

## 1. ОСНОВЕ ТЕОРИЈЕ И ПРАКСЕ

### 1. 1. ШТА ЈЕ ТРАНСФОРМАТОР

Тематиком енергетских трансформатора у оквиру Међународне електротехничке комисије (IEC) бави се Технички комитет TC 14 (TC 14 Power transformers), а стандарди који се односе на трансформаторе су садржани у серији 60076. Ови стандарди се односе на монофазне трансформаторе чија је снага већа од 1kVA и трофазне трансформаторе чија је снага већа од 5kVA, при чему је бар један намотај за напон већи од 1000V. Дефиниција трансформатора, према стандарду IEC 60076-1, из 2012., гласи: „Енергетски трансформатор је статички уређај са два или више намотаја који, коришћењем електромагнетне индукције, трансформише систем наизменичних напона и струја у други систем напона и струја обично различитих вредности, при чему је фреквенција иста, у сврху преноса електричне енергије.“

Оптималан пренос енергије, пре свега по критеријумима економичности и поузданости, захтева примену високих напона, утолико већих уколико се повећава снага преноса енергије и даљина преноса енергије. Данас се у системима за пренос електричне енергије стандардно користе напони 110 kV, 220 kV и 400 kV. Поред њих, у пракси се срећу и виши напонски нивои наизменичног напона – напони већи од 765 kV спадају у категорију ултра високих напона. Постоје и преносни системи на високом једносмерном напону – у новембру 2019. у Кини је пуштен у рад линк на напонском нивоу 1100 kV, пре кога је уобичајени напонски ниво за једносмерни пренос енергије (HVDC) износио од 100 kV до 800 kV (типична вредност која се користи за HVDC кабловске везе је 500 kV, а дужина неколико стотина километара). Са друге стране, оптималан напон синхроних генератора за производњу електричне енергије је око 20 kV. На местима потрошње електричне енергије, напон је диктиран пре свега изолационим и безбедносним критеријумима и најчешће износи 100 V - 500 V (код нас 230 V фазни напон, односно 400 V линијски напон, 50 Hz). За трансформације напона у различитим деловима мреже користе се трансформатори. Један од разлога због којих је преовладао наизменични пренос електричне енергије је то што је у систему једносмерне струје био проблем извршити трансформацију напонских нивоа. Чињеница је да су енергетски претварачи доживели огроман развој, и да могу да врше трансформацију напона без трансформатора (на пример чопер), али није реално очекивати да ће трансформатори у дугом периоду у будућности изгубити на свом значају и да ће се смањити њихова масовна примена. Приметимо да се, из разлога постизања техно-економског оптимума, у системима за пренос енергије на високим једносмерним напонима такође користе трансформатори. Наиме, у постројења (исправљачке станице, у којима се наизменични напон претвара у једносмерни, на коме се енергија преноси енергетским водом, као и инверторске станицама, у којима се једносмерни напон на крају једносмерног преносног вода претвара у наизменични) на крајевима преносног вода, поред полупроводничких претварача (исправљача / инвертора), садрже и трансформаторе.

У огромном броју случајева, намотаји трансформатора имају различит број навојака, због чега се разликују напони на намотајима, при чему је производ напона и струје кроз намотаје приближно исти. Дакле, подизање напона је праћено смањењем струје. Трансформатори су базирани на принципу електромагнетне индукције и немају покретне делове.

Трансформатори су велики и скупи уређаји, у којима постоје велика магнетна (због великих струја) и електрична (због великих напона) поља. Трансформатор је потребно познавати са више страна, и ова знања и послови у доминантној мери спадају у делокруг електроенергетичара. Ради се о пословима од **пројектовања**, производње, тестирања, преко **предвиђања понашања**

**трансформатора као елемента мреже**, до надзора и одржавања. Не ретко трансформатор је наменски конструисан и произведен према захтевима који проистичу од улоге коју он треба да испуни у електроенергетској мрежи. То поготову важи за трансформаторе великих снага. Уговарање куповине трансформатора великих снага и њихова производња су процеси који трају и неколико година. Оријентациона цена (октобар 2022.) трансформатора је 30000 € / MVA. По правилу, корисници трансформатора немају резервни трансформатор, због чега је веома битно праћење стања трансформатора током рада и правовремено предузимање мера – редовна испитивања, редовни сервис, спровођење посебних интервенција на трансформатору иницираних резултатима примене дијагностичких метода (са *on line* мониторинг система или редовних испитивања).

