1. МЕРНИ ТРАНСФОРМАТОРИ ЗА ПРИКЛУЧУВАЊЕ НА ЗАШТИТНИТЕ УРЕДИ

Уредите за мерење и заштита во високонапонските постројки не се приклучуваат непосредно на водовите на високиот напон, бидејќи таквиот приклучок и кога би бил изведен, би барал изградба на многу скапи мерни инструменти и релеи, заради високиот напон (изолација, димензиите на инструментите и релеите) и големите струи (пресек на проводниците и силите меѓу нив). За да се избегне ова, се употребуваат мерни трансформатори чија основна функција е да ги трансформираат погонските струи и напони на големини кои овозможуваат употреба на инструменти и релеи кои се изградени за номинални струи од 5 A односно 1 A и за номинални напони од 100 V. Исто така мерните трансформатори обезбедуваат галванска изолација помеѓу електроенергетската мрежа и релеите и инструментите поврзани на нивните секундарни намотки.

За да можат заштитните уреди да делуваат правилно потребно е мерните трансформатори доверливо и точно да ги пренесуваат примарните големини на секундарната страна. Барањата кои се поставуваат пред мерните трансформатори во однос на заштитната техника значително се разликуваат од барањата кои ги поставува мерната техника. Во ова поглавје се обработуваат основните принципи на делување, параметрите на мерните трансформатори кои се важни за нивниот избор и проблемите поврзани со барањата на заштитните уреди, а притоа не се навлегува во пресметката и конструкцијата на мерните трансформатори.

Се разликуваат два вида на мерни трансформатори: струјни и напонски.

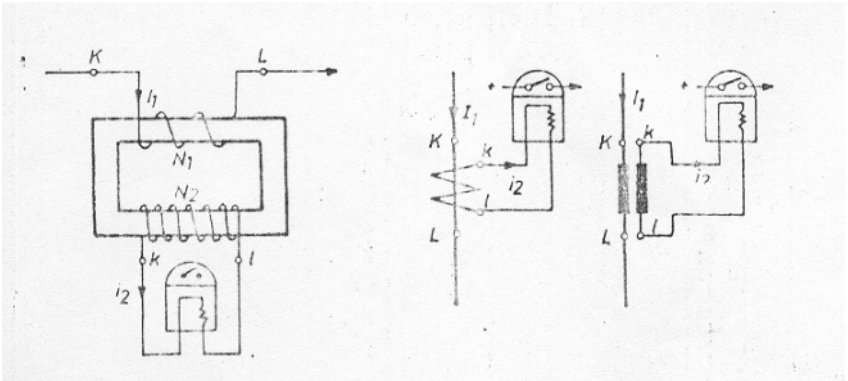
1.1. СТРУЈНИ МЕРНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

1.1.1. Принцип на работа

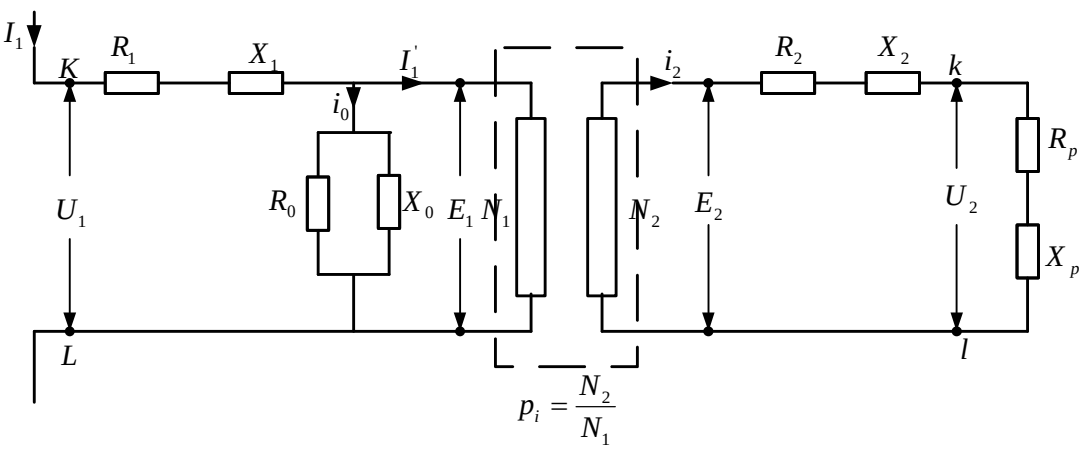
Струјните мерни трансформатори се изведени како секој трансформатор со примарна и секундарна намотка, како и железно јадро од лимови. На сликата 1.1 е прикажан принципот на работа на струен мерен трансформатор и ознаките кои се применуваат при негово прикажување во шемите. Примарната намотка $\boldsymbol{N}_1$ е споена во серија со главниот струен круг така што низ неа протекува вкупната примарна струја $\boldsymbol{I}_1$. На секундарната намотка $\boldsymbol{N}_2$ поврзани се во серија релеите низ кои тече секундарната струја $\boldsymbol{I}_2$. Преносниот однос на идеалниот струен трансформатор е дефиниран како однос на примарната и секундарната струја:

$$p_i = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Стегалките на трансформаторот се означуваат со соодветни букви. На сликата 1.1 се прикажани вообичаените ознаки кај нас K-L за примарната намотка и k-l за секундарната намотка. На сликата 1.2 е прикажана еквивалентната шема на мерниот струен трансформатор. Примарната струја поминува низ отпорите на примарната намотка $\boldsymbol{R}_1$ и $\boldsymbol{X}_1$. Делот $\boldsymbol{I}_0$ од примарната струја се троши за магнетизирање на железното јадро, а делот $\boldsymbol{I}_1^{'}$ поминува низ идеалниот трансформатор со преносен однос $\boldsymbol{p_i}$. Секундарната струја $\boldsymbol{i}_2 = -\boldsymbol{I}_1^{'} / \boldsymbol{p_i}$ протекува низ отпорите на секундарната намотка $\boldsymbol{R}_2$ и $\boldsymbol{X}_2$ и низ отпорите на сериски споените потрошувачи $\boldsymbol{R_p}$ и $\boldsymbol{X_p}$ (релеј или мерен инструмент).



