

1. ОСНОВЕ ТЕОРИЈЕ И ПРАКСЕ

1. 1. ШТА ЈЕ ТРАНСФОРМАТОР

Тематиком енергетских трансформатора у оквиру Међународне електротехничке комисије (ИЕС) бави се Технички комитет ТС 14, 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, а при чему је бар један намотај за напон већи од 1000V. Дефиниција трансформатора, према стандарду ИЕС 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 даљине 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 високи једносмерни напони – у новембру 2019. У Кини је пуштен у рад линк на напонском нивоу 1100 kV, пре чега је уобичајени напонски ниво за једносмерни пренос енергије износио 100 kV до 800 kV. Са друге стране, оптималан напон синхроних генератора за производњу електричне енергије је око 10 kV - 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 се користе трансформатори. Један од разлога због којих је преовладао наизменични пренос електричне енергије је то што је био проблем извршити трансформацију напонских нивоа у систему једносмерне струје. Чињеница је да су енергетски претварачи доживели огроман развој, и да могу да врше трансформацију напона без трансформатора, али није реално очекивати да ће трансформатори у дугом периоду у будућности изгубити на свом значају и да ће се смањити њихова масовна примена. Данашњи системи за пренос енергије на високим једносмерним напонима, у склопу постројења (исправљачких и инверторских станица) користе трансформаторе за трансформацију напона.

У огромног броју случајева, намотаји трансформатора имају различит број навојака, због чега се разликују напони на намотајима, при чему се приближно одржава исти производ напона и струје. 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 тај посао који у доминантној мери спадају у делокруг рада електроенергетичара, почев од пројектовања, производње, тестирања, предвиђања његовог понашања као елемента мреже, до надзора и одржавања. Треба навести и специфичност трансформатора да је чест случај да је он наменски конструисан и произведен према захтевима његове примене у електроенергетској мрежи. То поготову важи за трансформаторе великих снага. Уговарање куповине трансформатора великих снага и његова производња су процеси који трају и неколико година. 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, посебни захвати на трансформатору који проистичу из дијагностичких метода (са *on line* мониторинг система или редовних испитивања).

1. 2. ПРИМЕНА

Предмет проучавања су енергетски трансформатори, који се користе за преносе великих енергија, на високим напонима. Поред њих, постоје и трансформатори се користе и 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, за прилагођење великих напона и струја у енергетском колу напонским опсезима стандардних мерних инструмената (типичне вредности су 100V и 5 A). Следећи пример специфичне примене у електроенергетици су испитни трансформатори, који се користе у испитним станицама за испитивање електроенергетске опреме, како би се остварили потребни напони и струје. Огромно је поље могућности остварења различитих конструкција, при чему су оне све засноване на принципу електромагнетне индукције. Неке од примена ка већим крајњим потрошачима електричне енергије су: различити електромоторни погони, електрична вуча, електрохемија, електротермија итд. У одељку 1.1. су наведени напонски нивои класичних генератора који производе електричну енергију, напонски нивои преносне мреже и напонски ниво на којој се врши 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: 380 kV / 110 kV, 110 kV / 10 kV, 10 kV / 0.4 kV. У овом уводном делу могле би се поменути специфичне конструкције: 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 страни на којој је број навојака подесив.

Илустрације ради, у табелама 1.1. и 1.2. је приказан број трансформаторских станица и њихових инсталисаних снага за бившу Југославију, из 1987/89 године (табеле преузете из [1]).

Табела 1.1. – Трансформаторске станице електропривреде – 1988. година

Примарни напон (kV)	400	220	110	Укупно
Број станица	32	42	543	617
Инсталисана 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
Инсталисана снага (MVA)	14 517	12 482	22 162	49 161

Типично, једна трансформаторска станица садржи од 1 до 4 трансформатора (најчешће 2). То значи да је у електроенергетском систему бивше Југославије било око 200000 трансформатора, укупне снаге преко 110000 MVA. Укупна инсталисана снага електрана је износила 20794 MVA, што значи да је укупна инсталисана снага трансформатора била око 5.5 пута већа од инсталисане снаге генератора.

Трансформатори који се постављају у оквиру индустријских мрежа (иза места прикључка индустријског постројења на електроенергетски систем) могу бити специфичне конструкције, која се мора применити да би се остварили специфични захтеви потрошача електричне енергије. Примери: исправљачки трансформатори, на чији је секундар везан исправљачки полупроводнички мост, трансформатори за електричне пећи (електро-лучне, отпорне, индукционе), испитни (за велике напоне и мале струје) итд.