## 1. 2. ПРИМЕНА

Предмет проучавања су енергетски трансформатори, који се користе у електроенергетици, преваходно за пренос великих енергија на високим напонима. Поред њих, постоје и трансформатори који се користе у електроници и телекомуникацијама, најчешће у колима за напајање, прилагођење импеданси, пренос импулса итд.

У електроенергетици, поред намене за пренос енергије, трансформатори се користе као **мерни** трансформатори, којима се врши смањења великих напона и великих струја у енергетском колу на вредности напона / струја које се налазе унутар мерних опсега напона / струја мерних опсега стандардних мерних инструмената (типичне вредности су 100 V и 5 A).

Следећи пример специфичне примене у електроенергетици су **испитни** трансформатори, који се користе у станицама за испитивање електроенергетске опреме, како би се остварили потребни напони и струје. За њих је карактеристично да могу да имају врло велике напоне и мале струје или врло велике струје и мале напоне на напонској страни према електроенергетској опреми.

Поље примене трансформатора у различитим техничким системима је огромно. Велики је и скуп специфичних решења у конструкцији трансформатора која се користе како би трансформатори успешно обавили потребне функције. У оквиру курса ће се приказати нека од ових решења, за случајеве распрострањене у пракси. Највећи број трансформатора се користи као део електроенергетског система, за подизање или спуштање напона, односно за повезивање електроенергетских мрежа различитих напона. Већи извори електричне енергије се по правилу прикључују на ниженапонску страну трансформатора, док је вишенапонска страна повезана са мрежом. Постоје и специфичне примене трансформатора, у којима се на ниженапонску страну прикључују велики потрошачи електричне енергије, као што су: **електромоторни погони, електрична вуча, електрохемија, електротермија** итд. У већини од наведена четири примера постоје специфичности прикључених оптерећења, као што су исправљачи (полупроводнички претварачи) или веома велике струје на ниским напонима (примера ради, снага 80 MVA, а линијски напон на секундару трофазног трансформатора на који се прикључује електролучна пећ 761 V).

Поменимо још неке специфичне конструкције енергетских трансформатора:

1. **Аутотрансформатори** (они су јефтинији од трансформатора стандардне конструкције), којима се може мењати напон, али без галванског раздвајања више и ниже напонске стране,
2. **Регулациони трансформатори**, којима се може мењати број активних навојака, па самим тим и преносни однос и вредност напона на секундарној страни трансформатора (ток енергије је од примарне (напајане) стране ка секундарној (потрошња) страни).

У одељку 1.1. су наведени напонски нивои класичних генератора који производе електричну енергију, напонски нивои преносне мреже и напонски ниво на коме се врши широка потрошња електричне енергије. Типично, трансформација напонских нивоа је вишестепена, на пример, од преносне мреже до широке потрошње могу се извршити следеће трансформације система трофазних напона: 400 kV / 110 kV, 110 kV / 10 kV и 10 kV / 0.4 kV.

**Илустрације ради**, у табелама 1.1. и 1.2. је приказан број трансформаторских станица и њихових инсталираних снага за бившу Југославију, из 1987/88 године (табеле преузете из [1]).

Табела 1.1. – Трансформаторске станице у преносу електричне енергије – 1988. година

| Примарни напон (kV)     | 400    | 220    | 110    | Укупно |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Број станица            | 32     | 42     | 543    | 617    |
| Инсталирана снага (MVA) | 18 950 | 14 560 | 30 374 | 63 884 |

Табела 1.2. – Трансформаторске станице дистрибутивних организација – 1987. година

| Примарни / секундарни напон (kV/kV) | 110/x  | 35/x   | x/0.4  | Укупно |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Број станица                        | 289    | 1 380  | 75 359 | 77 028 |
| Инсталирана снага (MVA)             | 14 517 | 12 482 | 22 162 | 49 161 |

Типично, једна трансформаторска станица садржи од 1 до 4 трансформатора (најчешће 2). У електроенергетском систему бивше Југославије било око 160000 трансформатора, укупне снаге преко 110 GVA. Укупна инсталирана снага електрана је износила 20.8 GVA, што значи да је укупна инсталирана снага трансформатора била око 5.5 пута већа од инсталиране снаге генератора.

