

## 6. Термички прорачун енергетских уљних трансформатора

### 6.1. Увод

Један од основних прорачуна који се врши у току пројектовања трансформатора је термички прорачун (прорачун температура). Његов циљ је провере да ли су температуре испод дефинисаних (гарантованих) вредности. По правилу, услови испитивања су дефинисани стандардима (IEC 60076-2; о методи ће се више рећи у наставку текста), али се може уговорити и другачија методологија провере. Термичка ограничења представљају пре свега температура изолације намотаја и температура течне изолације (уља). Такође, не сме доћи ни до локалних прегревања конструкционих делова (суда или притезача магнетног кола, на пример) услед расутог флукса, али је то пре свега проблем спречавања великог расутог флукса и његовог каналисања помоћу електропроводних или магнетних екрана, а не пројектовања система за хлађење.

За термичке прорачуне је неопходно познавати расподелу губитака, која служи као улазни податак за прорачун температуре. Термички прорачуни обухватају прорачун укупних протока уља кроз поједине делове трансформатора и расподеле протока унутар делова трансформатора, као и прорачуне компоненти преноса топлоте провођењем и струјањем (зрачење постоји, али је по правилу његов утицај код уљних трансформатора, поготову оних већих снага, занемарљиво мали). Због тога би прецизнији термин за термичке прорачуне био термо-хидраулички прорачуни.

Дозвољене температуре чврсте и течне изолације зависе од примењених материјала; стандард IEC 60085 приказује класификацију чврсте изолације на класе – за сваку класу изолације се даје температура при којој се старење изолације (слабљење њених својстава) одвија „нормалном брзином“, односно при којој изолација достиже очекивани животни век; детаљније о томе се може наћи у оквиру курса из трансформатора.

Код трансформатора се углавном користи папирна изолација, код које је температура при којој се има нормално старење 98 °C (ова вредност важи за нормалан "крафт папир", а постоји и варијанта термички побољшаног папира, код кога је одговарајућа температура 110 °C) и Nomex изолација, са одговарајућом температуром 150 °C. Што се тиче уља, углавном се користе минерално уље (80 °C), естарско уље (100 °C) и силиконско уље (115 °C); савремени тренд је и примена „vegetable“ уља (уље биљног порекла), чије је увођење мотивисано еколошким захтевима. Са порастом класе изолације, односно њене максималне дозвољене температуре, расте и њена цена. Са друге стране, извесно је да се повећањем температура могу смањити димензије и габарит трансформатора (пример 1: могуће је смањити попречни пресек проводника, чиме се повећава густина струје, губици и температура, 2. Могуће је смањити расхладни систем, чиме се повећава

температура уља), а тиме и његова цена. Генерално, квалитетнији материјали се користе само за специјалне намене, када је од великог практичног интереса остварити трансформаторе мањих габарита (на пример на возовима, у подножјима стубова ветро генератора или на трансформаторима који се користе као резервни у електроенергетским мрежама, и које је потребно транспортовати до места на коме се догодио испад и квар неког трансформатора). Код стандардних енергетских трансформатора се користе папир и минерално уље. Примењује се и хибридна изолација, која резултује смањењем запремине и тежине трансформатора: виша класа изолације, Nomex, се користи као изолација проводника намотаја, где су температуре највише, док се преостали конструкциони делови изолационог система (цилиндри, структуре између врха и дна намотаја и јарма магнетног кола итд.) израђују од материјала нижих изолационих класа - разне врсте папирних материјала).

## 6. 2. Захтеви које треба остварити током термичког пројектовање и њихова провера

Као што је речено, стандардом IEC 60076-2 се дефинише метода испитивања термичких карактеристика трансформатора. По том стандарду проверава се да ли су порасте карактеристичних температура мањи од дозвољених вредности (порасте температура се рачунају у односу на температуру спољашњег расхладног средства). Проверавају се три карактеристичне температуре (стандарди специфицирају прве две температуре, док се трећа по правилу специфицира у купопродајном уговору):

- горње уље (у термометарском џепу, односно на врху суда, или на уласку у цев према радијатору / спољашњем хладњаку) –  $\theta_{gu}$ ,
- средња температура намотаја –  $\theta_{sn}$  и
- најтоплија тачка намотаја (hot-spot) –  $\theta_{hsn}$ .

Уобичајени начин извођења огледа је загревање трансформатора у кратком споју, при чему се оглед састоји из два дела: прво се успостави стационарно топлотно стање при снази губитака једнакој укупним номиналним губицима (пошто је трансформатор у кратком споју, струја при којој се достижу укупни номинални губици је нешто већа од номиналне), а затим се струја смањи на номиналну и такав режим одржава сат времена.

Из првог дела огледа се одређује пораст температуре уља (мере се температуре горњег –  $\theta_{gun}$  (ова вредност се пореди са уговореном  $\theta_{gu}^*$ ) и температура доњег уља –  $\theta_{dun}$ , а из њих одређује пораст средње температуре уља  $\theta_{sun} = (\theta_{gun} + \theta_{dun}) / 2$ ).

Из мерења на крају другог дела огледа се одреди разлика средње температуре намотаја ( $\theta_{sn}'$ ) и средње температуре уља ( $\theta_{su}'$ ):  $\Delta\theta_{sn-sun}' = \theta_{sn}' - \theta_{su}'$  и тај пораст се дода на пораст средње температуре уља одређен у првом делу огледа:  $\theta_{sn} = \theta_{sun} + \Delta\theta_{sn-sun}'$ . Тако добијена вредност треба да буде мања од уговорене вредности порасте средње температуре намотаја  $\theta_{sn}^*$ . Приметимо да у индексу разлике  $\Delta\theta_{sn-sun}'$  фигурише слово  $n$  (номинално), што указује да се ради о вредности која се има у номиналном режиму рада трансформатора на мрежи, при номиналним губицима у магнетном колу и номиналној струји.

