

**Испит спремат по овом тексту.**

Делове текста између маркера

и

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

## **10. Специјални трансформатори**

У претходним поглављима је било говора о „*стандардним трансформаторима*“, чије су карактеристике: по намени енергетски, по броју фаза трофазни и монофазни, по броју фазних намотаја двонамотајни и тронамотајни, и то галвански раздвојени (веза помоћу магнетног флукса), за простопериодичне напоне сталне учестаности (50Hz или 60Hz), са хлађењем активног дела уљем (изолационом течносту) или ваздухом.

Поред ових „*стандардних трансформатора*“, постоји читав низ „*специјалних трансформатора*“, као што су:

- 1) Трансформатори за претварање броја фаза (из 3 у 2, 6, 12)
- 2) Аутотрансформатори
- 3) Трансформатори за енергетске претвараче – са несинусоидалним напонима и струјама
- 4) Трансформатори са више извода (за „регулацију“ напона)
- 5) Допунски (редни) трансформатори
- 6) Мерни трансформатори

У овом поглављу су дате основне карактеристике специјалних трансформатора, као и неке додатне информације о тронамотајним и сувим трансформаторима, који су поменути у претходном делу курса.

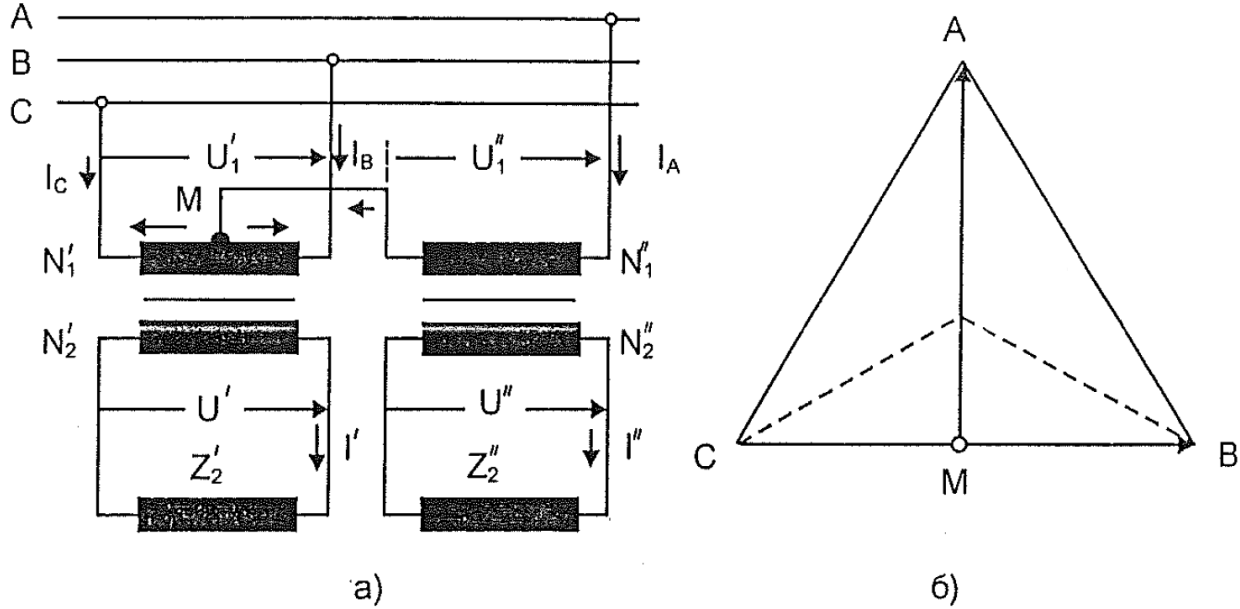
### **10.1. ПРЕТВАРАЧИ БРОЈА ФАЗА**

У различитим инжењерским применама од интереса је добијање вишефазних напона и струја из трофазног система напона и струја (који стандардно постоје у електродистрибутивним мрежама). У овом поглављу се приказују решења којима се напони и струје из трофазног система помоћу трансформатора са намотајима и магнетским језгрима претварају у следеће системе:

- двофазни систем
- шестофазни систем
- дванаестофазни систем

### 10.1.1. Претварање трофазног у двофазни систем

Оно се може остварити помоћу два једнофазна трансформатора, од којих један има извод на средини примарног намотаја. Оваква спрега се назива *Scott*–ова спрега. На слици 10.1 а) је дата шема, а на слици 10.1 б) фазорски дијаграм ове спреге.



Слика 10.1

Преносни односи трансформатора износе  $n' = (N_1'/N_2')$  и  $n'' = (N_1''/N_2'')$ . Напон на првом секундарном намотају ( $U'$ ) је у фази са линијским примарним напоном  $U_{BC}$ , док је напон на другом секундарном намотају ( $U''$ ) у фази са напоном између средишње тачке првог примарног намотаја (везаног између тачака В и С напојне мреже) и краја другог примарног намотаја (везаног на тачку А напојне мреже). Због тога су, као што се види на слици 10.1 б), напони на секундарним намотајима фазно померени за  $\pi/2$ . Да би напони  $U'$  и  $U''$  били исти, преносни односи трансформатора треба да буду различити. Однос преносних односа трансформатора  $n' / n''$  треба да буде једнак

$$(U_{BC} / U_{MA})^{-1} = (U_{BC} / (U_{AC} \sin(60^\circ)))^{-1} = (\sin(60^\circ))^{-1} = 2 / \sqrt{3} \quad (10.1)$$

Дакле, иста ефективна вредност напона на оба секундара се постиже када је

$$n' / n'' = (N_1' / N_2') / (N_1'' / N_2'') = 2 / \sqrt{3}. \quad (10.2)$$

Ако би се број навојака на секундару фиксирао,  $N_2' = N_2''$ , количник броја навојака на примару првог трансформатора и на примару другог трансформатора треба да буде

$$N_1' / N_1'' = 2 / \sqrt{3}. \quad (10.3)$$

Са  $n$  ће се означити преносни однос

$$n = N_1' / N_2'; \quad (10.4)$$

Однос броја навојака на првом трансформатору  $N_1' / N_2'$  одређен је односом линијског мрежног напона и потребног напона на секундару трансформатора:

$$n = N_1' / N_2' = U_n / U' \quad (10.5)$$

Сада се може одредити преносни однос другог трансформатора:

$$N_1'' / N_2'' = (\sqrt{3} / 2) (N_1' / N_2') = (\sqrt{3} / 2) n. \quad (10.6)$$

Сада ће се показати да су линијске струје, које протичу ка мрежи, за случај истог оптерећења на секундарима два трансформатора ( $Z_2' = Z_2''$ ), једнаке и фазно померене за  $120^\circ$ .

Као што је показано, напони на секундарима трансформатора су у квадратури

$$\underline{U}'' = j \underline{U}' \quad (10.7)$$

Из (10.7) и једнакости импеданси на секундару ( $Z_2' = Z_2''$ ), проистиче

$$\underline{I}'' = j \underline{I}' \quad (10.8)$$

Једнакост ампернавојака за први трансформатор даје

$$N_2' \underline{I}' = \frac{N_1'}{2} (\underline{I}_B - \underline{I}_C), \quad (10.9)$$

а за други

$$N_2'' \underline{I}'' = N_1'' \underline{I}_A \quad (10.10)$$

Из (10.10) следи

$$\underline{I}_A = \frac{N_2''}{N_1''} \underline{I}'' = \left( \frac{N_1''}{N_2''} \right)^{-1} \underline{I}'' = \left( \frac{\sqrt{3}}{2} n \right)^{-1} \underline{I}'' = \frac{1}{n} \frac{2}{\sqrt{3}} \underline{I}'' \quad (10.11)$$

односно

$$\underline{I}'' = n \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{I}_A \quad (10.12)$$

Из

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0 \quad (10.13)$$

следи

$$\underline{I}_C = -(\underline{I}_A + \underline{I}_B) \quad (10.14)$$

Заменом  $\underline{I}_C$  из (10.14) у (10.9) добија се

$$N'_2 \underline{I}' = \frac{N'_1}{2} (\underline{I}_B + \underline{I}_A + \underline{I}_B) \quad (10.15)$$

