

Делове текста између маркера

и

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

5. ЗАГРЕВАЊЕ ТРАНСФОРМАТОРА

5. 1. ТЕМПЕРАТУРА КАО ПАРАМЕТАР КОЈИ ОДРЕЂУЈЕ НОМИНАЛНУ СНАГУ

5. 1. 1. ТОПЛОТНИ ИЗВОРИ

Приликом рада трансформатора један део енергије се претвара у топлоту, што са становишта корисника представља губитак. Та топлота доводи до пораста температуре у деловима трансформатора.

Топлота се са места генерисања преноси ка околини различитим механизмима, при чему је сваки од њих праћен падом температуре на местима преласка топлоте са топлијег на хладније тело. У стационарним топлотним стањима целокупна генерисана топлота се одводи у околину.

За сваки од примењених материјала у трансформатору, пре свега материјала чврсте изолације и расхладног флуида (уље, односно изолациона течност), постоје **граничне вредности температуре** које се не смеју прећи, како се не би десило тренутно оштећење трансформатора, али и да би се избегло њихово убрзано старење и смањио животни век трансформатора.

Због тога је потребно познавати механизме загревања, односно поседовати методе за израчунавање карактеристичних температура, како у фази пројектовања трансформатора, тако и током њихове експлоатације.

У поглављу 4 је објашњено да постоје губици у језгру, губици у намотају и губици у конструкционим деловима трансформатора.

При константној учестаности (што је случај код мрежних трансформатора), губици у језгру (P_{Fe}) су приближно сразмерни са B_m^2 . У првој апроксимацији, ово се своди на квадратну зависност снаге губитака у језгру од квадрата напона: $P_{Fe} \sim U^2$.

Губици у намотају се састоје од две компоненте (обе су сразмерне квадрату ефективне вредности наизменичне струје): Цулових губитака, одређених као производ отпора намотаја једносмерној струји и квадрата ефективне вредности струје, и допунских губитака, који су последица магнетног поља у зони проводника намотаја. Обе компоненте губитака у намотају зависе од специфичне електричне отпорности ρ (прва је сразмерна, а друга обрнуто сразмерна ρ), која зависи од температуре и расте са њеним порастом. Температура зависи од снаге губитака, односно расте са порастом оптерећења (струје) трансформатора.

Губици у конструкционим деловима су последица протицања индукованих струја кроз њих; струје настају услед расутог магнетног флукса који се затвара кроз конструкционе делове. Ови губици су сразмерни квадрату густине индуковане струје, индукована струја је сразмерна расутом магнетном флуксу, а расути магнетни флукс је приближно сразмеран оптерећењу (струји) трансформатора.

У принципу, као и код намотаја, и губици у језгру (компонента губитака услед вихорних струја) и губици у конструкционим деловима зависе од температуре, која зависи од загревања изазваног

губицима, јер се специфична електрична отпорност ρ мења са променом температуре. Ова зависност није интензивна, пре свега у смислу укупних утицаја на загревање, па се обично не узима у обзир при прорачунима.

Због топлотне енергије (дисипације топлоте) расте температура намотаја (како бакра, тако и изолације), затим уља, гвожђа, суда и свих осталих делова трансформатора. Тај пораст температуре представља главни, практично једини, фактор ограничења снаге коју трансформатор може да пренесе.

Номинална снага трансформатора се дефинише као производ номиналног (називног) напона и номиналне (називне) струје трансформатора, $S_n = U_n I_n$ (односно $3 U_n I_n$ за трофазне трансформаторе).

С обзиром да се напони и струје, сведене на исти напонски ниво, мало разликују, приближно важи

$$U_{1n} I_{1n} = U_{2n} I_{2n} \quad (5.1)$$

Као што је објашњено, пораст температуре зависи од губитака, а губици од напона и струје, тако да постоји директна веза између снаге трансформатора дефинисане преко напона и струје, и преко граничних вредности температуре (максималних температура које се смеју достићи).

У реалном погону трансформатора по правилу не долази до значајних промена губитака у магнетном језгру, који су иначе доста мањи од губитака у намотајима. Поред тога, губици у магнетном језгру утичу на вредност температуре изолације намотаја, која је најкритичнија, само индиректно, путем повећања температуре уља. Због тога се по правилу у термичким прорачунима увек сматра да је снага губитака у магнетном колу константна и једнака губицима измереним у празном ходу при номиналној вредности испитног напона.

За разлику од тога, струја, а последично и губици које она изазива у намотајима и конструкционим деловима услед расутог флукса, се мења у току рада трансформатора.

5. 1. 2. ОГРАНИЧЕЊА ПРИ ПРЕОПТЕРЕЂЕЊИМА

Повећање струје трансформатора изнад номиналне у принципу није препоручљиво, јер доводи до повећања губитака и загревања, и то на најугроженијем месту, на изолацији проводника. У пракси се ипак дозвољава да струја повремено буде већа од номиналне, јер постоје ситуације када је то од значаја, као што је потреба да трансформатор преузме оптерећење неког трансформатора на коме је дошло до квара и који је испао из погона. Повећање струје преко номиналне у многим ситуацијама не доводи до прекомерног загревања и неприхватљивог погоршавања својстава изолације. За то постоји неколико разлога:

1) Трансформатор има велику запремину, тежину и топлотну инерцију, односно постоји велико кашњење пораста температуре у односу на промену струје и последичне губитке. Ова чињеница се може искористити у пракси - примера ради, при температури амбијента од 20°C пораст снаге оптерећења од 20 % преко номиналног, у трајању од 2 сата, ако је трансформатор претходно био трајно оптерећен са 50 % снаге, неће довести до температуре изолације преко 105°C , колико износи њена трајно дозвољена вредност за један од уобичајених типова изолације који се користе у енергетским уљним трансформаторима.

2) Веома је чест случај, чак би се могло рећи правило, да су трансформатори предимензионисани, односно да је температура изолације при номиналној струји и номиналној температури амбијента, испод дозвољене. То је последица прорачуна у фази пројектовања трансформатора током којих се по правилу усвајају вредности на страну сигурности.

3) Температура амбијента може бити мања од номиналне (оне према којој је пројектован трансформатор). У том случају, оптерећење може да буде веће од номиналног, а да температура изолације остане испод вредности која је дозвољена.

4) У краћим временским периодима је дозвољено да температура изолације буде већа од температуре при којој се има нормална деградација својстава изолације (за малопре поменути тип изолације 105 °C), јер по правилу постоје периоди мањег оптерећења, у којима је температура мања, па је и слабљење својстава изолације у тим периодима мањег интензитета. Деградација изолације, као последица кумулативног ефекта у периодима са убрзаном деградацијом и периодима са деградацијом споријом од нормалне, на тај начин може бити нормална или чак спорија од нормалне (зависно од трајања и температура у тим интервалима).

Повећање оптерећења је, дакле, могуће, али се мора извршити прорачун температура у таквим радним режимима и проценити ризик: пре свега се не смеју прећи вредности температура при којима долази до појаве ваздушних мехурова у уљу и трајног оштећења изолације (за стандардну папирну изолацију и минерално уље 140 °C), али и кумулативни ефекат погоршања својстава изолације не треба да буде већи од планиране вредности.

У вези са могућношћу повећања оптерећења преко номиналног, постоје границе које се не смеју прећи без обзира на то што су температуре активних делова (пре свега најтоплије тачке изолације намотаја, као критичне вредности), испод дозвољених. За трофазне трансформаторе до 100 MVA у стандардима за оптерећивање трансформатора (IEC 60076-7 из 2018. године [1]) специфицира се да је максимално оптерећење **1.5 релативне јединице** (у односу на номинално), док је за веће трансформаторе та граница **1.3 релативне јединице**. Граница максималног оптерећења (струје) је постављена како би се избегла локална прегревања (пре свега због расутог флукса), чије локације и вредности температуре на њима није лако предвидети. Поред тога, ова велика струја протиче и кроз елементе трансформатора као што су **проводни изолатори**, који имају мању топлотну инерцију и могу достићи недозвољено високе температуре.

Поред процене на бази прорачуна, од великог је практичног интереса пратити (мерити) критичне температуре током рада трансформатора. На бази њих се врши **надзор трансформатора** и његова **заштита**. Заштита практично спречава да дође до тренутног оштећења изолације услед тога што температура прелази критичне вредности. Надзор (мониторинг) омогућава контролу кумулативне деградације изолације у дужем временском периоду, односно омогућава њено праћење током времена и сигнализацију њеног нежељеног пораста.

У изолације намотаја присутни су високи напони према околини, због чега се не смеју применити сензори за мерење температуре који садрже металне делове, и то из два разлога: 1) присуство метала унутар трансформатора утиче на расподелу електричног поља унутар трансформатора, па може да доведе и до диелектричног пробоја, 2) веза сензора са мерним уређајем, који се налази ван трансформатора, не сме бити остварена металним проводницима, јер би се, у случају пробоја кроз изолацију и споја сензора и намотаја, високи потенцијал намотаја изнео ван трансформатора.

Због тога се у пракси као сензори за мерење температуре најтоплијих тачака изолације намотаја користе **оптички сензори (fiber-optics)** (слика 5.1). Алтернатива је одређивање температуре најтоплије тачке изолације индиректно, користећи податак о струји и податак о температури горњег уља - ове две вредности се једноставно мере, чиме се избегава директно мерење температуре најтоплије тачке изолације, која се налази у зони високих напона и магнетских поља. Постоје две варијанте за индиректно одређивање температуре најтоплије тачке изолације на основу мерења температуре горњег уља и струје: А) **аналогни уређаји (термичке слике)**, код којих се практично прави термички модел трансформатора - у комору у коју се уводи горње уље поставља се отпорник кроз који протиче струја сразмерна струји оптерећења трансформатора; сматра се да је температура тог отпорника једнака температури најтоплије тачке, па се мерена вредност температуре отпорника користи као температура најтоплије тачке изолације. Б) Концепт А) је коришћен у прошлости и он је са развојем **микропроцесорске технике** прерастао у концепт израчунавања температуре најтоплије тачке изолације на основу

измерене температуре горњег уља и измерене струје оптерећења. Ове вредности се могу једноставно измерити, односно њихове вредности добити у микроконтролеру као број. То се може остварити АД конверзијом на АД конвертору микроконтролера, на који се доводе стандардизоване вредности једносмерних напона (на пример 10 V) или струја (на пример 20 mA): а) класичних мерних сензора температуре и мерних претварача са сензора у једносмерни напон (10 V) или струју (20 mA) и б) струјних мерних трансформатора и мерних претварача наизменичне струје у једносмерни напон (10 V) или струју (20 mA).