На крају општег текста о трансформаторима, треба поменути да постоји дуга историја прављења и примене трансформатора, око **150 година** – историјски почеци сежу у 30.-те године 19.-тог века, када је откривена електромагнетна индукција, а затим и индукционо спрегнута кола, као принципа на коме се заснива рад трансформатора. Након производње ефикасних генератора наизменичне електричне енергије 1870. године, 70.-тих година 19.-тог века су произведени први монофазни трансформатори, а око 1890.-е године трофазни трансформатор и Теслин трансформатор – високонапонски резонантни трансформатор са ваздушним језгром за генерисање врло високих напона на високим учестаностима.

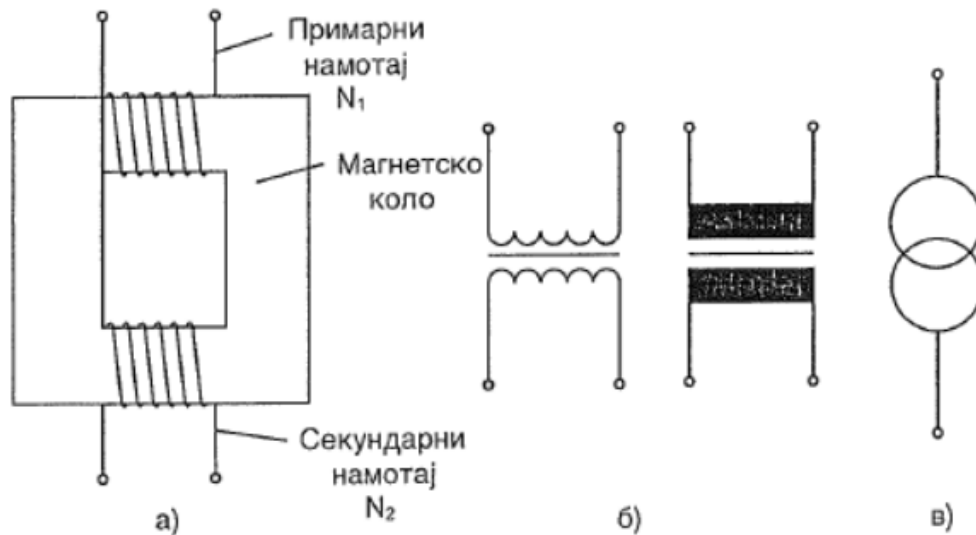
### 1. 3. КОНСТРУКЦИЈА И КЛАСИФИКАЦИЈА ТРАНСФОРМАТОРА

Конструктор трансформатора мора да обезбеди да трансформатор испуни предвиђену функционалност, односно све карактеристике које треба да има посматран споља као „црна кутија“, као елемент неког електроенергетског постројења. Поред тога, трансформатор мора да испуњава дефинисане карактеристике, на пример да губици буду испод специфицираних, као и да током рада у предвиђеним условима не дође до квара трансформатора. Да би компанија која производи трансформатора била конкурентна на тржишту, трансформатор мора бити економично конструисан. Као што ће се видети из излагања током курса, за постизање тог циља неопходно је развити и применити методе за прорачун комплексних електромагнетних, термичких и механичких појава.

Шематски посматрано, најједноставнији трансформатор има једно магнетно коло, на које су постављена два електрично одвојена намотаја, који се називају примар (са  $N_1$  навојака) и секундар