Имајући у виду (10.8), претходни израз постаје

$$N'_2 \frac{\underline{I}''}{j} = \frac{N'_1}{2} (2 \underline{I}_B + \underline{I}_A) \quad (10.16)$$

$$\underline{I}'' = j \frac{n}{2} (2 \underline{I}_B + \underline{I}_A) \quad (10.17)$$

Уврштавањем  $\underline{I}''$  из (10.12) у претходни израз добија се

$$n \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{I}_A = j \frac{n}{2} (2 \underline{I}_B + \underline{I}_A) \quad (10.18)$$

$$-j \sqrt{3} \underline{I}_A = 2 \underline{I}_B + \underline{I}_A \quad (10.19)$$

$$\underline{I}_B = \left( -\frac{1}{2} - \frac{j \sqrt{3}}{2} \right) \underline{I}_A \quad (10.20)$$

Из (10.14) и (10.20) се долази до

$$\underline{I}_C = - \left( 1 + \left( -\frac{1}{2} - \frac{j \sqrt{3}}{2} \right) \right) \underline{I}_A \quad (10.21)$$

$$\underline{I}_C = \left( -\frac{1}{2} + \frac{j \sqrt{3}}{2} \right) \underline{I}_A \quad (10.22)$$

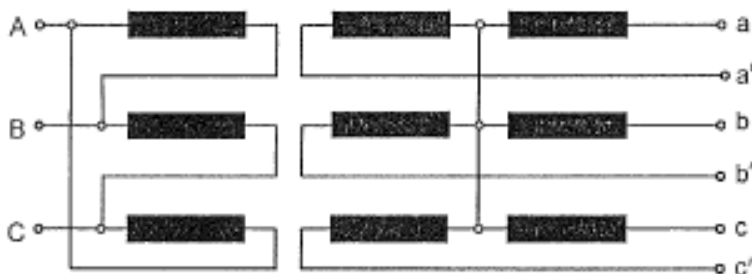
Струја  $\underline{I}_B$  фазно касни за струјом  $\underline{I}_A$  за  $120^\circ$ , а струја  $\underline{I}_C$  фазно предњачи у односу на струју  $\underline{I}_A$  за  $120^\circ$ . Ефективна вредност струја  $\underline{I}_B$  и  $\underline{I}_C$  је једнака ефективној вредности струје  $\underline{I}_A$ . То значи да се применом приказане спреге постиже да се оптерећење два монофазна пријемника са сртране мреже види као уравнотежено и симетрично.

Карактеристична примена *Scott*-ове спреге је прикључење две монофазне индукционе пећи (градиво из предмета Термички процеси у електроенергетици) на трофазну мрежу.

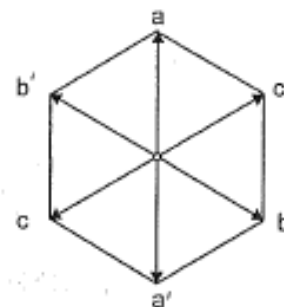
Поред наведене примене напајања двофазног система из трофазне мреже, ова спрега може да се користи и обрнуто, за претварање двофазног система напона у квадратури у симетричан трофазни систем. Применом мање модификације може се остварити и претварање трофазног система у четворофазни.

### 10.1.2. Претварање трофазног система у шестофазни

Шема је приказана на слици 10.2, а фазорски дијаграм напона на слици 10.3. Шестофазни систем се формира помоћу две звезде везане у опозицију (смер мотања намотаја у ове две звезде је, посматрано од звездишта ка изводу, различит, па су поларитети напона у ова два секундарна намотаја супротни).



Слика 10.2

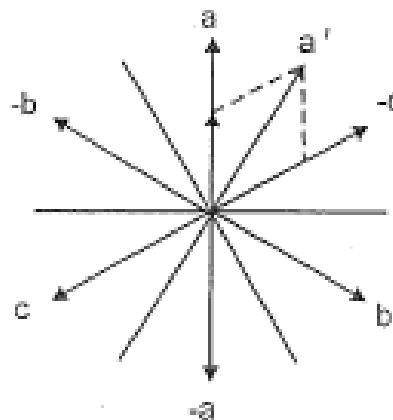


Слика 10.3

### 10.1.3 Претварање трофазног система у дванаестофазни

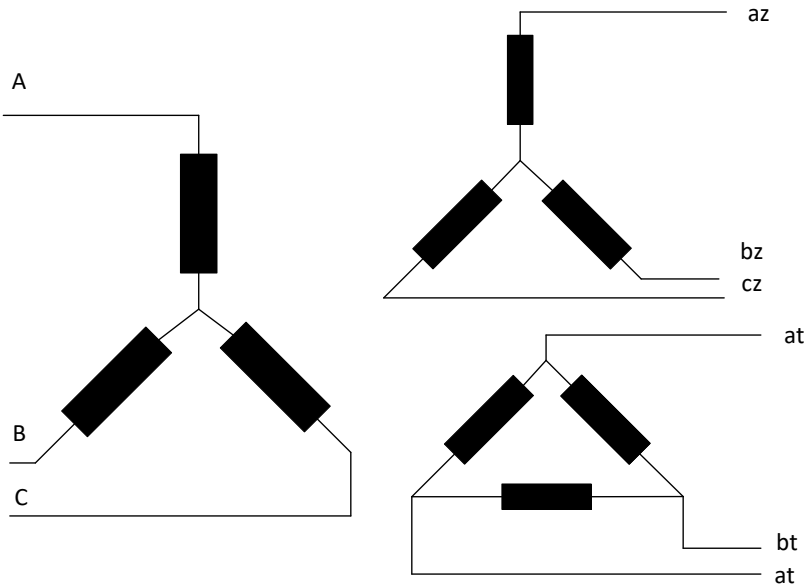
Приказаће се два начина. Оба начина се користе тако да се по принципу са слике 10.2 формирају два система намотаја, приказана у наставку, намотани на истом стубу у супротним смеровима.

Први начин је повезивањем делова намотаја, како је то приказано на слици 10.4, узимајући при томе одговарајући број навојака.

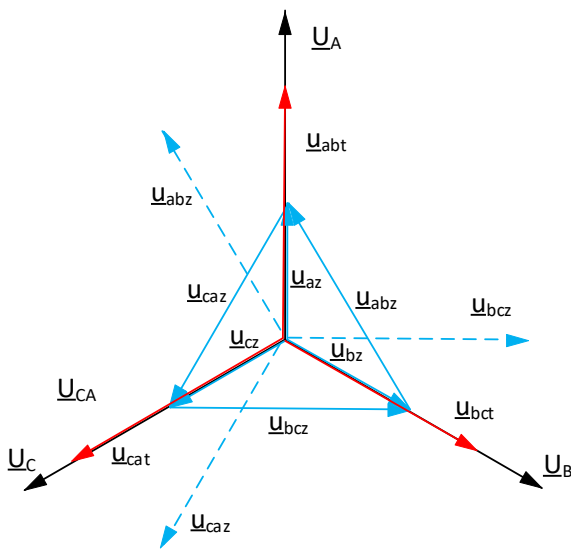


Слика 10.4

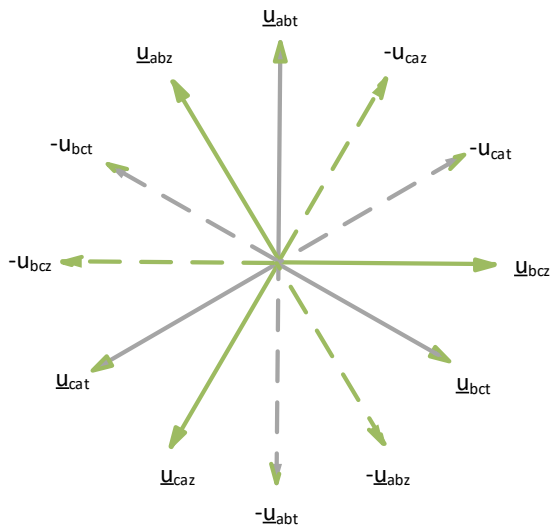
Други начин је спрезање (паралелно повезивање секундара): а) два различита трансформатора, при чему је примар једног спрегнут у звезду, а примар другог у троугао, б) једног трансформатора са два секундара, од којих је један везан у троугао, а други у троугао (приказан на слици 10.5). У наставку се детаљније приказује опција са једним трансформатором (спреге на примару звезда) и два секундара (спреге звезда и спреге троугао). Број навојака у намотају секундара који је везан у звезду је  $\sqrt{3}$  пута мањи од намотаја секундара који је везан у троугао. Фазорски дијаграм је приказан на слици 10.6. Применом принципа приказаног на слици 10.2 примењеног на трансформатор  $Yud$  са слика 10.5 формира се систем дванаестофазних напона приказаних на слици 10.7.



