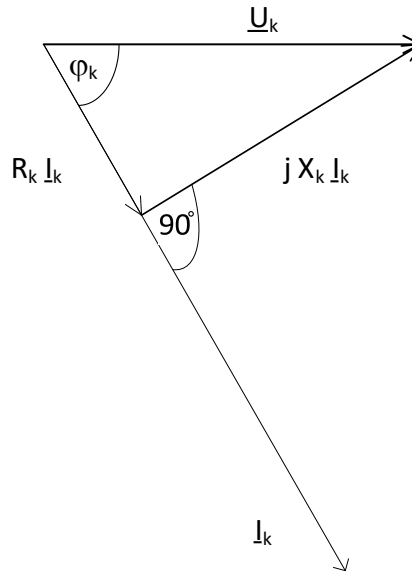
$$X_k = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \quad (3.18)$$

Уколико нису познате прорачунске вредности, из којих би се одредио однос R_1 / R_2' , односно $X_{1\sigma} / X_{2\sigma}'$, може се приближно претпоставити да је $R_1 \approx R_2'$, односно $X_{1\sigma} \approx X_{2\sigma}'$, после чега се добија $R_1 \approx R_2' = R_k / 2$, односно $X_{1\sigma} \approx X_{2\sigma}' = X_k / 2$. У вези са овим, треба напоменути да се резултати прорачуна коришћењем опште заменске шеме са слике 3.8, односно слике 3.9 неће много променити у зависности од односа R_1 / R_2' , односно $X_{1\sigma} / X_{2\sigma}'$. Разлог за ово је релативно мала струја у грани магнећења. Грешка у прорачуну проузрокована разликом стварних вредности односа R_1 / R_2' , односно $X_{1\sigma} / X_{2\sigma}'$, у односу на усвојене приближне вредности $R_1 \approx R_2' = R_k / 2$, односно $X_{1\sigma} \approx X_{2\sigma}' = X_k / 2$, већа је при радним струјама трансформатора које су мале у односу на номиналну струју. Подсетимо да се у пракси, као прихватљиво тачна, чак користи и Γ шема трансформатора (слика 3.10), која се заснива на претпоставци $R_1 = 0$, $R_2' = R_k$, односно $X_{1\sigma} = 0$, $X_{2\sigma}' = X_k$.

Фазорски дијаграм струја и напона кратког споја, за које, према заменској шеми приказаној на слици 3.13, постоји веза

$$\underline{U}_k = (R_k + j X_k) \underline{I}_k, \quad (3.19)$$

дат на слици 3.14.



Слика 3.14

Троугао кратког споја се често представља у релативним јединицама, или у процентима. При томе, посматра се случај да је струја кратког споја једнака номиналној струји трансформатора ($I_k = I_n$); номинална снага трансформатора износи $S_n = U_n I_n$. Полазећи од шеме на слици 3.14, за $I_k = I_n$ може се написати:

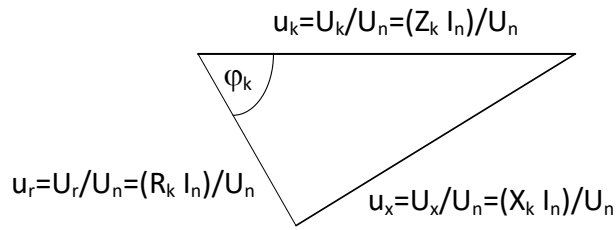
$$u_k = \frac{U_k}{U_n} = \frac{Z_k I_n}{U_n} \quad (3.20)$$

$$u_r = \frac{U_r}{U_n} = \frac{R_k I_n}{U_n} = \frac{R_k I_n^2}{U_n I_n} = \frac{P_k}{S_n} \quad (3.21)$$

$$u_x = \frac{U_x}{U_n} = \frac{X_k I_n}{U_n} = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} \quad (3.22)$$

Троугао кратког споја за у релативним јединицама (једначине (3.20) – (3.22)) приказан је на слици 3.15. Процентуалне вредности се добијају из релативних, множењем са 100:

$$u_k (\%) = 100 u_k = 100 \frac{U_k}{U_n} \quad (3.23)$$



Слика 3.15

Приметимо да је ефективна вредност напона кратког споја у процентима једнака ефективној вредности импедансе кратког споја (номинална, базна, импеданса, једнака је односу номиналног напона и номиналне струје – $Z_n = U_n / I_n$):

$$u_k (\%) = 100 \frac{U_k}{U_n} = 100 \frac{Z_k I_n}{U_n} = 100 \frac{Z_k}{Z_n} \quad (3.24)$$

Дакле,

$$u_k (\%) = z_k (\%) \quad (3.25)$$

У табели 3.1 дате су типичне вредности за u_k и $\cos \varphi_k$ за трансформаторе различитих номиналних снага.