Калибрација сензора



Уградња сензора



Припрема за извођење ван суда

Слика 5.1 - Оптички (*fiber-optics*) сензори

Оптички сензори се данас све чешће уграђују током израде нових трансформатора и може се рећи да примена ове технике постаје стандардна код великих и важних трансформатора. Од развоја ове мерне технике до њене примене прошло је доста времена (више од 20 година), пре свега због отворених питања где и како их уградити, да ли је њихова уградња у зоне јаких електричних и магнетних поља заиста безбедна, али и практичних проблема њихове уградње - пре свега продужење процеса израде намотаја у које се постављају ови фини и осетљиви сензори: потребно је додатно време за постављање сензора и извођење каблова кроз суд до мерног инструмента постављеног ван трансформатора.

Максимално дозвољене вредности температуре су различите за различите материјале и делове трансформатора. По правилу, најкритичније су **температуре чврсте изолације и уља** (граница за нормално циклично оптерећење за целулозну изолацију износи 120 °C, а за минерално уље 105 °C). Поред те две температуре, постоје и ограничења температуре **језгра и конструкционих делова** (граница за нормално циклично оптерећење за металне делове који су у додиру са уљем износи 140 °C, а најтоплија тачка магнетног кола 130 °C). Пројектовање и провера хлађења намотаја, уља и језгра може се сматрати задатком који се решава током пројектовања хлађења, док се температура конструкционих делова пре може сматрати темом конструкције (пре свега каналсања расутог флукса), него проблем пројектовања хлађења.

Једна од мера за спречавање загревања конструкционих делова је постављање екрана на унутрашњој страни суда, у зони малог растојања између намотаја и суда. **Екрани се израђују од магнетних лимова или металних шина добре електричне проводности.** Ови екрани спречавају појаву великих магнетних поља и флукса у суду, због којих би се појавиле велике индуковане струје и загревање у суду. Последица тих загревања би било велико загревање суда, а због њега и велико загревање уља и последична појава ваздушних мехурова у уљу. Кретање и улазак ваздушних мехурова у намотај, у зону високих напона, може да изазове електрични пробој и квар трансформатора. У суду, са или без екрана, увек ће се јавити извесни губици, који се уважавају при термичким прорачунима (ова топлота прелази ка амбијенталном ваздуху, али по правилу и са суда ка уљу, услед чега се загрева уље).

Лоши контакти или **слаба изолација** такође могу да изазове негативне ефекте. На лошим контактима кроз које протиче струја, због великог прелазног отпора, али и евентуалне појаве електричног лука, јавља се велико загревање и велики пораст температуре. На местима ослабљене изолације између делова под напоном процес загревања иницијално настаје као последица електричних пражњења, која у крајњем стадијуму могу да доведу до појаве електричног лука, веома високих температура и стварања ваздушних мехурова. Овакве појаве треба детектовати у раним фазама њиховог развоја, што се чини пре свега применом дијагностичких метода заснованих на анализи уља, у коме долази до хемисјких процеса који су повезани са настанком високих локалних температура у уљу или са појавом електричног лука.

5. 1. 3. ЗАКОНИТОСТИ СТАРЕЊА ИЗОЛАЦИЈЕ

Квантификација процеса старења трансформатора базирана је на највишој (критичној) температури изолације, јер је у тој тачки процес старења најинтензивнији. Полазећи од Аренијусовог закона за век изолације V :

$$V = k e^{(A+\frac{B}{T})} \quad (5.2)$$

где су A и B константе, а T апсолутна температура (К), Монтсингер је поставио правило за одређивање века изолације V (по истеку периода V , изолациони материјал губи своја изолациона својства, односно може се сматрати да је трансформатор достигао крај свог животног века, односно да се трансформатор мора заменити)

$$V = c e^{-p \vartheta}$$

где су c и p константе, а ϑ температура у ($^{\circ}\text{C}$). При постављању правила Монтсингер је утврдио да се век изолације смањује на половину када се температура повиси за 8 К; стандарди су касније ову вредност пораста температуре кориговали на 6 К, чему одговара вредност константе p :

$$\frac{1}{2} = \frac{e^{-p(\vartheta+6)}}{e^{-p\vartheta}} = e^{-6p} \quad (5.3)$$

$$p = \frac{\ln(2)}{6} = 0.1155 \quad (5.4)$$

У складу са претходним, у пракси је уобичајено да се век изолације исказује као релативна вредност у односу на век изолације који се има при номиналним условима (номиналној температури (ϑ_n)); овако дефинисан релативни век изолације при произвољној температури ϑ износи

$$\frac{V}{V_n} = \frac{c e^{-p \vartheta}}{c e^{-p \vartheta_n}} = e^{p(\vartheta_n - \vartheta)} = e^{\frac{\ln(2)}{6}(\vartheta_n - \vartheta)} = e^{\frac{\vartheta_n - \vartheta}{6} \ln(2)} = 2^{\frac{\vartheta_n - \vartheta}{6}} \quad (5.5)$$

У пракси, старење се по правилу исказује као **релативно старење (RS)**, која представља вредност релативне брзине старења (у односу на номиналну), и дефинише се као реципрочна вредност релативног века изолације:

$$RS = \left(\frac{V}{V_n}\right)^{-1} = 2^{\frac{\vartheta - \vartheta_n}{6}} \quad (5.6)$$

Пример: за температуру ϑ мању од номиналне за 6 К, $RS = 0.5$, за температуру ϑ већу од номиналне за 6 К, $RS = 2$; средња вредност $(0.5 + 2) / 2 = 1.25 > 1$.

Ако би животни век трансформатора који ради у режиму са приближно константном температуром најтоплије тачке изолације једнакој номиналној ($\vartheta_n = 98 \text{ }^\circ\text{C}$) био 30 година (ово представља реалну процену), може се одредити константа c :

$$c = 30 e^{p \vartheta_n} = 30 e^{\frac{\ln(2)}{6} 98} = 2.5 \cdot 10^6 \quad (5.7)$$

У ИЕС стандарду за оптерећивање трансформатора (ИЕС 60076-7 [1]), које је донет 2018.-е године, у додатку стандарда први пут се дају формуле по којима се одређује старење изолације намотаја (папира) не само на основу температуре најтоплије тачке изолације намотаја, већ се узима у обзир и присуство **садржаја влаге и кисеоника**. Познато је да поред ова два параметра, на интензитет старења утиче и **садржај киселина**. Постоје публиковани резултати истраживања у вези са наведеним утицајима, али се ова тема може сматрати као отворена, односно да се могу очекивати нове методе за процену релативног старења, односно другачији поступци за његово израчунавање. Резултати једног недавног истраживања, које је обухватило захтевне експерименте на два трансформатора снаге 300 kVA (слика 5.1) са нормалним и значајно увећаним садржајем влаге, спроведени у Србији и објављени 2019.-е године у водећем часопису у овој области, приказана су у радовима [2] и [3].

Данас постоје методе и системи за аутоматски надзор стања трансформатора, који обухвата праћење гасова у уљу и садржаја фурана (једињења која настају као резултат распада чврсте изолације и хемијске реакције са уљем), као и праћење садржаја влаге и киселина. Са друге стране, један од кључних параметара на основи ког се утврђује стање чврсте изолације је његов степен полимеризације (DP), који представља број молекула повезаних у полимерни ланац. DP се одређује на узорку изолације који се узима са локације температуре најтоплије тачке. Проблем одређивања вредности степен полимеризације је што је метода за узорковање инвазивна и по правилу неостварива, због чега је један од праваца истраживања оријентисан ка успостављању корелације између тренутне вредности DP и резултата неинвазивних мерења (на пример садржаја фурана).

Поред једначине (5.5), за који се наводи да важи за нормални крафт папир, у стандардима се даје израз за термички побољшан папир. Номинална температура за термички побољшан папир, при којој изолација нормално стари, износи $\vartheta_n = 110 \text{ }^\circ\text{C}$, док је релативно старење при температури вруће тачке ϑ_v (најтоплије тачке изолације):

$$RS = e^{\left(\frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\vartheta_{vt}+273}\right)} \quad (5.8)$$

Трансформатор по правилу ради у условима променљиве температуре амбијента и променљивог оптерећења, што за последицу има да се током времена мења и температура вруће тачке. Ако претпоставимо да је позната вредност температуре вруће тачке на сваких минут времена, релативна вредност старења у току дана, базирана на изразу (5.6), износи

$$RS = \frac{1}{24 \cdot 60} \sum_{i=1}^{24 \cdot 60} RS_i = \frac{1}{1440} \sum_{i=1}^{1440} 2^{\frac{\vartheta_{vti} - 98^{\circ}C}{6}} \quad (5.9)$$

Дакле, температура вруће тачке изолације се мења у току времена и претходни израз даје меру кумулативног погоршања својстава чврсте изолације у таквим реалним радним условима. Према наведеном изразу изолација нормално стари при номиналној температури од $\vartheta_n = 98^{\circ}C$. Ова температура представља једно од основних својстава изолације и у стандардима постоји класификација типова изолације према вредности ове температуре. У стандарду ИЕС 60085 из 2004. године су дате класе изолације, дефинисане према температурном опсегу при коме се у нормалним експлоатационим условима има нормално старење изолације. Изолација од крафт папира импрегнирана у уљу спада у класу А. С обзиром на могућност да фактори који нису обухваћени у законитостима старења изолације (садржај влаге, кисеоника и киселина) могу одступати од оних који се очекују током уобичајене експлоатације, за температуру при којој се има нормално старење се узима вредност $98^{\circ}C$, која не нешто мања од вредности од $105^{\circ}C$, што је вредност наведена у стандарду ИЕС 60085 за класу изолације А.

Поред наведене карактеристичне температуре, као вредности при којој се има нормално старење изолације, постоји **гранична вредност температуре која се не сме прећи ни краткотрајно**, јер би дошло до тренутног оштећења трансформатора - пробоја изолације, паљења уља или стварања мехурова, који могу да доведу до електричног пробоја.

Слична ситуација као за чврсту изолацију се јавља и за **течни изолациони материјал (уље)**, за који такође постоји максимална температура при којој долази до нормалне деградације, као и максимална температура која се не сме прећи како не би дошло до тренутног оштећења трансформатора или до паљења уља. Оријентационе вредности граничне температуре уља износе: за минерална уља $105^{\circ}C$, за естарска $130^{\circ}C$ и за силиконска $155^{\circ}C$. Примена чврсте изолације више термичке класе (номекс, на пример, има граничну температуру $180^{\circ}C$) са собом по правилу повлачи примену уља са вишим граничним вредностима температуре, како би се постигло максимално смањење габарита трансформатора (активног дела и расхладног система). То је значајно у неким специфичним применама као што је смештај уљног трансформатора у подножју стуба ветро генератора или на железничким путничким вагонима.

