

Испит спремати по овом тексту.

Делове текста између маркера

и

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

3. ЗАМЕНСКЕ ШЕМЕ ТРАНСФОРМАТОРА

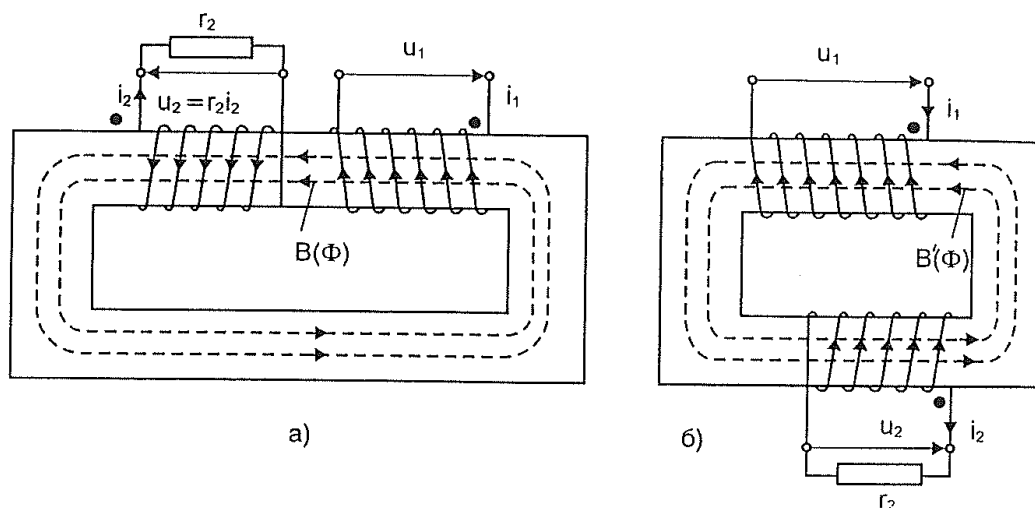
Уводна објашњења (одељци 3.1. и 3.2.) се дају полазећи од појма *идеалног трансформатора*:

- 1) Активни отпори намотаја примара (R_1) и секундара (R_2) је једнак нули
- 2) Комплетан магнетни флуks пролази кроз све навојке примара и кроз све намотаје секундара
- 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 разматрањима која следе одељак 3.2. уважавају се занемарења усвојена за идеални трансформатор.

3.1. Идеални оптерећени монофазни трансформатор

У циљу сагледавања фазних ставова напона на примару и секундару трансформатора погодно је увести **појам хомологних 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, а хомологни крај за секундар је крај намотаја из кога струја излази из намотаја. Овако дефинисани хомологни крајеви су приказани тачкама на слици 3.1 (u_1 представља напон напајања, а r_2 оптерећење).



Слика 3.1

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 флуksа, чији је смер повезан са смером струје кроз примар по правилу десне завојнице (или десне руке).

Промена овог флуksа у времену доводи до појаве напона на крајевима секундарног намотаја трансформатора (u_2), који је једнак индукованој електромоторној сили (e_2). e_2 у сваком од навојака секундара трансформатора једнака је интегралу електричног поља (E) дуж дуж контуре навојака C ,

$$e_2 = \oint_C \vec{E} d\vec{l}, \quad (3.1)$$

где је $d\vec{l}$ инфинитезимални елемент контуре C . Према Фарадејевом закону електромагнетне индукције, постоји следећа веза између циркулације електричног поља дуж контуре C и промене магнетног флуksа кроз површину S ограничену контуром C :

$$\oint_C \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S}, \quad (3.2)$$

где је B густина магнетног флуksа, при чему су смер контуре C и вектор према коме се израчунава магнетни флуks кроз површ S повезани правилом десне руке.

Струја кроз оптерећење ће протицати од краја намотаја секундара који је на вишем потенцијалу (овај крај је означен тачком) ка оптерећењу. Смер струје секундара је увек такав да ствара флуks који тежи да поништи флуks који ствара струја примара.

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

- За примар

$$u_1 - e_1 = 0, \quad (3.3)$$

где је

$$e_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.4)$$

$$u_1 = e_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.5)$$

- За секундар

$$u_2 = e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} = r_2 i_2 \quad (3.6)$$

Дељењем једначина (3.5) и (3.6) добија се већ познати израз за однос трансформације, односно преносни однос:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} = n, \quad (3.7)$$

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

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0, \quad (3.8)$$

одакле се добија већ познати израз

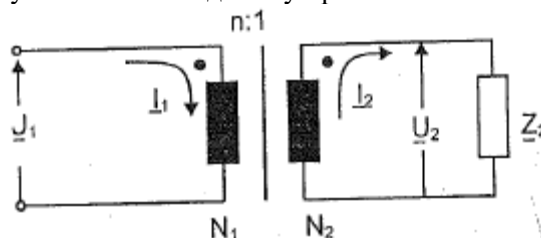
$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{n}. \quad (3.9)$$

Израз (3.9) се може добити и преко Закона о одржању енергије ($u_1 i_1 = u_2 i_2$) и израза (3.7). Сви претходни изрази су општег карактера, односно важе за произвољни временски облик напона.

3. 2. Свођење импедансе за случај идеалног монофазног трансформатора у простопериодичном режиму рада

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 поједностављује (скраћује) запис, а не губи се на општости добијених резултата.

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



Слика 3.2

У складу са једначинама (3.7) и (3.9), може се написати

$$\underline{U}_1 = \frac{N_1}{N_2} \underline{U}_2 \quad (3.10)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2 \quad (3.11)$$

Дељењем израза (3.10) и (3.11) добија се

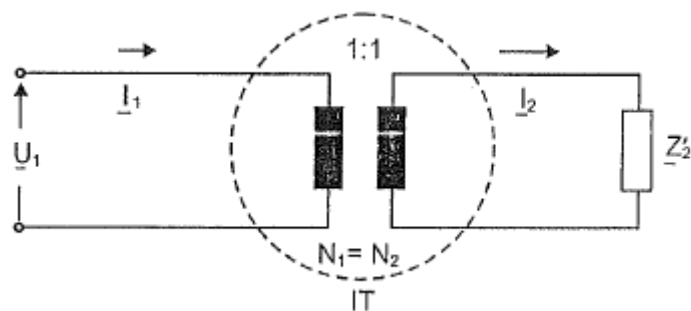
$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} \quad (3.12)$$

Однос напона и струје на секундару трансформатора једнак је 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

$$\underline{Z}_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \underline{Z}_2 = n^2 \underline{Z}_2 = \underline{Z}'_2. \quad (3.13)$$

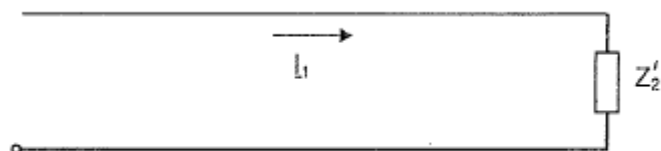
Термин који се уобичајено користи за импедансу која се види са примара је *импеданса секундара сведена на примар*. Свођење импедансе секундара на примар врши се њеним множењем са квадратом односа броја навојака n .

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.