Табела 3.1

S_n , kVA	1	10	100	1000	10000	100 000
u_k (%)	2.6	3	4	5	8.4	17.5
$\cos \varphi_k$	0.77	0.66	0.30	0.14	0.06	0.013

Поред одређивања вредности елемената заменске шеме трансформатора, оглед кратког споја служи и за одређивање губитака који су последица протицања струје кроз намотаје. Снага измерена ватметром (P_k), поред компоненте губитака у самим намотајима

$$P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} \quad (3.26)$$

односно

$$P_{Cu} = R_1 I_1^2 + R_2' I_2'^2 \quad (3.27)$$

садржи и компоненту **снаге губитака у конструктивним деловима трансформатора и суду (P_s) услед расутог флуksа који се затвара кроз ове делове.**

Потребно је навести још један детаљ, да се оглед кратког споја по правилу врши у хладном стању (температура трансформатора једнака температури амбијента) и да кратко траје, због чега намотаји не достижу номиналну температуру. Имајући то у виду, губици измерени у огледу кратког споја изведеног на хладном трансформатору, имају мању вредност од губитака при истој (номиналној) струји и радној температури намотаја (доминантни део губитака, једнак производу отпора намотаја једносмерној струји и квадрата струје (P_J) расте са порастом температуре). О компонентама губитака у намотајима и њиховој температурној зависности биће више речи у следећем поглављу (поглавље 4). Генерално, може се рећи да P_J расте са температуром, док додатни губици у намотају P_d опадају са температуром, док се за P_s обично сматра да се не мења са температуром конструкционих елемената / суда. Вредности P_J и P_d се могу добити прорачуном (P_J се израчунавају сасвим једноставно) при специфицираној температури, тако да се из огледа кратког споја одузимањем P_J и P_d од вредности губитака измерених у огледу кратког споја P_k могу добити P_s :

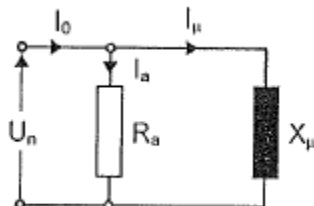
$$P_s = P_k - P_{Cu} = P_k - P_J - P_d \quad (3.28)$$

Оглед празног хода

Током огледа празног хода, који се по правилу изводи тако што се прикључци на вишенaponског страни оставе отворени, а напон напајања, што ближи номиналном, доведе на ниженапонску страну, мере се:

- Напон напајања U_0 , који је тачно једнак или приближан U_n
- Струја напајане (ниженапонске) стране I_0
- Снага узета из мреже P_0 .

Имајући у виду да је импеданса у грани магнећења много већа од импедансе коју сачињавају отпорност и индуктивност расипања намотаја, понашање трансформатора у празном ходу се може описати паралелном везом реактансе магнећења (X_μ) и отпорности (R_a) којом се описују губици у магнетном колу (слика 3.16). Другим речима, струја празног хода је мала у односу на струју оптерећења трансформатора, због чега је веома мали пад напона који струја празног хода прави на отпору и реактанси расипања напајаног ниженапонског намотаја, па је сасвим оправдано да се импеданса гране магнећења директно прикључи на мрежни напон.



Слика 3.16

Из измерених вредности се одређују:

- Адмитанса или импеданса празног хода

$$Y_0 = \frac{1}{Z_0} = \frac{I_0}{U_0} \quad (3.29)$$

- Кондуктанса или активна отпорност којом се описују губици у магнетном колу

$$G_a = \frac{1}{R_a} = \frac{P_0}{U_0^2} \quad (3.30)$$

- Суцептанса или импеданса магнећења

$$B_\mu = \frac{1}{X_\mu} = \sqrt{Y_0^2 - G_a^2} \quad (3.31)$$

Поред одређивања вредности елемената заменске шеме трансформатора, оглед празног хода служи и за одређивање губитака у гвожђу ($P_0 = P_{Fe}$), који представљају једну од вредности које мора да гарантује произвођач (и која је предмет купопродајног уговора трансформатора). Електромоторна сила E_1 која се има у заменској шеми на грани магнећења разликује се од напона на који је прикључен примар U_1 (у најчешћем случају, оптерећење трансформатора је индуктивног карактера и у том случају је $E_1 < U_1$). Да би се одредила вредност губитака у гвожђу која се има у нормалном раду, потребно је на примар трансформатора у празном ходу довести напон који је једнак електромоторној сили E_1 која се има при номиналном раду оптерећеног трансформатора на мрежи. Како E_1 зависи од оптерећења (како од вредности струје, тако и од њеног фазног става), што ће се показати у наставку курса, у пракси се користи приступ да се оглед празног хода изведе за више вредности напона, на пример у опсегу -10% , $+10\%$ у односу на номинални.

- Ако се употребе довољно тачни инструменти, из измерених вредности напона напајања (ниженапонска страна U_{20}) и напона на отвореним крајевима (вишенапонска страна U_{10}), добија се и вредност преносног односа:

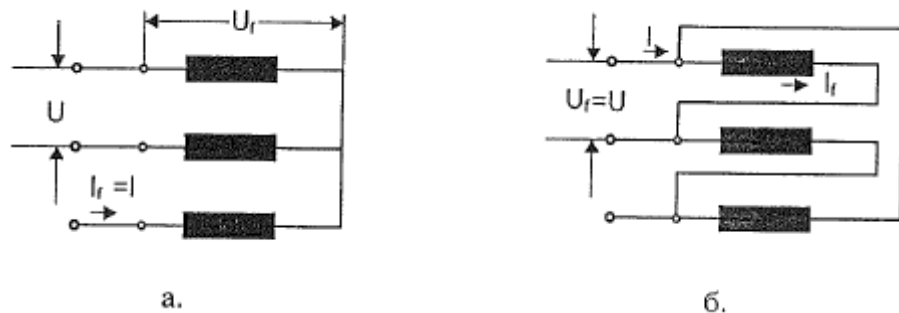
$$n = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (3.32)$$

Преносни однос n такође представља једну од гарантованих вредности трансформатора, и вредност добијена мерењем мора да буде у дозвољеним границама толеранције у односу на вредност декларисану за трансформатор.

Трофазни трансформатор

Уколико је трофазни систем уравнотежен, све што је до сада речено важи и даље, при чему се односи на једну фазу. У уравнотеженом трофазном систему напони и струје на сваком од намотаја примара, односно на сваком од намотаја секундара, у свакој од три фазе имају исте вредности (померене у времену за $2/3$ периоде).

Код трофазних трансформатора је уобичајено да се као номиналне вредности дају укупна номинална снага (S_n), једнака трострукој вредности снаге на једном стубу (S_{n1}): $S_n = 3 S_{n1}$; номинална снага на стубу се добија као производ напона и струје на (физичком) намотају фазе (ове вредности ће садржати индекс f), примара или секундара, на стубу $S_{n1} = U_f I_f$. Као номиналне вредности струје и напона за трансформатор обично се дају њихове вредности у линијским проводницима (ове вредности ће се означавати без индекса), односно вредности које се виде са стране мреже. У случају спреге звезда на примару (слика 3.17а), веза између линијског мрежног напона (номинални напон) и фазног напона на намотају износи $U = U_n = \sqrt{3} U_f$. У случају спреге троугао на примару (слика 3.17б), веза између линијске мрежне струје (номинална струја) и струја кроз намотај износи $I = I_n = \sqrt{3} I_f$.



Слика 3.17

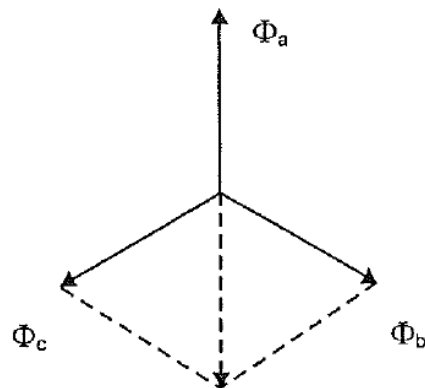
У уравнотеженом трофазном систему ефективне вредности напона на сваком од намотаја примара су исте, а фазни ставови различити за $2\pi/3$. Исто важи и за напоне на секундарним намотајима.