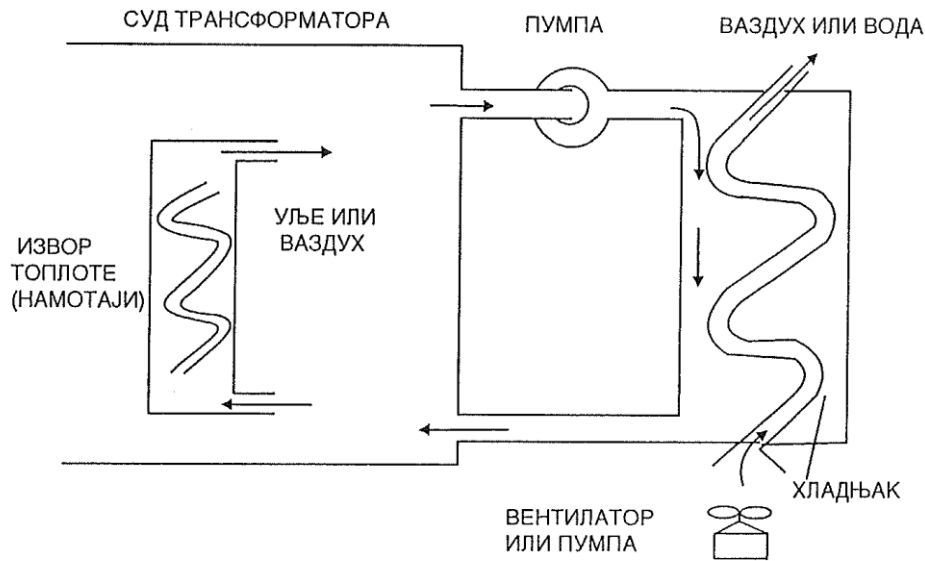
5. 1. 4. ТЕМПЕРАТУРА СПОЉАШЊЕГ РАСХЛАДНОГ ФЛУИДА

У претходном одељку је објашњено да постоји ограничење за максималне температуре чврсте изолације и расхладног флуида (уља) унутар трансформатора, односно да за сваки материјал постоји вредност температуре при коме се одвија нормална деградација његових својстава, као и максималне температуре чије би прелажење довело до тренутног оштећења трансформатора. Загревање настаје као последица губитака снаге (P_γ) у трансформатору и да би се генерисана топлота пренела са места где се генерише (температура ϑ) до спољашњег расхладног флуида (температура ϑ_o) мора да постоји разлика температура. Може се написати

$$P_\gamma \sim \vartheta - \vartheta_o \quad (5.10)$$

То значи да максимална снага губитака, а самим тим и максимално оптерећење трансформатора, зависе од температуре спољашњег расхладног флуида (то је најчешће температура ваздуха, а

може бити и температура воде на уласку у хладњак уље / вода, уколико се трансформатор хлади на тај начин) – видети слику 5.2.



Слика 5.2 – Принцип пренос топлоте са активног дела трансформатора, преко уља, ка спољашњем расхладном флуиду

На основу претходно наведеног, јасно је да температура спољашњег расхладног средства представља улазни податак при пројектовању трансформатора специфициране снаге.

Конвенција за обележавање температура која ће се користити у оквиру курса:

ϑ - температура ($^{\circ}\text{C}$)

ϑ_o - температура спољашњег расхладног флуида ($^{\circ}\text{C}$)

θ - пораст температуре у односу на околину: $\vartheta - \vartheta_o$ (K)

$\Delta\theta$ - разлика било које две температуре унутар трансформатора: $\vartheta_1 - \vartheta_2$ (K)

T - апсолутна температура: $\vartheta + 273$ (K)

5. 1. 5. НЕРАВНОМЕРНОСТ ТЕМПЕРАТУРЕ У ТРАНСФОРМАТОРУ

У претходном делу поглавља о загревању трансформатора објашњено је да је трансформатор термички најугроженији на месту где је температура чврсте изолације највиша; у принципу, ни температура уља не сме да прекорачи максимално дозвољене вредности. До сада се говорило о различитим температурама, те се могло наслутити да се температура делова трансформатора разликује, тј. да је температура унутар трансформатора променљива.

Из дела курса у коме се говорило о расподели губитака по запремини намотаја и чињеници да је она неравномерна, логично је очекивати да се разликују и температуре појединих проводника.

Поред разлике у губицима по проводницима, није равномерно ни хлађење проводника, па ситуација постаје компликована, јер није једноставно одредити температуру у најтоплијој тачки изолације, па чак ни локацију најтоплије тачке, у коју би се поставио оптички сензор преко кога би се ова критична температура мерила током рада трансформатора.

Слична је и ситуација за уље, које преузима топлоту са намотаја и магнетног кола (такође и са конструкционих делова) и предаје га расхладном систему преко кога се топлота одводи у околину. Ни код уља се не може једноставно предвидети локација где је његова температура највиша. Ипак, овом проблему се поклања мање пажње у пракси јер је по правилу температура уља мање критична. Уобичајено је, осим код корисника са високим техничким знањем, провера температуре уља се врши за уље у термометарском цепу на поклопцу трансформатора.

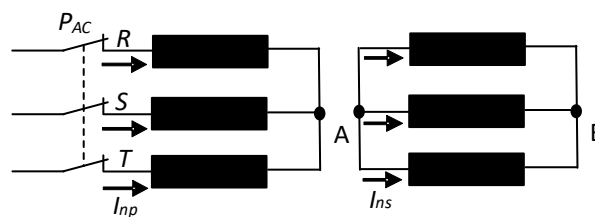
Након што је трансформатор произведен, потребно је проверити да ли је његово загревање, односно пораст температуре у односу на амбијент, мање од стандардима дозвољеног (граничне вредности дате у стандардима се евентуално могу променити уговором између купца и продавца). За мање трансформаторе, провера се по правилу врши као типски тест за сваки од трансформатора из производног програма фабрике, а за веће се по правилу врши за сваки произведени трансформатор. Дакле, потребно је **дефинисати оглед којим се проверава загревање**. С обзиром на претходно наведено, није погодно вршити проверу вредности критичних (највиших) температура чврсте изолације и уља, јер је за то потребно применити фибер-оптичке сензоре, при чему се не може једноставно одредити ни место на коме се очекује највиша температура. Због тога се у стандардима специфицира да се врши **провера дозвољене вредности пораста средње температуре намотаја и температуре уља у термометарском цепу** (испод поклопца трансформатора или на уласку у хладњак).

Средња температура намотаја се може одредити релативно једноставно експериментално (у огледу загревања), на следећи начин. Након достизања устаљеног температурног стања, на начин дат у стандарду IEC 60076-2 [4] (ово загревање трансформатора у кратком споју траје оријентационо 12 сати), искључује се наизменично напајање, а одмах затим разведе коло наизменичне струје (слика 5.3), повеже коло једносмерне мерне струје и UI методом врши мерење отпора намотаја (R_t), која је једнака односу напона измереног волтметром и струје измерене амперметром (слика 5.4). На слици 5.4 је приказана варијанта да се мери вредност отпора паралелне везе три намотаја секундара. Имајући у виду чињеницу да је температура сва три намотаја приближно иста, измерена вредност отпора се приближно може одредити дељењем овако измереног отпора са 3. Модификацијом мерне шене је могуће добити и отпоре намотаја сваке фазе – на пример, намотаји се могу везати на ред, а отпор сваког од њих добити као количник напона измереног на њему и заједничке струје кроз једносмерно коло.

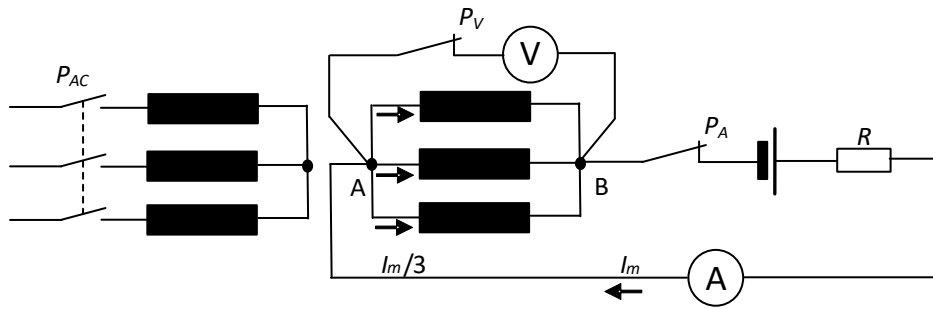
Температура намотаја се одреди из вредности отпора R_t и вредности отпора измереног на исти начин, једносмерном струјом, у хладном стању R_h , при температури намотаја ϑ_h (ако је трансформатор довољно дуго искључен, може се сматрати да је његова температура једнака температури амбијента или температури горњег уља измереној у термометарском цепу):

$$\frac{R_t}{R_h} = \frac{235 + \vartheta_t}{235 + \vartheta_h} \quad (5.11)$$

$$\vartheta_t = \frac{R_t}{R_h} (235 + \vartheta_h) - 235 \quad (5.12)$$



Слика 5.3 – Шема огледа загревања (други део – са номиналном наизменичном струјом)



Слика 5.4 – Шема мерења отпора намотаја секундера једносмерном струјом, по искључењу наизменичног напајања

Температура уља у термометарском цепу једноставно се мери контактним термометром или било којим температурним сензором, јер се налази у зони где не постоје јака електрична и магнетна поља, за разлику од зона унутар намотаја, где је неопходна примена оптичких сензора. Типичне вредности граничних вредности дозвољених пораста температура у односу на амбијент су, за папирну изолацију, $\theta_{sr \max} = 65 \text{ K}$ за средњу температуру намотаја и $\theta_{gu \max} = 60 \text{ K}$ за горње уље.