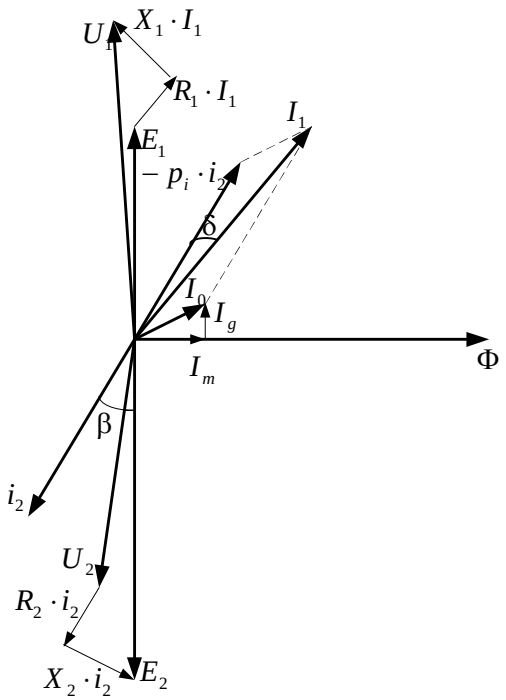
Слика 1.1. Принцип на делување и ознаки на струјниот трансформатор



Слика 1.2. Еквивалентна шема на струјниот мерен трансформатор

На сликата 1.3 е прикажан векторскиот дијаграм на струјата и напонот на струјниот трансформатор со преносен однос $\boldsymbol{p_i} = 1$. На реалната оска е поставен магнетниот флукс Φ. Него го произведува делот од струјата на магнетизирање $\boldsymbol{I_m}$. Вкупната струја на магнетизирање $\boldsymbol{I}_0$ е поголема од струјата $\boldsymbol{I_m}$ за компонентата $\boldsymbol{I_g}$ која отпаѓа на загубите во железото на јадрото на трансформаторот. Индуцираната електромоторна сила $\boldsymbol{E}_2$ заостанува зад флуксот Φ за 90°. Таа ја произведува струјата $\boldsymbol{I}_2$ која заостанува зад неа за агол β. Секундарниот напон на стегалките на трансформаторот $\boldsymbol{U}_2$ помал е од $\boldsymbol{E}_2$ за падот на напон во отпорите $\boldsymbol{R}_2$ и $\boldsymbol{X}_2$ на трансформаторот, односно е еднаков на падот на напонот на отпорот на потрошувачот $\boldsymbol{R_p}$ и $\boldsymbol{X_p}$. Примарната струја $\boldsymbol{I}_1$ е поголема за струјата на магнетизирање од идеалната струја $\boldsymbol{I}_1^{'} = -\boldsymbol{p_i} \cdot \boldsymbol{i}_2$:

$$I_1 = I_0 - p_i \cdot i_2$$



Слика 1.3. Дијаграм на струјата и напонот на ст рујниот трансформатор

Електромоторната сила $\boldsymbol{E}_2$ зависи од индукцијата во железото и при синусен облик на напонот таа може да се одреди преку релацијата:

$$E_2 = 4{,}44 \cdot N_2 \cdot f \cdot B \cdot S = 4{,}44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi$$

каде $\boldsymbol{f}$ е фреквенција, а $\boldsymbol{S}$ е пресекот на железото во јадрото за кое спрема кривата на магнетизирање за употребените типови на железните лимови, потребна е струја на магнетизирање $\boldsymbol{I}_0$. Струјата на магнетизирање на разгледуваниот струен трансформатор за константна примарна струја зависи само од импеданцијата $\boldsymbol{Z}_p = \boldsymbol{R}_p + \boldsymbol{jX}_p$, односно при исти услови од напонот $\boldsymbol{U}_2$, па спрема тоа и електромоторната сила $\boldsymbol{E}_2$ и напонот $\boldsymbol{U}_1$ зависат само од импеданцијата $\boldsymbol{Z}_p$. Споредувајќи ги струјниот трансформатор со енергетскиот трансформатор може да се утврди разлика која е последица на начинот на приклучување. Енергетскиот трансформатор е приклучен паралелно на потрошувачите, односно генераторите, што значи промените на напонот на секундарната страна практично не влијаат на напонот на примарната страна. Значи струјата на магнетизирање е независна од условите на секундарната страна на трансформаторот. Од друга страна напонот на секундарната страна на енергетскиот трансформатор, ако го занемариме падот на напонот во трансформаторот зависи само од напонот на примарната страна, додека во струјниот трансформатор, ако аналогно на падот на напон ја занемариме струјата на магнетизирање, струјата низ секундарната намотка зависи само од струјата низ примарната намотка. Од дијаграмот може да се види дека и при преносен однос $\boldsymbol{p}_i = 1$, секундарната струја е помала од примарната струја и е фазно поместена во однос на истата што значи разликуваме струјна и аголна грешка кај струјниот трансформатор.

1.1.2. Точност на струјните мерни трансформатори

При снижувањето на примарната струја струјните мерни трансформатори прават аголна и преносна (струјна) грешка. Ако со $\boldsymbol{p_{in}}$ го означиме номиналниот преносен однос на струјниот трансформатор (при номинална примарна и секундарна струја), преносната грешка на струјниот трансформатор е одредена со релацијата:

$$\Delta i = \frac{p_{in} \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100\%$$

каде што, $\boldsymbol{I}_1$ и $\boldsymbol{I}_2$ се апсолутни вредности на примарната и секундарната струја кои во праксата се разликуваат од номиналните вредности што значи и трансформаторот работи со преносен однос различен од номиналниот. Аголната грешка е еднаква на аголот δ за кој секундарната струја е дефазирана во однос на примарната (слика 1.3) и таа се изразува во минути. Струјната грешка е позитивна ако е поголема од нула, а аголната грешка е позитивна ако секундарната струја и претходи на примарната. Класата на точност на струјниот трансформатор е еднаква на дозволената апсолутна струјна грешка во %, при номинално оптоварување и номинална примарна струја на трансформаторот или 120% од номиналната примарна струја. Треба да се нагласи дека дозволените ст рујна и аголната грешка се исти при номинална и 120% од номиналната примарна струја. Според IEC 185 ги разликуваме следниве класи на точност на струјните трансформатори и дозволените аголни и струјни грешки за нив (табела 1):

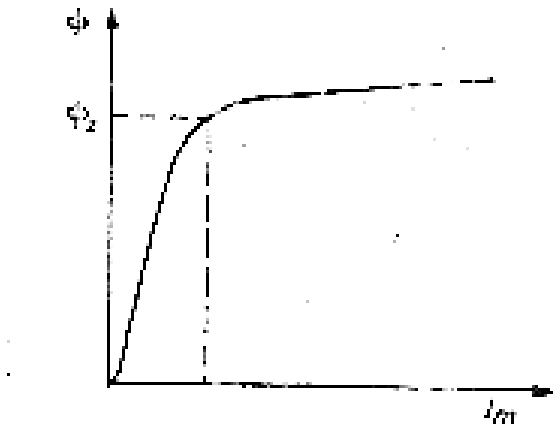
Табела 1. Класи на точност н а струјните мерни трансформатори

класа на точност	$\Delta \boldsymbol{i}$ (%) дозволена струјна грешка	$\pm\delta$ (минути) дозволена аголна грешка
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	30
1	1,0	60
3	3,0	не е нормирана
5	5,0	не е нормирана

За посебните класи на точност дозволените грешки зависат од струјата на оптоварување и од импеданцијата на оптоварување приклучена на секундарните намотки. Од векторскиот дијаграм може да се види дека струјната и аголната грешка се јавуваат поради постоењето н а струјата на магнетизирање. Компонентата на чистата струја на магнетизирање I_m зависи од големината на магнетниот флукс:

$$I_m = \frac{\Phi \cdot R_m}{N_1}$$

Зависноста $\boldsymbol{I_m} = \boldsymbol{f}(\Phi)$ за материјалот од кој е направено магнетното јадро ја дава кривата на магнетизирање, сл 1.4. Во почетниот дел на карактеристиката струјата е пропорционална на магнетниот флукс. Почнувајќи од некоја вредноста на флуксот Φ_z јадрото преминува во заситено подрачје и струјата на магнетизир ање нагло расти со зголемувањето на магнетниот флукс така што и грешките се зголемуваат.