Зашто су критеријуми дефинисани на овај начин? Из уводног дела јасно је да су критичне вредности за материјале – чврсту изолацију и течну изолацију (уље) максималне температуре. Од конструкције трансформатора (намотаја и магнетног језгра) зависи пораст температуре у односу на спољашњи расхладни флуид – у првој апроксимацији се може сматрати да овај пораст не зависи од температуре спољашњег расхладног флуида. Дакле, корисник трансформатора треба да дефинише температуру спољашњег расхладног средства при погону трансформатора и да у складу са њом, полазећи од максимално дозвољених температура чврсте и течне изолације, специфицира порасте температура  $\theta_{gu}^*$ ,  $\theta_{sn}^*$  и  $\theta_{hsn}^*$ . Дакле, што је температура амбијента на месту рада трансформатора већа, мањи су дозвољени порасте температуре у односу на амбијент.

Поводом поступка из Стандарда, потребно је дати два коментара.

Први се односи на порасте температуре намотаја. Разлог због кога је специфициран пораст средње температуре намотаја (дакле, средња температура, а не максимална) је што он може релативно лако да се провери коришћењем методе мерења отпора намотаја једносмерној струји. За разлику од њега, мерење температуре најтоплије тачке намотаја, која се налази у зони високих напона је компликованије и захтева коришћење фибер оптичких влакана – температурних сензора постављених у сам намотај, што је повезано са разним тешкоћама и трошковима практичне реализације.

Други коментар се односи на температуру уља. Максимална температура уља на врху појединих намотаја може бити, и највероватније јесте, виша од температуре на врху суда (у термометарском цепу). За разлику од температуре уља на врху суда, која се лако може мерити (неким од класичних типове температурних сензора у цепу, на пример), температура уља на врху намотаја се мора мерити фибер оптичким сензорима, јер се ради о мерењу температуре у зони високих напона.

Илустрација препоруке за дефинисање пораста температура: за трансформаторе са чврстом изолацијом класе А са минералним уљем или синтетичком течномшћу са тачком паљења испод

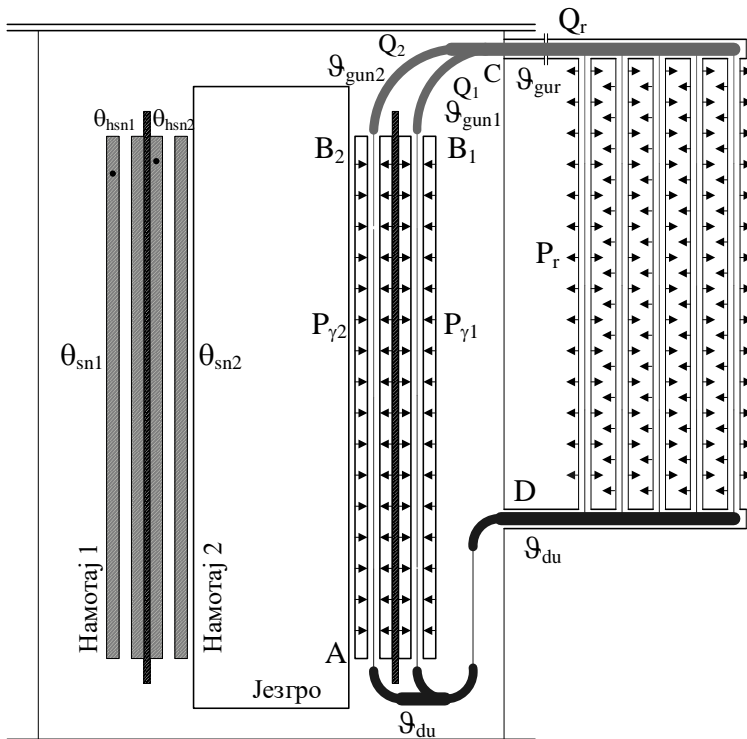
300 °C, препоручују се порасте температура:  $\theta_{gu}^* = 60$  K,  $\theta_{sn}^* = 65$  K, за ON и OF трансформаторе и 70 K за OD трансформаторе, и  $\theta_{hsn}^* = 78$  K. Препорука важи под условима: а) ако је спољње хлађење ваздухом, да се његова температура креће у границама  $-25$  °C и  $40$  °C, да средња годишња температура не прелази  $20$  °C, а средња температура у најтоплијем месецу  $30$  °C; б) ако је спољње хлађење водом, њена температура не прелази  $25$  °C.

На основу изложеног, пројектовање трансформатора треба извршити тако да су порасте температура (у односу на спољашњи расхладни флуид) мањи или једнаки: за горње уље (на врху суда) од  $\theta_{gu}^*$ , за средњу температуру намотаја –  $\theta_{sn}^*$  и за најтоплију тачку намотаја (hot-spot) –  $\theta_{hsn}^*$ .

Што се прорачунских метода тиче, код једноставнијих и мање тачних метода израчунати порасте температура не зависе од температуре расхладног флуида, док код софистицираних зависе, па се као улазни податак у прорачуне задаје и температура спољашњег расхладног средства.

### 6. 3. Физичке основе метода пројектовања

На слици 62 је дат глобални приказ термичког процеса код уљних трансформатора. У активним деловима трансформатора (намотаји и језгро) постоје губици електричне енергије (на слици је приказана само снага губитака у намотајима), односно долази до генерисања топлоте. Топлота се прво провођењем преноси кроз изолацију активних делова трансформатора (код намотаја, на пример, провођењем кроз папирну изолацију проводника), а са њих струјањем на уље (уље има двојаку улогу - оно је део изолационог система и представља унутрашњи расхладни флуид), које се креће на горе уз површ активних делова. Топлотну енергију уље предаје спољашњем расхладном флуиду (ваздух и / или вода), преко расхладних површи (радијатори, компактни хладњаци или површ суда) – пренос топлоте садржи компоненте струјања са уља на зид расхладног тела, провођења кроз зид и струјања са зида на спољни расхладни флуид.