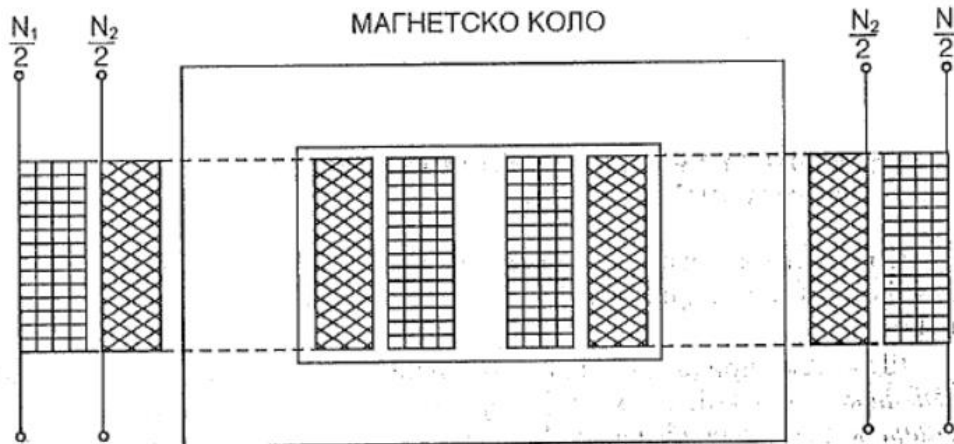
(са  $N_2$  навојака). Електрична енергија се преноси са примара ка секундару. На слици 1.1а је дат упрошћен изглед, на слици 1.1б уобичајен симбол за трансформатор и на слици 1.1в приказ трансформатора као елемента једнополне шеме.

**Магнетно коло се састоји од челичних, специјално легираних, танких лимова.** За остваривање оптималних карактеристика трансформатора потребно је да материјал има што већу магнетну пермеабилност, што мање хистерезисне губитке и што већу специфичну електричну отпорност. Вредност губитака се смањује и смањењем дебљине лимова, због чега се примењује ламелирана конструкција – танак челични лим са електроизолационим слојем на површини. Уколико би се магнетно коло извело изливањем масивног гвозденог језгра, појавиле би се велике вихорне струје, последично и велики губици, тако да масивно језгро не представља опцију од практичног интереса.



Слика 1.1 – а) Упрошћени приказ трансформатора, б) уобичајена шема, в) приказ трансформатора као елемента једнополне шеме

Да би се постигла боља магнетна спрега, намотаји се мотају један преко другог, на пример као што је приказано на слици 1.2, односно практично никада као што је приказано на слици 1.1 а). Са друге стране, намотаји морају бити довољно удаљени један од другог, као и од магнетног кола, како не би дошло до појаве недозвољено великих електричних поља и диелектричног пробоја. Постављање изолационих елемената, као што су изолациони цилиндри, омогућава постизање потребне изолованости, односно одржавање вредности електричног поља испод пробојног поља, уз мања међусобна растојања.



Слика 1.2 – Расподела намотаја примара и секундара на два стуба

Рад трансформатора се заснива на принципу електромагнетне индукције. Довођењем напона на примар у магнетном колу се ствара магнетни флуks. У идеализованом случају, довођење напона на примар  $u_1$  доводи до појаве магнетног флуksа  $\varphi$  одређеног изразом  $u_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt}$ . Другим речима, напон на примару је једнак електромоторној сили индукованој у једном навојку  $e_1 = \frac{d\varphi}{dt}$ , помноженој са бројем навојака  $N_1$ . Емс у секундару се ствара као резултат промене магнетног флуksа кроз навојке секундара. У идеализованом случају савршене магнетне спреге, магнетни флуks кроз сваки од навојака примара једнак је магнетном флуksу кроз сваки од навојака секундара. Дакле, генерисани напон у намотају секундара, који има  $N_2$  навојака, износи  $u_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt}$ . Наведена идеализација, да је флуksни обухват кроз сваки од навојака примара и кроз сваки од навојака секундара константан, је нешто чему се у принципу стреми при конструкцији трансформатора. О детаљима стварања магнетног флуksа и његове расподеле ће бити речи у наставку курса.

Као при свакој трансформацији енергије (овде се енергија претвара из електричне енергије у електричну енергију исте учестаности и најчешће другачијег напона), појављују се губици енергије, који се трансформишу у топлоту. Губици су доминантно сконцентрисани у магнетном колу и у намотајима. Поред њих, значајну вредност имају и губици који настају као резултат струја у конструкционим деловима трансформатора изложених расутом флуksу. Губици енергије директно представљају финансијски трошак. Друга негативна последица је загревање трансформатора. Нарочито је значајно загревање изолације проводника, јер сваки изолациони материјал има максималну температуру – по правилу, постоји једна (нижа) дозвољена температура при којој изолациони материјал нормално стари и друга (виша) температура чији прелазак би изазвао тренутно оштећење изолације и њен пробој, односно оштећење и испад трансформатора. За постојеће губитке је могуће смањити температуре правилним хлађењем трансформатора. Хлађење активних делова трансформатора може бити ваздухом (суви трансформатори) или изолационом течностју.