Слика 1.4. Крива на магнетизирање на јадрото на струјниот трансформатор

За да се држат грешките во потребните граници треба вредноста на флуксот да биде ограничена, односно треба да биде ограничена и вредноста на секундарната ЕМС $\boldsymbol{E}_2$ која е еднаква на падот на напон на секундарниот отпор на струјниот трансформатор $\boldsymbol{Z}_2$ и $\boldsymbol{Z}_p$:

$$E_2 = 4{,}44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi = I_2 \cdot \left(Z_2 + Z_p\right)$$

Значи за да вредноста на $\boldsymbol{E}_2$ биде доволно мала потребно е да секундарното оптоварување на струјниот трансформатор биде што помало, односно трансформаторот да работи во режим близок на режимот на куса врска. Од равенката за струјат а на магнетизирање може да се види дека, за да се намали струјата на магнетизирање потребно е да се зголеми бројот на навивки на примарната намотка и да се намали магнетниот отпор на магнетното коло. Магнетниот отпор е:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S}$$

каде од равенката се гледа дека потребно е да се одбере што пократок пат на затварање на магнетниот флукс, да се примени висококвалитетен лим со високо μ и доволно да се димензионира пресекот на јадрото $\boldsymbol{S}$. За да се намали работната компонента на струјата на магнетизирање магнетното јадро се изведува во облик на тенки, меѓусебно изолирани ламели (мали загуби од виорни струи). Со наброените мерки може да се постигнат бараните класи на точност, но притоа треба да се има на ум дека грешките се нормирани само за одредено струјно подрачје, не поголемо од $1{,}2 \cdot \boldsymbol{I_n}$ и под услов секундарното оптоварување на трансформаторот да не ја надминува неговата номинална моќност.
Номиналната моќност на струјниот трансформатор е д ефинирана како:

$$S_n = U_2 \cdot i_{2n}$$

Бидејќи $\boldsymbol{U}_2 = \boldsymbol{i_{2n}} \cdot \boldsymbol{Z_{2n}}$, каде $\boldsymbol{Z_{2n}}$ е номиналниот вкупен отпор на оптоварување приклучен на секундарната страна на струјниот трансформатор, тогаш:

$$S_n = i_{2n}^2 \cdot Z_{2n} \quad \text{или} \quad Z_{2n} = \frac{S_n}{i_{2n}^2}$$

Номиналната моќност на струјните трансформатори обично се дава во (VA) или во дозволениот привиден отпор на уредите приклучени на секундарот на трансформаторот. Стандардни вредности на номиналните моќности се:

-трансформатори за мерење: 2.5-5.0-10-15-30 (VA)
-трансформатори за заштита: 10-15-30-45-60 (VA)

Кај струјните трансформатори наменети за приклучок на заштитните уреди се бара верна трансформација во областа на максимални струи на куси врски кои можат да течат низ примарната намотка на трансформаторот, а не во областа на номиналните струи. Самата класа на точност и номиналната моќност на струјните трансформатори не можат да служат како мерило за прикладноста на трансформаторот за заштитна намена.

1.1.3. Параметри за избор на струјните трансформатори за заштита

Покрај досега дефинираните параметри на струјните трансформатори потребно е да се дефинираат и неколку други параметри кои се значајни при изборот на струјните трансформатори за заштита.

Номинална краткотрајна термичка струја $\boldsymbol{I_{th}}$ е ефективната вредност на примарната струја во kA која трансформаторот може без оштетување да ја поднеси во траење од 1 s при кусоврзана секундарна намотка, а притоа да не се загрее над дозволената температура. Краткотрајната термичка струја се движи во граници од $(60-120)\cdot \boldsymbol{I_{1n}}$ што зависи од изведбата. Точниот податок може да се најде во каталози од производителот и на натписната плоча на трансформаторот. При изборот на струјниот трансформатор треба да се провери дали номиналната краткотрајна термичка струја е поголема од струјата меродавна за загревање при куса врска.

Номинална динамичка струја $\boldsymbol{I_{dyn}}$ е најголема моментална вредност на примарната струја во (kA) која трансформаторот при кусоврзана секундарна намотка може да ја поднеси без електрички и механички оштетувања. Вообичаен однос е $\boldsymbol{I_{dyn}} / \boldsymbol{I_{th}} = 2{,}5$, затоа вредноста на динамичката струја се наведува на натписната плоча ако е различна од $2{,}5\cdot \boldsymbol{I_{th}}$. При избор на струјниот трансформаторот потребно е да номиналната динамичка струја биде поголема од ударната струја на куса врска.

Сложена грешка $\boldsymbol{p_{is}}$ ја вклучува грешката при трансформација на струјата поради влијанието на вишите хармоници во секундарната струја, кои се појавуваат поради заситувањетто на железото при големи струи. Се изразува во % од примарната струја:

$$p_{is} = \frac{100}{I_1}\cdot\sqrt{\frac{1}{T}\cdot\int_0^T \left(k_{in}\cdot i_2 - i_1\right)^2\cdot dt}\,\%$$

каде е: T-траење на една периода во секунди

$\boldsymbol{i_1}$ и $\boldsymbol{i_2}$ -моментални вредности на примарната и секундарната струја во А

$\boldsymbol{k_{in}}$ -номинален преносен однос на струјниот трансформаторот

$\boldsymbol{I_1}$ -ефективна вредност на примарната струја

Однесувањето на струјниот трансформатор во подрачјето на зголемена примарна струја се изразува со две големини (наместо поранешниот прекуструен број):

-фактор на сигурност F_s кај јадрата за мерење

-граничен фактор на точност F_t кај јадрата за заштита

Факторот на сигурност F_s е повеќекратник на номиналната примарна струја на струјниот трансформатор кај кој при номинално оптеретување на секундарната намотка, струјната грешка изнесува најмалку 10%. Стандардни вредности се $F_s = 5$ и $F_s = 10$.

Граничен фактор на точност F_t е повеќекратник на номиналната примарна струја на струјниот трансформатор кај кој при номинално оптеретување на секундарната намотка, сложената грешка p_{is} не ја надминува вредноста од 5% и 10% за класи на точност 5P или 10P. Стандардни вредности му се: 5; 10; 15; 20; 30.