Слика 62 – Глобални приказ загревања трансформатора

Основни теоријски постулати наведених компоненти преноса топлоте су разматрани у претходном делу курса о преносу топлоте.

Компоненте преноса топлоте са површи (спољашња површ чврсте изолације намотаја или површ језгра, односно спољна површ суда, радијатора или хладњака) на флуид (уље, односно спољње расхладно средство) или са флуида (уље) на површ (унутрашња површ суда, радијатора или хладњака) су описане законима преноса топлоте струјањем.

Модел који доста добро описује загревање проводника намотаја састоји се од мреже, чији чворови одговарају појединачним механичким навојцима (изолованим проводницима), док су у гранама између чворова топлотни отпори преносу топлоте провођењем кроз слој електричне изолације проводника. Довољно је тачно користити дводимензионални модел, у аксијалном и радијалном правцу, без уважавања промене температуре по угаоној координати, која је мала, па нема практичне потребе да се и она уважава у термичком моделу. У чворове се инјектира снага губитака у проводницима. Коначно, у топлотној шеми, у гранама између чворова и уља, постоје и топлотни отпори преносу топлоте струјањем са спољашње површ изолације према уљу.

Пренос топлоте унутар језгра, односно загревање језгра, може се одредити на основу сличног модела као за намотај, при чему се у полазној топлотној шеми сваки магнетни лим

представља једним чвором. Карактеристично за језгро је да се топлотни отпори провођењу топлоте у правцу попречном на слој лима разликују у односу на топлотни отпор у хоризонталном правцу лима. Први је одређен дебелином изолационог слоја на лиму и површи лима, а други дужином лима и попречним пресеком лима. Као и код намотаја, могуће је користити дводимензионалне топлотне шеме.

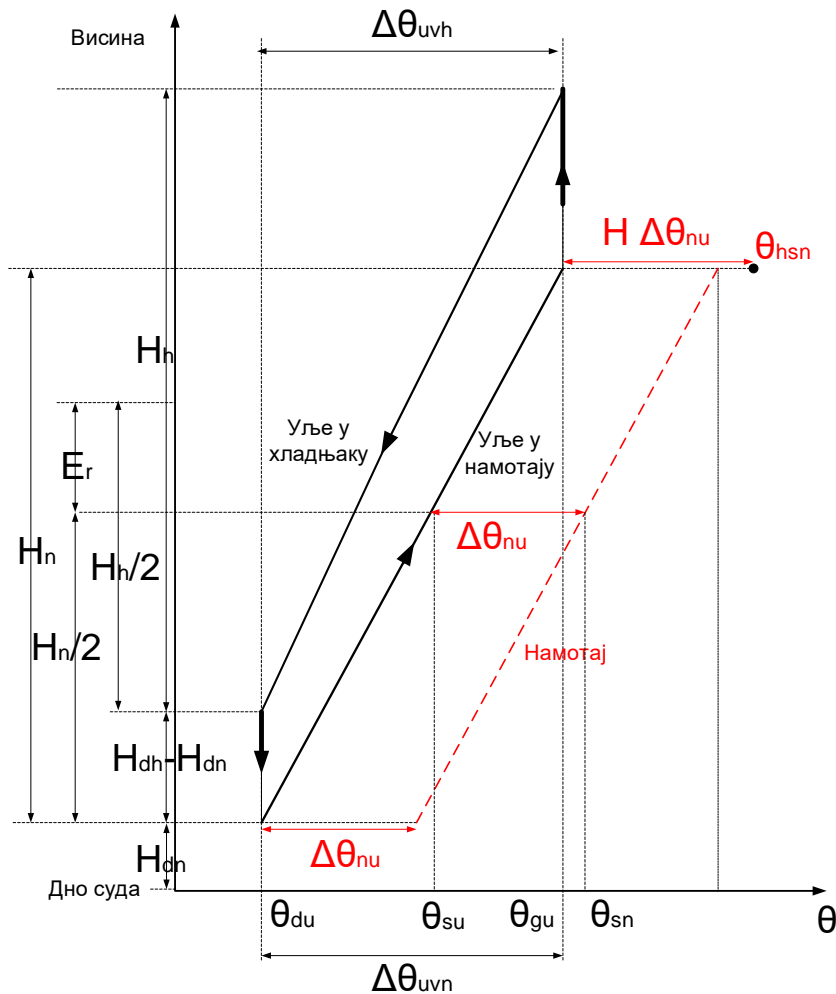
Код загревања суда, челични зид суда се посматра као хомогена топлопроводне средине са запремински равномерно генерисаном топлотом, као последицом расутог флукса који се затвара у зиду суда. Заштитни слојеви, укључујући фарбу, моделују се као топлотни отпори преносу топлоте струјањем.

Загревање самог уља унутар намотаја, односно хлађење унутар расхладног тела, описано је законитостима преноса топлоте за отворен систем са константним протоком (одељак 2. 1. 2).

У теорији преноса топлоте објашњено је да све наведене компоненте, осим преноса топлоте провођењем, зависе од брзине струјања уља, ваздуха, односно воде. Логична последица тога је да се поред температурних једначина на неки начин морају поставити и решити и хидрауличке једначине, помоћу којих ће се одредити протоци, односно брзине, струјања флуида. Основни принцип је једнакост произведених притисака и падова притисака. Произведени притисак може да потиче од пумпе, вентилатора или се може јавити као природна термосифонска сила код трансформатора са природним струјањем уља. До падова притисака долази на хидрауличким отпорима, односно падови притисака настају услед трења и локалних отпора струјању уља / ваздуха / воде.