Температура најтоплије тачке (ϑ_{vt}) се израчунава преко средње температуре намотаја (ϑ_{sr}) и температура уља на врху (ϑ_{ug}) и дну трансформатора (ϑ_{ud}) – средња температура намотаја (ϑ_{usr}) је једнака $\vartheta_{usr} = (\vartheta_{ud} + \vartheta_{ug})/2$, као и фактора најтоплије тачке (H):

$$\vartheta_{vt} = \vartheta_{ug} + H (\vartheta_{sr} - \vartheta_{usr}) \quad (5.13)$$

Фактор најтоплије тачке H није једноставно одредити јер се њиме обухвата неравномерност губитака и неравномерност хлађења појединих проводника у намотају [5]. У ИЕС стандарду за оптерећивање трансформатора [1] наводи се да се вредност H креће у широком опсегу, од 1 до 2.1, у зависности од номиналне снаге трансформатора, импедансе кратког споја и конструкције намотаја (пре свега канала за хлађење и усмеравања уља кроз намотај). Препоручује се да се фактор најтоплије тачке одреди прорачуном или на бази мерења оптичким сензорима. Оријентационо, за дистрибутивне трансформаторе нормалне конструкције, и напона кратког споја до 8 % може се усвојити вредност $H = 1.1$. У примерима датим у стандардима, за трансформаторе чија је снага већа од 100 MVA примењена је вредност $H = 1.3$. Практично једини начин да се он поуздано одреди у фази пројектовања је преко комплексних детаљних термичких прорачуна. Евидентан је тренд увођења оваквих софтвера у праксу, па се може очекивати да ће то постати стандардна пракса.

Увођење вредности пораста средње температуре намотаја у стандарде за тестирање је мотивисано тиме да се изврши контрола бар некакве вредности (када је већ тешко проверити најкритичнију температуру најтоплије тачке) која карактерише загревање намотаја, а коју је могуће релативно лако измерити. На жалост, експериментални резултат да је средња температура намотаја мања од дозвољене вредности не значи да је трансформатор добро конструисан са становишта загревања и да неће доћи до његовог оштећења или убрзаног старења током рада због постојања високе локалне температуре неког проводника у намотају.

5. 2. ПРОРАЧУН ТЕМПЕРАТУРЕ У ФАЗИ ПРОЈЕКТОВАЊА ТРАНСФОРМАТОРА

5. 2. 1. ПРЕНОС ТОПЛОТЕ

Пренос топлоте од места на којима се она генерише до спољашњег расхладног флуида одвија се на три стандардна начина:

- 1) провођење
- 2) струјање
- 3) зрачење

1) Провођење

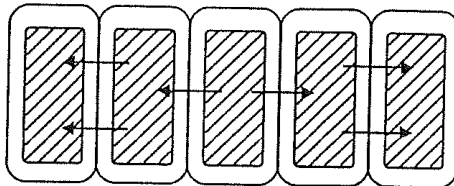
Основна законитост која описује пренос топлоте провођењем, које је карактеристично за пренос топлоте кроз чврсто тело, је Фуријеов закон, који за случај једнодимензионог преноса топлоте гласи:

$$p = \lambda S \frac{\Delta\theta}{x} = \lambda S \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{x}. \quad (5.14)$$

Топлотна снага p која се преноси кроз равну плочу дебљине x и површине попречног пресека S , од граничне површи са вишом температуром ϑ_1 ка граничној површи са нижом температуром ϑ_2 (разлика температура $\Delta\theta = \vartheta_1 - \vartheta_2$) је сразмерна разлици тих температура, при чему је коефицијент сразмерности специфична топлотна проводност λ (W / (m K)), која представља карактеристику материјала кроз коју се топлота преноси провођењем.

Због односа вредности специфичне топлотне проводности кроз металне (проводне) и изолационе материјале у трансформатору (λ је много веће за металне делове), разлике температура услед провођења топлоте кроз електроизолационе делове су значајно веће од оних кроз металне, због чега се разлика температура услед провођења топлоте кроз металне делове (бакар / алуминијум, односно челичне легуре у магнетном колу) углавном могу занемарити.

На слици 5.5 је скициран начин преноса топлоте провођењем унутар једног намотаја, односно унутар диска сачињеног од 5 проводника са папирном изолацијом (све спољне површи диска су у додиру са уљем). На слици је приказан само пренос топлоте провођењем у радијалном правцу, и то само кроз изолацију између два проводника. Провођење у радијалном правцу постоји и кроз слој изолације крајњих (до уља) проводника, као и у аксијалном правцу кроз слој изолације.



Слика 5.5 – Илустрација преноса топлоте провођењем кроз изолацију проводника

2) Струјање

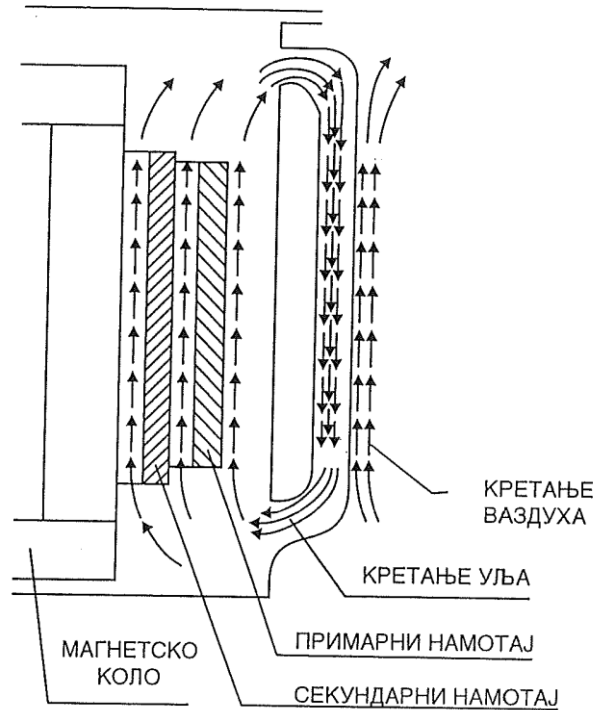
Основна законитост која описује пренос топлоте струјањем, који је карактеристичан за размену топлоте између површи чврстог тела и флуида,

$$p = \alpha S \Delta\theta \quad (5.15)$$

исказује да је пренета снага p сразмерна са површином S и температурном разликом $\Delta\theta = \vartheta_1 - \vartheta_2$ те површи и флуида.

Топлота се струјањем преноси од површи активних делова (намотаја и језгра) ка уљу. Уколико постоје значајни губици услед расутог флукса у суду, топлота се са суда преноси струјањем ка

уљу; уколико су ови губици мали, топлота се струјањем преноси са уља на суд, а са суда ка амбијенту. На хладњацима (радијатори или компактни хладњаци) топлота се струјањем преноси од уља ка страни хладњака која је у додиру са уљем, затим провођењем кроз зид хладњака и струјањем од стране хладњака према спољашњем расхладном флуиду (ваздух код радијатора, односно ваздух или вода код компактних хладњака). Скица струјања уља (део намотај, уље, хладњак) и ваздуха приказана је на слици 5.6.



Слика 5.6 – Скица струјања уља и ваздуха

Кретање уља у трансформатору може бити изазвано пумпама или вентилаторима (тај случај се карактерише као принудно струјање) или природно, –као резултат термосифонског ефекта (у том случају услед преласка топлоте на уље оно се загрева, густина честица флуида постаје мања и оне се крећу на горе; услед преласка топлоте са уља оно се хлади, густина честица флуида постаје већа и оне се крећу на доле. Уље струји у затвореној контури. Хладан ваздух, на дну радијатора, улази из слободног простора, док загрејан ваздух, на изласку из радијатора, излази у слободан простор. Слична ситуација овој за ваздух се има за воду, која не струји у затвореној контури.

Коефицијент преласка топлоте струјањем (α) зависи од низа фактора, као што је врста флуида, његова температура, разлика температура површи и флуида, начин струјања уља (принудно или природно), брзина струјања уља итд. У литератури из области преноса топлоте струјањем могу се наћи формуле за израчунавање коефицијента преласка топлоте струјањем за разне случајеве, укључујући и различите геометрије (на пример, површ у слободној струји флуида, канали различитих облика кроз које струји уље, сноп цеви преко којих попречно струји флуид итд.). Ипак, чест је случај да се геометрија и услови струјања уља унутар трансформатора разликују од оних за које се у литератури могу наћи формуле за α , због чега се морају спровести додатна теоријска, прорачунска (FEM) и експериментална истраживања чији је циљ добијање поузданих формула задовољавајуће тачности за ситуације преноса топлоте струјањем које постоје у трансформатору.

Примера ради, као илустрација и објашњење да α ($W / (m^2 K)$) није константна величина, наводи се неколико формула које се, међу бројним другим (и за исту геометрију се може наћи више различитих израза), могу наћи у литератури:

А) Примери за природно струјање са вертикалне плоче:

Ка ваздуху

$$\alpha = 2.5 (\Delta\vartheta)^{0.25} \left(\frac{293}{T} \right)^{0.25} \quad (5.16)$$

$\Delta\vartheta$ представља разлику температуре плоче и ваздуха

T означава апсолутну температуру ваздуха.

Ка уљу:

$$\alpha = 38 (\Delta\vartheta)^{0.25} \left(\frac{\vartheta}{50} \right)^{0.5} \quad (5.17)$$

$\Delta\vartheta$ представља разлику температуре плоче и уља

ϑ означава температуру уља у $^{\circ}C$.

Б) Пример за принудно струјање:

Ваздушно хлађење, за брзине $v < 5 m / s$ и за вредност средње температуре површи и ваздуха до $50^{\circ}C$:

$$\alpha = 6 + 4 v \quad (5.18)$$

3) Зрачење

Зрачење је пренос топлоте путем електромагнетских таласа. То је једини облик преноса топлоте за који није потребно постојање материјалне средине, односно површ неког тела може зрачењем предавати или примати топлоту и кроз вакуум. Овај облик преноса топлоте у највећем броју практичних ситуација не представља значајну компоненту у укупном процесу преноса топлоте код уљних енергетских трансформатора; код већих уљних трансформатора он би се чак могао и занемарити без велике грешке у прорачуну, за разлику од сувих трансформатора или малих уљних трансформатора који се хладе ваздухом само преко површи суда (мали трансформатори често немају радијаторе, већ довољно хлађење преко површи равног суда).