Струјниот трансформатор за заштита ги задоволува условите за класата на точност ако при номинално оптеретување, струјната, аголната и сложената грешка му се во границите дадени во табелата 2:

Табела 2. Класи на точност за струјни трансформатори за заштита

класа на точност	струјна грешка (%) при I_{1n} (A)	аголна грешка (') при I_{1n} (A)	сложена грешка (%) при $F_t \cdot I_{1n}$ (A)
5P	± 1	± 60	5
10P	± 3		10

Класата на точност и граничниот фактор на точност се пишуваат во заедничка ознака. Пример: ознаката **10P20** се однесува на струен трансформатор за заштита со класа на точност 10P и граничен фактор на точност 20. Тоа значи дека при $I_1 = 20 \cdot I_{1n}$ сложената грешка е $p_{is} \leq 10\%$. Изборот на класата на точност и граничниот фактор на точност зависи од видот на применетите заштитни уреди и релеи. Ориентационите вредности се дадени во табела 3:

Табела 3. Класи на точност за струјни трансформатори при примена

Примена		Класа на точност	Граничен фактор на точност
Заштита	Прекуструјни независни релеи Прекуструјни зависни или ограничено зависни релеи Диференцијална заштита	10P	10
	Автоматски регулатор на напон		
	Дистантна заштита	10P или 5P	10 do 30
	Земјоспојна заштита		

Начин на означување на преносниот однос: Ознаката 2x300/5/1 A значи, дека се работи за преспоив струен трансформатор (за номинална примарна струја 300A или 600 A) со две јадра, од кои намотката на првото јадро има номинална секундарна струја 5A, а намотката на другото јадро 1A; ознаката 2000/5 A означува непреспоив струен трансформатор со едно јадро.

Поделба на струјните трансформатори:

-поделба по примарниот проводник: 1. Струен трансформатор со примарен проводник и со сопствена примарна изолација е класичен струен трансформатор чија примарна намотка се состои од една или повеќе навивки и која има за интегрален дел на својата конструкција изолација која одговара на неговиот ст епен на изолација.
2. Струен трансформатор без примарен проводник и без сопствена примарна изолација кој може да биде поставен директно на изолиран проводен изолатор, проводник или кабел.
3. Струен трансформатор без примарен проводник но со примарна изолац ија (т.н. собирнички трансформатор) кој може да биде поставен директно на проводник или шина (собирница)
-поделба по примената: 1. Струен трансформатор за мерење кој е наменет за напојување на мерните инструменти, броилата или сличните апарати.
2. Струен трансформатор за заштита кој е наменет на релеи и други заштитни и контролни уреди.
-поделба по конструкцијата: 1. Потпорен струен трансформатор служи како носач на проводникот во примарното струјно коло.
2. Проводен струен трансформатор може да се користи како проводен изолатор
3. Стапест струен трансформатор кај кој примарниот проводник е направен во облик на стап или низа на паралелни стапови.
-поделба по изолационото средство: 1. Епоксидни струјни трансформатори, најчесто наменети за номинални напони до 35 kV и за внатрешна монтажа со можност за вградување во било која положба.
2. SF6 струјни трансформатори користат изолација од гас сулфур хексафлуорид (SF6)
3. Малкумаслени струјни трансформатори кои се користат за напони поголеми од 35 kV посебно ако се предвидени за надворешна монтажа и тие се прават со отворено или затворено јадро.

1.1.4 Режим на празен од и куса врска кај струјните трансформатори

Поради разликите помеѓу енергетските трансформатори и струјните трансформатори следат разлики и во о днесувањето при режимите на празен од и куса врска. Во празен од низ примарната намотка на енергетскиот трансформатор течи струјата на магнетизирање која зависи од напонот на кој е приклучена примарната намотка. При празен од на струјниот трансформатор (от ворена секундарна намотка) низ примарната намотка тече струјата $\boldsymbol{I}_1$ која ја бараат потрошувачите и ја произведуваат генераторите. Во секундарната намотка нема струја, па нема ни протекување кое би се спротиставило на протекувањето на примарната струја. Поради тоа целата примарна струја служи за магнетизирање на јадрото што значи при $\boldsymbol{I}_2 = 0$, $\boldsymbol{I}_1 = \boldsymbol{I}_0$. Толкава струја на магнетизирање кога примарната струја е во границите на номиналната струја на струјниот трансформаторот, ќе доведе до значително зголемување на индукцијата во железното јадро, што од една страна ќе предизвика зголемување на загубите во железото, а од друга страна зголемување на напонот на стегалките на струјниот трансформатор. Зголемувањето на загубите доведува до загревање на јадрото. Струјните трансформатори со повеќе ампернавивки можат толку да се загреат при што да изгори изолацијата и магнетните лимови да ги изменат магнетните својства со што струјниот трансформатор со оглед на точноста станува неупотреблив се додека не се смени железното јадро. Напонот на стрегалките на трансформаторот може да порасне толку што може да ја загрози изолацијата на струјниот трансформатор и да го доведе во опасност персоналот. Електромоторната сила, а спрема то а и напонот на секундарните стегалки, бидејќи се работи за празен од се одредени со релацијата:

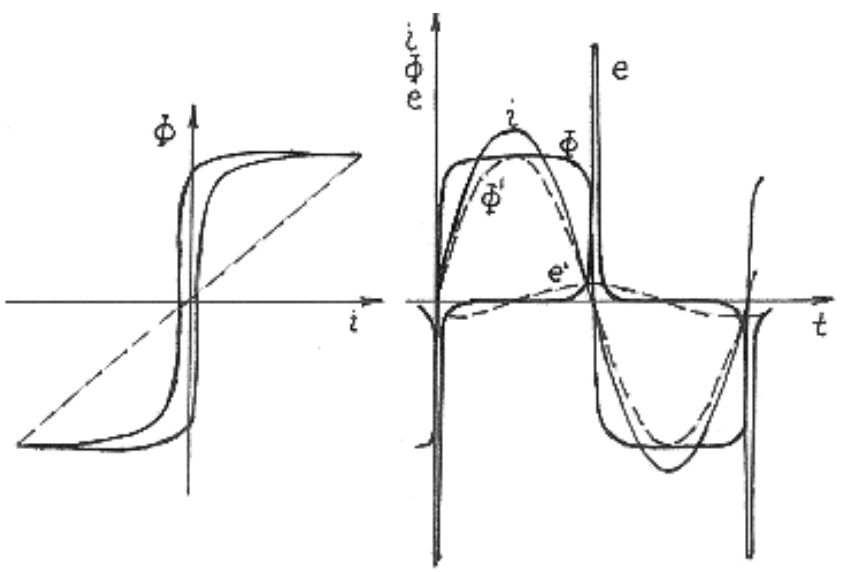
$$e = -\frac{d\Psi}{dt}$$

За да се прикаже квалитативно промената на напонот се тргнува од хистерезисната крива (сл 1.5). Повторно имаме ситуација која се разлику ва од онаа кај енергетските трансформатори каде флуксот и електромоторната сила се синусни, додека струјата на магнетизирање ги содржи освен основниот бран и трикратните и вишите фреквенции. Наспроти тоа во струјниот трансформатор струјата $\boldsymbol{I}_1$ и струјата на магнетизирање во празен од $\boldsymbol{I}_0$ се синусни. Затоа флуксот и електромоторната сила не можат да бидат синусни заради обликот на кривата на магнетизирање односно хистерезисната крива. Заради наглите промени на флуксот во подрачјето каде тој е блиску до вредноста нула, доаѓа до значителни напони како што е прикажано на сликата 1.5.