У складу са претходно изнетим, расподела температура у намотају и уљу по висини трансформатора може се приказати као на слици б3 ( $\theta$  означава пораст температуре у односу на спољашње расхладно средство). Приказан је упрошћени случај да су температуре на дну ( $\theta_{du}$ ) и врху ( $\theta_{gu}$ ), као и средња ( $\theta_{su}$ ) температура уља у сваком од намотајима и у радијаторима исте. Сагласно томе, једнаке су и вредности промене температуре уља услед загревања у сваком од намотаја ( $\Delta\theta_{uvn}$ ) и услед хлађења у радијатору ( $\Delta\theta_{avh}$ ).  $H_n$  означава висину намотаја, а  $E_R$  растојање између средишне висине намотаја и средишне висине радијатора, а  $H_h$  дужину хладњака. Значење осталих симбола на слици:  $\Delta\theta_{nu}$  – разлика температуре намотаја и температуре уља унутар намотаја (ова разлика температура се може интерпретирати као разлика температура намотаја и уља на дефинисаној висинској координати, или као разлика средњих вредности температуре намотаја и температуре уља у намотају; на слици се види да је претпостављено да су дуж

температуре намотаја и дуж температуре уља у намотају паралелне, односно да је разлика температура намотаја и уља константна по висини намотаја),  $\theta_{sn}$  – пораст средње температуре намотаја,  $\theta_{hsn}$  – пораст температуре најтоплије тачке намотаја (hot-spot),  $H$  – фактор најтоплије тачке (hot-spot фактор) – он представља однос разлике температура hot-spot и горњег уља и разлике средње температуре намотаја и средње температуре уља.



Слика 63 – Расподела температуре уља и намотаја по висини трансформатора

Одређивање тачне вредности hot-spot фактора је комплексан технички проблем - детаљније о томе може се наћи у чланку [Decomposition of the hot spot factor](#).

Један од приступа је да се фактор најтоплије тачке израчуна као однос површинске густине снаге која се са површи намотаја преноси ка уљу у области на врху намотаја и површинске густине снаге која се преноси од намотаја ка уљу усредњено по површи читавог намотаја. Када би конструкција намотаја била иста по висини, овај однос би био већи од један, јер су додатни губици на крајевима намотаја (на дну и врху) већи од средње вредности додатних губитака по читавој

висини намотаја. То је последица радијалне компоненте расутог магнетног поља при врху и дну намотаја.

Према методи из стандарда 60076-2 фактор најтоплије тачке ( $H$ ) је једнак производу односа највећих губитака у навојку и средње вредности губитака у свим навојцима ( $Q$ ) - видети претходни пасус и фактора који описује неравномерност хлађења ( $S$ ) -  $H = Q \cdot S$ .

Једина могућност да се вредност hot-spot фактора одреди прецизно је да се поред расподеле губитака одреди и расподела брзина струјања уља кроз канале за хлађење, на основу ње локалне вредности коефицијената преласка топлоте струјањем, локалне вредности температуре уља и, коначно, температура у сваком проводнику. Други приступ, коме веома често прибегавају и водећи светски произвођачи је да се рачуна са вредношћу hot-spot фактора одређеном приближно, односно да се узме типична вредност из стандарда. Грешка која се чини на овај начин може бити значајна – примера ради, ако би стварна вредност фактора, као резултат лошег решења за хлађење при врху намотаја, била 2, усвајање вредности од 1.3 из стандарда би, у случају да је пораст средње температуре намотаја у односу на средњу температуру уља 20К, довела до грешке у процени температуре најтоплије тачке за  $(2 - 1.3) 20 = 14\text{К}$ .

С обзиром да се евентуална висока вредност температуре hot-spot не може ни приметити у типском огледу грејања – ову температуру није могуће измерити (осим ако се не уграђују фибер оптички сензори у намотај), могло би се учинити да је довољно да произвођач „убеди“ купца да су примењени фактор најтоплије тачке намотаја, односно последична вредност температуре најтоплије тачке, довољно поуздани и тачни. Ипак, ствар није тако једноставна, јер ће у случају велике стварне вредности фактора најтоплије доћи до проблема у погону - до убрзаног старења, а у екстремном случају и до оштећења трансформатора. Висока температура најтоплије тачке се може детектовати индиректно - применом савремених метода анализе гасова у уљу и хемијским анализама уља. У дугој претходној пракси експлоатације трансформатора овакве дијагностичке методе нису постојале, па самим тим превисоке температуре као резултат лошег пројекта или грешке у производњи нису ни могле да буду детектоване пре него што трансформатор потпуно не страда. Што се тиче произвођача, треба истаћи да је карактеристично да се данас на тржишту дају веома дуги гарантни рокови за трансформаторе (и до 30 година), тако да примопредајни тестови и исправан рад трансформатора у стандардним условима гаранције (реда једне до пет година) не представљају крај интересовања произвођача. Поред евентуалних директних материјалних трошкова поправке у гарантном року услед превисоких температура, водећи светски произвођачи би претрпели штету губитка репутације, што је битан аспект у овој индустрији.



Детаљно излагање методе за прецизно одређивање hot-spot фактора превазилази ниво курса на основним студијама (потенцијално заинтересовани студенти могу наћи основне информације о једној оваквој методи у раду [“Precizno izracunavanje hot-spot faktora”, 29. Savetovanje JUKO CIGRE, Zlatibor, 31. maj - 06. jun 2009.](#) Детаљнија објашњења методе су објављена у раду [PowerDeliveryApr2010](#), а у раду [PowerDeliveryOct2010](#) је дата илустрација примене методе у оквиру пројекта реконструкције трансформатора снаге 360 MVA код кога су постојали термички проблеми. На даље ће се сматрати да је вредност hot-spot фактора позната – важећи стандарди за оптерећивање трансформатора (IEC 60076-7) као типичне вредности hot-spot фактора за дистрибутивне и трансформаторе средњих снага наводе 1.1, а за трансформаторе великих снага оптимистичких 1.3.