Суви трансформатори се по правилу налазе у затвореним просторијама, где су заштићени од атмосферских падавина. Постоје конструкције код којих се магнетно коло и намотаји постављају у кућиште, као и они код којих се без оклопа постављају директно у просторију. У случају постојања кућишта, обезбеђена је заштита од додира опасних напона (додира изложених електропроводних делова), као и смањење магнетног поља у околини трансформатора.

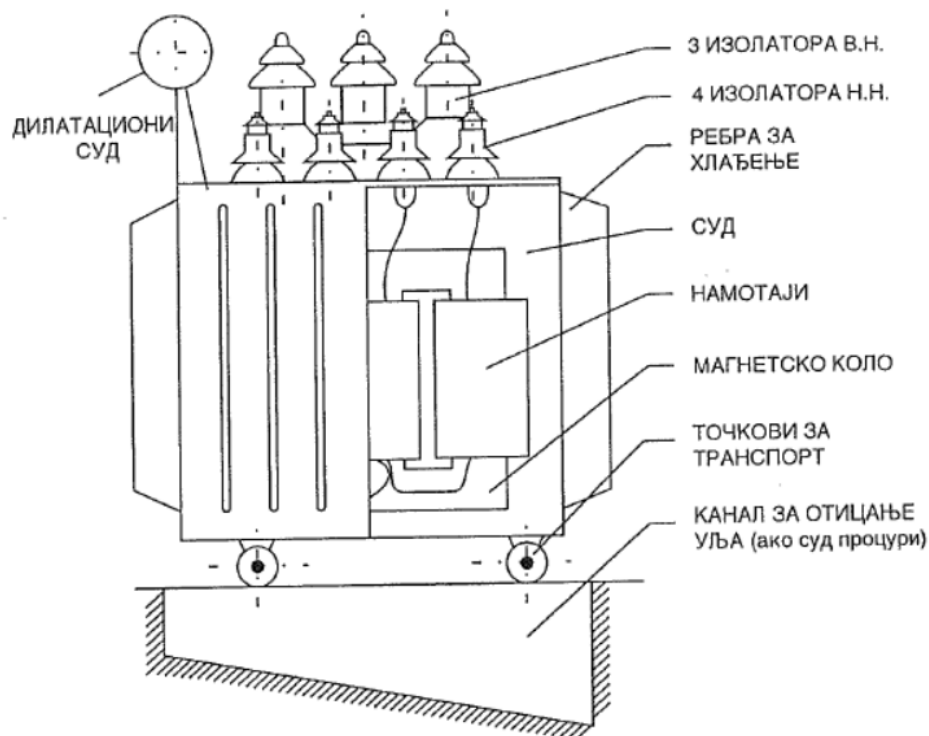
Опционо, за хлађење сувих трансформатора се може применити принудно струјање ваздуха, и то тако да се усмери преко намотаја и магнетног кола. Ова опција се обично користи у периодима највећег оптерећења трансформатора и највећих температура околног ваздуха. Разлог је што вентилатори по правилу нису конструисани за велики број радних сати, па се њихова употреба предвиђа само у периодима када је загревање трансформатора, услед високог оптерећења и велике околне температуре, највеће.

Код трансформатора са изолационом течносту, активни део (намотаји и магнетно коло) су потопљени у суд испуњен изолационом течносту (надаље ће се уместо термина изолациона течност користити реч уље). Уље служи као расхладно средство, коме се топлота предаје са активног дела трансформатора и са кога се затим, преко радијатора или компактних хладњака, преноси ка спољњем расхладном средству (ваздух или вода). Поред тога, уље служи и као изолационо средство које, заједно са чврстом електричном изолацијом, обезбеђује потребна изолациона својства између делова под напоном. Другим речима, уљно-папирна изолација треба да буде тако димензионисана да обезбеди да електрично поље буде мање од његове критичне вредности, при којој би дошло до пробоја електричне изолације.

Практично, уљни трансформатори се користе у случајевима већих напона / снага. Иако суви трансформатори представљају варијанту која је једноставнија за одржавање, еколошки су прихватљивији и мањи су захтеви у грађевинском смислу (није потребна јама за сакупљање уља у случају хаварије), њихова практична примена је реална за мање напоне и снаге, оријентационо 35 kV, 3.15 MVA. Разлог је што је хлађење код уљних трансформатора ефикасније, због чега би димензије и цена сувих трансформатора за веће напоне и снаге била неприхватљива.