Напонот на секундарните стегалки ќе биде дотолку поголем колку е поголем бројот на ампернавивки на примарната страна, што е поголем пресекот на железното јадро (за иста индукција поголем флукс) и што е помала секундарната номиналната струја. Единствено ефикасно средство за спречување на ваквите зголемувања на напонот е да не се остава отворена секундарната намотка на трансформаторот. Наспроти ова нема никаква опасност за струјниот трансформатор ако секундарните стегалки се кусоврзани. Тогаш електромоторната сила на во трансформаторот е многу мала бидејќи таа треба да изнесува колку што е падот на напон во секундарната намотка. Заради тоа и струјата на магнетизирање е многу мала. Секундарната струја е дадена со релацијата:

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot \left(I_1 - I_0\right)$$

па кога $\boldsymbol{I}_0$ е приближно нула, што настанува кога секундарните стегалки се кусоврзани, секундарната струја во струјниот трансформатор зависи само од примарната струја. Тоа е поточно колку што е поголема номиналната моќност на трансформаторот. Секундарната струја во нормален погон и покрај кусоврзаните секундарни стегалки нема да биде значително поголема од струјата која ќе течи низ секундарните намотки кога е приклучена импедансата $\boldsymbol{Z}_p$. Струјниот трансформатор може трајно да остане во погон со кусоврзани секундарни стегалки. Тоа не е случај со енергетскиот трансформатор бидејќи низ неговата секундарна намотка ќе протекува струја значително поголема од онаа во нормален погон, а тоа ќе доведе до значително недозволено загревање.



сл.1.5 Примарна струја (u), флукс (Φ) и електромоторна сила ($\boldsymbol{e}$) на секундарно отворен струен трансформатор и флукс (Φ') и електромоторна сила ($\boldsymbol{e}'$) на секундарно кусоврзан трансформатор

1.1.5 Важни напомени за погонот на струјните трансформатори

На примарно приклучен струен трансформатор секундарната намотка треба секогаш да биде затворена со потрошувач или кусоврзана бидејќи на отворена секундарна намотка можат да се појават опасни по живот напони, а може да дојде до оштетување на трансформаторот поради загревање на јадрото.
Во секундарниот круг на струен трансформатор не се вградуваат осигурачи.

Во една разводна постројка на сите струјни трансформатори обично се заземјува истата секундарна стегалка.

Металните делови на струјниот трансформатор кои во нормални услови не се под напон треба да се заземјат за да се заштити персоналот.

Сите секундарни струјни кола мораат да се заземјат во една точка и тоа во ормарот за заштита бидејќи заземјувањето на секундарните струјни кругови во повеќе точки може да предизвика погрешно делување на релејната заштита или оштетување на секундарните кабли.

1.2. НАПОНСКИ МЕРНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

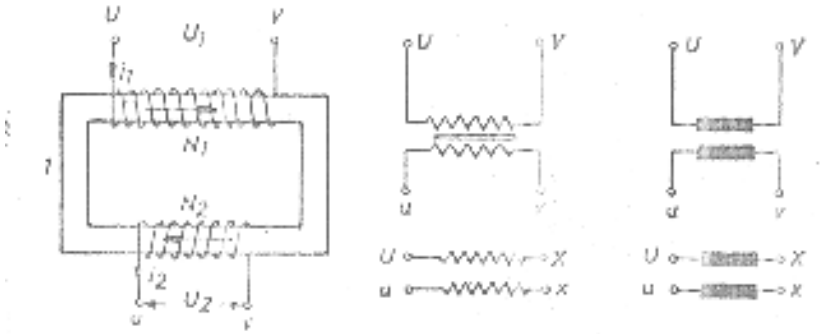
Напонските заштитни релејни уреди се приклучуваат на контролен напон преку напонските мерни трансформатори. Напонскиот мерен трансформатор е изведен како нормален енергетски трансформатор кој е приклучен паралелно со потрошувачите на практично константен напон. Основна поделба на напонските мерни трансформатори е спрема изведбата и тоа:

-индуктивни напонски мерни трансформатори изведени во облик на железно јадро на кое се наоѓа примарната намотка и една или повеќе секундарни намотки и се користат за напони од 10 до 110 kV.

-капацитивни напонски мерни трансформатори изведени како капацитивен делител на напон и се користат за напони 110 kV и повеќе.

1.2.1 Индуктивни напонски мерни трансформатори

На слика 1.6 е прикажан принципот на делување на индуктивниот напонски трансформатор и ознаките на двополно и еднополно изолираните мерни трансформатори. Ваквата поделба е извршена спрема заземјувањето на примарната нам отка. **Двополните** изолирани еднофазни напонски трансформатори имаат примарна намотка и два примарни приклучоци изолирани спрема земјата во согласност со номиналниот степен на изолација на трансформаторот, а примарната намотка се приклучува на мрежа меѓу два фазни проводници. **Еднополно** изолираните еднофазни напонски трансформатори имаат само еден крај на примарната намотка изолиран за номиналниот степен на изолација, додека другиот крај е предвиден за директно заземјување, што значи примарната намотка е приклучена на мрежа меѓу фаза и земја. Напонските трансформатори за 110 kV и повеќе се еднополно изолирани.

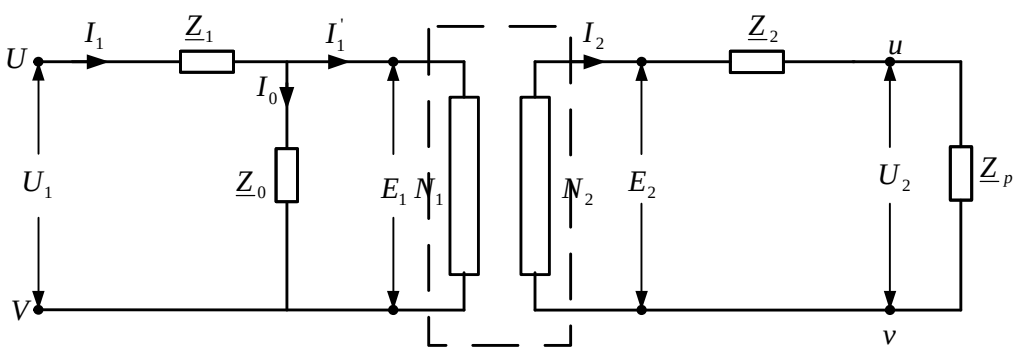


Слика 1.6. Принцип на работа и ознаки на напонските мерни трансформатори

На јадрото од ламелирани лимови се наоѓа примарната намотка с о N_1 број на навивки која е приклучена на примарен напон U_1. На секундарната намотка со N_2 број на навивки се приклучуваат паралелно мерните инструменти и напонските намотки на релеите. На сл 1.7 е прикажана еквивалентната шема на напонскиот трансформатор. Примарниот напон U_1 ја создава примарната струја I_1. Делот од примарната струја I_0 служи за магнетизирање на железното јадро. Пре останатиот дел $I_1^{'}$ течи низ идеален напонски трансформатор со преносен однос:

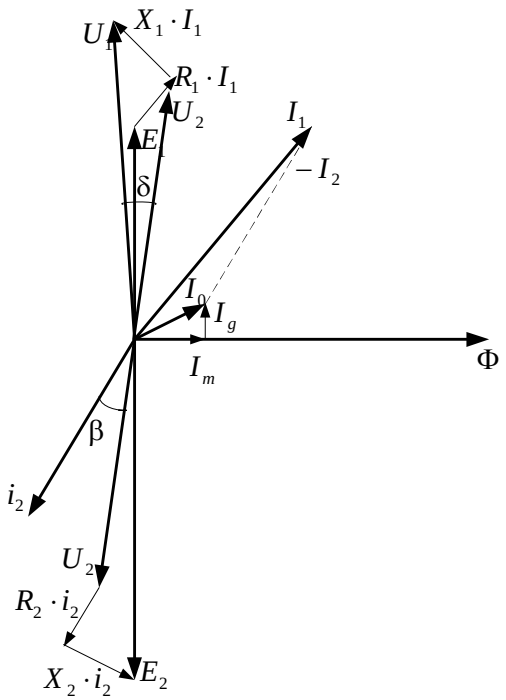
$$p_u = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}$$

Секундарната ЕМС $E_2 = -E_1 / p_u$ предизвикува секундарна струја I_2 низ отпорот на секундарната намотка Z_2 и отпорот на потрошувачите Z_p, приклучени на секундарните стегалки на трансформаторот.



Слика 1.7. Еквивалентна шема на напонски мерен трансформатор

На сликата 1.8 е даден векторски от дијаграм на струите и напоните. На реалната оска е поставен магнетниот флукс Φ. Него го произведува струјата на магнетизирање I_m. Вкупната струја на магнетизирање I_0 е поголема за работната компонента I_g која се троши за загубите во железното јадро.



Слика 1.8. Векторски дијаграм на струите и напоните

Секундарната ЕМС $\boldsymbol{E}_2$ заостанува зад флуксот Φ за 90°. Напонот на секундарните стегалки на трансформаторот е:

$$U_2 = E_2 - I_2 \cdot Z_2$$

Ако се претпостави дека преносниот однос на идеалниот трансформатор е единица, тогаш $\boldsymbol{I}_1^{'} = -\boldsymbol{I}_2$ и:

$$I_1 = I_0 - I_2$$

Примарниот напон е поголем од ЕМС $\boldsymbol{E}_1$ за падот на напон на отпорот на примарната намотка и од дијаграмот се гледа дека примарниот напон и по апсолутна вредност и по фазна положба е различен од секундарниот напон ако е претпоставено $\boldsymbol{p_u} = 1$.

$$U_1 = E_1 + I_1 \cdot Z_1$$

Напонската грешка на напонскиот мерен трансформатор се дефинира исто како кај струјните трансформатори и се изразува во % од ефективната вредност на примарниот напон:

$$\Delta u = \frac{U_2 \cdot p_{un} - U_1}{U_1} \cdot 100\,\%$$

каде $\boldsymbol{p_{un}}$ е номиналниот преносен однос, $\boldsymbol{U}_1$ е ефективната вредност на примарниот напон, $\boldsymbol{U}_2$ е ефективна вредност на секундарниот напон. Аголната грешка δ се дефинира

како фазна разлика меѓу векторот на секундарниот и векторот на примарниот напон и се изразува во минути.

Со обзир на дозволените грешки напонските трансформатори наменети за мерење се класифицираат спрема класата на точност:

Табела 4. Класи на точност за напонските трансформатори

класа на точност	примарен напон	оптоварување	cos β	напонска грешка (%)	аголна грешка (минути)
0,1	$(0{,}8-1{,}2)\cdot \boldsymbol{U}_{1n}$	$(0{,}25-1{,}0)\cdot \boldsymbol{S}_{n}$	0,8	0,1	5
0,2				0,2	10
0,5				0,5	20
1				1	40
3				3	-

За да напонската и аголната грешка бидат што помали, потребно е да падовите на напон во примарната и секундарната намотка бидат што помали и струјата на магнетизирање да биде што помала. Спрема тоа потребно е да секундарната струја биде што помала што се постигнува со приклучување на потрошувач со високо $\boldsymbol{Z}_p$. За разлика од струјните трансформатори грешката на напонските трансфортматори ќе биде помала колку што трансформаторот е поблиску до режимот на празен од, т.е. колку што е $\boldsymbol{Z}_p$ поголемо.

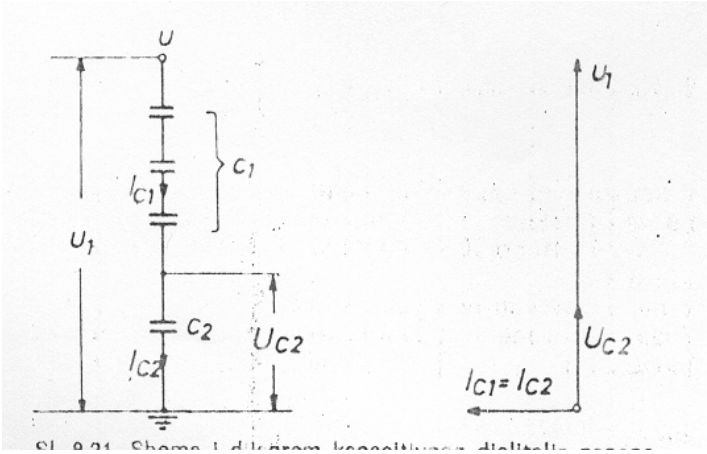
Заштитните релејни уреди не бараат висока класа на точност дефинирана на горниот начин. Основното барање кое се поставува пред напонскиот трансформатор е верно пренесување на секундарната страна на амплитудата и обликот на примарниот напон при куси врски односно при случаи кога примарниот напон моментално опадне од номинална на вредност блиска до нула. Повеќе за класите на точност кај напонските трансформатори за заштита во поглавјето за параметри за избор на напонските трансформатори.

Деталните испитувања покажуваат дека кај индуктивните трансформатори се можни изобличувања на секундарниот напон при ставање на вод под напон во момент на проаѓање на напонот низ нулата, заради можната појава на заситување на магнетното јадро. Ова може да се потенцира ако водот претходно се исклучи во момент на максимален напон така што набиениот капацитет на водот се празни низ напонскиот трансформатор. Тоа доведува до силно заситување на магнетното јадро, а заради реманенцијата трансформаторот може да остане предмагнетизиран, што уште повеќе го влошува преносот ако таков напонски трансформатор се вклучи под напон во момент на проаѓање на напонот низ нулата. Доколку во специјални случаи е потребно да се избегнат овие изобличувања може да се применат линеаризирани напонски трансформатори со воздушни распони во магнетниот круг.