Примера ради, снага размене топлоте зрачењем између мање конвексне површи 1 (температуре T_1), површине S , и велике површи 2 (температуре T_2), која обухвата површ 1, износи

$$p = \varepsilon \sigma_c S (T_1^4 - T_2^4) \quad (5.19)$$

p - снага преноса топлоте (W)

ε - емисивност површи (зависи од боје и углачаности површи)

σ_c - Штефан-Болцманова константа ($5.67 \cdot 10^{-8} (W / (m^2 K^4))$)

S - површина конвексне површи 1 која је обухваћена великом површи 2 (m^2)

Једино место на коме је потребно снагу преноса топлоте зрачењем узети у обзир је површ ка амбијенту - суд и радијатори. Површинска густина снаге преноса топлоте зрачењем у реалном опсегу температура код трансформатора је самерљива са снагом преноса топлоте струјањем

према ваздуху. Коефицијент преласка топлоте струјањем са уља на зид суда / радијатора (α_u) је много већи него за прелазак топлоте са зида на ваздух (α_v), због чега је снага преноса топлоте од уља ка амбијенту доминантно одређена вредношћу α_v . На основу претходно наведеног закључило би се да је неопходно уважити пренос топлоте зрачењем. Конструкција радијатора и хладњака је таква да је пренос топлоте зрачењем у огромној мери блокиран: примера ради, ако радијатор има 30 паралелних плоча, у преносу топлоте струјањем са ваздухом учествује 60 површи једне стране плоче, док у преносу топлоте зрачењем практично учествује само једна површ плоче, она која се налази најдаље од суда трансформатора, јер само она зрачи енергију у слободан простор. Због тога је грешка која се чини занемарењем преноса топлоте зрачењем код таквих трансформатора мала. Код трансформатора малих снага, који немају радијаторе, код којих је за хлађење довољна површ суда, ово не важи, већ је површ преко које се топлота одводи струјањем једнака површи преко које се топлота одводи зрачењем. Понекад се у пракси и теорији струјање и зрачење не издвајају, већ се пренос топлоте са површи приказује као пренос топлоте струјањем, при чему се коефицијент преласка топлоте повећава у односу на вредност коефицијента преласка топлоте струјањем, на следећи начин:

$$\begin{aligned} \varepsilon \sigma_c S (T_1^4 - T_2^4) &= \varepsilon \sigma_c S (T_1^2 + T_2^2)(T_1^2 - T_2^2) \\ &= \varepsilon \sigma_c S (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2) \\ &= \varepsilon \sigma_c S (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)\theta \end{aligned} \quad (5.20)$$

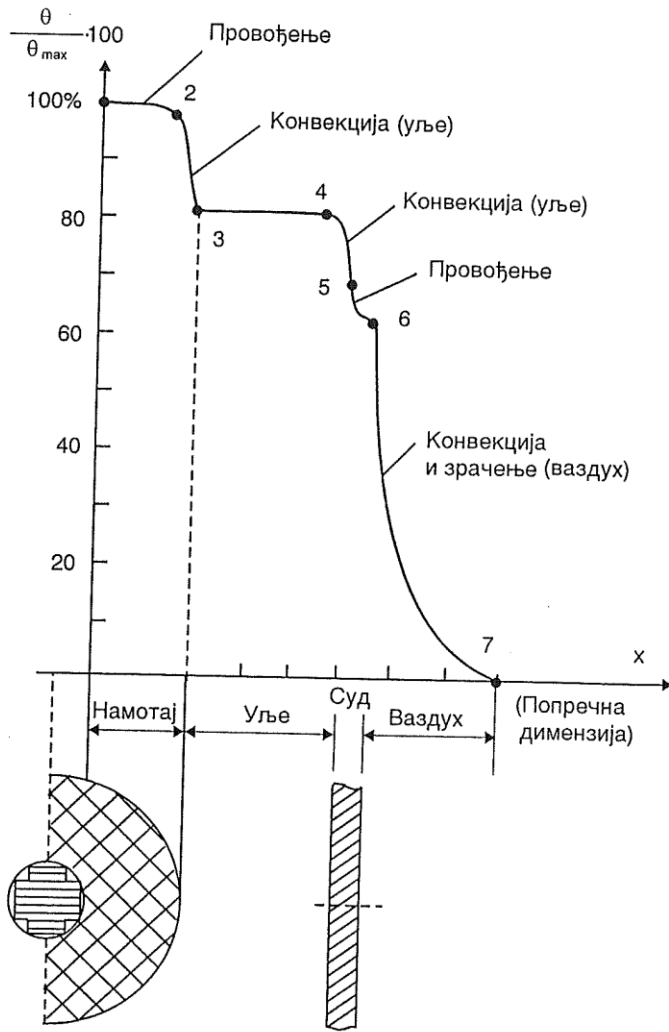
$$\varepsilon p = p_s + p_z = \alpha_k S \theta = (\alpha_s + \alpha_z) S \theta \quad (5.21)$$

α_k - коефицијент комбинованог преласка топлоте струјањем и зрачењем

$$\alpha_z = \varepsilon \sigma_c (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) \quad (5.22)$$

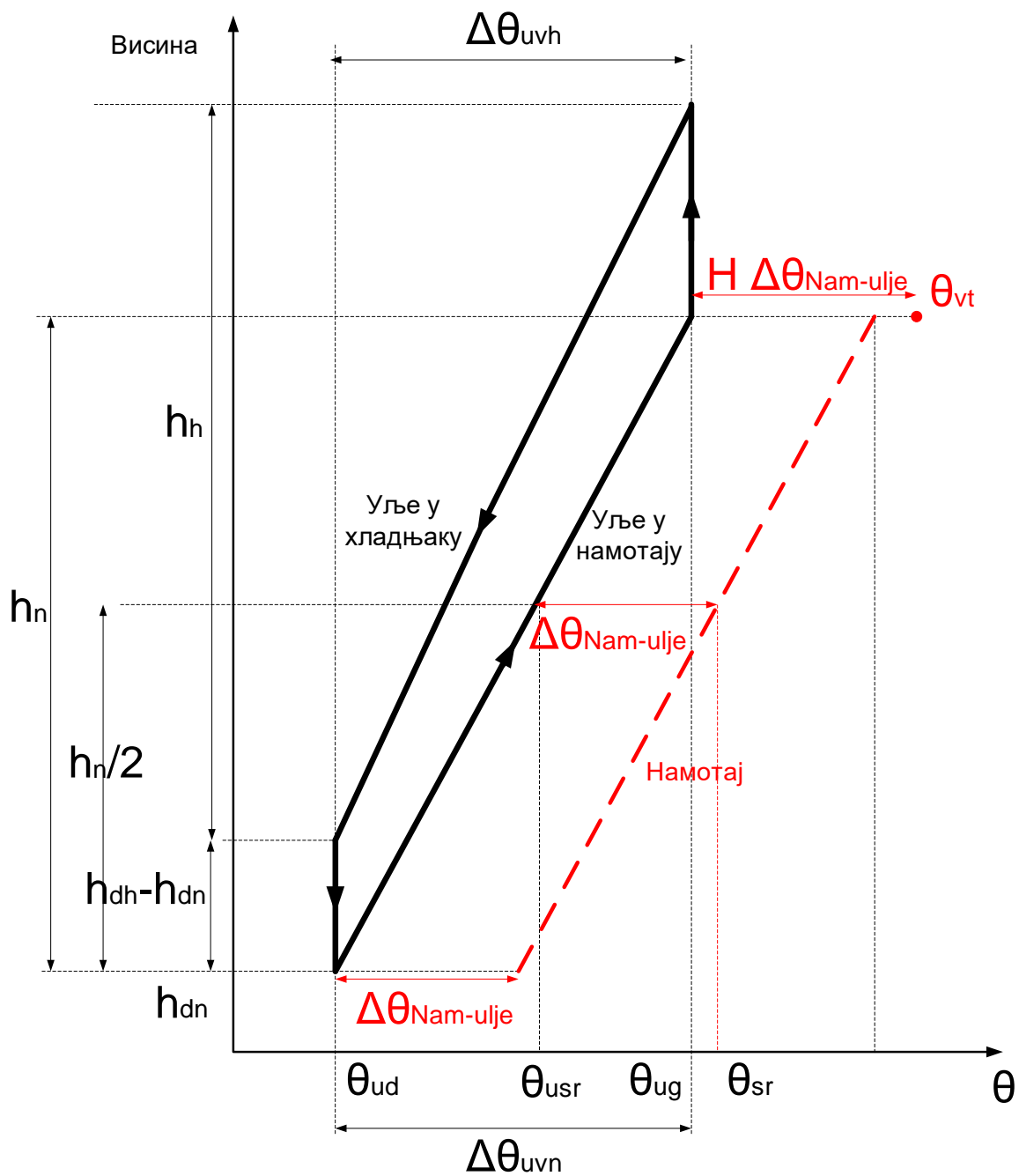
5. 2. 2. ПРОСТОРНА РАСПОДЕЛА ПОРАСТА ТЕМПЕРАТУРЕ

Скица расподеле температуре у хоризонталном попречном пресеку је дата на слици 5.7. Температура он најтоплије тачке опада услед провођења топлоте линеарно од тачке 1 до 2. Топлота се са површи намотаја на уље преноси струјањем, чему одговара пад температуре 2 – 3 (оријентационо 20 – 30 % укупне разлике температуре између најтоплије тачке и спољашњег расхладног флуида. Топлота се са уља преноси ка зиду такође струјањем (тачке 4 – 5), после чега следи пад температуре у зиду провођењем (5 – 6), који обично не прелази 2 – 3 К. Највећи пад температуре је 6 – 7, са површи суда на ваздух, који настаје као комбиновани пренос топлоте струјањем и зрачењем.



Слика 5.7 – Скица пада температуре по хоризонталном пресеку

Шематски упрошћен распоред промене температуре по висини је дат на слици 5.8, где се посматра само један намотај. У случају више намотаја, вредности вертикалног градијента температуре уља у сваком од намотаја ($\Delta\theta_{uvn}$) могу се међусобно разликовати, а тиме ће се разликовати и од вредности вертикалног градијента температуре уља у хладњаку ($\Delta\theta_{uvh}$); у приказаном примеру $\Delta\theta_{uvn}=\Delta\theta_{uvh}$. Поред различитих вертикалних градијента температуре уља у сваком од намотаја, на вредност $\Delta\theta_{uvh}$ утиче и протицање хладног уља поред активног дела и протицање уља кроз језгро – по правилу вертикални градијент температуре уља које протиче кроз језгро ($\Delta\theta_{uj}$) разликује од вертикалног градијента температуре уља које протиче кроз намотаје ($\Delta\theta_{uvn}$). Шематски распоред промене температуре по висини за случај два намотаја и постојања *by-pass*-а уља (протицање хладног уља поред активног дела) дат је на слици 5.9. Слика важи за случај да су намотаји истих висина, и да се дно намотаја налази на истој вертикалној координати. Скица је дата за случај да су губици лоцирани само у намотајима. Сматра се да до мешања уља из намотаја и *by-pass*-а уља долази на врху намотаја. Дно хладњака се налази на већој висини од дна намотаја. Врх хладњака се налази на већој висини од врха намотаја.