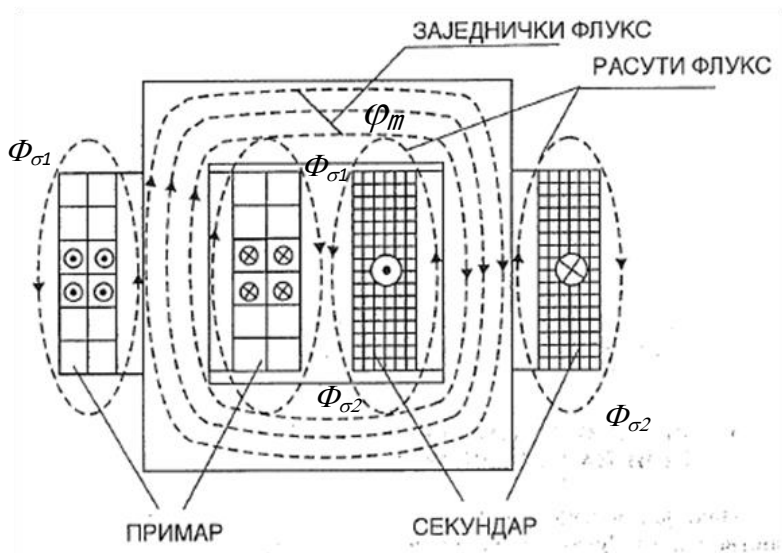
Слика 3.4

3. 3. Реални трансформатор и његове еквивалентне шеме

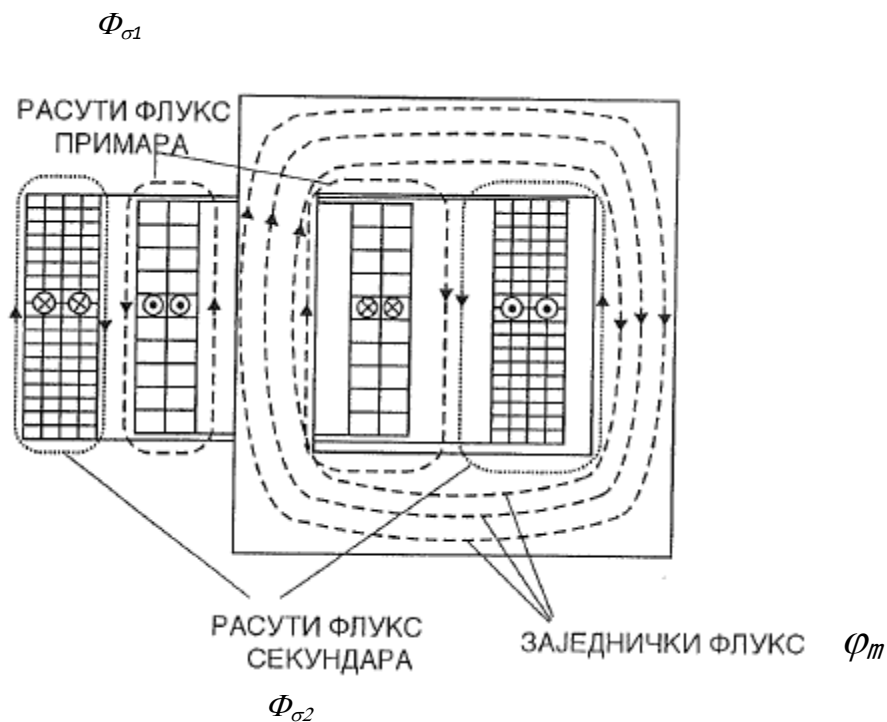
Еквивалентна шема реалног трансформатора се може поставити полазећи од напонских једначина за индуктивно спрегнуте намотаје примара и секундара.

Главна компонента магнетног флуksа се затвара кроз све навојке намотаја 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 сведене на примар $I_1 - I_2'$ ($I_2' = (N_2 / N_1) I_2$).

Део магнетног флуksа $\varphi_{\sigma 1}$ се затвара само кроз намотај примара (не и кроз намотај секундара), а део магнетног флуksа $\varphi_{\sigma 2}$ се затвара само кроз намотај секундара (не и кроз намотај 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 намотај секундара на другом стубу, дат је на слици 3.5. Упрошћени приказ, за случај да су намотаји примара и секундара на истом стубу, дат је на слици 3.6.



Слика 3.5



Слика 3.6

Компоненте расутог магнетног флуksа у намотају примара сразмерне су са струјом примара, а компоненте 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 наредном поглављу 4.

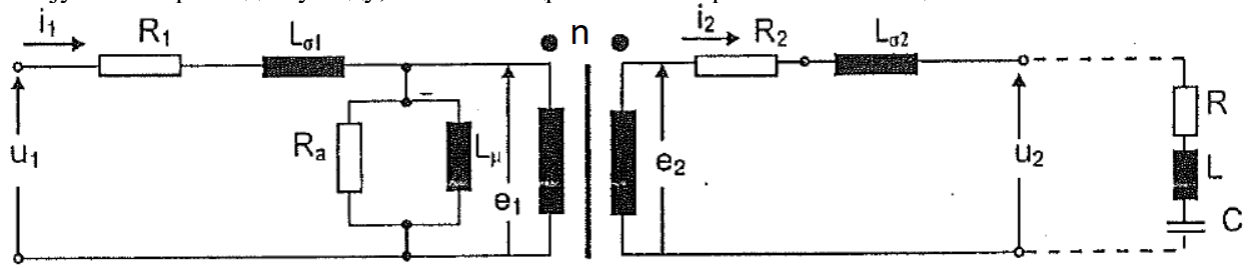
Компоненте флуksа које се затварају само кроз намотаје примара $\Phi_{\sigma 1}$ (секундарa $\Phi_{\sigma 2}$) изазивају падове напона који су за $\pi / 2$ фазно померени у односу на струју ($du_{\sigma} = d\Phi_{\sigma} / dt$). Поред ових падова напона, постоји и пад напона на активним отпорностима ($u_R = R i$) намотаја примара (R_1) и секундарa (R_2).

У складу са претходним, може се написати

$$u_1 - R_1 i_1 - L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} - e_1 = 0 \quad (3.14)$$

$$e_2 - R_2 i_2 - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} - u_2 = 0 \quad (3.15)$$

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



Слика 3.7

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

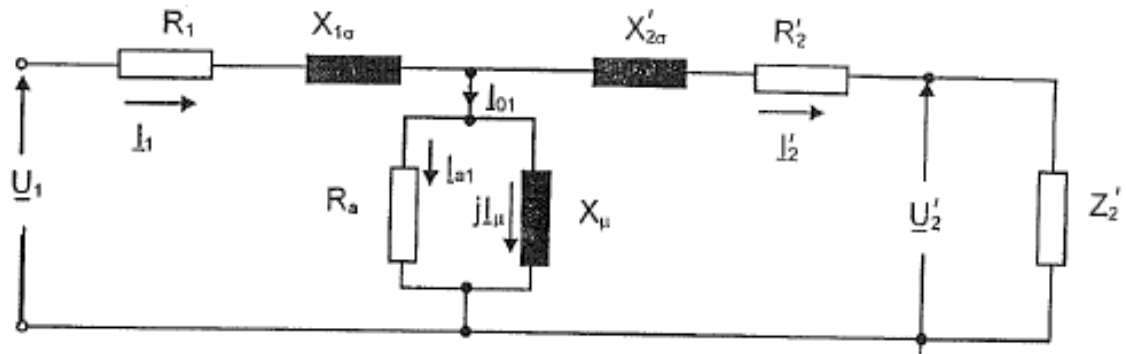
Отпорности примара (R_1) и секундара (R_2) су веће од вредности отпорности једносмерној струји ($R_{DC} = \rho l/S$), и зависе од учестаности струје, као што ће бити детаљније разматрано у поглављу 4. Отпорности R_1 и R_2 су једнаке односу укупних губитака у проводницима посматраног намотаја и квадрата ефективне вредности наизменичне струје (посебно у намотају примара, а посебно у намотају секундара). У поглављу 4. је објашњена природа додатних губитака и приказан 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 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 трансформатора (кратак спој / празан ход). За неке радне режиме, пре свега за оне током огледа испитивања, могуће је упростити шему, при чему је губитак тачности са практичног становишта занемарљиво мали.