Заменска шема за намотаје примара и секундара који се налазе на истом стубу је идентична заменској шеми која је коришћена за монофазни трансформатор (слика 3.8). Дакле, има се четворокрајник – два краја представљају крајеве намотаја примара, а два краја крајеве намотаја секундара.

Повезивање крајева намотаја примара на сваком од стубова са крајевима намотаја примара на друга два стуба врши се на начин дефинисан спрегом трансформатора на примарној страни. Спрега звезда је приказана на слици 3.17а, а спрега троугао на слици 3.17б. Исто важи за крајеве секундара на сваком од стубова.

Дакле, иста је логика за повезивање крајева примара са мрежом и намотаја секундара са оптерећењем; општије речено, иста логика повезивања намотаја важи и на ниже- и на више-напонској страни, без обзира на то на шта су оне прикључене.

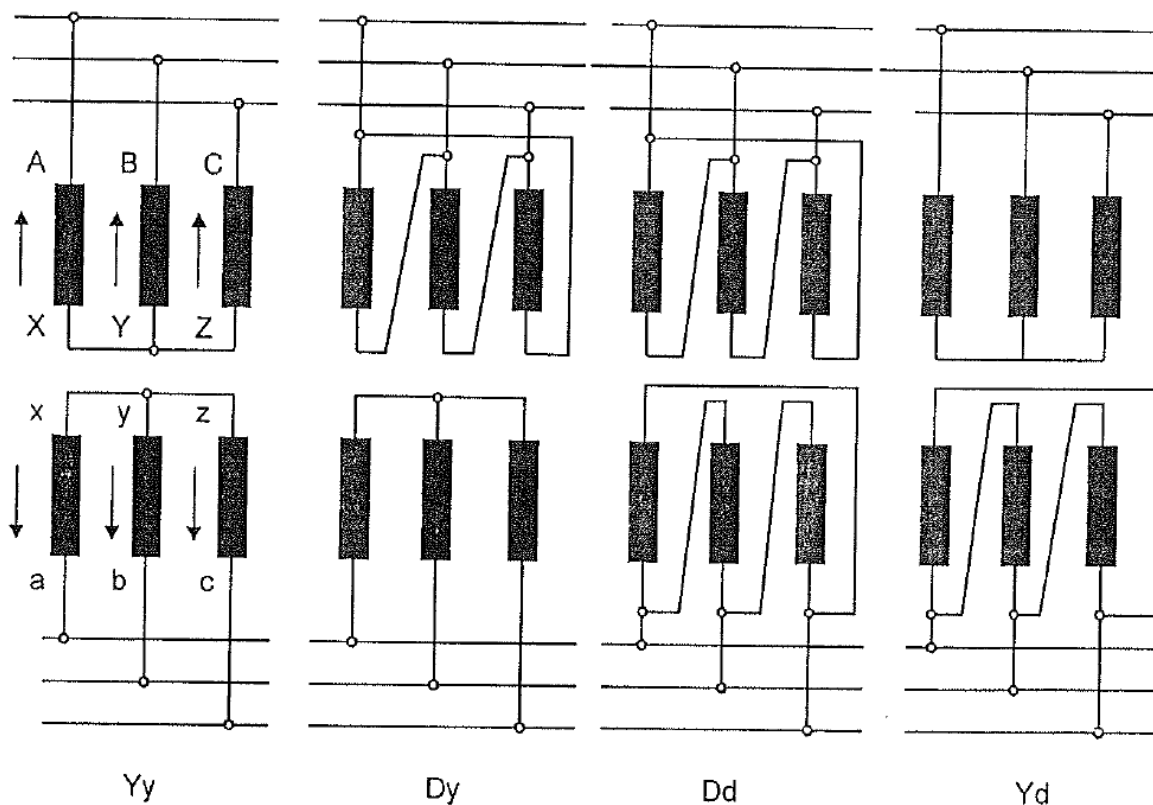
Примена конструкције трофазног трансформатора у трофазним системима, уместо да се користе три монофазна трансформатора, представља економично решење. Може се рећи да се основа ниже цене трофазног трансформатора заснива на чињеници да је векторски збир магнетних флуксева по фазама једнак нули ($\underline{\Phi}_a + \underline{\Phi}_b + \underline{\Phi}_c = 0$, слика 3.18), што је генерална одлика свих електричних величина у уравнотеженим трофазним системима. "Поништавање флукса" (векторски збир флуксева по фазама једнак нули) илустровано је у поглављу 2 (слика 2.3), због чега може да се „скрати“ магнетно коло само до тачке сустицања три фазе, односно не мора да се формира затворена контура магнетног кола за сваку фазу, што је случај када би се спрегнула три монофазна трансформатора.