Слика 10.5



Слика 10.6



Слика 10.7

6-то фазни и 12-то фазни системи формирани на описани начин се користе у енергетским статичким претвараачима (исправљачима) да би се смањила валовитост једносмерног напона.

## 10.2. ТРОНАМОТАЈНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

До сада је углавном било речи о трансформаторима (монофазним или трофазним), са два намотаја по фази (примар и секундар, при чему се може догодити да, у случају да трансформатор повезује две активне мреже, намотаји примара и секундара промене улогу). Могуће је да по фази постоји и више од два намотаја. Ова могућност је помињана као решење са терцијарним намотајем

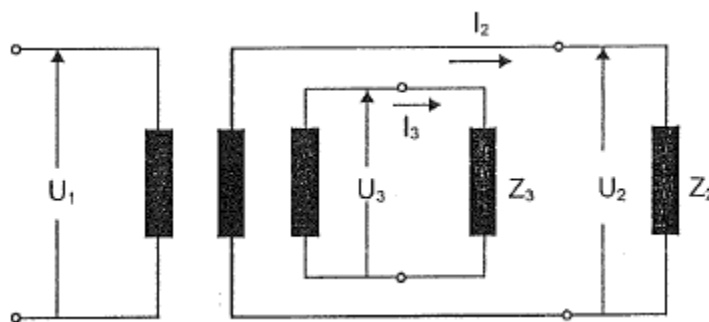
спрегнутим у троугао, које спречава протицање трећег хармоника струје, који настаје као резултат нелинеарног оптерећења на секундару, у мрежу (одељак 7.2.1). Терцијер спрегнут у троугао представља кратак спој за нулту компоненту струје посматрано са стране мреже прикључене на страну трансформатора са спреглом уземљена звезда. Једна од могућности је да се на терцијер прикључује кондензаторска батерија за компензацију реактивне снаге. У даљем тексту фокус ће бити на трансформаторима код којих сва три намотаја по фази преносе значајну снагу. У зависности од смера преноса снаге, постоје трансформатори:

- са једним примаром и два секундара
- са два примара и једним секундаром

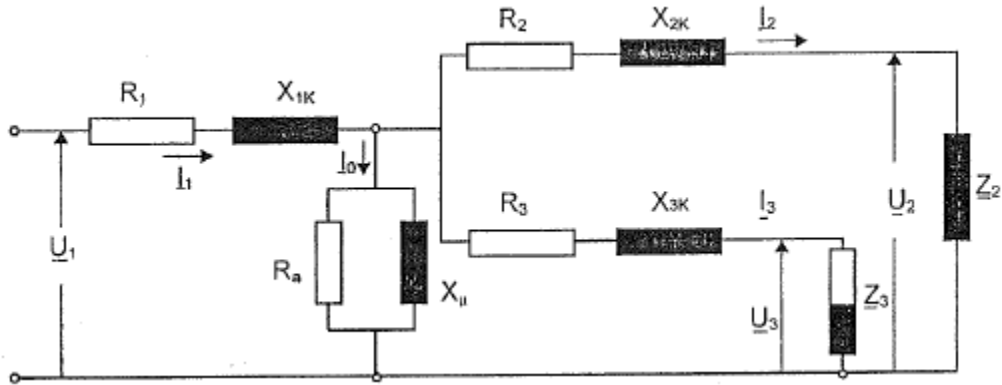
Овакви трансформатори се најчешће користе у разводним постројењима са три напонска нивоа (на пример 220kV, 110kV и 35kV) или у електранама, када се два генератора, по правилу истих напонских нивоа, повезују са преносном мрежом преко једног блок трансформатора. Типична ситуација је да трансформатор у постројењима има један примар (највишег напонског нивоа) и два секундара, а блок трансформатор у електрани два примара, нижег напонског нивоа, и један секундар, вишег напонског нивоа.

Оптерећење индивидуалних намотаја може бити произвољно, при чему важи да је збир улазних снага једнак збиру излазних снага и губитака у трансформатору. У зависности од намене трансформатора, конструкција може бити таква да су снаге намотаја једнаке (100 %  $S_n$ ), или, што је најчешће случај, снаге неких намотаја могу бити мање (на пример 70 %  $S_n$ , или снага на сваком од два ниженапонска намотаја на која се прикључују генератори може бити једнака 50 %  $S_n$ , док је снага високонапонског намотаја 100 %  $S_n$ ).

У циљу скраћења и поједностављења схватања суштине заменске шеме тронамотајних трансформатора, посматраће се један трансформатор са два секундара (слика 10.8), за који је заменска шема приказана на слици 10.9, при чему је узето да је однос трансформације између примара и сваког од два секундара  $n = 1 : 1$ .

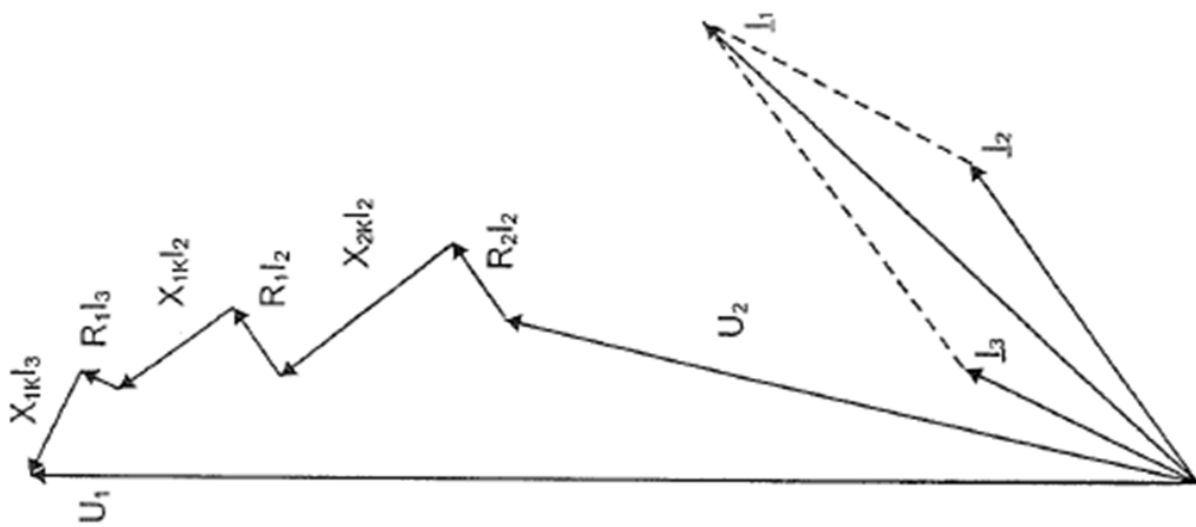


Слика 10.8



Слика 10.9

Фазорски дијаграм за напон  $\underline{U}_2$  (сличан дијаграм важи и за напон  $\underline{U}_3$ ) приказан је на слици 10.10. Параметри  $\{R_k, X_k\}$  могу се одредити рачунски или из мерења.



Слика 10.10

Рачунско одређивање параметара за случај двонамотајних трансформатора је разматрано у поглављу 4.А. Принципи и приступи из поглавља 4.А остају исти. У упрошћеном приступу (слика 4А.2) аксијална компонента магнетопобудне силе и магнетне индукције имају једну узлазну и једну силазну ивицу. У случају тронамотајних трансформатора са једним примаром постоји једна узлазна и две силазне ивице. Реактансе расипања намотаја примара и секундара тронамотајног трансформатора се могу одредити из једноставних мерења, из којих се одређује збир парова реактанси расипања. То није било могуће код двонамотајних трансформатора, па је однос реактанси расипања на примару и секундару одређиван или на основу прорачунских вредности



или је једноставно усвајано да су једнаке половини експериментално одређене реактансе расипања.