Задржавајући претпоставку о линеарности магнетске карактеристике, о чему је дискутовано у поглављу 2, за случај прикључења трансформатора на простопериодичну мрежу може се прећи у комплексни домен. Облик шеме са слике 3.7 остаје исти, при чему се мала слова за тренутне вредности величина на слици 3.7 мењају се у комплексне величине:

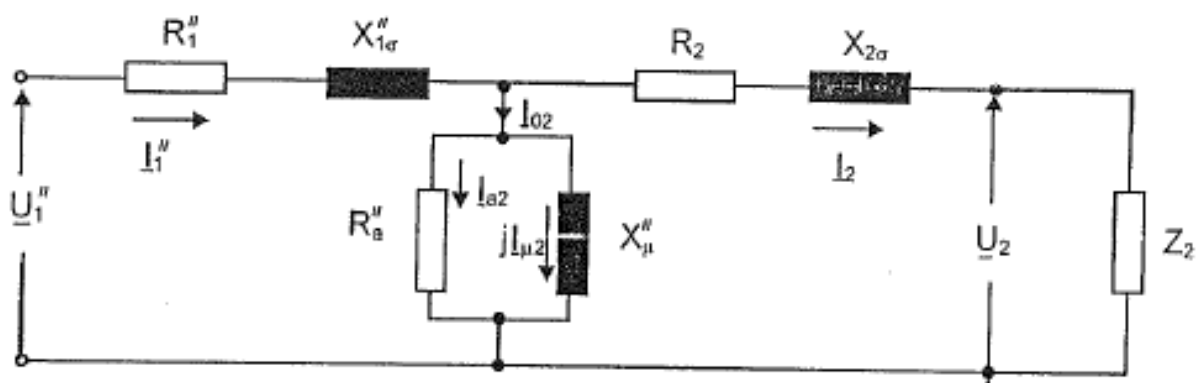
$$u \rightarrow \underline{U}, i \rightarrow \underline{I}, e \rightarrow \underline{E}$$

Уместо вредности L и C уводе се 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

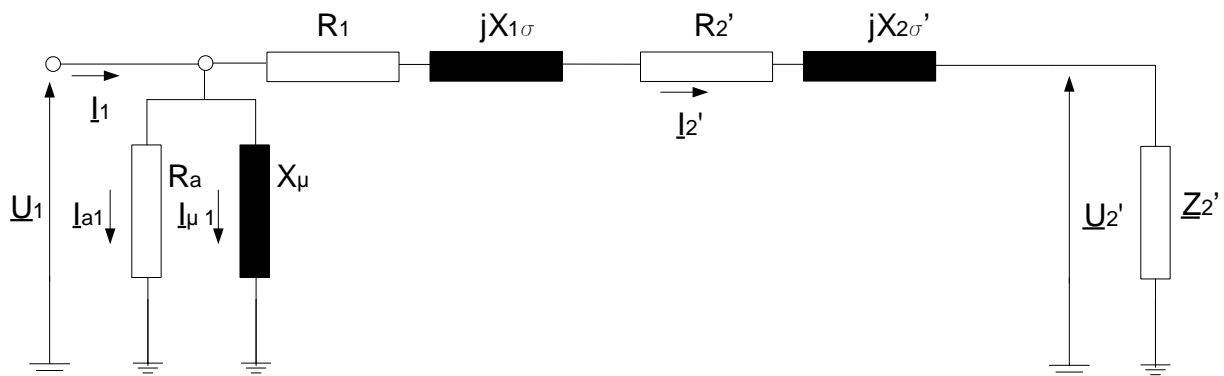
За потребе одређивања вредности напона и струја на секундарној страни трансформатора, погодно је све вредности свести на секундар (слика 3.9). Импедансе које су на слици 3.7 биле везане на примарну страну су сведене на секундар дељењем са n^2 , напони на примару се свде на секундар дељењем са n , а вредности струја на примару се свде на секундар множењем са n . У ознаци струја у грани магнећења промењен је индекс са 1 на 2, чиме се указује да вредности струја магнећења (активне компоненте, реактивне компоненте и укупне струје) представљају вредности добијене када се напајање трансформатора у празном ходу врши са примарне (индекс 1), односно са са секундарне (индекс 2) стране. Оглед празног хода се може вршити са примарне стране, а вредност „2“ одредити измерених вредности са напонског нивоа примара на напонски ниво секундара (импедансе се, на пример, деле са n^2).



Слика 3.9

Шеме на сликама 3.8 и 3.9 називају се 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, L_{μ} зависи од напона на примару, R_a од напона на примару и од учестаности, R_1 и R_2 од учестаности, што значи да у општем случају, када би трансформатор радио у режиму са значајно променљивим напонима и учестаностима, параметри шеме би зависили од радног стања трансформатора. У раду на мрежи, напон и (поготово) 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 Γ шеме трансформатора – на слици 3.10 је приказана Γ шема трансформатора за случај за који је на слици 3.8 приказана Т шема трансформатора.



Слика 3.10

У свим до досадашњим разматрањима имплицитно је подразумевано да се **на примар доводи мрежни напон (по правилу страна вишег напона)**, а да је **на секундар везано оптерећење**. У већини случајева, 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.

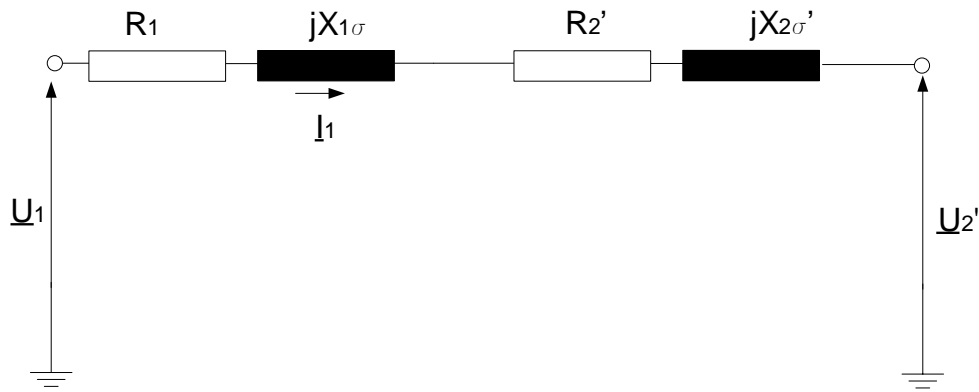
Постоје трансформатори који повезују и **две активне мреже**, у којима би постојао напон и када би посматрани трансформатор био искључен. У том случају, и прикључак на секундар се приказује као напонски прикључак, а не као импедансни прикључак Z_2' (слика 3.10).

Интересантно је поменути и трећи случај, **блок трансформатор у електрани**, на чији се примар (оријентационог номиналног напона 20kV) прикључује генератор, а на секундар (оријентационог номиналног напона 400kV) високонапонска мрежа.