#### 6. 4. Пример једног класичног поступка за термички прорачун

Као пример ће се илустровати упрошћени поступак прорачуна ODAF трансформатора, што је типична конструкција за трансформаторе великих снага – преко 100 MVA. Посматраће се случај да се за спољашње хлађење (пренос топлоте са уља на ваздух) користе радијатори – код трансформатора највећих снага се најчешће користе компактни хладњаци уље / вода или уље / ваздух, али се они, због великог пада притиска при протицању уља, не могу користити ако се захтева да трансформатор може (наравно са мањом, али дефинисаном, снагом – реда величине 50 – 60 % номиналне) да ради и у ONAF / ONAN режиму, са искљученим пумпама / пумпама и вентилаторима.

Улазни подаци су дозвољене вредности пораста температура  $\theta_{gu}^*$ ,  $\theta_{sn}^*$  и  $\theta_{hsn}^*$ . Такође, полази се од тога да су познате вредности губитака, изражене у kW, за сваки од намотаја  $\nu (P_{k\nu})$  и за језгро ( $P_0$ ).

*Корак 1:* Усвоји се вредност пораста температуре уља у намотају ( $\Delta\theta_{uvn}$ ) – искуство показује да за ову вредност треба усвојити вредност од 6 K – 8 K.

*Корак 2:* На основу ње се одреди проток уља  $Q_{uv}$  ( $m^3 / h$ ) кроз сваки од намотаја  $\nu$ , као

$$Q_{uv} = 3.6 \cdot 10^6 \frac{P_{k\nu}}{\rho c_p \Delta\theta_{uvn}} \quad (202)$$

где су:

$\rho$  – густина уља [ $kg / m^3$ ]

$c_p$  – специфични топлотни капацитет уља [J / (kg K)]

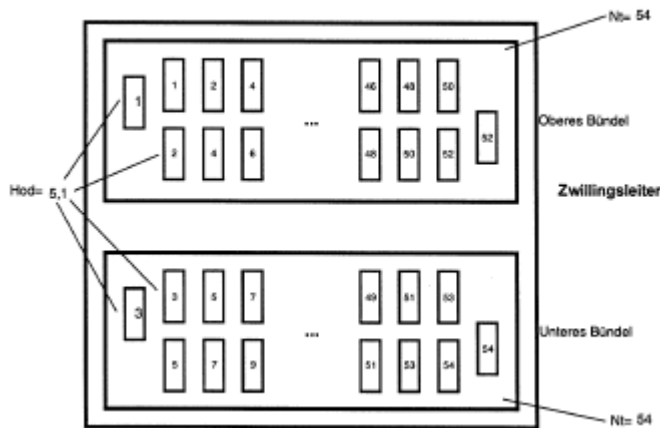
Параметри уља се могу одредити за приближну температуру која је за 10 K нижа од дозвољеног порасте температуре  $\theta_{gu}^*$ ; упрошћење да се уместо тачне средње температуре уља узме наведена приближна вредност неће имати велики утицај на коначне резултате прорачуна. Протоком уља ( $Q_{uv}$ ) је одређена и брзина струјања уља у намотају. Илустрације ради, када би брзина уља  $v$  у сваком од  $n$  паралелних аксијалних канала за хлађење ширине  $w$  и обима  $O$  била једнака, њена вредност би износила  $v = Q_{uv} / (n w O)$ . Уколико се испостави да је она мања од 10 cm/s (што је вредност дефинисана по критеријуму да се има довољно ефикасно хлађење намотаја, односно да се има довољно велика вредност коефицијента преласка топлоте струјањем са изолације на уље), потребно је повећати вредност протока тако да се достигне наведених 10 cm/s. Максимална дозвољена брзина струјања уља износи 50 cm/s – критеријум је успостављен како би се избегла опасност од стварања статичког електрицитета при кретању уља преко папирне изолације. Са  $\Delta\theta_{uvn}'$  ће се означити вредност пораста температуре уља у намотају  $v$ , евентуално различита од вредности  $\Delta\theta_{uvn}$ , усвојене на почетку; са  $Q_{uv}'$  ће се означити одговарајућа вредност протока уља кроз намотај  $v$ .

*Корак 3:* Одреди се hot-spot фактор; његово одређивање је коментарисано у претходном одељку; на овом месту пројектант на основу искуства са претходно конструисаним, произведеним и у огледу загревања испитаним сличним трансформаторима у које су били уграђени фибер-оптички сензори, или на основу смерница из стандарда, процењује вредност hot-spot фактора.

*Корак 4:* За сваки од намотаја се одреди разлика температуре намотаја и температуре уља унутар намотаја ( $\Delta\theta_{nu v}$ ). Ова разлика садржи две компоненте: пад температуре на чврстој изолацији ( $\Delta\theta_{nu v \lambda}$ ) и пад температуре при преласку топлоте са спољне површи чврсте изолације на течну изолацију (уље) –  $\Delta\theta_{nu v \alpha}$ .

Постоје различите конструкције проводника; најопштији случај је да постоје три слоја изолације: лак на самој површи проводника (типична дебљина 0.05 mm), и два слоја спољњег изолационог материјала (папир, на пример); на слици 64 је приказана конструкција једног таквог проводника. Да би се стекла представа о димензијама, даће се подаци о овом проводнику: он се користи за високонапонски намотај (237 kV) трофазног трансформатора снаге 736 MVA; висина појединачних бакарних проводника (којих има 2 x 54) је 5.1 mm, а ширина 1.5 mm; дебљина папирне изолације сваког од два проводника 54 x (5.1 mm x 1.5 mm) износи 0.15 mm, а око оба

проводника је слој папирне изолације дебљине 1.15 mm; спољне димензије проводника су: висина  $H = 24.12 \text{ mm}$  и ширина  $B = 50.75 \text{ mm}$ , чему одговара обим додирне површи са уљем  $2 \times (24.12 + 50.75) \text{ mm} = 149.74 \text{ mm}$ .