Слика 3.18

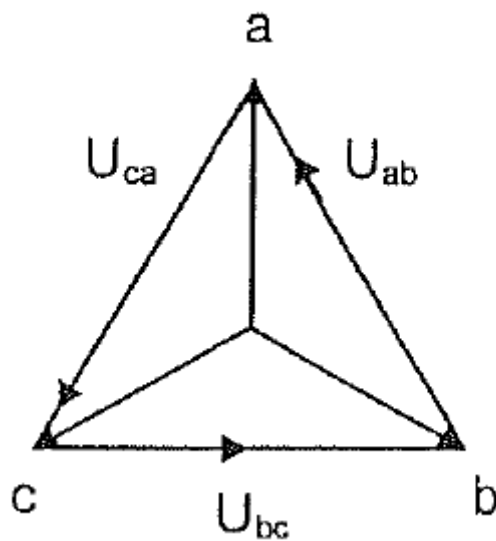
Као што ће се видети, ситуација није увек тако једноставна, јер се у пракси јављају и несиметрични радни режими, када је $\underline{\Phi}_a + \underline{\Phi}_b + \underline{\Phi}_c \neq 0$, због чега се конструкција трофазног трансформатора са три стуба у једној равни мора неће понашати као три монофазна трансформатора.

Три намотаја једне и друге напонске стране трансформатора се, као и намотаји обртних машина, или импедансе било ког електричног оптерећења, могу везати у звезду (ознака Y) / троугао (ознака D). Избор спреге на примару и на секундару се може вршити потпуно независно, односно не постоји међусобна условљеност. Спрега вишег напона се означава великим словом, а нижег напона малим словом. Примера ради, на слици 3.19 приказане су све спреге / комбинације горе поменутих спрега Yy, Dy, Dd, Yd.



Слика 3.19

Главна разлика између спрега је што се код спрега звезда (Y) могу користити и фазни (U_a , U_b , U_c) и линијски напони (U_{ab} , U_{bc} , U_{ca}) – слика 3.20. Када је изведен прикључак за звездиште (неутралну тачку), ознаци спрега се додаје и слово N, односно n. О другим карактеристикама спрега битним за праксу, пре свега при несиметричним режимима рада, биће речи у поглављу 7.

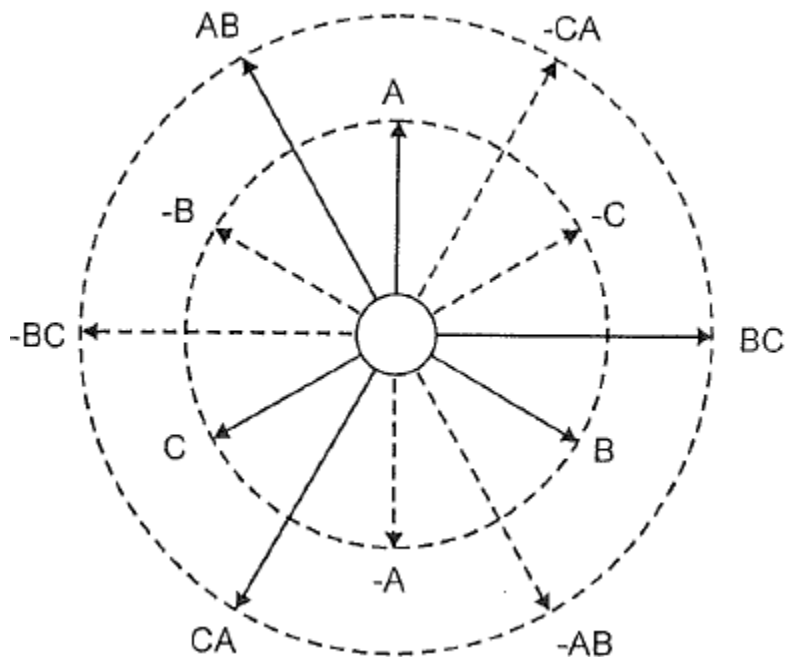


Слика 3.20

Једна од битних ствари код трансформатора су фазни ставови између фаза које су означене истим словним ознакама на примару и секундару. Он зависи од начина повезивања крајева напона и уписивање словних ознака на доступне изводе. Примера ради, за спрегу Yy на слици 3.19 фазни напон фазе a на секундару ($\underline{U}_a$) је у фази са фазним напоном фазе A на примару ($\underline{U}_A$). Исто важи и за преостале две фазе a и b .