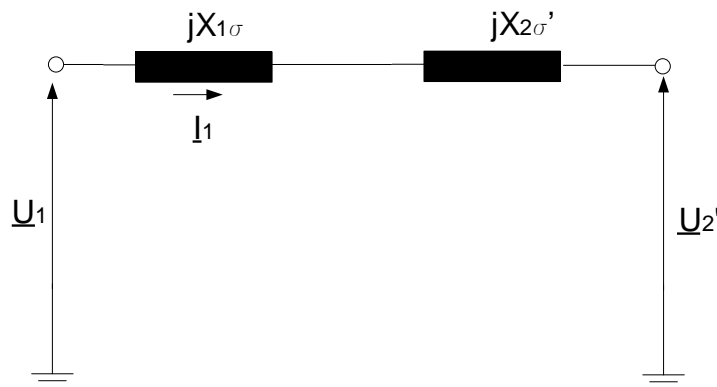
У циљу израчунавања струје кратких спојева (кратко спојени крајеви секундара при номиналном напону на примару) и одређивања промене напона (најчешће је случај да се напон смањује, а не повећава, тако да се уместо „одређивање промене напона“ каже „одређивање пада напона“), могуће је, без значајног губитка тачности, користити шему која настаје изостављањем попречне гране у *Т шем*и трансформатора.

Наведено упрошћење се може извршити јер су струја магнећења и струја за покривање губитака у гвожђу значајно мање од сведене струје секундара. Ово посебно важи у кратком споју, када су струје многоструко веће од номиналне – оријентационо 10 – 20 пута, а напон на грани магнећења мали (око половине напона напајања примара), због чега расту и вредности L_μ и R_a , па се, смањују i_μ и i_a .

Шема која настаје након уклањања попречне гране приказана је на слици 3.11, а након изостављања и отпорности намотаја (овакво занемарење је оправдано код великих трансформатора, код којих је реактанса расипања много већа од активне отпорности намотаја) на слици 3.12.



Слика 3.11



Слика 3.12

3. 4. Огледи кратког споја и празног хода

Помоћу огледа кратког споја се проверава да ли су стварни губици услед протицања струје кроз намотаје мањи од њихове гарантоване вредности.

Помоћу огледа празног хода се проверава да ли су стварни губици у магнетном колу мањи од њихове гарантоване вредности.

Помоћу огледа празног хода се проверава и вредност струје магнећења.

Поред тога, на основу резултата огледа кратког споја могу се одредити сви 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 ближи номиналном, доведе на ниженапонску страну.

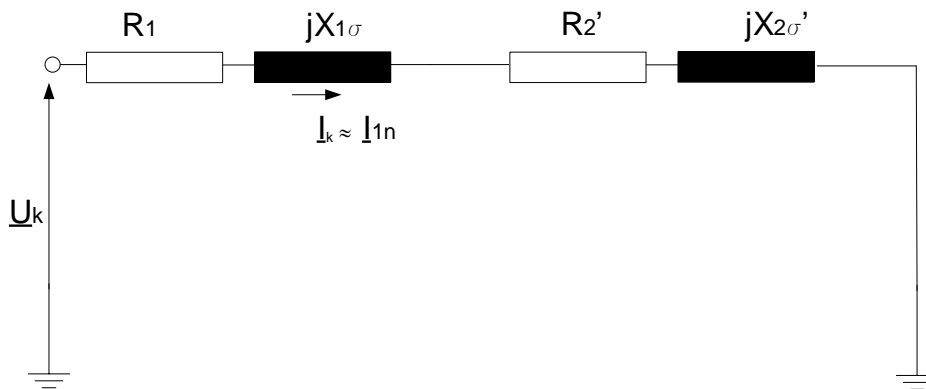
Уколико се огледи изведу на горе наведени начин, приближно иста опрема се може користити у оба огледа – огледу кратког споја и огледу празног хода.

3.4.1. Оглед кратког споја

Оглед кратког споја значи да се намотаји секундера кратко споје, а на примар се доводи напон. Током огледа кратког споја мере се 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

Струја кроз грану магнећења, како њена реактивна компонента I_μ , тако и њена активна компонента I_a , имају малу вредност услед малог магнетног флукса кроз магнетно коло који је последица малог напона на примару. Због тога се струја I_0 , односно њене компоненте I_μ и I_a могу занемарити, односно може се сматрати да је струја кроз примар приближно једнака струји кроз секундар сведеној на напонски ниво примара. Ово практично значи да се у општој заменској шеми на слици 3.10 може изоставити грану магнећења, као што је приказано на слици 3.11, после чега се шема за оглед кратког споја своди на облик приказан на слици 3.13.



Слика 3.13

Из измерених вредности се одређују:

- Импеданса кратког споја

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \left(= \frac{U_{kn}}{I_{1n}} \right) \quad (3.16)$$

- Активна отпорност кратког споја

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2} \left(= \frac{P_{kn}}{I_{1n}^2} \right) \quad (3.17)$$

- Реактанса кратког споја

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (3.18)$$

На основу заменске шеме може се написати

$$R_k = R_1 + R_2' \quad (3.19)$$

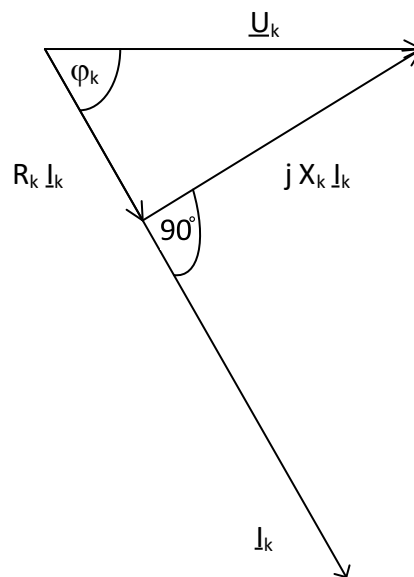
$$X_k = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \quad (3.20)$$

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 је еквивалентна претпоставци да је $R_1 = 0$, $R_2' = R_k$, 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

$$\underline{U}_k = (R_k + j X_k) \underline{I}_k, \quad (3.21)$$

дат је на слици 3.14.



Слика 3.14

Троугао кратког споја се често представља у релативним јединицама, или у процентима (приказују се вредности напона подељене са номиналним напонем U_n). 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 фазорског дијаграма на слици 3.14, за $I_k = I_n$ могу се написати следећи изрази за компоненте напона кратког споја у релативним јединицама:

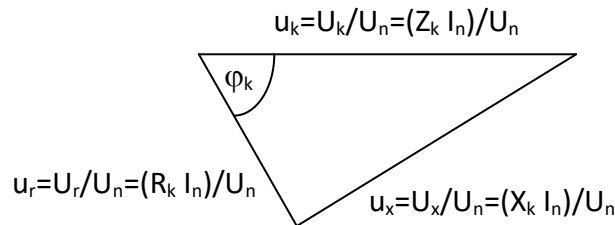
$$u_k = \frac{U_k}{U_n} = \frac{Z_k I_n}{U_n} \quad (3.22)$$

$$u_r = \frac{U_r}{U_n} = \frac{R_k I_n}{U_n} = \frac{R_k I_n^2}{U_n I_n} = \frac{P_k}{S_n} \quad (3.23)$$

$$u_x = \frac{U_x}{U_n} = \frac{X_k I_n}{U_n} = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} \quad (3.24)$$