1.2.2 Капацитивни напонски мерни трансформатори

На сл. 1.9 е прикажан капацитивен делител на напон и векторскиот дијаграм на струите и напоните на истиот. Ако е делителот приклучен на фазен напон $\boldsymbol{U}_1$ на кондензаторот $\boldsymbol{C}_2$ се добива напонот:

$$U_{C2} = U_1 \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

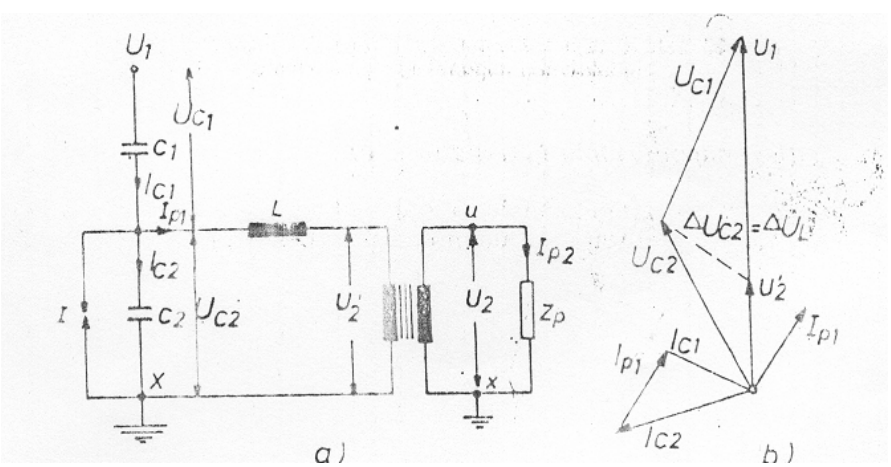


Слика 1.9. Шема и дијаграм на капацитивен делител на напон

Напонот $\boldsymbol{U}_{C2}$ е пропорционален на примарниот напон $\boldsymbol{U}_1$. За да овој напон од ред 10 до 20 kV се сведе на саканите номинални вредности и да се постигне галванско одвојување од примарниот струен круг, напонот $\boldsymbol{U}_{C2}$ се мери со помош на индуктивен напонски трансформатор спрема слика 1.10. Ако се претпостави дека секундарот на трансформаторот е неоптеретен ($\boldsymbol{Z}_p = \infty$) и ако се земе дека сопствената потрошувачка на индуктивен меѓутрансформаторот е занемарлива, векторските односи на напоните $\boldsymbol{U}_1$ и $\boldsymbol{U}_{C2}$ се исти како на слика 1.9, бидејќи $\boldsymbol{I}_{p1} = 0$. Кога секундарот на трансформаторот ќе се оптовари со напонските намотки на броила, заштитни уреди, мерни инструменти и кога ќе се додаде сопствената потрошувачка на индуктивниот меѓутрансформатор се појавува струјата $\boldsymbol{I}_{p1}$:

$$I_{C1} = I_{C2} + I_{p1}$$

Струјата $\boldsymbol{I}_{p1}$ има индуктивен карактер, што доведува до зголемување на струјата $\boldsymbol{I}_{C2}$ и намалување на $\boldsymbol{I}_{C1}$. Тоа има за последица зголемување на апсолутната вредност и фазното поместување на напонот $\boldsymbol{U}_{C2}$ во однос на истиот напон при празен од на трансформаторот. Ако секундарното оптеретување е премногу високо или ако се работи за секундарна куса врска може напонот $\boldsymbol{U}_{C2}$ да достигне многу високи вредности кои можат да доведат до оштетување на кондензаторот. Заради тоа се додава искриштето **I** кое во такви случаи пробива и кусо го врзува кондензаторот.



Слика 1.10. Шема и векторски дијаграм на капацитивен напонски мерен т -тор

Опишаниот капацитевен напонски трансформатор би бил непогоден за приклучување на инструменти и релеи бидејќи при значителна аголна грешка секундарниот напон би можел да варира 10 до 20% во завис ност од секундарното оптоварување на трансформаторот. За да се сведат напонските и аголните грешки на капацитивните напонски трансформатори во границите одредени со класата на точност се применува компензациона пригушница L споена во серија со примарната н амотка на индуктивниот меѓутрансформатор Т. На слика 1.10 се гледа дека зголемувањето на напонот $\boldsymbol{U}_{C2}$ се појавува поради падот на напонот на индуктивната струја на кондензаторите на делителот. За да се компензира ова зголемување и за да се добие на секундарот на меѓутрансформаторот напон пропорционален на примарниот напон, независно од големината на струјата потребно е да падот на напонот $\Delta\boldsymbol{U}_{C2}$:

$$I_{p1} \cdot \omega \cdot L = I_{p1} \cdot \frac{1}{\omega\left(C_1 + C_2\right)}$$

$$L = \frac{1}{\omega^2\left(C_1 + C_2\right)}$$

Во индуктивитетот L влегува е растурачкиот индуктивитет на меѓутрансформаторот. Зголемувањето на напонот на кондензаторот $\boldsymbol{C}_2$ предизвикано од струјата практично е целосно компензирано со индуктивниот пад на напон $\Delta\boldsymbol{U}_1$ така што напонот $\boldsymbol{U}_2^{'}$ останува константен независно од големината на струјата. Значителни напрегања за секој напонски трансформатор предизвикува кусата врска на секундарната страна. Во индуктивниот напонски трансформатор, на тој начин доаѓа до зголемување на температурата заради струјната преоптовареност. Ефикасна заштита се осигурачите. Во случај на куса врска на секундарната страна на капацитивниот напонски трансформатор заради големите струи доаѓа до значително зголемување на напонот во резонантниот круг и ако не се превземат посебни мерки на заштита тоа доведува до оштетување на парцијалниот капацитет $\boldsymbol{C}_2$. Заштитата се оставарува со поставување на дополнителна пригушница која има крива на магнетизирање со изразито колено. Кога струјата ќе постигне одредена вредност дополнителната пригушница станува заситена. Тоа доведува до промена на индуктивитетот во кругот и заради тоа не постои резонанција. На тој начин се спречува зголемувањето на напонот на парцијалниот капацитет $\boldsymbol{C}_2$.

1.2.3 Параметри за избор на напонските мерни трансформатори

Покрај досега дефинираните параметри на напонските трансформатори потребно е да се дефинираат и низа други параметри кои се значајни при изборот на напонските трансформатори за заштита.

Номинален примарен напон ($\boldsymbol{U}_{1n}$) е ефективна вредност на примарниот напон која се впишува на натписната плоча и спрема која се одредуваат особините на трансформаторот. За еднофазните трансформатори кои се употребуваат во еднофазна мрежа или помеѓу фазите во трифазна мрежа и за трифазните трансформатори номиналниот примарен напон мора да се избере меѓу стандардните вредности на номиналните напони на мрежата. За еднофазните трансформатори кои се приклучуваат помеѓу една фаза и земја или неутралната точка и земја во трифазна мрежа, стандардните вредности на номиналниот примарен напон се добиваат со делење на номиналните напони со $\sqrt{3}$.