На крају општег текста о трансформаторима, треба поменути да постоји дуга историја прављења и примене трансформатора, од преко 130 година – историјски почеци сежу у 30.-те године 19.-тог

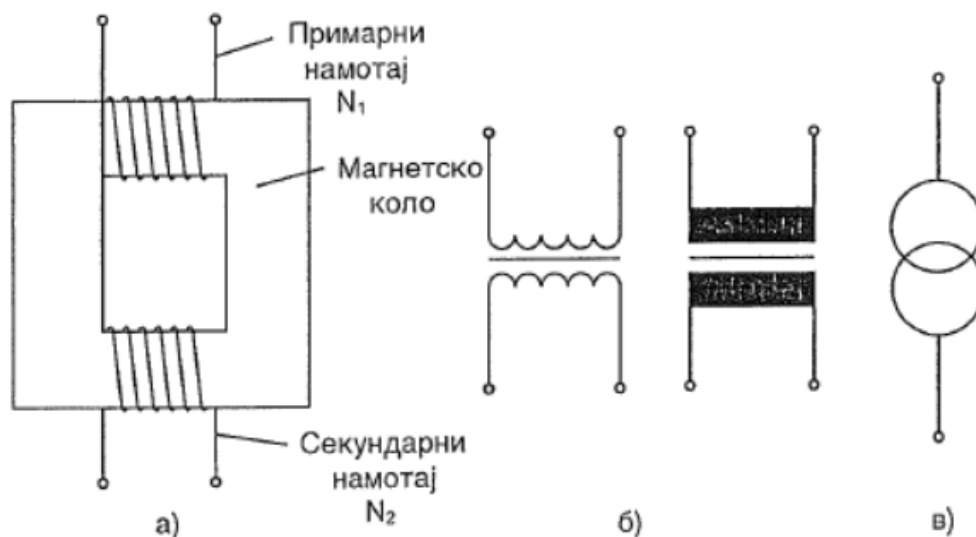
века, када је откривена електромагнетна индукција, а затим и индукционо спрегнута кола, као принцип рада трансформатора. Након производње ефикасних генератора наизменичне електричне енергије 1870. године, 70.-тих година 19.-тог века су произведени први монофазни трансформатори, а око 1990.-е године трофазни 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.

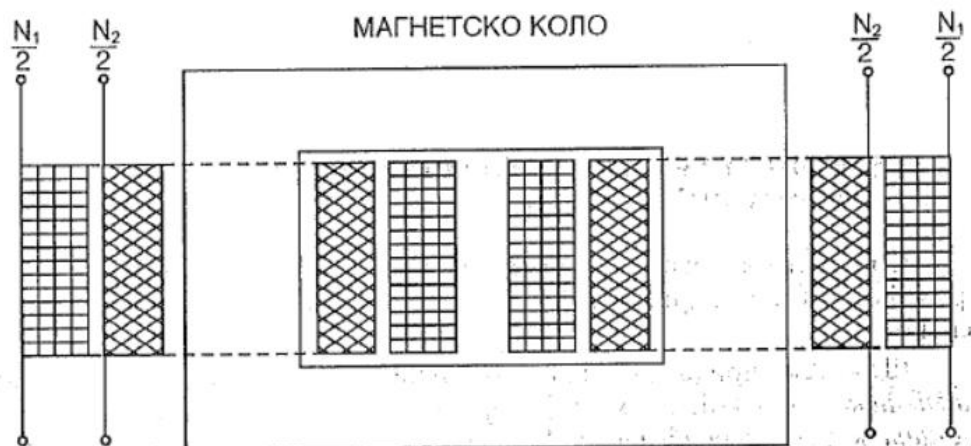
Шематски посматрано, најједноставнији трансформатор има једно магнетно коло, на које су постављена два електрично одвојена намотаја, који се називају примар (са N_1 навојака) и секундар (са N_2 навојака). На слици 1.1а је дат упрошћен изглед, на слици 1.1б уобичајен симбол за трансформатор и на слици 1.1в приказ трансформатора као елемента једнополне шеме.

Магнетно коло се састоји од гвоздених, специјално легираних, 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. Другим речима, масивно магнетно коло, које би се остварило изливањем масивног гвозденог језгра, 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 мотају бити довољно удаљени један од другог, како би се постигла њихова међусобна електрична изолованост. Постављање изолационих елемената, као што су изолациони цилиндри, омогућава постизање потребне изолованости уз мања међусобна растојања између намотаја.