Слика 64 – Пример двоструког проводника са упреденим жицама

Пад температуре на чврстој изолацији ( $\Delta\theta_{nu \nu \lambda}$ ) једнак је збиру падова температуре на појединим деоницама на којима се одвија пренос топлоте провођењем (максимално три; њихове дебљине ће се означити са  $\delta_{insi}$  (m), а специфичне топлотне проводности са  $\lambda_{insi}$  (W / (m K))). Са  $P_{ks}$  ће се означити површинска густина снаге која се са површи проводника преноси ка уљу ( $\text{W} / \text{m}^2$ ) – она се израчунава као количник снаге губитака (збир омских и додатних губитака) по једном метру проводника и обима спољашње површи проводника која је у додиру са уљем. Ова површ се добија када се од обима спољне површи проводника који је у додиру са уљем (максимално  $2(H + B)$ ) одузме део који је покривен одстојницима за формирање аксијалних и радијалних канала (одстојници за аксијалне канале умањују вертикалну површ ( $\pi D H$ ), а одстојници за радијалне канале хоризонталну површ ( $\pi D B$ );  $D$  означава пречник намотаја). Вредност  $\theta_{nu \lambda}$  се израчунава према изразу

$$\theta_{nu \lambda} = P_{ks} \sum_{i=1}^3 \frac{\delta_{insi}}{\lambda_{insi}} \quad (203)$$

Претходни израз се заснива на упрошћењу да и у случају проводника приказаног на слици 64 нема пада температуре због размене топлоте између малих појединачних проводника. Ово упрошћење је оправдано, односно не постоји велика разлика између температура појединачних проводника јер је дебљина лак изолације сваког од појединачних проводника мала.

Рад температуре при преласку топлоте струјањем са спољне површи чврсте изолације на уље ( $\theta_{nu \alpha}$ ) се израчунава користећи израз

$$\theta_{nu\alpha} = \frac{P_{kS}}{\alpha} \quad (204)$$

У приближним (прилично грубим) поступцима који се користе у пракси, за коефицијент преласка топлоте струјањем  $\alpha$  се користе константне вредности за поједине типове хлађења и поједине типове намотаја: примера ради, а) за OD:  $\alpha = 240 \text{ W / (m}^2 \text{ K)}$ , б) за ON, за намотаје само са аксијалним каналима за хлађење  $\alpha = 130 \text{ W / (m}^2 \text{ K)}$ , в) за ON, за намотаје са аксијалним и радијалним каналима за хлађење  $\alpha = 80 \text{ W / (m}^2 \text{ K)}$ .

*Корак 5:*

Одреди се максимални дозвољени пораст температуре доњег уља ( $\theta_{du\ doz}$ ); температура уља на уласку у сваки од намотаја је иста:

$$\theta_{du\ doz} = \min \left( \left( \theta_{gu}^* - \theta_{uvnv} \right), \left( \theta_{hsn}^* - H \Delta\theta_{nuv} - \theta_{uvnv} \right), \left( \left( \theta_{sn}^* - \Delta\theta_{nuv} \right) - \frac{\theta_{uvnv}}{2} \right) \right) \quad (205)$$

Минимум из једначине (205) се тражи за (3 и) чланова. Усвоји се температура доњег уља  $\theta_{du\ doz}$  која је нешто мања (сигурносни фактор) од  $\theta_{du\ doz}$ .

Одреди се пораст температуре горњег уља ( $\theta_{gu\ v}$ ) у сваком од  $v$  намотаја:

$$\theta_{guv} = \theta_{du\ doz} + \theta_{uvnv} \quad (206)$$

Одреди се пораст температуре горњег уља на уласку у радијатор ( $\theta_{gu}$ ), који се одређује из једначине енергетског биланса мешања уља из намотаја, чије мало упрошћена форма гласи:

$$\sum_v Q_{uv} (\theta_{guv} - \theta_{du\ doz}) = (\theta_{gu} - \theta_{du\ doz}) \sum_v Q_{uv} \quad (207)$$

Уважавање утицаја губитака у магнетном колу ( $P_{Fe}$ ), које по правилу није укључено у OD систем хлађења, већ се хлади природним струјањем уља, на загревање уља, врши се повећањем вредности

$$\theta_{gu} \text{ одређене из израза (207) за износ } \frac{P_{Fe}}{\rho c_p \sum_v Q_{uv}} .$$

*Корак 6:* Дефинише се систем за спољашње хлађење, односно пренос топлоте од уља ка спољашњем расхладном средству, који обезбеђује да пораст температуре доњег буде испод  $\theta_{du\ doz}$ . На почетку одељка је речено да ће се разматрати случај да се за спољашње хлађење користе радијатори, па ће се у тексту који следи приказати разрада детаља избора радијатора. Напомимо да би у случају хладњака из каталога био изабран хладњак чија је расхладна снага при порасту температуре  $\theta_{gu}$  и протоку  $\sum Q_{uv}$  већа од суме снаге губитака у трансформатору. При томе, могуће

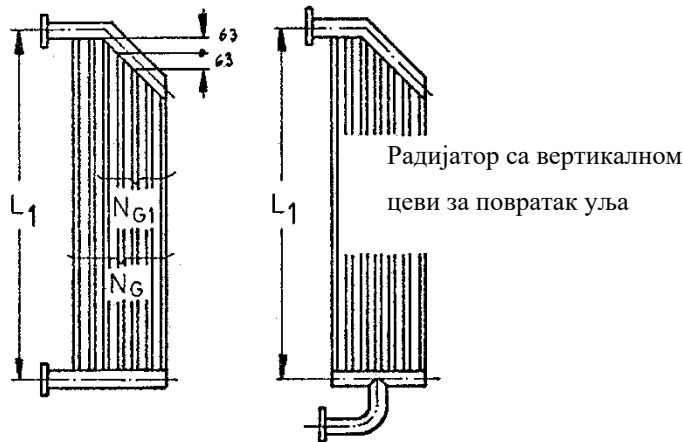
је да је неопходно вршити прерачунавање каталожке вредности снаге хладњака, која је дата за у каталогу за специфициране вредности температуре горњег уља и протока на вредности  $\theta_{gu}$  и  $\Sigma Q_{uv}$ .