Номиналниот секундарен напон (U_{2n}) е ефективна вредност на секундарниот напон која се впишува на натписната плоча и спрема која се одредуваат особините на трансформаторот. За еднофазните тарнсформатори во еднофазните мрежи или приклучени меѓу фазите во трифазната мрежа се утврдени следниве стандардни вредности на секундарниот напон: 100 и 200 V. Кај еднофазните трансформатори наменети за приклучок помеѓи фаза и земја во трифазна мрежа за која номиналниот примарен напон е поделен со $\sqrt{3}$, и номиналниот секундарниот напон треба да биде една од горенаведените вредности поделена со $\sqrt{3}$, така што преносниот однос да остане ист. Вредностите на номиналниот секундарен напон за отворен триаголник се 100/3 и 200/3 V.

Номинален преносен однос p_{un} е однос на номиналниот примарен напон и номиналниот секундарен напон на напонскиот мерен трансформатор.

Номинална снага S_n е привидната снага во (VA) при пропишан фактор на моќност, која трансформаторот ја дава на секундарниот круг при номинален секундарен напон и номинално оптеретување, а при тоа напонската и аголната грешка да не ги надминат дозволените вредности. Номиналните снаги на напонските трансформатори се движат во вредностите 10-15-25-30-50-75-100-150-200- 300-400-500 VA.

Оптоварување е привидната проводност на секундарниот круг S_n изразена во сименси со назнака на факторот на моќност (индуктивен или капацитивен).

$$Y_n = \frac{S_n}{U_{2n}^2}$$

Термичка гранична снага на напонскиот трансформатор е секундарно оптеретување кое трансформаторот може да го издржи, а температурата на намотките да не ја премине дозволената вредност. Граничната снага е значително поголема од номиналната и се движи во границите пд 1500 до 4000 VA.

Номинален фактор на напон V_f е фактор со кој треба да се множи номиналниот примарен напон заради одредување на највисокиот напон при кој трансформаторот мора да ги задоволува пропишаните барања во поглед на загревање за време на пропишаното траење, како и барањата во однос на точноста. Овој фактор зависи од начинот на заземјување на мрежата и начинот на приклучување на примарната намотка на трансформаторот на мрежата. Стандардните фактори на напон кои одговараат на различните услови на заземјување на мрежата заедно со дозволеното траење се дадени во табелата 5:

Табела 5. Номинален фактор на напон V_f

номинален фактор на напон V_f	номинално траење	Начин на приклучување на примарната намотка и начин на заземјување на мрежата
1,2	трајно	помеѓу фазите на било која мрежа; помеѓу неутралната точка на т-торот и земјата во било која мрежа
1,2	трајно	помеѓу фаза и земјата во мрежа со ефикасно заземјена неутрална точка
1,5	30 s	
1,2	трајно	помеѓу фаза и земјата во мрежа со неефикасно заземјена неутрална точка и автоматско исклучување на земјоспој
1,9	30 s	
1,2	трајно	помеѓу фаза и земјата во мрежа со изолирана неутрална точка без автоматско исклучување на земјоспој или во мрежа со компензирана струја на земјоспој без автоматско исклучување на земјоспој
1,9	8 h	

Класа на точност на напонски трансформатор за заштита се означува со број кој ја покажува најголемата дозволена напонска грешка и буквата P. Напонскиот трансформатор ги задоволува условите на класата на точност ако напонската и фазната грешка се внатре во границите дадени во табелата 6 за вредности на примарниот напон $0{,}05 \cdot U_{1n} \le U_1 \le V_f \cdot U_{1n}$ за оптоварување помеѓу 25% и 100% од номиналното оптоварување при индуктивен фактор на моќност 0.8.

Табела 6. Напонска и фазна грешка за соодветна класа на точност кај напонскиот трансформатор за заштита

класа на точност	$\pm \Delta u\%$	$\pm \delta_u$ минути
3P	3	120
6P	6	240

Ако напонскиот трансформатор има две секундарни намотки на натписната плоча на трансформаторот назначена е за секоја секундарна намотка класата на точност и номиналната снага.

Начин на означување на преносниот однос (пример за мрежа со номинален напон 10000 V: за двополно изолиран трансформатор:

$$10000/100\,V$$

за еднополно изолиран трансформатор:

$$\frac{10000}{\sqrt{3}}/\frac{100}{\sqrt{3}} \quad \text{или} \quad \frac{10000}{\sqrt{3}}/\frac{100}{\sqrt{3}}/\frac{100}{3}V$$

притоа ознака се однесува за еднополно изолиран напонски трансформатор кој има две секундарни намотки, а една од нив е намотка за отворен триаголник. За дојава на земјоспој може во еднополните изолирани трансформатори да се вгради помошна

секундарна намотка со номинален напон 100/3 V (односно 200/3 V) која заедно со таквите намотки од останатите две фази се врзуваат во отворен триаголник. Напонот на отворениот триаголник во нормален погон е незначителен, а во случај на земјоспој на една фаза тој пораснува до 100 V и сигнализира земјоспој.

Поделба на напонските трансформатори спрема изолационите средства:

-*<u>епоксидни напонски трансформатори</u>*, најчесто се употребуваат за номинални напони до 35 kV и тоа како двополно и еднополно изолирани. Наменети се исклучиво за внатрешна монтажа и можат да се врадат во било која положба.

-*<u>малкумаслени напонски трансформартори</u>*, се користат за напони поголеми од 35 kV, посебно ако се предвидени за надворешна монтажа. Малку маслените напонски трансформатори за високи и многу високи напони се прават со отворено или затворено јадро. Со примената на отвореното јадро се смалуваат димензиите но, ваквото јадро предизвикува нешто поголема струја на магнетизирање односно зголемување на грешката на трансформаторот при празен од.

-*<u>SF_6 напонски трансформатори</u>*, користат за изолација гас сулфур хексафлуорид (SF_6). При напони до 145 kV, високонапонската намотка на индуктивните напонски трансформатори обично е залеана со епоксидна смола, а за изолација спрема металното куќиште служи SF_6 гас. За напони од 170-750 kV, SF_6 напонските трансформатори се изведуваат со изолациона фолија. Јадрото со примарната и секундарната намотка се поставува слободно во куќиште со SF_6 гас. Одредени слоеви на примарната намотка се изолирани едни од други со SF_6 импрегнирана фолија специјално развиена за оваа намена. Тоа им дава висока диелектрична цврстина на овие конструкции на напонски трансформатори.

1.2.4 Важни напомени за погонот на напонските трансформатор и

Секундарниот круг на напонскиот трансформатор не смее (за разлика од струјните трансформатори никогаш кусо да се врзува заради опасноста од оштетување на трансформаторот.

Металните делови на напонските мерни трансформатори кои во нормални услови не се под напон треба да се заземјат за да се заштити персоналот.

Кај двополно изолираните напонски трансформатори се заземјува една стегалка на секундарната намотка (обично стегалката v), а кај еднополните изолирани напонски трансформатори се заземјува секундарната стегалка x и примарната стегалка X (неизолираниот извод на примарната намотка)