У електродистрибуцији се често користе решења за смештај трансформаторске станице у три просторије: у једној је смештен трансформатор, у једној разводни блок електричне енергије на ниженапонској страни и на једној разводни блок електричне енергије на вишенапонској страни. У било којој од ових варијанти мора се обезбедити адекватно хлађење простора у коме је смештен трансформатор, што се ради правилним димензионисањем вентилационих отвора (природна вентилација) или вештачком климатизацијом.

На слици 1.3 је приказана скица једног типичног дистрибутивног трофазног трансформатора који се хлади природним струјањем уља (не постоје пумпе) и природним струјањем ваздуха (не постоје вентилатори).



Слика 1.3 – Скица типичног трофазног трансформатора

Према броју и начину спрезања намотаја, могла би се извршити следећа класификација:

- Трофазни трансформатори са три намотаја на примару и три намотаја на секундару, при чему на свакој од напонских страна намотаји могу бити везани у звезду или у троугао
- Једнофазни трансформатори са једним намотајем на примару и једним намотајем на секундару
- Тронамотајни, најчешће трофазни, са једним или два трофазна намотаја примара и два или једним трофазним намотајем секундара
- Трансформатори за претварање броја фаза (3 у 2, 6 или 12), који се примењују код електричних пећи и исправљача, како би се постигло симетрично оптерећење трофазне електроенергетске мреже (3 у 2) и смањили хармоници струја који протичу ка мрежи (3 у 6 или 12).

#### 1. 4. ПРИНЦИП РАДА, ОСНОВНЕ ЈЕДНАЧИНЕ И ГЛАВНИ ПРОБЛЕМИ

Као што је већ речено, рад трансформатора је базиран на електромагнетној индукцији. Прикључење напона на примарни намотај (на примару има  $N_1$  навојака) трансформатора доводи до појаве магнетне индукције (магнетног флукса) у језгру, што доводи и до појаве генерисања напона у секундарном намотају (на секундару има  $N_2$  навојака) трансформатора. Уколико је на крајеве секундара прикључена импеданса, кроз секундар ће протичати струја ( $i_2$ ), а кроз примар ( $i_1$ ) струја нешто већа од  $i_2 * (N_2 / N_1)$ . Разлика  $i_1 > i_2 * (N_2 / N_1)$  садржи реактивну компоненту која је потребна да би се створио магнетни флукс кроз језгро које није идеално, јер има коначну вредност магнетне отпорности. Поред реактивне компоненте, постоји и активна компонента (у фази са напонем примара), чији је производ са напонем примара једнак губицима у магнетном колу (губици услед магнетног хистерезиса и вихорних струја). Када је секундар отворен (за овај случај се каже да је

трансформатор у празном ходу), кроз примар протиче само мала струја потребна да намагнети језгро и покрије губитке у њему.

У идеализованом случају, да се целокупни магнетни флуks затвара кроз магнетно коло, да нема никаквих губитака, и да је магнетни отпор магнетног кола нула, важи закон о равнотежи струја, који изражава једнакост магнетопобудних сила (или ампернавојака) примара и секундара,

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad (1.1)$$

и закон напонске равнотеже

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.2)$$

$u$  и  $i$  су тренутне вредности напона и струје примара (индекс 1) и секундара (индекс 2).

У наведеном идеализованом случају важи и закон одржања енергије у временском домену:

$$u_1 i_1 = u_2 i_2 \quad (1.3)$$

На први поглед би се могло рећи да трансформатор представља једноставан уређај. У пракси постоји низ аспеката који инжењеринг везан за трансформаторе чини комплексним и изазовним. Трансформатори представљају кључне елементе у електроенергетским постројењима и мрежи, скупи су и у случају квара не могу се брзо заменити новим трансформаторима. У трансформатору су присутна јака електрична поља, магнетна поља и велики губици, а последично и повећање температуре. Могли би се систематизовати следећи практични аспекти, који ће се, осим последњег, проучавати у оквиру курса.