Оглед кратког споја се врши за све три могућности кратког споја, при чему је један намотај напајан (као примар), други кратко спојен (као секундар), а трећи отворен. Вредности импедансе кратког споја, исказане преко величина на шеми 10.9 приказане су у табели 10.1.

Прва два мерења (напајање са примара, а кратак спој на секундару и терцијеру; имплицитно се подразумева да напон опада или остаје исти од примара, преко секундара, до терцијера) дају импедансе кратког споја сведене на примар, а треће мерење (напајање са секундара и кратак спој на терцијеру) на секундар, па се ова импеданса мора свести на примар:

$$Z'_{k23} = Z_{k23} \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (10.23)$$

Мерењима се добијају вредности  $R_{k12}$ ,  $R_{k13}$ ,  $R_{k23}$ ,  $X_{k12}$ ,  $X_{k13}$ ,  $X_{k23}$ . Вредности отпорности и расипних реактанси по фазама се могу добити из измерених импеданси и њихове везе са вредностима по фазама, која је приказана у табели 10.1. Решавањем система три једначине са три непознате долази се до  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $X_{k1}$ ,  $X_{k2}$ ,  $X_{k3}$ . Детаљније ће се дати поступак за одређивање  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ .

Табела 10.1

Редни број	Напајани намотај	Краткоспојени намотај	Импеданса кратког споја
(1)	1	2	$\underline{Z}_{k12} = R_{12} + jX_{12} = R_1 + R_2 + j(X_{1k} + X_{2k})$
(2)	1	3	$\underline{Z}_{k13} = R_{13} + jX_{13} = R_1 + R_3 + j(X_{1k} + X_{3k})$
(3)	2	3	$\underline{Z}_{k23} = R_{23} + jX_{23} = R_2 + R_3 + j(X_{2k} + X_{3k})$

Из (1) + (2) – (3):

$$2 R_1 + (R_2 + R_3) - (R_2 + R_3) = R_{12} + R_{13} - R'_{23} \quad (10.24)$$

Из (1) + (3) – (2):

$$2 R_2 + (R_1 + R_3) - (R_1 + R_3) = R_{12} + R'_{23} - R_{13} \quad (10.25)$$

Из (2) + (3) – (1):

$$2 R_3 + (R_1 + R_2) - (R_1 + R_2) = R_{13} + R'_{23} - R_{12} \quad (10.26)$$

Одатле је

$$R_1 = \frac{1}{2} (R_{12} + R_{13} - R'_{23}) \quad (10.27)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} (R_{12} + R'_{23} - R_{13}) \quad (10.28)$$

$$R_3 = \frac{1}{2} (R_{13} + R'_{23} - R_{12}) \quad (10.29)$$

Идентичним поступком долази се до вредности реактанси расипања сваког од намотаја:

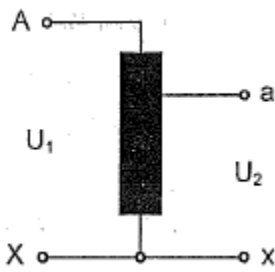
$$X_{1k} = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{13} - X'_{23}) \quad (10.30)$$

$$X_{2k} = \frac{1}{2} (X_{12} + X'_{23} - X_{13}) \quad (10.31)$$

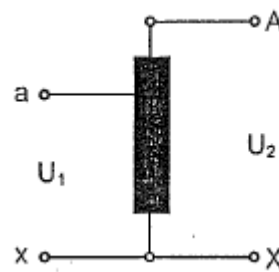
$$X_{3k} = \frac{1}{2} (X_{13} + X'_{23} - X_{12}) \quad (10.32)$$

### 10.3. АУТОТРАНСФОРМАТОРИ

Аутотрансформатори имају само један намотај, при чему је на крајеве намотаја везана вишенпонска страна, док је ниженапонска страна везана између једног од крајева намотаја и прикључка који је изведен на неком од навојака унутар намотаја. У зависности од тога где је прикључен примар, разликује се аутотрансформатор спуштач напона (тада је примар прикључен на крајеве намотаја – слика 10.11) и аутотрансформатор подизач напона (тада је примар прикључен између једног краја намотаја и извода са намотаја – слика 10.12).



Слика 10.11

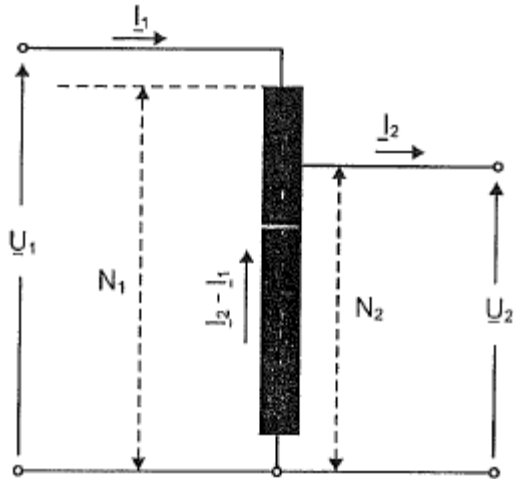


Слика 10.12

Као и код обичног трансформатора, кроз стуб магнетног кола пролази константан флуks, због чега је индукована електромоторна сила у сваком од навојака иста. Струја магнећења магнетног кола, исто као код обичног трансформатора, протиче кроз намотај примара. На основу чињенице да је индукована електромоторна сила у сваком од навојака иста, однос напона вишенпонске и нижанапонске стране једнак је односу укупног броја навојака и броја навојака између неутралне тачке и одцепа са намотаја:

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_{AX}}{N_{ax}} \quad (10.33)$$

За разлику од стандардног трансформатора, примар и секундар аутотрансформатора имају заједнички део намотаја, кроз који протиче струја чија је вредност једнака разлици струја ниженапонске и вишенпонске стране (слика 10.13).



Слика 10.13

У циљу лакшег разумевања принципа рада и ефеката који се постижу коришћењем конструкције аутотрансформатора у односу на конструкцију стандардног трансформатора, у тексту који следи занемариће се струја магнећења. Из закона о одржању енергије следи

$$\underline{U}_1 I_1^* = \underline{U}_2 I_2^* . \quad (10.34)$$

Из услова константног флукса у магнетном колу следи

$$\frac{U_1}{U_2} = n. \quad (10.35)$$

Из претходна два израза следи

$$\frac{I_2}{I_1} = n, \quad (10.36)$$

односно, имајући у виду (10.33)

$$N_{AX} I_1 = N_{ax} I_2. \quad (10.37)$$

До исте везе се може доћи из равнотеже магнетопобудних сила које делују у делу намотаја кроз који протиче струја примара ( $N_{AX} - N_{ax}$  навојака) и делу намотаја кроз који протиче разлика струја примара и секундара ( $N_{ax}$  навојака):

$$(N_{AX} - N_{ax}) I_1 = N_{ax} (I_2 - I_1) \quad (10.38)$$

Код трансформатора се разликују две (привидне) снаге. Прва снага је она која се преноси из мреже прикључене на примар, односно ка мрежи прикљученој на секундар. Ова снага се назива преносна или пролазна снага ( $S_P = U_1 I_1 = U_2 I_2$ ). Друга снага се назива инсталирана или типска снага ( $S_T$ ) и она је меродавна за одређивање физичке величине трансформатора и количине утрошеног материјала, а тиме и цене трансформатора. Код обичног трансформатора, ове две снаге су једнаке,

јер је снага која се преноси из мреже са које се напаја примар једнака снази намотаја примара, док је снага која се преноси ка мрежи напајаној са секундара једнака снази секундарног намотаја.