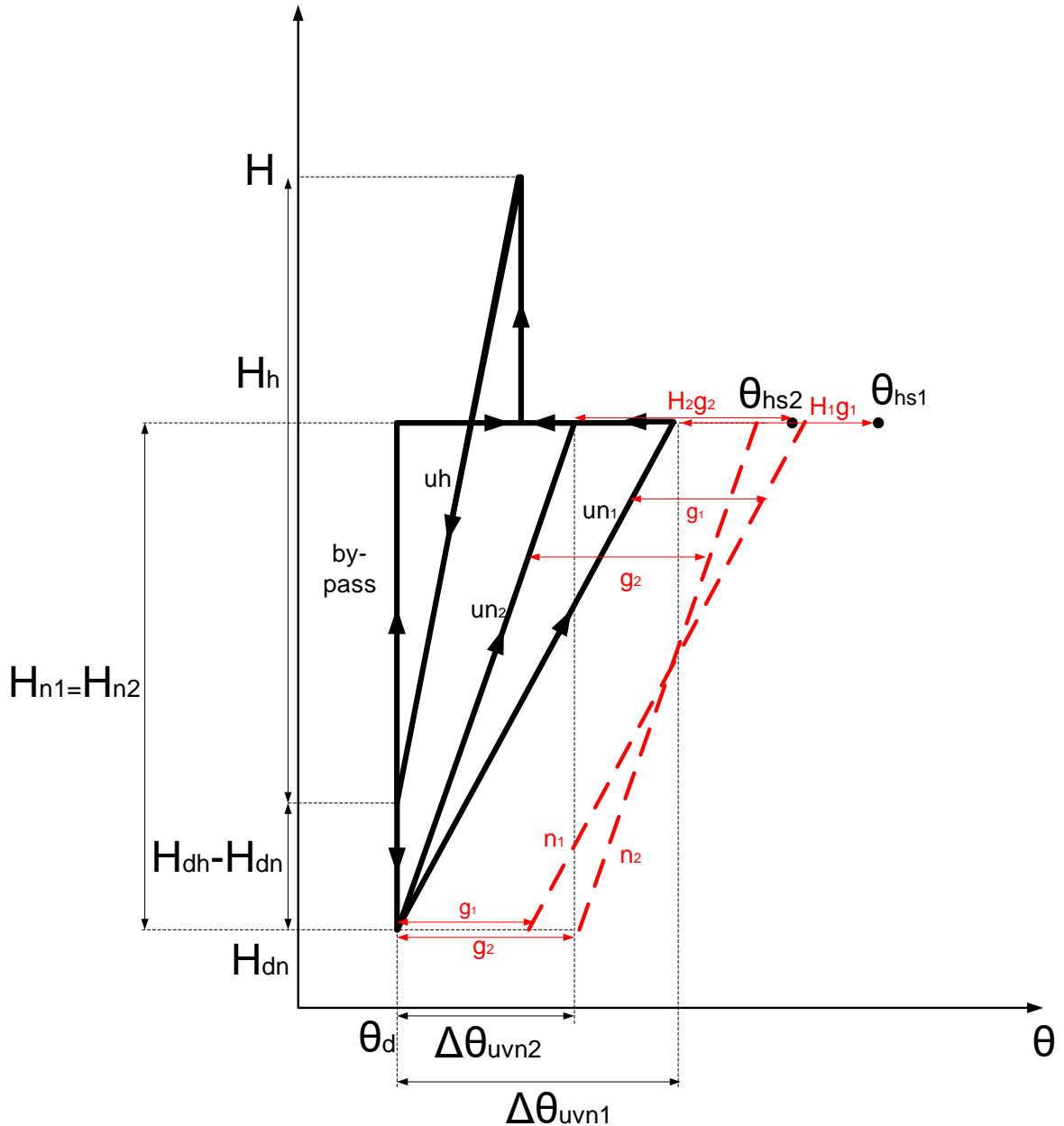


Слика 5.8 - Вертикална расподела температура уља и намотаја
Геометријски фактори:

- h_{dn} – растојање од дна суда до дна намотаја,
- $h_{dh}-h_{dn}$ – растојање од дна намотаја до дна радијатора
- h_h – висина хладњака
- h_n – висина намотаја

Карактеристични градијенти температура и порасте температура у односу на амбијент:

- θ_{vt} – пораст температуре најтоплије ($v = \text{врућа}$) тачке намотаја
- θ_{sr} – пораст средње температуре намотаја
- θ_{ug} – пораст температуре горњег уља (у цељу на врху суда, у који се смешта термометар)
- θ_{ud} – пораст температуре доњег уља
- θ_{usr} – пораст средње температуре уља



Слика 5.9 - Вертикална расподела температура у случају трансформатора са два намотаја и постојању by-pass-а уља (протицање хладног уља поред активног дела)

У фази пројектовања потребно је израчунати вредности критичних температура (најтоплије тачке намотаја и горњег уља). Класичне прорачунске методе се заснивају на одређивању критичних температура - најтоплије тачке намотаја (θ_{vt}) и горњег уља (θ_{gu}) коришћењем дијаграма са слике 5.8, при чему постоје формуле, углавном са емпиријски подешеним коефицијентима, за израчунавање θ_{gu} , $\Delta\theta_{uvh}$, $\Delta\theta_{uvn}$, $\Delta\theta_{Nam-ulje}$, H . Облици формула су успостављени полазећи од израза познатих у теорији преноса топлоте провођењем, струјањем, евентуално зрачењем, као и теорије преноса топлоте и механике флуида за елементарне геометрије. Услед разлике између овако израчунатих вредности и вредности добијених мерењима током огледа загревања трансформатора, произвођачи користе корекционе факторе добијене емпиријским путем. У делу који се односи на механику флуида, користе се изрази за пренос енергије преносом масе (струјање уља) и изрази једнакости притисака у затвореној контури струјања уља

(продуковани притисци и падови притисака, директно или индиректно, преко температура, зависе од протока уља).

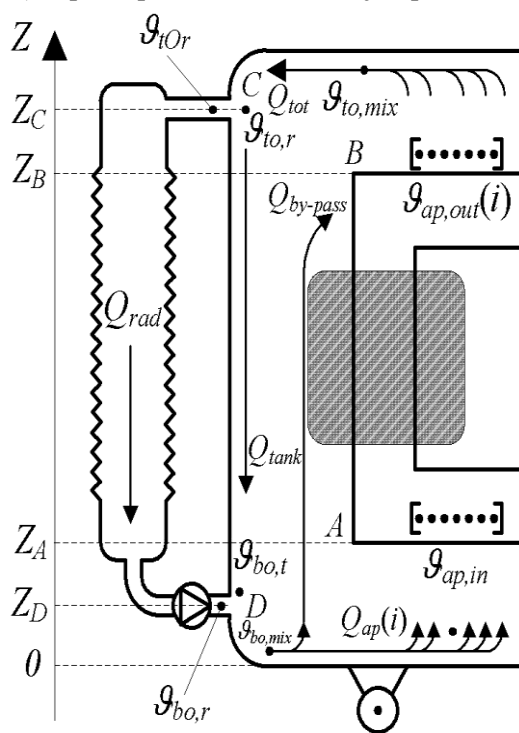
Приступ преко термо-хидрауличног модела се разликује од класичног приступа у томе што се у максималној могућој мери користи стриктна примена законитости из теорије преноса. Термо-хидраулички модел се заснива на стриктној примени:

- а) закона одржања енергије,
- б) закона одржања масе,
- в) равнотеже притисака (Бернулијева једначина) у затвореним контурама уља,
- г) закона преноса топлоте провођењем, струјањем и зрачењем.

Принципи који се примењују:

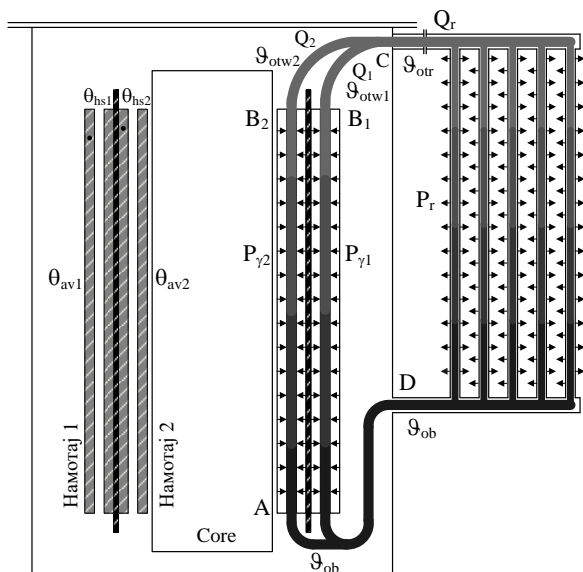
1. У моделовању глобалног струјања уља – одређивање расподеле протока између делова трансформатора (намотаји, језгро, хладњак итд.) - пример дат на сликама 5.10 - 5.12.

2. При прављењу хидрауличких и топлотних шема појединих делова трансформатора, намењених прорачуну расподеле: а) протока уља кроз канале за хлађење - пример дат на слици 5.13 и б) температуре: б1) уља, б2) сваког проводника намотаја (слика 5.14) и б3) карактеристичних тачака језгра.