- Губици енергије. Иако је степен искоришћења велики (код највећих трансформатора и 99.5%), значајна је укупна (сумарна) енергија изгубљена у великом броју трансформатора у електроенергетском систему.
- Последица губитака је загревање трансформатора. Хлађење активних делова трансформатора, као и уља, мора бити адекватно решено, тако да температуре не пређу вредности при којима се има нормална (планирана) деградација чврсте изолације и уља, односно нормалан животни век трансформатора.
- Расипање магнетног флуksа. Део магнетног флуksа се затвара кроз простор ван магнетног кола. Од расутог магнетног флуksа зависе многи важни радни параметри трансформатора: пад напона, додатни губици у намотајима, загревање намотаја, механичке силе и загревање конструкционих делова трансформатора.
- Расподела електричног поља и димензионисање изолационог система на начин да не дође до електричног пробоја.
- Нелинеарност магнетног кола. Једна од најзначајнијих практичних последица нелинеарности магнетног кола је велика струја при укључењу трансформатора. Поред тога, она доводи до изобличења струје (њеног одступања од синусног облика).
- Несиметрична оптерећења и кварови (прекиди фаза или кратки спојеви). Проучавање ових практичних појава захтева примену метода симетричних компоненти, при чему се као улазни параметри при израчунавању користе експериментално одређени параметри трансформатора. Параметри трансформатора у нултом систему драстично зависе од спрега и, у случају спреге звезда, начина уземљења неутралне тачке.
- Прелазни режими. Поред већ поменутог прелазног режима укључења трансформатора, од практичног интереса су и прелазни режими до којих долази при кратком споју на крајевима трансформатора, као и при пренапонима који настају услед атмосферског пражњења или комутација (укључења / искључења прекидача) у мрежи.



- Бука. При раду трансформатора се ствара звук, услед магнетострикције магнетног кола, као и вибрација које изазивају силе које се јављају у намотајима кроз које протиче наизменична струја.

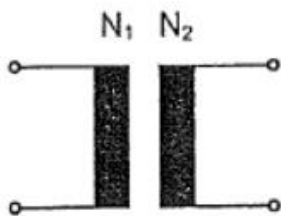
## 1. 5. ИНЖЕЊЕРСКИ ПРИСТУП РЕШАВАЊА ТЕХНИЧКИХ ПРОБЛЕМА

Прављење јединственог општег математичког модела чијом би се применом могле добити вредности свих претходно поменутих физичких величина, за сваки од радних режима трансформатора, не представља реално примењив приступ. Због тога се математички модели најчешће прилагођавају намени / решавању одређеног проблема, због чега њихова комплексност постаје прихватљива, односно ти модели постају примењиви у пракси.

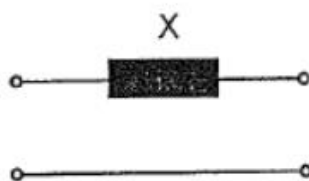
Посебна вештина је постављање модела који су довољно једноставни и довољно тачни, односно дефинисање модела у којима се уважавају феномени који значајно утичу на резултат, док се занемарују феномени чији је утицај мали (ефекти „другог реда“).

Математички модели се најчешће могу приказати у облику заменских шема, у највећем броју случајева електричних, а за загревање у облику топлотне шеме. На сликама 1.5 до 1.10 је приказано неколико заменских шема:

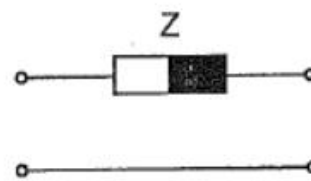
- Слика 1.5 – за идеални трансформатор, што је представа која се користи за основне прорачуне напона и струја у мрежама које садрже трансформатор
- Слика 1.6 – трансформатор као реактанса расипања, која се користи пре свега за прорачуне струја кратког споја у електроенергетском систему
- Слика 1.7 – трансформатор као редна импеданса, са активном отпорношћу и реактансом расипања, која се користи пре свега за одређивање пада напона на трансформатору и напонских прилика у мрежи
- Слика 1.8 – трансформатор као оточна импеданса, која се користи пре свега за модел понашања трансформатора у празном ходу (струја магнећења и губици у гвожђу)
- Слика 1.9 – трансформатор као низ редних и оточних капацитивности, која се користи за расподелу напона при наиласку пренапонског таласа (атмосферског или мрежног комутационог)
- Слика 1.10 – трансформатор као веза топлотних отпора и топлотних капацитета, која се користи за одређивање температуре у прелазним топлотним процесима