Типска снага заједничког дела намотаја и дела намотаја који припада само вишенпонској страни једнака је производу напона и струје на њему. Овај производ доста добро корелира са количином укупног утрошеног материјала (материјала магнетног кола и материјала намотаја). Део намотаја кроз који протиче само струја примара садржи  $N_{AX} - N_{ax}$  навојака, заједнички део намотаја садржи  $N_{ax}$  навојака и напон на овом заједничком делу намотаја износи  $U_2$ , што значи да је напон на делу намотаја кроз који протиче струја примара  $U_1 - U_2$ . Одатле следи да је типска снага дела намотаја који припада само вишенпонској страни

$$S_{ATP} = (U_1 - U_2) I_1 = U_1 (1 - 1/n) I_1 = S_{ATP} (1 - 1/n) \quad (10.39)$$

Типска снага заједничког дела намотаја износи

$$S_{ATZ} = U_2 (I_2 - I_1) = U_2 I_2 (1 - 1/n) = S_{ATP} (1 - 1/n) \quad (10.40)$$

Укупна типска снага ауотрансформатора износи

$$S_{ATT} = S_{ATP} + S_{ATZ} = 2 S_{ATP} (1 - 1/n) \quad (10.41)$$

Код обичног трансформатора, типске снаге примарног ( $S_{T1}$ ) и секундарног ( $S_{T2}$ ) намотаја међусобно су једнаке и једнаке су пролазној снази ( $S_{TP}$ )

$$S_{T1} = S_{T2} = U_1 I_1 = U_2 I_2 = S_{TP} \quad (10.42)$$

Укупна типска снага обичног трансформатора износи

$$S_{TT} = S_{T1} + S_{T2} = 2 S_{TP} \quad (10.43)$$

За исту пролазну снагу ауото трансформатора и обичног трансформатора ( $S_{ATT} = S_{TT}$ ), однос типских снага износи

$$\alpha = \frac{S_{ATT}}{S_{TT}} = (1 - 1/n). \quad (10.44)$$

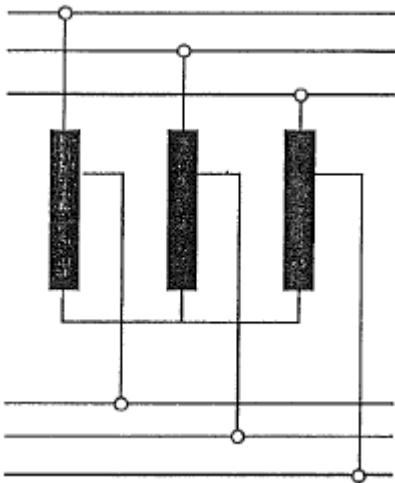
Вредност  $\alpha$ , а самим тим и снага  $S_{ATT}$ , утолико је мања уколико је однос напона примара и секундара  $n$  ближи јединици (када  $n$  тежи јединици,  $\alpha$  тежи нули). Примера ради, за  $n = 1.25$ ,  $\alpha = 0.2$ , за  $n = 2$ ,  $\alpha = 0.5$ ). Дакле, за преносне односе мање од 2, снага ауото трансформатора је мања од половине снаге стандардног трансформатора. Кроз нумерички пример на рачунским вежбама приказаће се колика је могућа уштеда у материјалу активног дела (бакру за израду намотаја и магнетних лимова за израду магнетног кола) када се уместо обичног трансформатора користи ауотрансформатор. Због уштеде материјала, за ауотрансформатор се користи и термин „трансформатор у штедном споју“ (*Spartrafo*).

Поред уштеде у материјалу за израду трансформатора, код аутотрансформатора за исту пролазну снагу биће мањи и губици (густина струје кроз проводнике и магнетна индукција у магнетном колу биће сличне, а укупна запремина намотаја и магнетног кола код аутотрансформатора је мања него код обичног трансформатора). Логична последица је да ће и степен искоришћења, рачунат у односу на пролазну снагу, бити већи код аутотрансформатора него код обичног трансформатора.

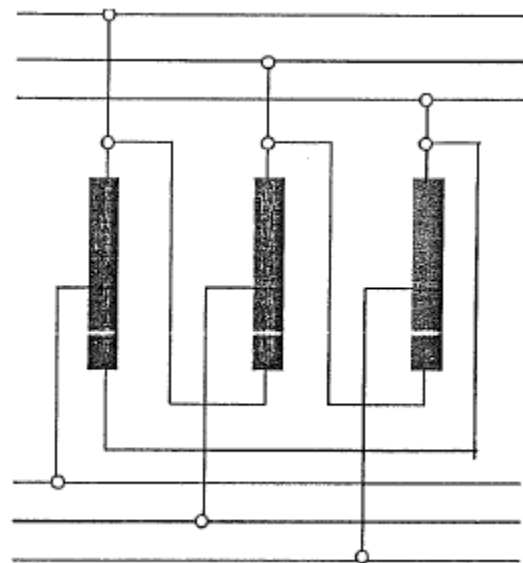
Уштеда материјала и смањење губитака су главни разлог за примену аутотрансформатора уместо стандардног трансформатора. Поред тога, постоје и друге разлике:

- Губи се изолација између примарног и секундарног намотаја, који су код обичног трансформатора спрегнути путем магнетног поља, док код аутотрансформатора постоји и директна галванска веза.
- Последица претходне чињенице је да се пренапони на високонапонској страни оштрије преносе на нисконапонску страну, односно на нисконапонску мрежу.
- Код аутотрансформатора су мање реактансе расипања, што има две важне последице:
  - струје кратког споја су веће, самим тим већа су и механичка напрезања, због чега се мора ојачати механичка конструкција трансформатора
  - пад напона на трансформатору је мањи, што је погодно, поготову при старту великих асинхроних мотора

Аутотрансформатори се, чак и за врло велике снаге, израђују као трофазни, различитих спрега (пример спреге у звезду је дат на слици 10.14, а спреге у троугао на слици 10.15). За пример звезде са слике 10.14 потребан је и намотај терцијера везан у троугао како би напони на намотајима били синусоидални, односно како се не би појавио напон између звездишта и земље (видети одељак 7.2.2).



Слика 10.14



Слика 10.15

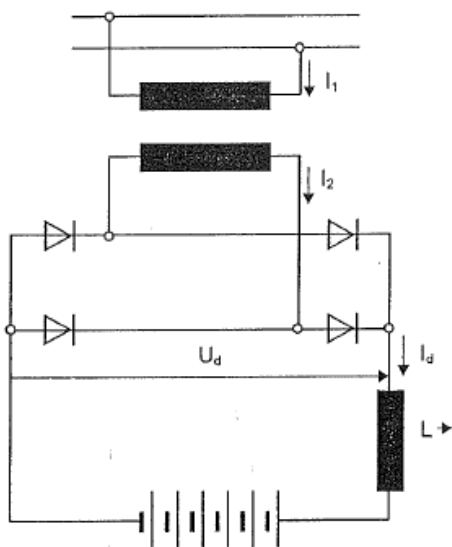
## 10.4. ТРАНСФОРМАТОРИ ЗА СТАТИЧКЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ПРЕТВАРАЧЕ

Заједничко за ову широку класу трансформатора је да се примењују у широком опсегу учестаности, као и то да напони и струје нису простопериодичног облика. У неким случајевима може се десити да се појави и једносмерна компонента у резултујућој магнетопобудној сили која изазива померај на магнетној карактеристици и може да доведе до засићења језгра.