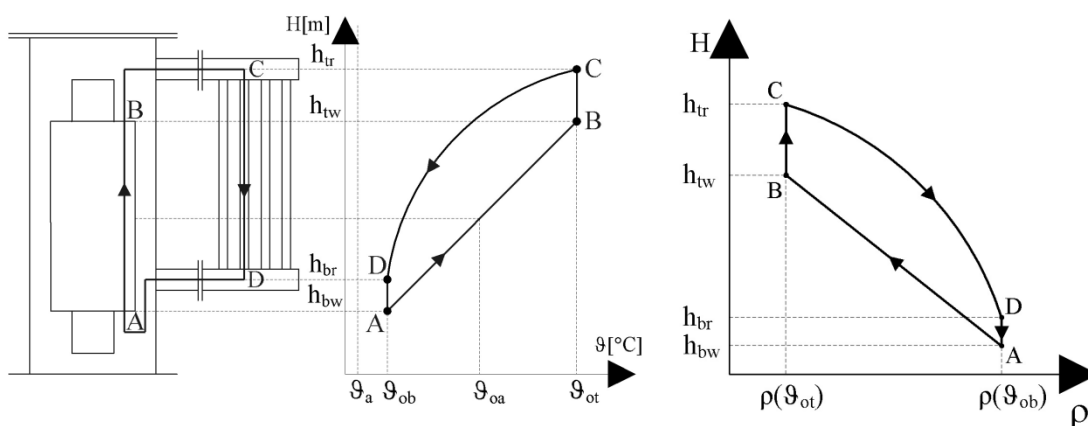


- Q_{rad} - проток уља кроз радијаторе
- $Q_{by-pass}$ - by-pass уља - проток хладног уља које, поред активног дела унутар суда, без размене топлоте са активним делом, струји одоздо на горе
- Q_{tank} - проток уља које се хлади на површи суда и струји одозго ка доле
- Q_{ap} - проток уља које струји кроз активне делове трансформатора - кроз сваки од намотаја и кроз језгро и струји одоздо на горе
- Q_{tot} - укупан проток уља које струји кроз затворену контуру унутар трансформатора
- g - температуре уља у карактеристичним тачкама

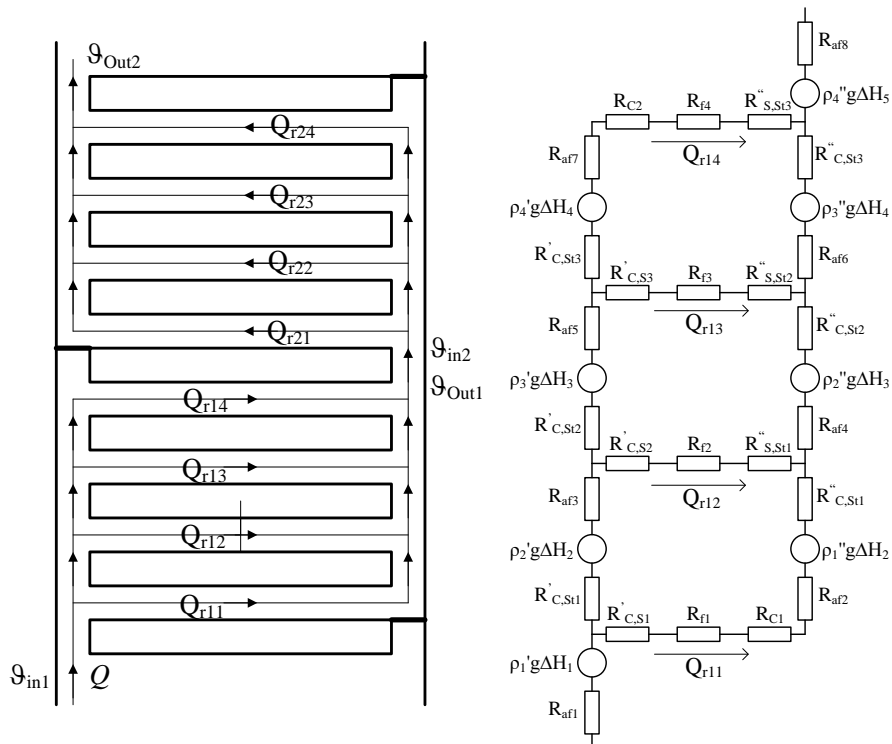
Слика 5.10 - Расподела протока између делова трансформатора



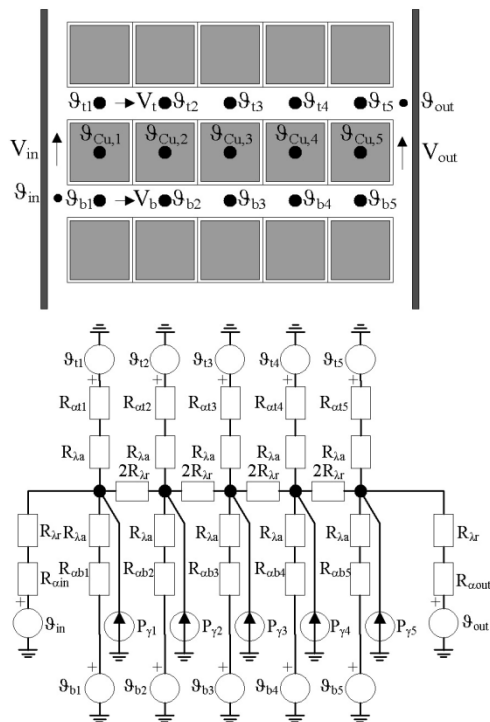
Слика 5.11 - Принцип формирања више затворених контура уља на упрошћеном примеру - две тубе уља кроз намотаје струје на горе, мешају се и формирају тубу уља која струји кроз радијаторе



Слика 5.12 - Илустрација профила промене температуре уља и густине уља по затвореним контурама уља на примеру једне контуре (намотај и радијатор); површ формиране затворене фигуре густине представља притисак који се ствара као резултат термосифонског ефекта; тај притисак се сабира са притиском који ствара пумпа (ако пумпа постоји); кроз трансформатор се успоставља проток уља при коме је укупни произведени притисак једнак паду притиска услед протицања уља кроз канале (канали за хлађење у намотајима и канали у радијатору)



Слика 5.13 - Расподела протока унутар намотаја, по радијалним каналима у намотају са баријерама за цик-цак струјање уља: изглед (приказана два проласка уља - један од унутрашње ка спољашњој страни намотаја и један од спољашње ка унутрашњој страни намотаја) и хидрауличка шема (за један од два наведена проласка уља; шема је нелинеарна јер хидраулички отпори зависе од протока кроз канале). Решавањем хидрауличке шеме добија се расподела протока по каналима, као и укупни пад притиска у делу намотаја моделованом хидрауличком шемом.



Слика 5.14 - Расподела температуре унутар једног диска који је у додиру са уљем чије су брзина кроз сваки од канала и температура поред сваког од проводника ϑ_{in} , ϑ_{out} , ϑ_{b1} , ϑ_{b2} , ϑ_{b3} , ϑ_{b4} , ϑ_{b5} , ϑ_{t1} , ϑ_{t2} , ϑ_{t3} , ϑ_{t4} , ϑ_{t5} познати (ове вредности су израчунате из хидрауличке израчунато шеме). Вредности R_{ain} , R_{aout} , R_{ab1} , R_{ab2} , R_{ab3} , R_{ab4} , R_{ab5} , R_{at1} , R_{at2} , R_{at3} , R_{at4} , R_{at5} се зависе од брзине и температуре уља. После израчунавања ових вредности, решава се систем једначина који одговара приказаној топлотној шемати. $P_{\gamma 1}$, $P_{\gamma 2}$, $P_{\gamma 3}$, $P_{\gamma 4}$ и $P_{\gamma 5}$ представљају снагу губитака у сваком од проводника диска.

Детаљније о методи може се наћи у референци [6]; доступно на <http://term-procesi.etf.rs/dokumenti/istrazivanja/RadakovicIEEEApril2010PrintedPaper.pdf>

5. 2. 3. ВРСТЕ ХЛАЂЕЊА

Обележавају се са четири велика латинична слова:

- 1) За расхладно средство у додиру са намотајем
- 2) За начин струјања расхладног средства у додиру са намотајем
- 3) За расхладно средство у додиру са спољашњом површи хладњака
- 4) Начин струјања спољашњег расхладног средства

1) Расхладно средство у додиру са намотајем:

O (*oil*) - уље

L (*liquid*) – синтетичка течност

A (*air*) - ваздух

2) Начин струјања расхладног средства у додиру са намотајем:

N (*natural*) - природно

F (*forced*) - принудно

D (*directed*) - дириговано

Када је расхладно средство у додиру са намотајем ваздух, струјање може бити природно (N) или принудно (F); карактеристично је да се принудно струјање не користи у дужим временским периодима, односно у трајном раду, већ се по правилу вентилатори укључују само кад температура пређе задату вредност (ова ситуација током рада ових сувих трансформатора представља пре изузетак него правило).

Када је расхладно средство у додиру са намотајем уље или синтетичка течност, струјање може бити природно (N), принудно (F) и дириговано (D). И у случају принудног и у случају диригованог струјања постоји пумпа, али постоји значајна разлика: код "струјања D" уље (синтетички флуид) се помоћу дистрибуционог канала са отворима усмерава директно у намотај, док се код "струјања F" уље (синтетички флуид) само упумпава у суд. Усмеравање у намотај (D) очигледно захтева додатни рад и трошак при производњи у односу на принудно (F) али омогућава повећање протока уља кроз намотај и ефикасније хлађење – уколико се код (F) примени јака пумпа постоји опасност да уље прође поред намотаја, што би довело до ниже температуре уља при врху суда (мерена вредност) него на врху намотаја; смањење температуре уља доводи до мање ефикасног искоришћења хладњака јер се смањује разлика температуре хладњака и спољњег флуида, а самим тим и снага која се преноси са јединице површи хладњака).

3) За расхладно средство споља (у случају сувог трансформатор без кућишта, тада постоји само унутрашње расхладно средство, тако да ознака хлађења садржи само два симбола – 1) и 2)):

A (*air*) = ваздух

W (*water*) = вода

4) Начин струјања спољашњег расхладног средства (у случају да је суви без кућишта, тада постоји само унутрашње расхладно средство, тако да ознака хлађења садржи само два симбола – 1) и 2)):

N (*natural*) - природно

F (*forced*) - принудно

Најчешће коришћени системи хлађења:

AN - суви трансформатор без кућишта, са природним струјањем ваздуха

ONAN - уљни трансформатор са природним струјањем уља изнутра и ваздуха споља

ONAF - уљни трансформатор са природним струјањем уља изнутра и принудним струјањем ваздуха споља

OFAF - уљни трансформатор код са принудним струјањем уља унутар суда и принудним струјањем ваздуха споља

OFWF - уљни трансформатор са принудним струјањем уља унутар суда и принудним струјањем воде споља

ODAF - уљни трансформатор са диригованим струјањем уља у намотаје и принудним струјањем ваздуха споља

Могуће је да неки трансформатор, са декларисаном максималном снагом при ODAF хлађењу ради у три режима: 1. укључене пумпе и укључени вентилатори, 2. искључене пумпе и укључени вентилатори, 3. искључене пумпе и искључени вентилатори. Уколико се таква могућност унапред превиђа, током уговора о производњи трансформатора специфицира се снага у сваком од режима и за сваки од њих стандардним огледима загревања врши провера вредности пораста температура.