Пракса пројектовања трансформатора је углавном заснована на емпирији (на претходном искуству, односно на резултатима мерења у огледима загревања). Другим речима, у класичним пројектантским поступцима прорачунске методе су ретко у потпуности засноване на теоријским законима механике флуида и преноса топлоте. Типичан пример је пројектовање радијатора.

У основи, полази се од податка да површинска густина снаге са површи радијатора при порасту температуре горњег уља од 55 К износи  $320 \text{ W} / \text{m}^2$ . Из односа  $(320 \text{ W} / \text{m}^2) / (55 \text{ K})$  се добија вредност укупног коефицијента проласка топлоте (струјање са уља на зид радијатора, провођење кроз зид радијатора и струјање са зида радијатора на ваздух) од  $5.82 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$ . Вредност  $5.82 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$  представља еквивалентни коефицијент проласка топлоте: коришћена вредност пораста температуре од 55 К се има само на врху радијатора и опада од врха ка дну радијатора – оријентациона (приближна) вредност вертикалног температурног градијента је 6 К код OD хлађења, а 20 К код ON и OF хлађења. Из наведеног се закључује да би вредност фиксног коефицијента проласка топлоте када би се радијатор посматрао као размењивач топлоте, са чије једне стране цеви струји уље, а са друге природним струјањем струји ваздух константне температуре, био већи од  $5.82 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$ .

Приступ је следећи: наведена вредност од  $320 \text{ W} / \text{m}^2$  се даје под тачно дефинисаним условима (на пример, за одређену дужину радијатора, број елемената радијатора, пораст температуре горњег уља итд.), а ако се параметри разликују од наведених, примењују се одређени корекциони коефицијенти дефинисани кроз табеларне, графичке или аналитичке форме.

У наставку ће се разматрати један тип радијатора, и то плочастог типа, са познатим попречним пресеком елемената радијатора (ширине 520 mm, чији је обим површине преко које се размењује топлота са ваздухом 1.07 m; стандардно растојање између елемената (плоча) радијатора, чији је укупан број  $N_G$ , је 45 mm). Поменимо да поред плочастог типа постоје и радијатори сачињени од цеви кружног попречног пресека.



Слика 65 – Изглед радијатора

Уколико је пораст температуре горњег уља различит од 55 К (и износи  $\theta_{gu}$ ), снага која се одводи у околину преко радијатора се израчунава преко израза

$$P_{\theta} = P_{55} \left( \frac{\theta_{gu}}{55} \right)^x, \quad (208)$$

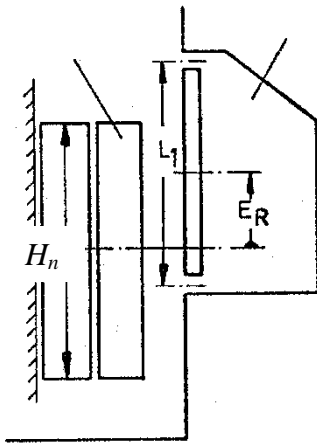
где је  $P_{55}$  снага хлађења која се има при порасту температуре уља од 55 К. Коefицијент  $x$  има вредност 0.7 код ONAN хлађења, односно 0.8 код ONAF хлађења.

Снага  $P_{55}$  се израчунава као производ густине снаге  $320 \text{ W/m}^2$ , обима 1.07 m, укупне дужине свих плоча у радијатору (при томе се узима у обзир евентуално закошење радијатора (број закошених плоча  $N_{GI}$ , видети слику 65) – поједини елементи радијатора имају мању дужину - такозвани транспортни профил) и следећих корекционих фактора:

1. За дужину радијатора – јединична вредност фактора се има за дужину од 1.9 m; дужина радијатора варира у опсегу од 0.8 m до 3.5 m; фактор опада са порастом дужине радијатора; физичко објашњење увођења овог корекционог фактора: а) средњи коefицијент преласка топлоте опада са повећањем дужине вертикалне површи и б) са повећањем растојања од врха радијатора све је мања разлика температура уља и амбијента (уље се хлади дуж путање од врха ка дну радијатора).
2. За број елемената радијатора – јединична вредност фактора се има за 14 елемената (плоча); број елемената варира од 4 до 28; фактор опада са порастом броја елемената; физичко објашњење: што је већи број елемената, мањи је проток кроз један елемент, па је мања и брзина уља и коefицијент преласка топлоте струјањем са уља на унутрашњу површ

радијатора; такође, са смањењем протока се повећава и вертикални градијент температуре и смањује разлика температура уља и амбијента.

3. За вредност односа  $E_R / H_n$  (однос вертикалног растојања између средине радијатора и средине намотаја –  $E_R$  и висине намотаја –  $H_n$ ); фактор има вредност 1 код OF и OD хлађења; код ON хлађења, фактора има вредност 1 за  $E_R / H_n = 0.5$ ; стандардни однос  $E_R / H_n$  се креће у опсегу од 0.15 до 0.5; фактор расте са порастом односа  $E_R / H_n$ ; физичко објашњење: са порастом односа повећава се термосифонска сила која изазива струјање уља, а тиме и проток уља и коефицијент преласка топлоте са уља на унутрашњу површ радијатора, као и средња температура уља дуж радијатора (услед смањења градијента температуре уља дуж радијатора).