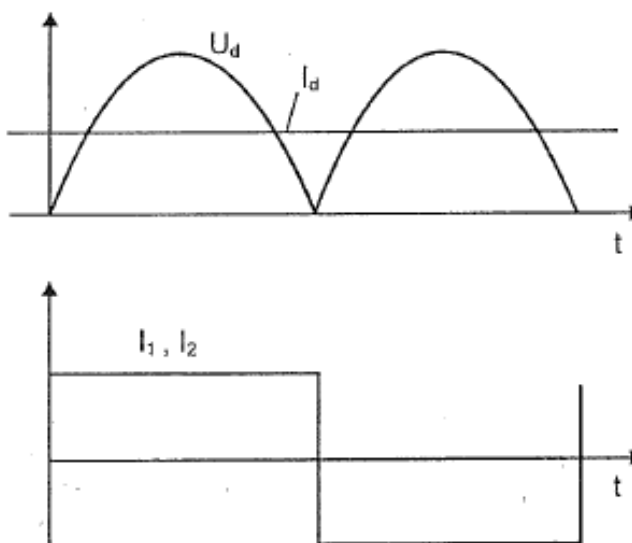
Конструкција и карактеристике трансформатора у уређајима са статичким енергетским претварачима (у уређајима енергетске електронике) је актуелна развојна у електроенергетици. Поред развоја нових технологија за полупроводничке материјале и компоненти израђених од њих, које омогућавају више прекидачке учестаности и смањење губитака, веома је важно оптимизовати трансформатор, јер он значајно утиче на цену, габарит, тежину и степен искоришћења целокупног уређаја. Код фотонапонских (ФН) генератора (генератора електричне из сунчеве енергије) често се примењује решење да се једносмерни напон ФН генератора прво претвори у наизменични напон високе учестаности, затим помоћу трансформатора подигне, после чега се исправља у једносмерни напон, а затим инвертором претвори у наизменични напон мрежне учестаности. Код већих снага ФН генератора електрична енергија се испоручује у средњенапонску мрежу. Поменути трансформатор у склопу претварача ради на високој учестаности. Примена високих учестаности омогућава смањење пресека језгра, али уводи додатне захтеве у погледу карактеристика магнетног материјала у погледу губитака, који расту са повећањем учестаности.

На наредним сликама су илустровани примери таласни облици напона и струја који нису простопериодични: за случај једнофазног исправљача и за случаје инвертора (у две варијанте: струјни и напонски) који напајају оптерећење наизменичним напонам и струјом.

На слици 10.16 је приказан исправљач за пуњење акумулатора који у колу једносмерне струје има велику пригушницу ( $L \rightarrow \infty$ ). Последица тога је да ће струја у једносмерном колу ( $I_d$ ) имати приближно константну вредност, а у наизменичном делу, на улазу у исправљач, као и кроз секундар ( $I_2$ ) и кроз примар ( $I_1$ ) трансформатора облик четвртки. Напон у наизменичном делу има простопериодични облик, док је облик напона у једносмерном колу приказан на слици 10.17. На таласном облику напона на слици 10.17 није приказана комутација, на чије карактеристике значајно утиче реактанса расипања трансформатора.



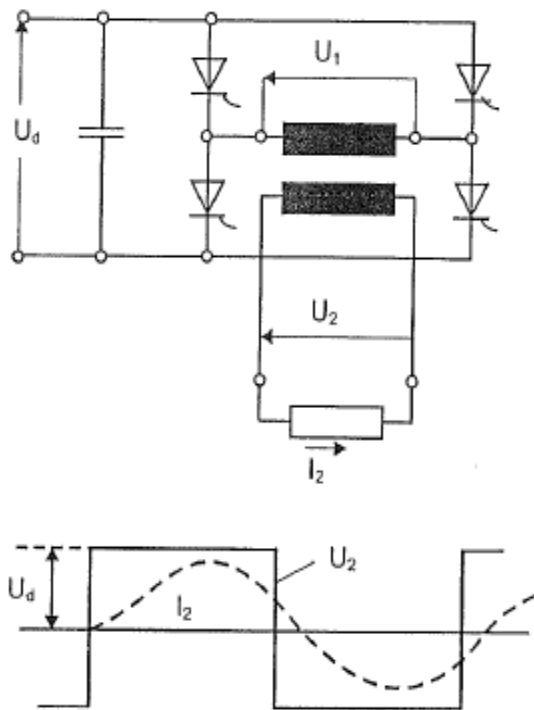
Слика 10.16



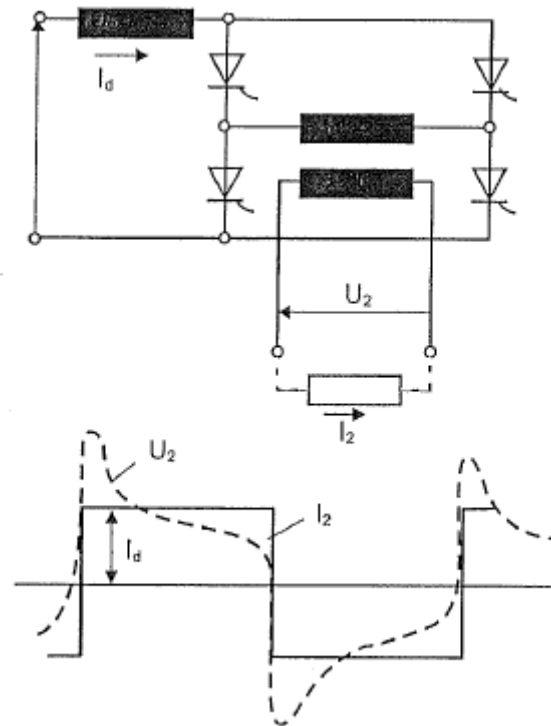
Слика 10.17

Струја кроз трансформатор садржи основни хармоник струје, који преноси енергију, као и више хармонике, који повећавају загревање намотаја и повећавају његову температуру у односу на ситуацију када струја садржи само „корисни“ основни хармоник који преноси енергију. Ефективна вредност струје кроз трансформатор, приказана на слици 10.17, је  $4/\pi$  пута већа од основног хармоника струје.

На сликама 10.18 и 10.19 дати су таласни облици напона и струја за независне инверторе за напајање пријемника који раде у две варијанте: напонски (слика 10.18) и струјни (слика 10.19). Код напонског инвертора наизменични напон има облик четвртки ( $U_2$ ), а код струјног струја има облик четвртки ( $I_2$ ). Облик струје код напонског инвертора, као и облик напона код струјног инвертора, одређени су типом оптерећења. Изобличење таласног облика напона има за последицу повећање губитака у гвожђу, као и још изобличенију струју магнећења него када је напон простопериодичан.



Слика 10.18



Слика 10.19

Инвертори приказани на сликама 10.19 и 10.20 представљају решења која су примењивана у прошлости. Савремени инвертори су углавном базирани на ширинско импулсној модулацији, било да се ради о ситуацији: а) да је из инвертора потребно обезбедити простопериодичан напон или простопериодичну струју на пријемнику прикљученом на инвертор (одговара ситуацији прикатаној на сликама 10.19 и 10.20), или б) да је управљањем инвертором потребно обезбедити инјектирање простопериодичне струје мрежне учестаности у мрежу на коју је прикључен излаз инвертора (овакав случај се, на пример, јавља код инвертора преко којих се ФН панели, који представљају генераторе једносмерног напона, прикључују на мрежу). У оба случаја управљање се врши тако што се у кратком циклусу (реда величине  $10 - 100 \mu s$ ) врши укључење и искључење транзистора (такозвана PWM модулација), како би се струја (напон) у сваком тренутку периоде одржавала око референтне вредности (она се мења по простопериодичној законитости). Генерално, PWM модулација, која уноси извесне хармонике напона и струје високе учестаности,

не доводи до ефеката који значајно утичу на радне карактеристике трансформатора у односу на његов рад при простопериодичним напонима и струјама мрежне учестаности.

---

## 10.5. ТРАНСФОРМАТОРИ СА ИЗВОДИМА

У пракси се јавља потреба за подешавањем напона на секундару, што се може учинити променом преносног односа трансформатора, односно променом броја навојака једног намотаја. Примери оваквих ситуација су да пријемник електричне енергије захтева променљиви напон или у случају да се мења напон у мрежи на коју је прикључен примар, па је потребно променити преносни однос трансформатора како би се напон на секундару одржао на вредности што ближеј номиналној.

### 10.5.1. ОБЛАСТ ПРИМЕНЕ

Најраспрострањенија примена трансформатора са изводима је у електроенергетским мрежама, како би се напон на месту напајања пријемника одржавао у дозвољеним границама. Електроенергетске мреже представљају динамичне системе у којима се мења оптерећење (потрошња електричне енергије), као и изворишта електричне енергије (термо електране, које углавном генеришу константну активну снагу, хидро електране, обновљиви извори електричне енергије (соларни генератори, ветро генератори), који су често дистрибуирани по електроенергетском систему и чије снаге зависе од природних енергетских ресурса – сунца и ветра). Због падова напона на елементима мреже, напони у чвориштима мреже, укључујући и оне где је прикључена потрошња, се мењају, па се морају применити мере да се напон одржи унутар дозвољених граница. Једно од класичних, једноставних и јефтиних решења је да се мењају преносни односи трансформатора.