У зависности од типа спреге (слика 3.19), разликују се фазни углови између истих фазора напона (фазних A / a , B / b , C / c или линијских AB / ab , BC / bc , CA / ca) на примару и на секундару. Ови фазни помераји се могу одредити полазећи од електромоторних сила у намотајима примара и секундара који се налазе на истом стубу. Ове електромоторне силе су у фази, при чему је њихово усмерење означено хомологим крајевима. Пре него што се илуструје принцип сабирања фазора електромоторних сила којим се долази до фазних помераја фазора напона на примару у односу на секундар, уведемо појам сатног броја. Једноставним анализама се може доћи до закључка да су фазни помераји између истих фазора напона (фазних или линијских) на примару и на секундару једнаки целобројном умношку 30° ($n \cdot 30^\circ$; $n = 0, 1, \dots, 11$). Због постојања ових фиксних еквидистантних 12 фазних помераја, као и сличности обележавања фазора казаљкама сата, уобичајена је пракса да се фазно заостајање изражава у сатима – на пример, заостајање од 60° се исказује као сатни број од 2 сата, а предњачење од 30° као сатни број од 11 сати.

Даља илустрација сатног принципа је дата за фазне и линијске напоне на примару трансформатора. За сада, посматрајмо трансформатор са спрегом звезда (Y) на примару. На слици 3.21 су приказани сви фазни и линијски напони на примару, при чему се подразумева да је систем напона директан (напон у фази B касни за напоном у фази A , а напон у фази C касни за напоном у фази B). Фазор фазног напона фазе A се, по конвенцији, ставља у положај 12 сати.

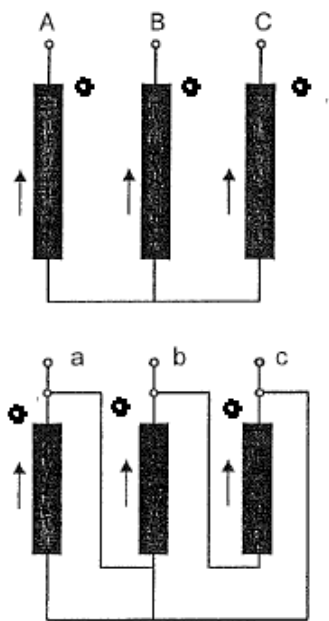


Слика 3.21

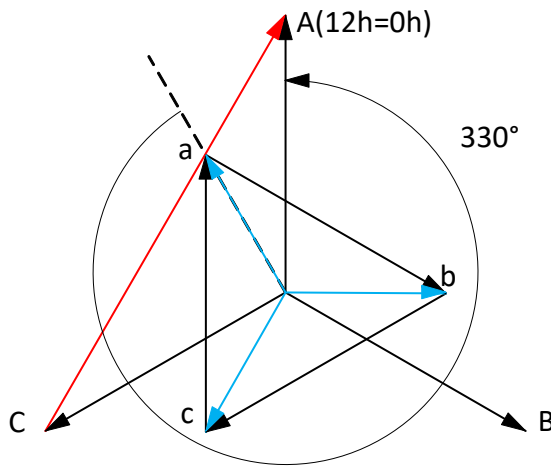
Слика 3.21 важи и за случај спреге троугао (D), када се „фазни напони“, као фиктивни фазни напони који нису физички доступни, формирају помоћу тежишних линија, тако да фазори фазних напона полазе из тежишта (које одговара фиктивној неутралној тачки) и завршавају у одговарајућим теменима троугла (видети слику 3.20).

Сатни број другог намотаја (секундара) одређује се фазним положајем напона секундара у фази у односу на напон примара у фази А (без обзира да ли „фазни напони“ примара и секундара постоје физички (спрега Y за примар, односно у за секундар) или не (спрега D за примар, односно спрега d за секундар)). Сатни број линијских напона (посматра се ab у односу на AB) је исти као сатни број (еквивалентних) фазних напона (a у односу на A).