Слика 1.2 – Расподела намотаја примара и секундара на два стуба

Основни принцип рада трансформатора је индуковање електромоторне силе ($\epsilon_{мс}$) у секундару ако се на примар доведе наизменични напон. Емс у секундару се ствара као резултат промене магнетног флукса кроз навојке секундара. Магнетни флуks се ствара као резултат напона доведеног на примар. У идеалном случају, да су материјали намотаја и магнетног кола, кроз које се простире магнетно поље, идеални, напон на примару (u_1) је једнак електромоторној сили индукованој у једном навојку $e_1 = \frac{d\varphi}{dt}$, помноженој са бројем навојака N_1 . Дакле, $u_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt}$. Уз наведене претпоставке, на секундару, који има N_2 навојака, јавља се напон $u_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt}$. Наведена идеализација, да је флуksни обухват кроз сваки од навојака примара, као и кроз сваки од навојака секундара, константан, је нешто чему се стреми при конструкцији трансформатора – магнетно коло се прави од материјала велике магнетне пермеабилности, тако да линије магнетног поља доминантно пролазе кроз магнетно коло, које има мали магнетни отпор, а не кроз ваздух, чија је релативна магнетна пермеабилност једнака 1. Једна од мера при конструкцији којом се постиже да разлика магнетног флуksа кроз навојке примара и кроз намотаје секундара буде што мања, је да се намотаји мотају један преко другог, како је то дискутовано пре слике 1.2.

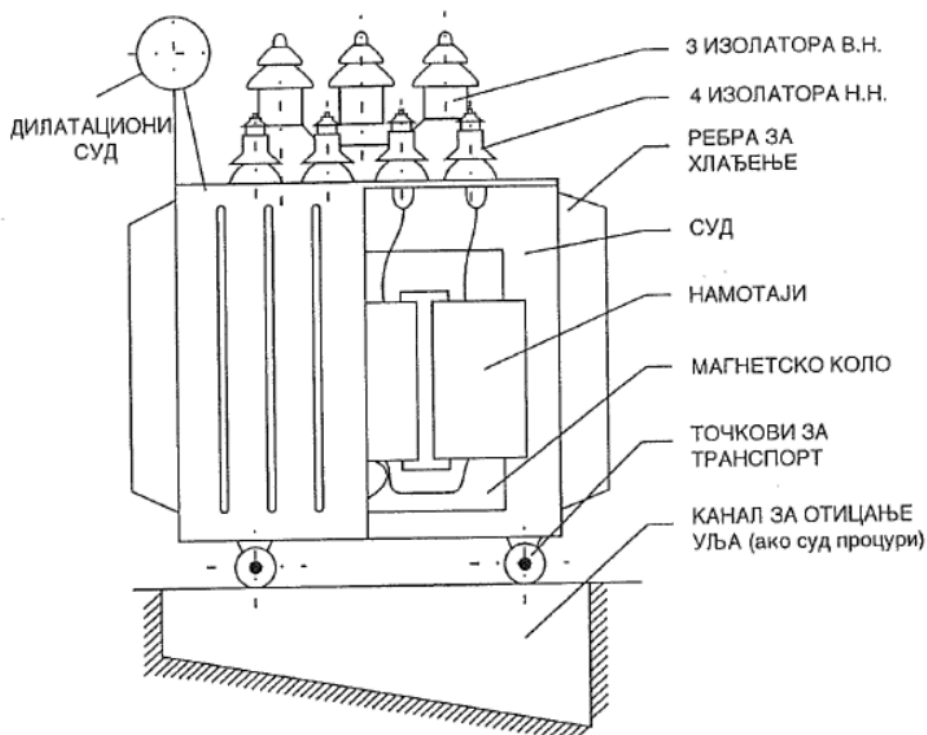
Као при свакој трансформацији енергије (овде се енергија претвара из електричне енергије у електричну енергију исте учестаности и најчешће другачијег напона), појављују се губици енергије и то у виду топлоте. Губици се јављају у магнетном колу и у намотајима. Губици енергије директно представљају финансијски 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. С обзиром на начине, трансформатори се могу поделити на суве и уљне.

Суви трансформатори су конструисани тако да се магнетно коло и намотаји налазе у ограђеном простору, који штити трансформатор од атмосферских падавина, али и од додира опасних напона (додира изложених електропроводних делова). Трансформатор се може ставити у кућиште, самостално или тако да се у кућишту, поред трансформатора, смешта и друга електроенергетске опрема. У електродистрибуцији се често користе решења да се трансформатор поставља у једну од три просторије у објекту који садржи трансформатор и разводни блок електричне енергије на ниженапонској и на вишенапонској страни трансформатора (сваки од ових блокова се смешта у посебној просторији). У било којој од ових варијанти мора се обезбедити адекватно хлађење

простора у које је смештен трансформатор, што се ради правилним димензионисањем вентилационих отвора. Опционо, суви трансформатори се могу хладити принудним струјањем ваздуха, које се ствара вентилаторима са струјањем ваздуха које је усмерено 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 уљних трансформатора, активни део (намотаји и магнетно коло) су потопљени у суд испуњен уљем. Уље служи као расхладно средство, коме се топлота предаје са активног дела трансформатора и које се затим, преко радијатора или компактних хладњака, топлота 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, 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 22kV, 3.15MVA.