Као други карактеристичан случај где је потребно мењати напон променом преносног односа трансформатора поменућемо електролучне пећи, где је током технолошког поступка топљења и формирања легура потребно мењати напон напајања, како би се остварила потребна снага загревања, која се мења у широким границама.

### 10.5.2. МЕЊАЊЕ ИЗВОДА У БЕЗНАПОНСКОМ СТАЊУ И ПОД ОПТЕРЕЋЕЊЕМ

На трансформатору је могуће извести изводе на различитим местима намотаја, тако што се неки од навојака повежу са проводницима чији је други крај прикључен на контакте груписане на локацији унутар суда. Изводи, а тиме и број навојака и преносни однос, последично и напон на секундару могу се мењати у безнапонском стању или под оптерећењем, што је технички захтевније и скупље техничко решење, јер се струја не сме прекинути, нити се сме кратко спојити група навојака (у том случају појавила би се струја чија је природа слична струји кратког споја – реализација промене извода под оптерећењем се описује у следећем одељку 10.5.3).

Због тога се промена извода у безнапонском стању врши када је то могуће. То је случај, на пример, код поменутог случаја електролучних пећи, што је прихватљиво решење због постојања велике термичке инерције шарже у пећи, која се неће охладити током неколико десетина секунди, па и минута, што је довољно да се трансформатор искључи, извод промени у безнапонском стању и трансформатор поново укључи и настави са загревањем шарже новом вредношћу снаге загревања. Краткотрајна пауза у загревању не угрожава технолошки процес нити утиче на продуктивност технолошког процеса.

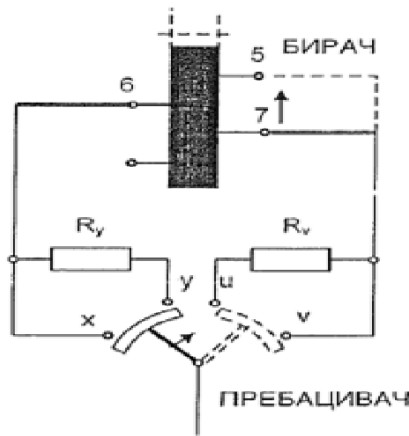
За разлику од овог примера, промена извода код трансформатора у електроенергетском систему се, осим у изузетним случајевима, врши под оптерећењем.



### 10.5.3. ТЕХНИКА МЕЊАЊА ИЗВОДА ПОД ОПТЕРЕЋЕЊЕМ

Током прелазног процеса промене извода, између два навојка или групе навојака који се укључују / искључују са остатка намотаја, умеће се отпорник или пригушница. Мана примене отпорника је што се на њему јављају губици енергије ( $R I^2$ ), док је мана пригушнице да она подржава лук и отежава прекидање, јер ствара напон који је сразмеран брзини промене струје ( $L di / dt$ ).

На слици 10.20 је приказана једна од техника пребацавања. Проводник испод пребацача се повезује на мрежни прикључак трансформатора. Бирач извода је био у положају 7, сада је у положају 6 и треба га пребацити у положај 5 (то је крајње стање обележено испрекиданим линијама). Померање бирача се врши са два клизна контакта (са леве и десне стране), која се померају горе / доле. Ови клизни контакти не врше прекидање струје. За разлику од њих, као што ће се објаснити у наставку, постоји ротациони пребацивач који прекида струју. У стабилном стању при положају 6, ротациони прекидач је спојен само са контактом **x**. Редослед операција пребацавања са извода 6 на извод 5 је следећи:



Прикључак на намотај

Слика 10.20

1. Клизни контакт десног бирача, који је без оптерећења, се помера из 7 у 5; целокупна струја  $I$  ка прикључку трансформатора протиче кроз извод 6 преко контакта **x**
2. Ротациони пребацивач се из положаја **x** пребаци у положај **ху**; целокупна струја  $I$  ка прикључку трансформатора  $I$  и даље протиче кроз извод 6 преко контакта **x**
3. Ротациони пребацивач се из положаја **ху** пребаци у **уи**; сада су изводи 5 и 6 међусобно повезани преко отпора  $R_y + R_v$ . У овом положају постоји циркулациона струја  $i$ , чија вредност није велика – она је једнака количнику напона између навојака са којих су извучени крајеви 6 и 5 и отпора  $R_y + R_v$ . Кроз контакт 6 протиче струја  $I / 2 - i$ , а кроз контакт 5 струја  $I / 2 + i$ .

4. При даљој ротацији пребацивача, у једном тренутку се губи веза са **у** и тада долази до прекидања циркулационе струје, као и струје кроз клизни контакт 6. Ово је тренутак у коме контакт **у** трпи највеће напрезање, јер током прелазног процеса врши прекидање струје која је на почетку износила  $I / 2 - i$ . Након завршетка наведеног померања пребацача извод 5 је повезан са мрежним прикључком трансформатора преко **u**, односно преко  $R_v$ .
5. Даљом ротацијом пребацивач се из положаја **u** пребације положај **uv**. Целокупна струја  $I$  ка прикључку трансформатора протиче преко извода 5, кроз контакт **v**, и кроз њега протиче целокупна струја  $I$ .
6. Коначно, пребацач се ротира из положаја **uv** у крајњи десни положај (**v**), при чему целокупна струја  $I$  ка прикључку трансформатора наставља да тече само кроз контакт **v**.

Објашњење начина рада још једног типа пребацивача честог у пракси може се видети на

<https://electrical-engineering-portal.com/4-essential-features-of-transformer-on-load-tap-changer-oltc>

(није потребно за испит)

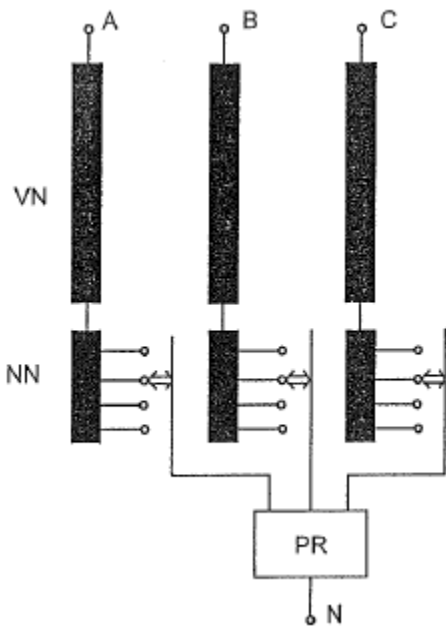
#### 10.5.4. ПОЗИЦИЈА НАВОЈАКА ЗА РЕГУЛАЦИЈУ НАПОНА

Због мање струје коју је потребно "комутовати", навојци за промену преносног односа и подешавање напона по правилу се постављају у високонапонски намотај.

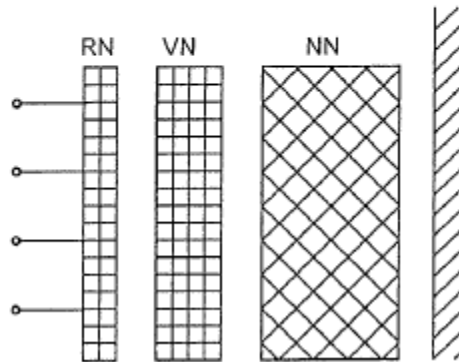
Следећа два критеријума која утичу на избор положаја регулационих навојака (навојака који се укључују / искључују да би се подесио напон) су: а) напонска напрезања, па самим тим и потребна изолација и б) утицај на расподелу магнетног поља, а тиме и на реактансу расипања и локалне додатне губитке.

Ако је спрега  $Y$ , најмања напонска напрезања се имају ако се регулациони навојци сместе у звездиште. Ово решење, са применом једног трофазног пребадача (PR) приказано је на слици 10.21. Поменимо да се у случају аутотрансформатора укључењем / искључењем регулационих навојака смештених у звездиште мењају и  $N_1$  и  $N_2$ , па је ефекат промене напона мањи него када би се навојци ставили у део намотаја кроз који протиче само струја вишенпонске стране.