Илустрација одређивања сатног броја ће се дати за пример приказан на слици 3.22. Као што је речено, полази се од електромоторних сила по стубовима, уважавајући конвенцију о хомологим крајевима (слика 3.22). Имајући у виду да су електромоторне силе приближно једнаке фазним напонима на примару (U_A, U_B, U_C) и линијским напонима на секундару (u_{ab}, u_{bc}, u_{ca}), једноставно се долази до фазорских дијаграма приказаних на слици 3.22 б). Користећи претходно објашњени принцип формирања (еквивалентних) фазних напона на секундару, спрегнутом у троугао (d), могу се нацртати (плавом линијом) и (еквивалентни) фазни напони на секундару (u_a, u_b, u_c). Сатни број се одређује на основу фазног помераја (еквивалентног) фазног напона на секундару u_a у односу на фазни напон на примару U_A . Фазно кашњење износи 330° , што значи да је сатни број 11. Једноставно се може проверити и претходно наведена чињеница да је фазно заостајање одговарајућих линијских напона такође 330° (примера ради, једноставно је посматрати $U_{CA} = U_A - U_C$ (црвена линија) и u_{ca}).



а)

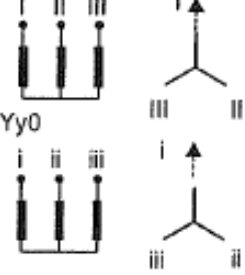
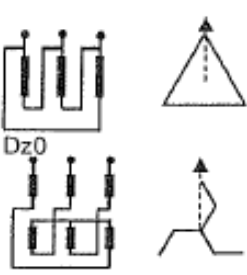
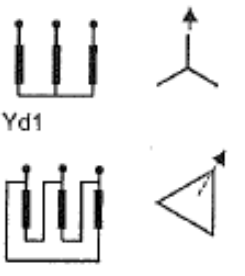
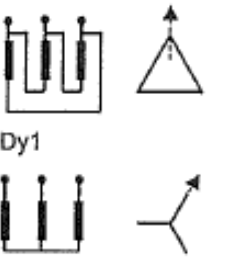
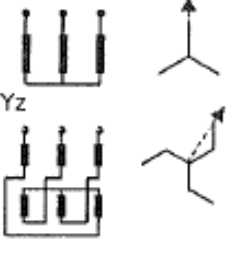
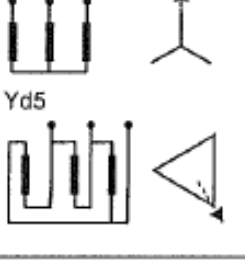
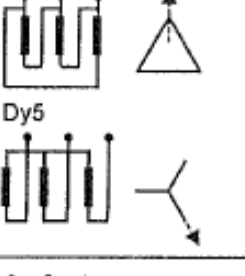
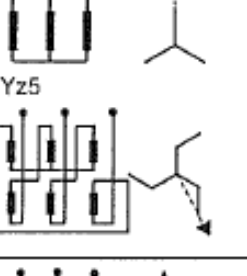
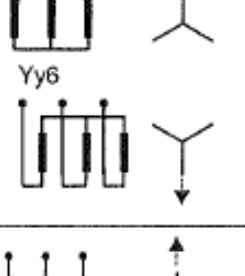
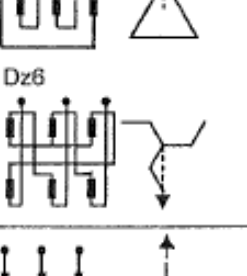
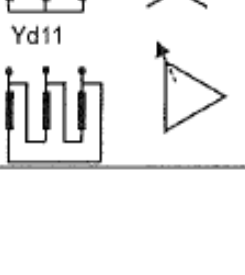
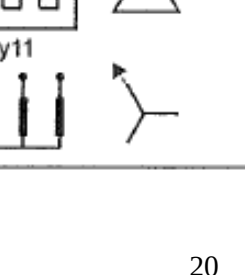
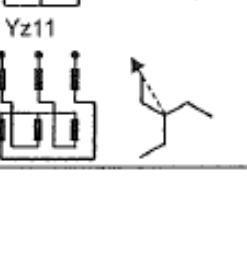


б)

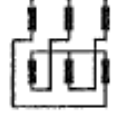
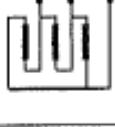
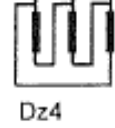
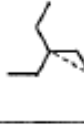
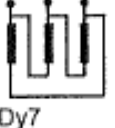
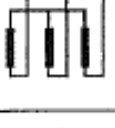
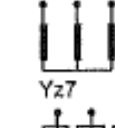
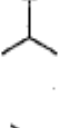
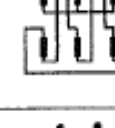
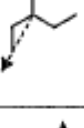
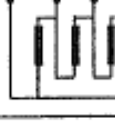
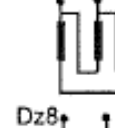
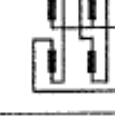
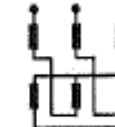
Слика 3.22

Стандарди SRPS EN из серије 60076, која се односи на енергетске трансформаторе, дају уобичајене спреге (табела 3.2.) и допунске спреге (табела 3.3.) трофазних трансформатора.