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 спрежања 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 и смањили хармоници струја који протичу ка мрежи.

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 флуksа) 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 струја нешто већа од i_2 (N_2 / N_1). Разлика $i_1 > i_2$ (N_2 / N_1) потиче од компоненте струје која треба да створи магнетни флуks кроз језгро које није идеално, јер има коначну вредност магнетне отпорности, као и да покрије губитке 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 магнетски 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).

Из (1.1) и (1.2) следи 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. Са једне стране, трансформатори представљају кључне елементе у електроенергетским постројењима и мрежи, скуп су и у случају квара не могу се брзо заменити новим трансформаторима. Са друге стране, оно што трансформаторску технику чини комплексном и ризичном, су присуства јако великих електричних поља, магнетних поља и губитака, а последично и температура. 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%), укупна изгубљена енергија у великом броју трансформатора у електроенергетском систему, је значајна.
- 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 магнетског флукса. Део магнетног флукса се затвара кроз простор ван магнетног кола. Од расутог магнетног флукса зависе многи важни радни параметри трансформатора: пад напона, додатни губици у намотајима, загревање намотаја, механичке силе и загревање конструкционих делова трансформатора.
- 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 поремећаји (прекиди фаза или кратки спојеви). Проучавање ових практичних појава захтева примену метода симетричних компоненти, уз одговарајуће вредности параметара трансформатора које 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 сила које се јављају у намотајима кроз које протиче наизменична струја.

1. 5. ИНЖЕЊЕРСКИ ПРИСТУП РЕШАВАЊА ТЕХНИЧКИХ ПРОБЛЕМА

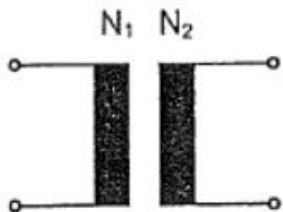
Прављење јединственог општег математичког модела који би као резултат дао одређивање свих вредности од практичног интереса, за сваки од радних режима трансформатора, представља преамбициозан задатак. Због тога се математички модели најчешће прилагођавају намени / решавању одређеног проблема, због чега њихова комплексност постаје прихватљива, односно ти модели постају примењиви у пракси.

Посебна вештина је постављање модела који су довољно једноставни и довољно тачни, односно модели којима се уважавају величине које значајно утичу на резултат.

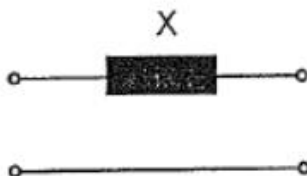
Математички модели се најчешће могу приказати у облику заменских шема, у највећем броју случајева електричних, а за загревање у облику топлотне шеме. На сликама 1.5 до 1.10 је приказано неколико заменских шема:

- 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 магнетнења и губици у гвожђу)

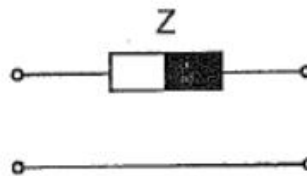
- Слика 1.9 – трансформатор као низ редних и оточних капацитивности, који се користи за расподелу напона при наиласку пренапонског таласа (атмосферског или мрежног комутационог)
- Слика 1.10 – трансформатор као веза топлотних отпора и топлотних капацитета, који се користи за одређивање температуре у прелазним топлотним процесима



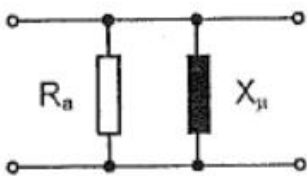
Слика 1.5



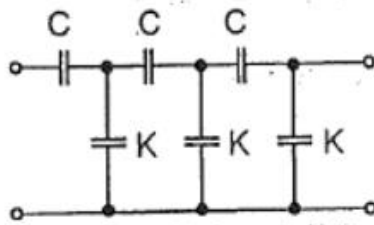
Слика 1.6



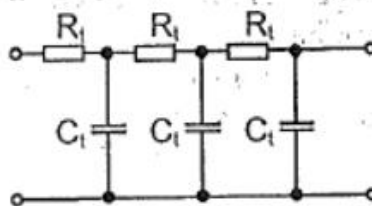
Слика 1.7



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 и метода, које неминовно захтевају примену комплексних рачунарских софтвера. 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 утrophка 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. Могло би се рећи да, у принципу, приступ „црне кутије“ преовлађује за моделе којима треба да се предвиди понашање трансформатора у реалним случајевима током експлоатације, док приступ да се израчунавања врше полазећи од података о конструкцији и карактеристика материјала преовлађује у фази пројектовања трансформатора. Приступ „црне кутије“ је од већег практичног интереса и више се користи од стране корисника трансформатора, док је други приступ значајнији за произвођаче трансформаторе, 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.