Троугао кратког споја у релативним јединицама (једначине (3.22) – (3.24)) приказан је на слици 3.15. Процентуалне вредности се добијају из релативних, множењем са 100:

$$u_k (\%) = 100 u_k = 100 \frac{U_k}{U_n} \quad (3.25)$$



Слика 3.15

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

$$u_k (\%) = 100 \frac{U_k}{U_n} = 100 \frac{Z_k I_n}{U_n} = 100 \frac{Z_k}{Z_n} \quad (3.26)$$

Дакле,

$$u_k (\%) = z_k (\%) \quad (3.27)$$

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 настају у конструкционим деловима трансформатора, а настају као последица флукса који се затвара кроз те делове, а који је проузрокован протицањем струје кроз намотаје. Дакле, снага измерена ватметром (P_k), поред компоненте губитака у самим намотајима

$$P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} \quad (3.28)$$

односно

$$P_{Cu} = R_1 I_1^2 + R_2' I_2'^2 \quad (3.29)$$

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

Као што ће се показати у поглављу 4, вредности губитака у намотају се састоје од две компоненте P_J (једнак производу отпора намотаја једносмерној струји и квадрата струје) и P_d (додатни губици), које се могу се добити прорачуном 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 :

$$P_s = P_k - P_{Cu} = P_k - P_J - P_d \quad (3.30)$$

Оглед кратког споја по правилу се врши у хладном стању (температура трансформатора једнака температури амбијента) и траје кратко, 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. Доминантан је део губитака P_J , који расте са порастом температуре, док додатни губици у намотају P_d опадају са температуром (детаљи следе у наредном поглављу 4), док се за P_s може применити апроксимација да се не мењају са температуром конструкционих елемената / суда. Као што ће се видети, из израза који описују температурно зависност компоненти губитака P_J и P_d могу се прорачунски одредити њихове вредности при било којој температури, па и номиналној. Ово прерачунавање се користи за одређивање губитака током рада трансформатора при номиналним условима на мрежи, полазећи од вредности измерених у огледу кратког споја у хладном стању.

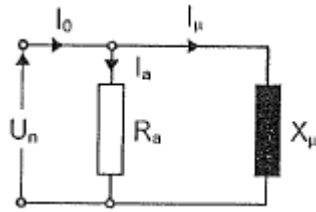
3.4.2. Оглед празног хода

Током огледа празног хода, који се по правилу изводи тако што се прикључци на вишенпонској 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 напајањог 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

$$Y_0 = \frac{1}{Z_0} = \frac{I_0}{U_0} \quad (3.31)$$

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

$$G_a = \frac{1}{R_a} = \frac{P_0}{U_0^2} \quad (3.32)$$

- Суцептанса или реактанса магнећења

$$B_\mu = \frac{1}{X_\mu} = \sqrt{Y_0^2 - G_a^2} \quad (3.33)$$

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). ЕМС E_I која се има у заменској шеми на грани магнећења разликује се од напона на који је прикључен примар U_I (оптерећење трансформатора је најчешће индуктивно, и у том случају је $E_I < U_I$). 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 ЕМС-и E_I која се има при номиналном раду оптерећеног трансформатора на мрежи. Како E_I зависи од оптерећења (како од вредности струје, тако и од њеног фазног става), што ће се показати у наставку курса, оглед празног хода се изводи за више вредности напона, на пример у опсегу од -10% до +10% у односу на номинални. Овим експериментом се може проверити грешка која се чини применом константних вредности параметара у попречној грани заменске шеме.

- Коначно, из огледа празног хода одређује се и преносни однос трансформатора, као однос измерених вредности напона напајања (ниженапонска страна U_{20}) и напона на отвореним крајевима (вишенапонска страна U_{10}):

$$n = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (3.34)$$

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.

3.5. Трофазни трансформатор

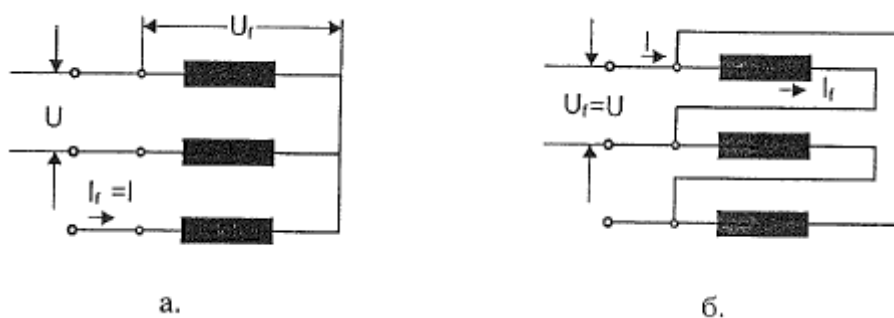
Уколико је трофазни систем уравнотежен, све што је до сада речено важи и даље, при чему се односи на једну фазу. У уравнотеженом трофазном систему напони и струје на сваком од намотаја примара, односно на сваком од намотаја секундара, у свакој од три фазе имају исте вредности (померене у времену за $2/3$ 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 струје кроз намотај износи $I = I_n = \sqrt{3} I_f$.



Слика 3.17

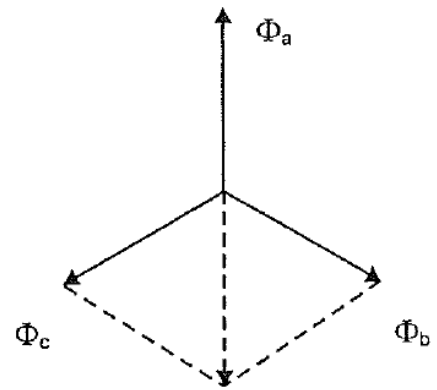
У уравнотеженом трофазном систему ефективне вредности напона на сваком од намотаја примара су исте, док им се фазни ставови разликују за $2\pi/3$. Исто важи и за напоне на секундарним намотајима.

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, заменска шема за физичке намотаје примара и секундара на једном стубу се приказује четворокрајником – два краја представљају крајеве намотаја примара, а два краја крајеве намотаја секундара.

Повезивање крајева четворокрајника намотаја се врши у складу са спрегом трансформатора. То важи за два краја физичких намотаја све три фазе примара и два краја физичких намотаја све три фазе секундара. Спрега звезда је приказана на слици 3.17а, а спрега троугао на слици 3.17б.

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.