Табела 7.2 – Уобичајене спреге трофазних трансформатора

0	 Yy0	 Dd0	 Dz0
1	 Yd1	 Dy1	 Yz1
5	 Yd5	 Dy5	 Yz5
6	 Yy6	 Dd6	 Dz6
11	 Yd11	 Dy11	 Yz11

Табела 7.3 – Допунске спреге трофазних трансформатора

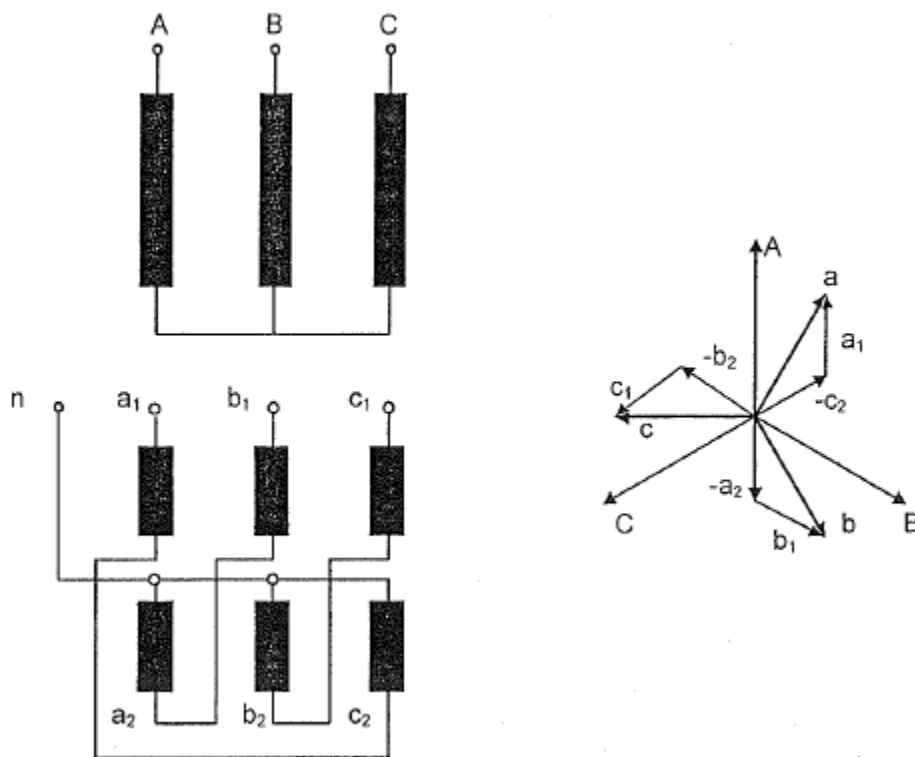
2		   	   
4		   	   
7	   	   	   
8		   	   
10		   	   

Опис спреге „сломљена звезда“ (z спрега):

Спрега Y_{zn} је приказана на слици 3.23 а), а њен фазорски дијаграм на слици 3.23 б): напон фазе а (између прикључка a_1 и n) је једнак

$$\underline{U}_a = \underline{U}_{a1} - \underline{U}_{c2} \quad (7.1)$$

$$U_a = 2 U_{a1} \cos 30^\circ = 1.732 U_{a1} \quad (7.2)$$



Слика 3.23

Да је спрега на секундару била звезда (тада би делови намотаја на истом стубу (a_1 и a_2 , b_1 и b_2 , c_1 и c_2) били везани на ред), напон би био

$$U_a = 2 U_{a1} \quad (7.3)$$

Другим речима, за остварење исте вредности напона, у случају примене спреге Y_{zn} потребно је намотати $2 / 1.732 = 1.15$ пута више навојака него што би било потребно у случају спреге Y_{yn} .