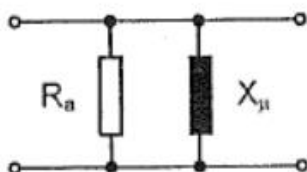
Слика 1.5



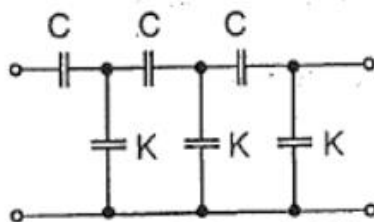
Слика 1.6



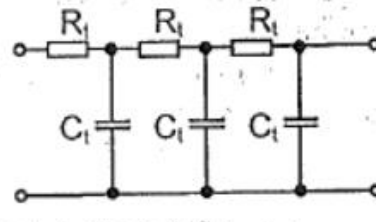
Слика 1.7



Слика 1.8



Слика 1.9



Слика 1.10

Наведени модели се дуго користе у пракси и могло би се рећи да су веома једноставни. Неки од њих су довољно добри са становишта сврхе којој служе. Имајући у виду значајна упрошћења, примена оваквих модела мора бити експериментално верификована, односно мора се установити тачност једноставних модела на низу реалних ситуација у пракси. У вези са тим, треба рећи да је класична инжењерска пракса у великој мери заснована на једноставнијим моделима и прорачунским методама, где је подешавање коефицијената вршено на основу **емпиријских** података. Ово је разумљиво имајући у виду од када се производе трансформатори и како су тада могла да се врше израчунавања. Последњих деценија постоји јак тренд примене тачнијих модела, који се базирају на **детаљнијем описивању физике проблема и детаљнијој конструкцији**, што неминовно захтева примену **комплексних рачунарских софтвера**. Тренутно је, могло би се рећи као део опште цивилизацијске „дигитализације“, у фокусу трансформаторске струке развој и примена **DIGITAL TWIN**, што заправо представља примену поменутих детаљних модела. Основни разлог је могућност великих уштеда, јер примена једноставних и мање тачних метода захтева увођење сигурносних фактора, који, на крају, доводе до предимензионисања трансформатора, односно он постаје скуп због непотребног утрошка вишка материјала.

**Параметри модела** се одређују на један од следећа два начина, или њиховом комбинацијом: **мерењем на трансформатору са спољне стране** (приступ трансформатору као „црној кутији“) или **полазећи од конструкционих детаља и карактеристика материјала** употребљених у трансформатору. Приступ „црне кутије“ је могућ само код модела за предвиђање понашања већ произведеног трансформатора у реалним случајевима током експлоатације. Приступ да се израчунавања врше полазећи од података о конструкцији и карактеристика материјала се примењује у фази пројектовања трансформатора. Приступ „црне кутије“ је од већег практичног интереса за кориснике трансформатора, док је други приступ значајнији за произвођаче трансформатора, који уређај треба да пројектују и произведу економично, при чему трансформатор мора да испуни параметре специфициране у уговору, као и да прође комплетан програм предвиђених тестова у испитној лабораторији.

### Литература

- [1] S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde: “Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics”, Second Edition, CRC Press, Published September 6, 2012, ISBN 9781439853771
- [2] J.H.Harlow: Electric power transformer engineering, CRC Press, 2012, ISBN-13: 978-1-4398-5636-9 (eBook – PDF)
- [3] Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M. Shah, Rajendra Ahuja: “Transformer Design Principles”, Third Edition, CRC Press, Published August 18, 2017, ISBN: 9781498787536
- [4] J. Duncan Glover, Thomas Overbye, Mulukutla S. Sarma: “Power System Analysis and Design”, SI Edition 6th Edition, Cengage Learning, 2015, ISBN: 9781305636187
- [5] П. Матић: Електричне машине 1, Академска мисао, 2016, ISBN: 978-99955-46-25-0
- [6] Ђ. Калић, Р. Радосављевић: „Трансформатори“, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, 1991, ISBN 86-17-09089-8
- [7] Ђ. Калић, Р. Радосављевић: Трансформатори, збирка задатака за рачунске вежбе
- [8] Fitzgerald, Kingsley: Електричне машине (на сајту предмета је доступна скенирана верзија српског издања књиге)