Једно од често коришћених решења је да се регулациони навојци формирају у посебном танком цилиндру, који се распростире дуж читаве висине (у пракси се срећу и решења са два цилиндра, један за грубу и један за фину регулацију напона), како је то приказано на слици 10.22. Тиме се избегавају могуће појаве великих расутих вредности магнетног поља (пре свега велике радијалне компоненте поља, а тиме и великих локалних додатних губитака у намотају) које се могу јавити при постављању регулационих навојака унутар намотаја, слично решењу на слици 10.21.



Слика 10.21



Слика 10.22

#### 10.5.5. ОПСЕГ РЕГУЛАЦИЈЕ

Оријентационо, опсег регулације за мање трансформаторе износи  $\pm 5\%$ , са корацима  $2.5\%$  (дакле  $-5\%$ ,  $-2.5\%$ ,  $0$ ,  $2.5\%$ ,  $5\%$ ). За веће трансформаторе, опсег регулације је већи - оријентационо  $\pm 15\%$ , са корацима  $1\%$ ,  $1.5\%$  или  $2\%$ .

**НАПОМЕНА:** Промена положаја регулационог извода утиче само на промену броја навојака примарног намотаја, тј. на промену преносног односа трансформатора, при чему је напон примара,

наравно, увек једнак напону напајања. Примера ради, уколико је преносни однос дат као  $10 \pm 2 \times 2.5\% / 0.4 \text{ kV}$ , највећи напон секундар се има при минималном броју навојака на примару ( $-2 \times 2.5\%$ ); тада је преносни однос трансформатора:

$$m_{\text{ново}} = \frac{10 \cdot (1 - 2 \times 0.025)}{0.4} = 23.75$$

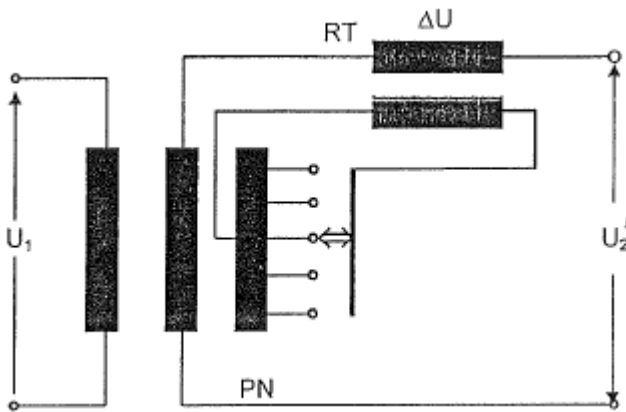
па је, при номиналном напону напајања примара, напон празног хода секундар:

$$U_{02}^{\text{ново}} = \frac{U_1}{m_{\text{ново}}} = 0.421 \text{ kV}$$

За извод у неутралном положају напон празног хода секундар износи  $U_{02} = 0.4 \text{ kV}$ . Дакле, променом положаја регулационог отцепа мења се напон празног хода секундар.

## 10.6. ДОПУНСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Ови трансформатори (*Booster Transformers*) се називају и редни трансформатори, по начину на који се везују у коло (слика 10.23). Сврха им је иста као сврха трансформатора са изводима - подешавање ("регулација") секундарног напона. Решење приказано на слици 10.23 смањује напонска напрезања у регулационом делу намотаја, а побољшана је и финоћа регулације ( $U_2' = U_2 + \Delta U$ ).



Слика 10.23

## 10.7. МЕРНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Мерни трансформатори се више изучавају у областима мерења, као и релејне заштите. Фокус у овом курсу су енергетски трансформатори, па ће се о мерним трансформаторима дати само основне информације.

### 10.7.1. НАПОНСКИ МЕРНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Конструкцијом напонских мерних трансформатора је потребно остварити да напон на секундару треба буде линеарно сразмеран напону на примару. Ово важи за сваки тренутак, односно

посматрано у фреквентном домену, исказује се као константан преносни однос напона примара и секундара и исти фазни став напона примара и секундара.

На секундар се повезују мерни инструменти или заштитни (релејни) уређаји. Из разматрања пада напона, извршених у поглављу 4., закључује се да је пад напона од напона примара до сведеног напона секундара мањи уколико су мањи отпор намотаја трансформатора и реактанса расипања трансформатора. Из тога следи да густина струје и расипање флукса код напонских мерних трансформатора треба да буду што мањи. Прецизније речену, производ редне импедансе и номиналне струје секундара треба да буде у прописаним границама. При одређивању овог пада напона треба узети у обзир и струју магнећења, која изазива пад напона на отпорности и реактанси расипања примара трансформатора.

Поменимо и чињеницу да је напонски трансформатор на секундару оптерећен колима за мерење напона, који имају велику улазну импедансу. Номинална снага је једнака количнику квадрата номиналног напона на секундару и импедансе једног или више паралелно прикључених мерних уређаја. „Главни критеријум“ при пројектовању ових трансформатора није снага дефинисана према дозвољеном загревању, већ веран (линеаран) пренос односа напона на примару и секундару. Класа напонског мерног трансформатора, карактерисана амплитудском и фазном грешком у преносу напона примара на секундар, мора остати у гарантованој вредности за све предвиђене (номиналне) радне режиме трансформатора.

Примар напонског мерног трансформатора се везује на високонапонски енергетски вод, због чега конструкција мора бити таква да се обезбеди потребна изолација напонског мерног трансформатора према земљи, као и између примара и секундара.

### 10.7.2. СТРУЈНИ МЕРНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Конструкцијом струјних мерних трансформатора је потребно остварити да струја на секундару треба буде линеарно сразмерна струји на примару. На секундар су повезани мерни инструменти или заштитни (релејни) уређаји, који имају малу улазну импедансу. Идеална својства струјних мерних трансформатора би се остварила када би била испуњена једнакост магнетопобудних сила на примару и на секундару:  $N_1 I_1 = N_2 I_2$ , одакле следи  $I_2 = (N_1 / N_2) I_1$ . Струја магнећења представља главну сметњу за „верно пресликавање“ струје са примара на секундар, због чега она треба да буде што мања. То значи да се морају користити магнетни материјали високе пермеабилности и малих губитака, а радна тачка пројектује на линеарни део криве магнећења. Класа струјног мерног трансформатора, карактерисана амплитудском и фазном грешком у преносу струје примара на секундар, мора остати у гарантованој вредности за све предвиђене (номиналне) радне режиме трансформатора.

Пошто се примар струјних мерних трансформатора везује редно у електроенергетску мрежу, његова улазна импеданса, гледано са примара, мора да буде мала. Другим речима, напон који струјни мерни трансформатор уноси у електрични вод мора да буде мали. Због тога струјни мерни трансформатор ради у радној тачки блиској кратком споју.

Примар струјног мерног трансформатора се везује на електроенергетски вод, због чега конструкција мора бити таква да се обезбеди потребна изолација струјног мерног трансформатора према земљи, као и између примара и секундара.

Друга специфичност је то да је напон на секундару, услед мале прикључене импедансе, мали. Струјни трансформатор се не сме да ради без оптерећења на секундару, јер би то довело до великог напона на њему, односно до опасних напонских напрезања.

## 10.8. СУВИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Мали трансформатори се по правилу израђују као суви, ваздухом хлађени, јер би било непрактично примењивати неки други (интензивнији) начин хлађења, иако би се на тај начин из постојећег магнетног кола и намотаја извукла већа снага трансформатора.

И за трансформаторе већих снага (оријентационо напона до 52 kV и снага 40 MVA), такође се користе ваздухом хлађени трансформатори. Код сувих трансформатора се користи изолација која може да достигне знатно више температуре; дозвољене температуре за поједине класе изолације дате су у табели у поглављу 5.

Предности сувих трансформатора су:

- применом одговарајућих материјала могу се начинити незапаљивим
- отпорнији су на влагу
- не захтевају практично никакво одржавање
- не захтевају израду јаме за хаваријско изливање уља

Суви трансформатори могу бити без кућишта или са кућиштем. Код конструкције без кућишта постоје доступни делови под напоном. За такву конструкцију је карактеристично и да је већа вредност електромагнетног поља у околини трансформатора, као последица расутог флукса.