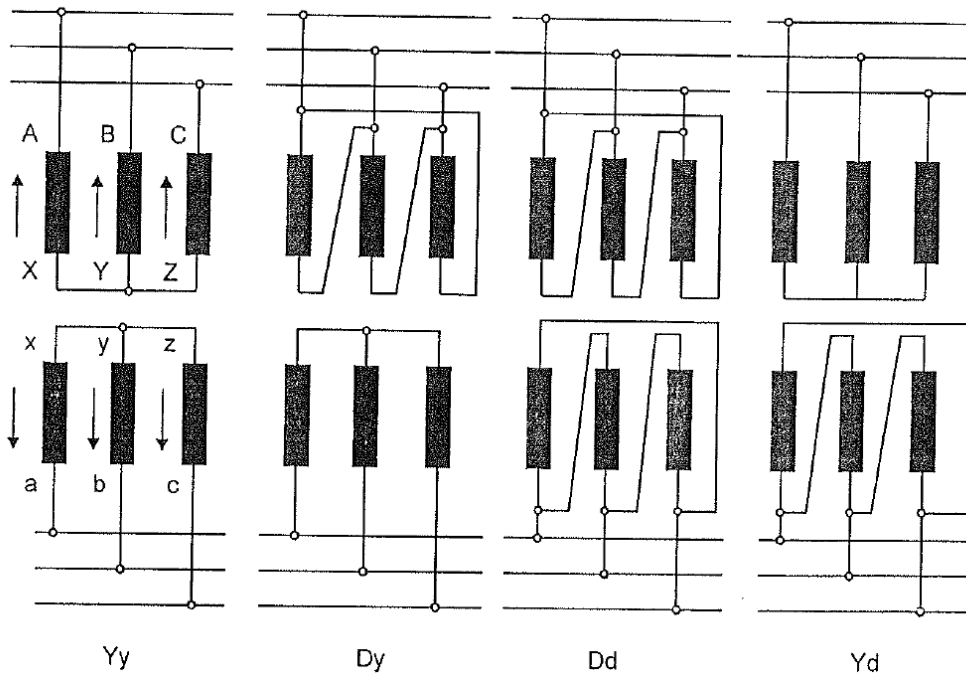
Примена конструкције трофазног трансформатора у трофазним системима, уместо да се користе три монофазна трансформатора, представља економично решење. Може се рећи да се основа ниже цене трофазног трансформатора заснива на чињеници да је векторски збир магнетних флуксева по фазама једнак нули ($\underline{\Phi}_a + \underline{\Phi}_b + \underline{\Phi}_c = 0$, 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

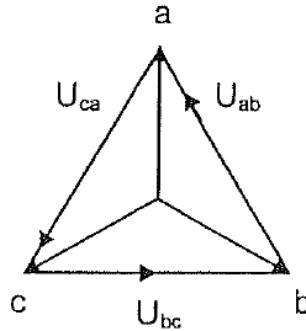
Као што ће се видети, ситуација није увек тако једноставна, јер се у пракси јављају и несиметрични радни режими, када је $\underline{\Phi}_a + \underline{\Phi}_b + \underline{\Phi}_c \neq 0$, због чега се конструкција трофазног трансформатора са три стуба у једној равни при несиметричним режимима неће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

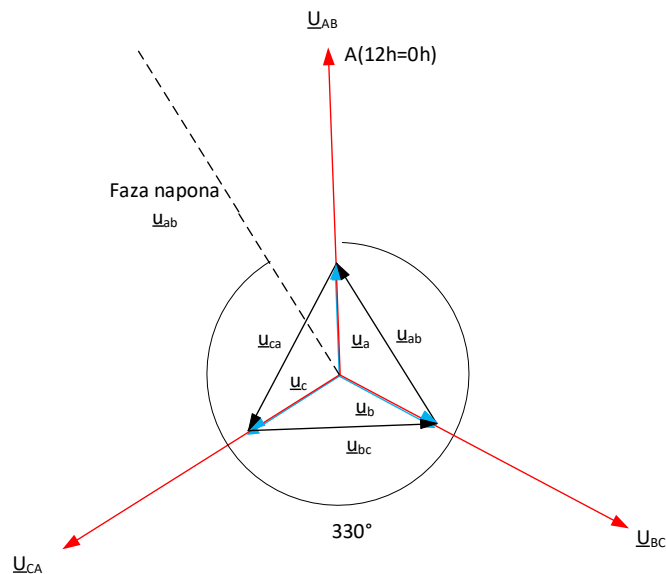
Главна разлика између спрега је што се код спреге звезда (y) могу користити и фазни (U_a, U_b, U_c) и линијски напони (U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}) – слика 3.20. За коришћење фазних напона неопходно је из трансформатора извући прикључак за звездиште (неутралну тачку). У случају изведеног прикључка за звездиште ознаки спреге 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 (на пример a и A , c и C , ab и AB). Тај фазни став зависи од начина повезивања крајева намотаја, али и од тога којим словним ознакама су означени изводи. Примера ради, за спрегу Yy на слици 3.19, претпостављајући да су хомологи крајеви намотаја на стубовима ка странама ВН и НН мреже, 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 b и c .

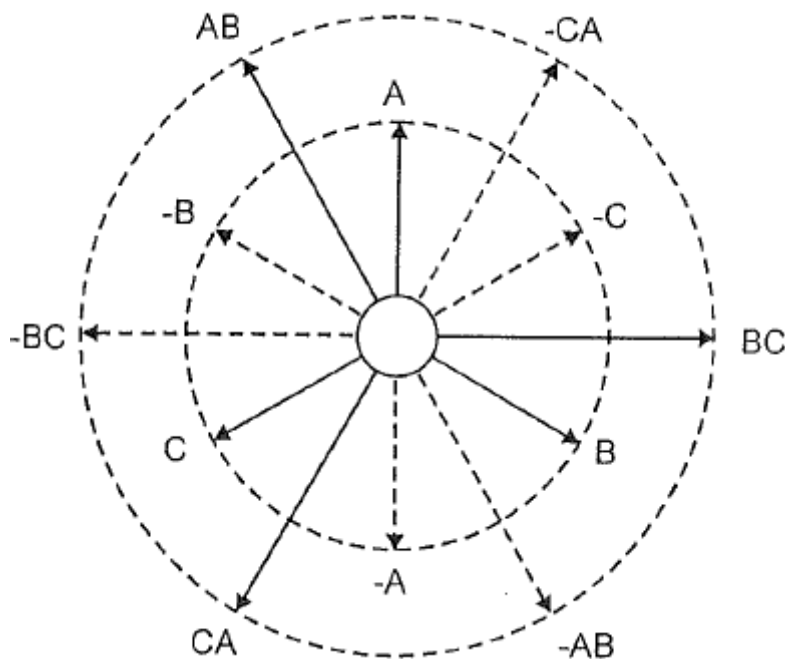
Посматрајмо спрегу Dy на слици 3.19. На основу до сада приказаног у овом поглављу, ЕМС-е у намотајима примара и секундара који се налазе на истом стубу су у фази, при чему је усмерење ЕМС-а означено хомологним крајевима. Линијски напон на примару U_{AB} је у фази са ЕМС на стубу фазе A . Линијски напон на секундару U_{ab} је једнак фазорском збиру ЕМС-а у намотају на стубу фазе a и фазе b . Имајући у виду фазне помераје $2\pi/3$ између ЕМС-а у намотајима на стубовима фазе a и фазе b , разликују се фазни ставови напона U_{AB} и U_{ab} (видети слику 3.21).



Слика 3.21

Фазни углови између истих фазора напона (фазних U_A / U_a , U_B / U_b , U_C / U_c или линијских U_{AB} / U_{ab} , U_{BC} / U_{bc} , U_{CA} / U_{ca}) на примару и на секундару мењају се са променом типа спреге (слика 3.19). Једноставним анализама се може доћи до закључка да су фазни помераји 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 напона на секундару у односу на напон на примару од 60° исказује се као сатни број од 2 сата, а предњачење од 30° као сатни број од 11 сати.

На слици 3.22 су приказани фазни и линијски напони на вишенAPONској страни.



Слика 3.22

Слика 3.22 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 3.23 б)).

Сатни број другог намотаја (секундара) одређује се на основу фазног кашњења напона секундара у фази a у односу на напон примара у фази A (без обзира да ли „фазни напони“ примара и секундара постоје физички (спрега Y за примар, односно y за секундар) или не (спрега D за примар, односно 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). Овај сатни број се одржава и између преосталих напона: b / B , c / C , bc / BC , ca / CA .