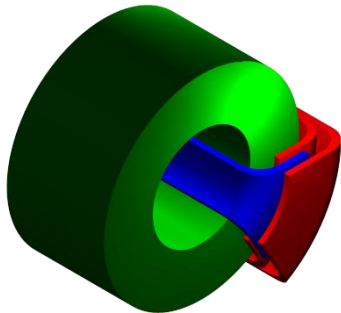


Слика 66 – Однос  $E_R / H_n$

Претходно изложени поступак се односио на радијаторе хлађене природним струјањем ваздуха (AN). Уколико је хлађење принудним струјањем ваздуха (AF), односно ако се примењују вентилатори, понавља се претходно описани поступак, а на резултат се примењују нови „корекциони фактори“. Они зависе од карактеристике вентилатора (укупан проток и пречник), њиховог броја и положаја, као и правца струјања ваздуха (вертикално, хоризонтално или вертикално и хоризонтално).

У претходном тексту је описан поступак како се одређује расхладна снага једног радијатора, који садржи дефинисани број елемената (плоча стандардног профила) дефинисане дужине, а према вредности пораста температуре уља на уласку у радијатор. Укупна расхладна снага се одређује као сума снага хлађења са појединачних радијатора. Она мора да буде једнака или већа од укупних губитака – у намотајима и у језгру.

*Корак 7:* Изједначавање падова притисака кроз сваку од паралелних грана у активном делу трансформатора. Подсетимо се да смо у кораку 2 дефинисали проток кроз сваки од намотаја. Протицање уља кроз намотаје доводи до пада притиска на сваком од намотаја. Поред овог пада притиска, јавља се компонента пада притиска на изолационом систему испод и изнад намотаја (између намотаја и јарма магнетног кола) – изолациони систем је сачињен од прстенова од изолационог материјала, између којих струји уље. Скица која илуструје принцип израде изолационог система је дата на слици 67. Ове две компоненте пада притиска се сабирају, јер су елементи (намотаји и изолациони системи) редно на путу струјања уља.



Слика 67 – Скица принципа израде изолационог система

Да би се остварила циљна расподела протока кроз намотаје ( $Q_{uv}$ ), мора се обезбедити да збир падова притисака кроз сваку од паралелних грана у активном делу трансформатора, при  $Q_{uv}$ , буде исти. То се чини постављањем још једног елемента – регулационих отвора: једно од решења која се примењују у пракси су 4 уводника – рупа кружног попречног пресека (оријентационог пречника 60 mm – 120 mm; оријентациона дужина ових цилиндричних уводника је 375 mm) у свакој од паралелних грана. Дакле, додатне рупе се димензионишу тако да је збир падова притиска (збир  $\Delta p_v$  4 компоненте: у намотају  $\Delta p_{vm}$ , изолационом систему испод намотаја  $\Delta p_{vid}$ , изолационом систему изнад намотаја  $\Delta p_{vig}$ , регулационим отворима  $\Delta p_{vo}$ ; за намотаје нижих напонских нивоа не постоје изолациони системи -  $\Delta p_{vid} = \Delta p_{vig} = 0$ ), при циљаним протоцима  $Q_{uv}$ , кроз сваку од паралелних грана буду исти.

*Корак 8:* Одређивање пада притиска у активном делу трансформатора и избор пумпе. Пад притиска у активном делу трансформатора је одређен у претходном кораку – он је једнак паду притиска у било којој од „уравнотежених“ паралелних грана  $\Delta p_v$ . Поред пада притиска у активном делу трансформатора, пумпа мора да савлада и пад притиска у конструктивним деловима ван суда



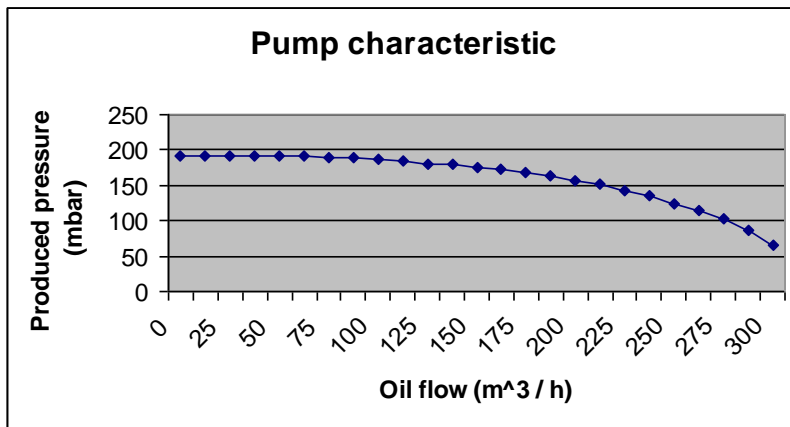
$\Delta p_{spolja}$ . У овим прорачунима, пад притиска у самим радијаторима се може занемарити (пресек кроз који протиче уље је релативно велики, па је последично брзина струјања уља мала); тада се пад притиска у конструктивним деловима ван суда практично своди на падове притиска на цевима (цеви постоје уколико је батерија радијатора одвојена од суда, односно када радијатори нису монтирани директно на суд). Ако се за спољње хлађење не користе радијатори, већ хладњаци, потребно је уважити пад притиска у компактним хладњацима (уље / вода или уље / ваздух) – пад притиска на хладњаку је доминантан у комплетној затвореној контури струјања уља.

Пумпа практично треба да обезбеди  $p(Q)$  радну тачку дефинисану укупним протоком (кроз све намотаје) и укупним падом притиска:

$$p_v + p_{spolja}, \sum_v Q_{uv} \quad (209)$$

Последњи корак је избор „прве веће“ пумпе, за коју је продуковани притисак  $p^*$  за  $\sum Q_{uv}$  већи од  $p_v + p_{spolja}$ . Последично, протоци ће бити нешто већи од  $Q_{uv}$ , а све температуре нешто мање.

Илустрације ради, на слици 68 је приказана карактеристика једне реалне пумпе.



Слика 68 – Пример карактеристике пумпе