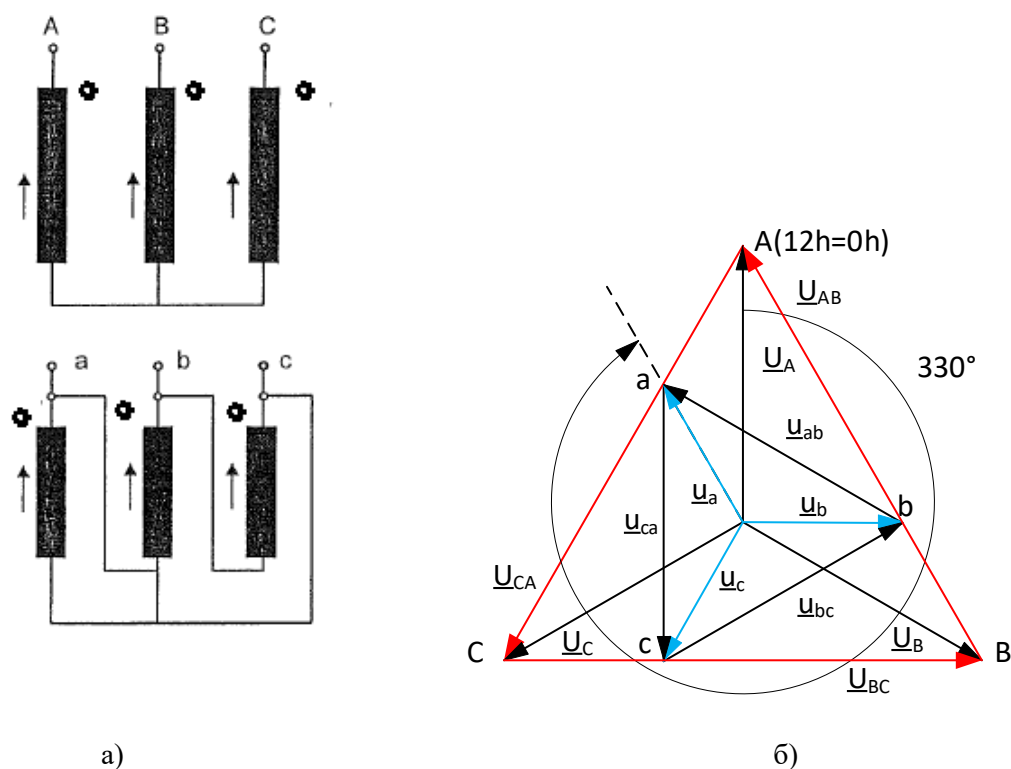
Илустрација одређивања сатног броја ће се дати за пример приказан на слици 3.23 а) (спрега Yd). Као што је речено, полази се од ЕМС-а по стубовима, уважавајући конвенцију о хомологним крајевима. Фазни напони на примару (U_A , U_B , U_C) су једнаки ЕМС на примару.

Фазни ставови линијских напона на секундару су једнаки:

- За напон u_{ab} негативан фазни напон фазног напона U_B
- За напон u_{bc} негативан фазни напон фазног напона U_C
- За напон u_{ca} негативан фазни напон фазног напона U_A

Фазорски дијаграм напона је приказани на слици 3.23 б). Сатни број се може одредити на основу фазног помераја напона u_{ab} на секундару у односу на напон \underline{U}_{AB} на примару. Фазно кашњење износи 330° , што значи да је сатни број 11.

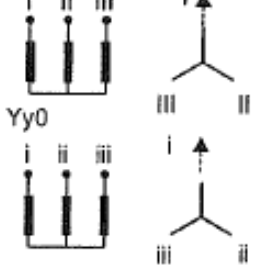

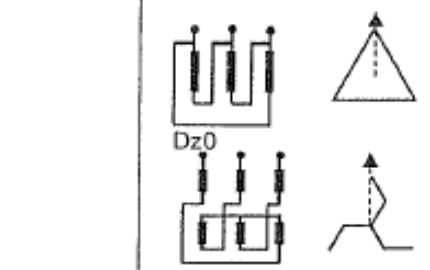
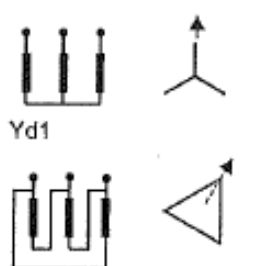
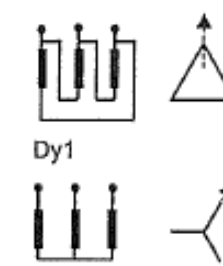
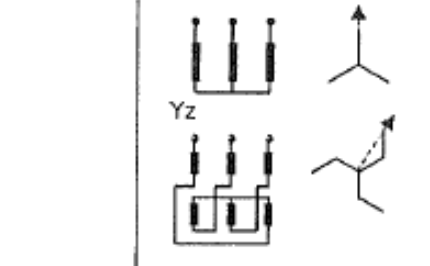
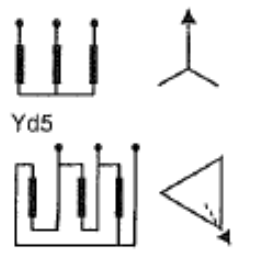
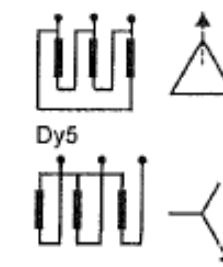
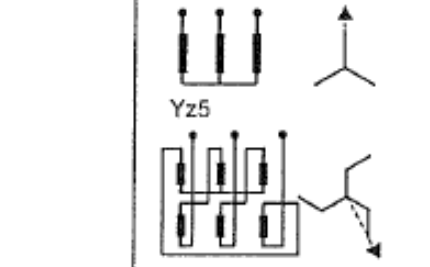
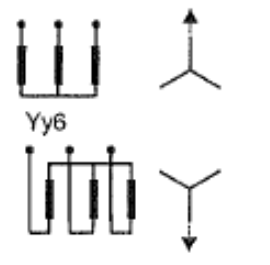
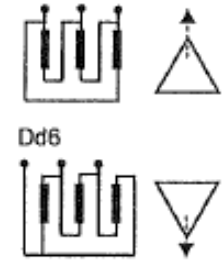
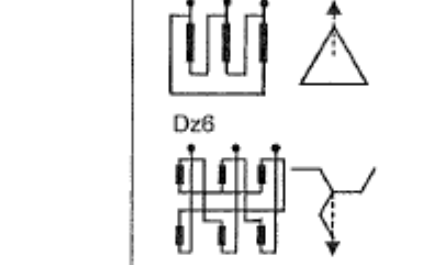
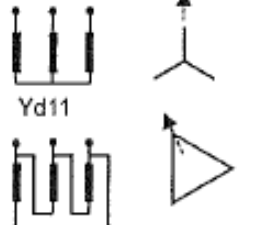
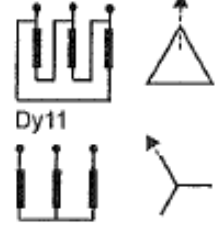
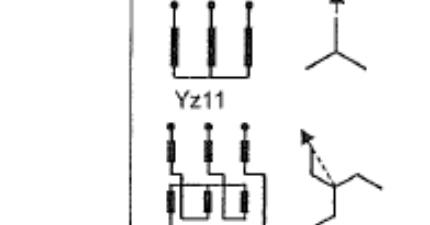
Сатни број је било могуће одредити и посматрањем фазних напона. Користећи претходно објашњени принцип формирања (еквивалентних) фазних напона на секундару, спрегнутом у троугао (d), могу се нацртати (плавом линијом) и (еквивалентни) фазни напони на секундару ($\underline{u}_a, \underline{u}_b, \underline{u}_c$).



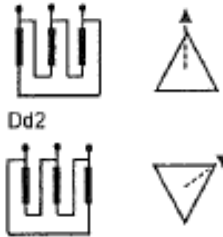
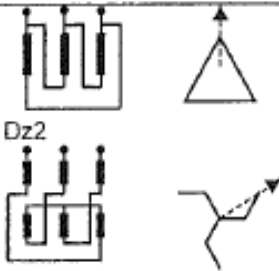
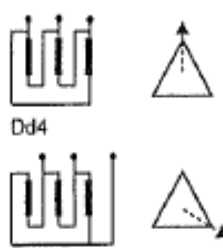
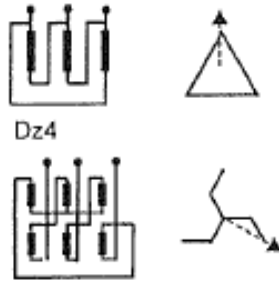
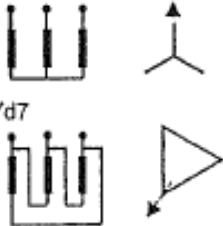
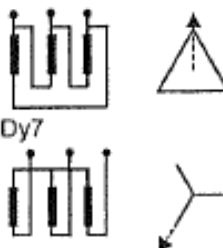
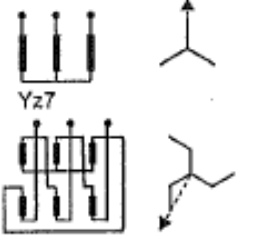
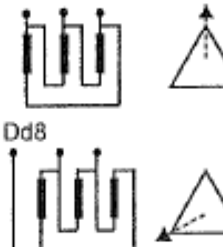
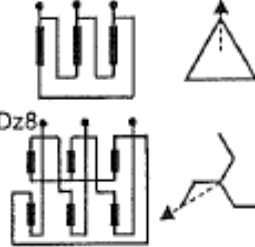
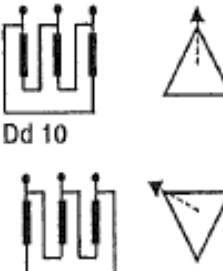
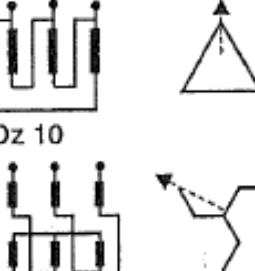
Слика 3.22

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 3.2 – Уобичајене спреге трофазних трансформатора

0	 <p>Yy0</p>	 <p>Dd0</p>	 <p>Dz0</p>
1	 <p>Yd1</p>	 <p>Dy1</p>	 <p>Yz</p>
5	 <p>Yd5</p>	 <p>Dy5</p>	 <p>Yz5</p>
6	 <p>Yy6</p>	 <p>Dd6</p>	 <p>Dz6</p>
11	 <p>Yd11</p>	 <p>Dy11</p>	 <p>Yz11</p>

Табела 3.3 – Допунске спреге трофазних трансформатора

2		 <p>Dd2</p>	 <p>Dz2</p>
4		 <p>Dd4</p>	 <p>Dz4</p>
7	 <p>Yd7</p>	 <p>Dy7</p>	 <p>Yz7</p>
8		 <p>Dd8</p>	 <p>Dz8</p>
10		 <p>Dd10</p>	 <p>Dz10</p>

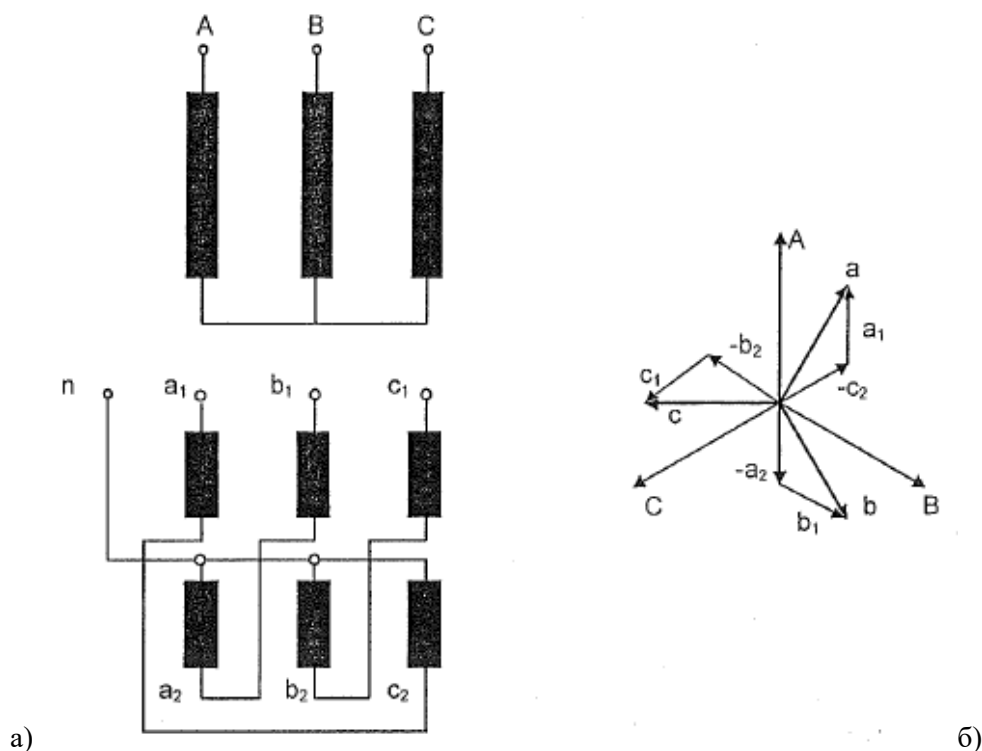
Опис спреге „сломљена звезда“ (z спрега):

Спрега $Yzn1$ је приказана на слици 3.23 а). Намотаји „1“ и „2“ су намотани око стубова магнетног кола на исту страну. Фазорски дијаграм је приказан на слици 3.23 б). Напон фазе а (између прикључка a_1 и n) је једнак

$$\underline{U}_a = \underline{U}_{a1} - \underline{U}_{c2} \quad (3.35)$$

Имајући у виду да је троугао који формирају вектори U_a , U_{a1} , U_{c2} једнакокраки и да је угао између основе (U_a) и крака 30° , може се написати

$$U_a = 2 U_{a1} \cos 30^\circ = 1.732 U_{a1} \quad (3.36)$$



Слика 3.23

Да је спрега на секундару била звезда, односно да су 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

$$U_a = 2 U_{a1} \quad (3.37)$$

Другим речима, за остварење исте вредности напона, у случају примене спреге Yzn потребно је намотати $2 / \sqrt{3} = 1.15$ пута више навојака него што би било потребно у случају спреге Yyn . Исти однос важи и за снаге. z спрега има добре особине у погледу елиминисања утицаја нулте компоненте и триплих хармоника (хармоника реда дељивог са три), због чега налази значајно место примене у енергетским претварачима. У случају симетричног оптерећење трипли хармоници у све три фазе имају исте вредности, због чега спрега разломљена звезда елиминира појаву магнетопобудне силе учестаности триплих хармоника по стубовима тростубног трансформатора.