У пракси се примењује и решење да се током рада трансформатора, у зависности од температуре амбијента и оптерећења, мења број вентилатора у раду, па и њихова брзина обртаја. На овај начин се може одржавати стална вредност температуре горњег уља или минимизирати губици у трансформатору – они садрже две компоненте: енергију за погон вентилатора и пумпи и губици у активном делу, који су температурно зависни.

5. 3. ПРОРАЧУН TEMPERATURE У ПРЕЛАЗНИМ ТОПЛОТНИМ РЕЖИМИМА

Из текста поглавља 5.1.2 може се закључити да је потребно пратити тренутне температуре, али и предвидети њихове вредности у будућем планираном дијаграму оптерећења. Чак и да постоје мерења критичних температура, постоји потреба за прорачуном температура у прелазним топлотним стањима – на пример предвиђање температуре за случај да оператор система мора

краткотрајно да преоптерети неки од трансформатора како би снабдевао потрошаче који су се нападали са неког другог трансформатора који је искључен због квара.

Стандарди праве разлику између прелазних топлотних режима која се понављају - на пример интермитентни рад неког индустријског погона и ванредних прелазних топлотних режима - великих преоптерећења, која се јављају ванредно и мали број пута у току експлоатације трансформатора. Примера ради, таква ситуација се има приликом повратка нападања потрошачима који су неко време били искључени са мреже. Стандарди дозвољавају више границе температура за ванредна оптерећења. При њима је дозвољено и жртвовање животног века, односно релативно старење веће од 1, јер се ти режими дешавају ретко.

5. 3. 1. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ СА ЈЕДНОМ ВРЕМЕНСКОМ КОНСТАНТОМ

Најједноставнији модел понашања трансформатора при временски променљивом оптерећењу и температури расхладног средства, који се приближно може користити за добијање временске промене температуре уља, је математички модел са једном временском константом. Овај модел се може окарактерисати и као модел у коме се трансформатор посматра као тело чија је температура константна по запремини и чији је топлотни капацитет једнак суми топлотних капацитета сваког од делова трансформатора. Ова представа је врло груба и њеном применом се не може добити вредност температура уља и намотаја, које се значајно разликују. То значи да се модел мора конципирати тако да се обухвата размена топлоте између бар два хомогена тела (међусобно и са спољашњим расхладним флуидом).

Поред претпоставке да читав трансформатор има јединствену температуру, поменути најједноставнији модел, чији детаљи следе у даљем тексту, не узима у обзир промену коефицијента преласка топлоте струјањем (α) са променом температуре. Излагање модела ће се дати на примеру да је снага губитака у периоду који се посматра константна, као и да се температура амбијента не мења. Под тим условима, једначина енергетског биланса, да је енергија генерисане топлоте у кратком временском интервалу dt , једнака производу снаге губитака P и времена dt ($P dt$) једнака збиру промене унутрашње енергије ($C d\theta$; C представља топлотни капацитет, који је једнак производу масе и специфичног топлотног капацитета $C = m c$) и енергије пренете ка спољашњем расхладном флуиду ($\alpha S \theta dt = K \theta dt$; S представља површину расхладне површи према ваздуху):

$$P dt = C d\theta + K \theta dt \quad (5.23)$$

Веза између снаге губитака и пораста температуре у устаљеном стању (тада је $d\theta = 0$) гласи $P = K \theta_{st}$. Након исказивања снаге губитака преко пораста температуре у устаљеном стању, израз (5.23) постаје

$$dt = \frac{C}{K} \frac{d\theta}{\theta_{st} - \theta} \quad (5.24)$$

Увођењем временске константе T

$$T = \frac{C}{K} = \frac{m c}{\alpha S} \quad (5.25)$$

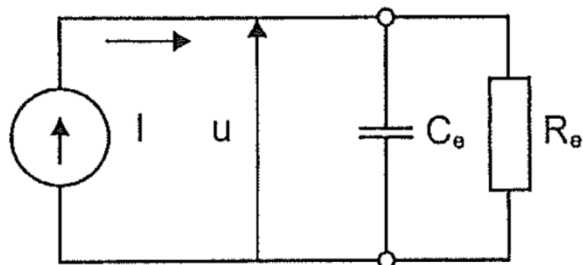
и интеграцијом претходне једначине у границама времена од почетног тренутка 0 до текућег тренутка t и границама пораста температуре од вредности у почетном тренутку θ_0 до вредности у текућем тренутку θ долази се до

$$\frac{t}{T} = \ln \left(\frac{\theta_{st} - \theta_0}{\theta_{st} - \theta(t)} \right) \quad (5.26)$$

односно

$$\theta(t) = \theta_{st} - (\theta_{st} - \theta_0)e^{-t/T} \quad (5.27)$$

Између математичких модела који описују топлотне и електричне појаве постоји аналогија, односно оне се описују сличним једначинама. Аналогно електрично коло претходно разматраног топлотног система приказано је на слици 5.15.



Слика 5.15

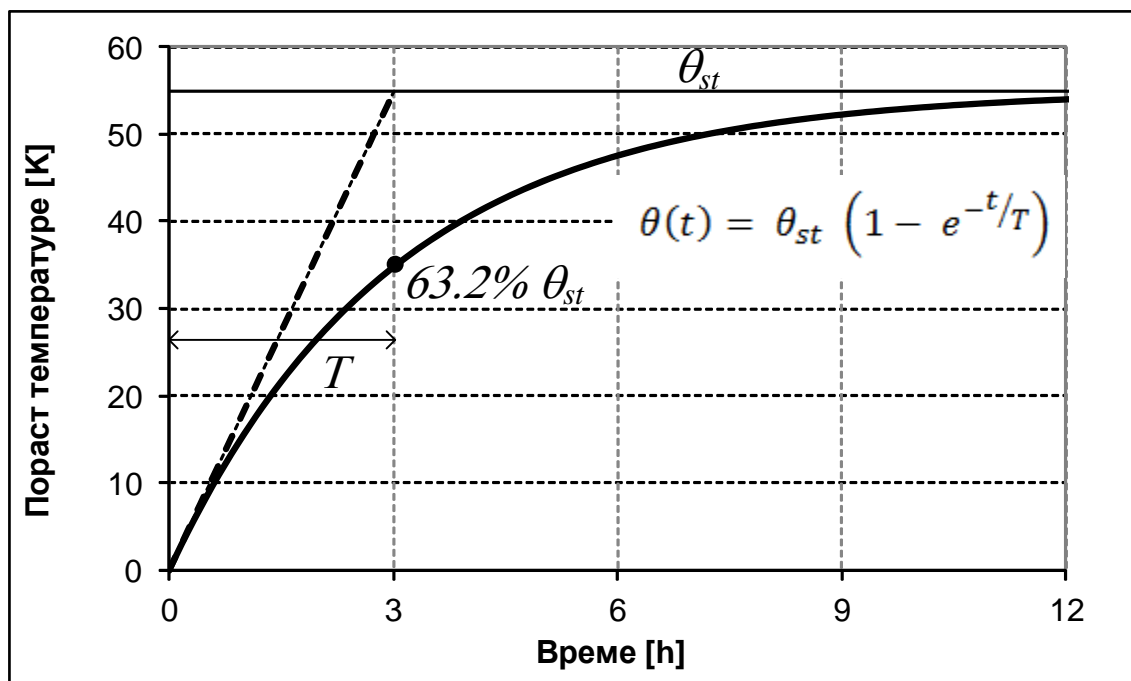
Израз (5.27) се може написати у форми

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-t/T} + \theta_{st} (1 - e^{-t/T}) \quad (5.28)$$

За вредност почетног пораста температуре $\theta_0 = 0$ (загревање из хладног стања), израз постаје

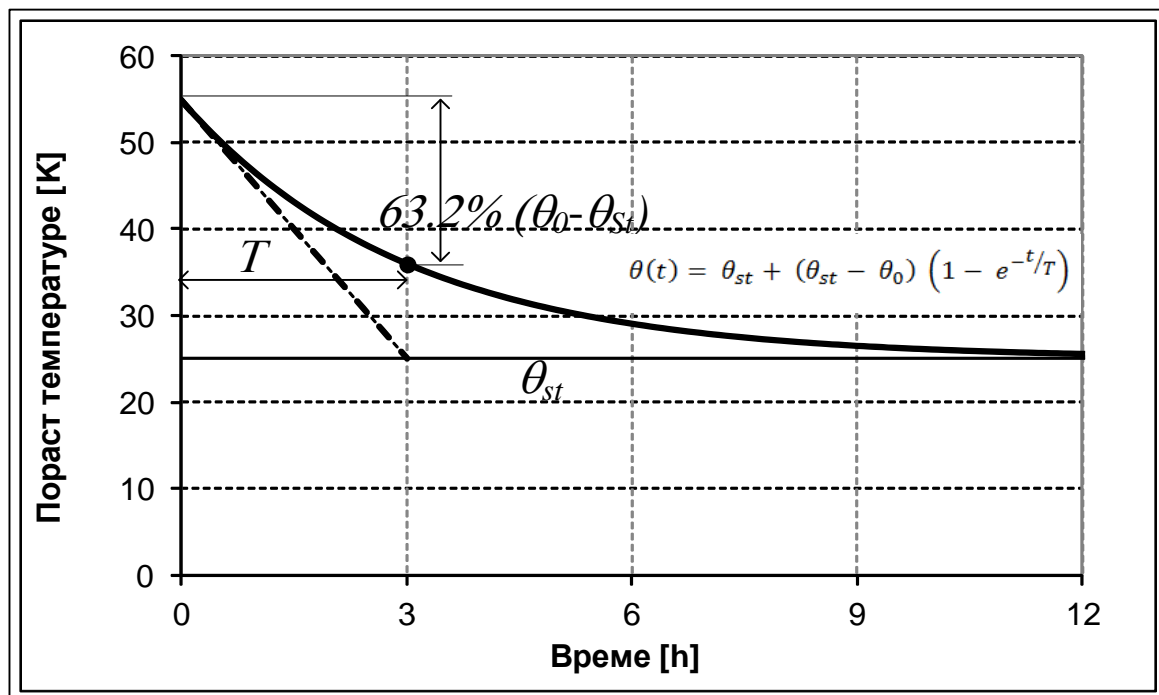
$$\theta(t) = \theta_{st} (1 - e^{-t/T}) \quad (5.29)$$

Временска промена пораста температуре која одговара случају $\theta_0 = 0$ приказана је на слици 5.16.



Слика 5.16 - Загревање трансформатора као хомогеног тела по једној временској константи, при константним губицима, константној температури амбијента и почетном стању у коме је температура била једнака температури амбијента

На слици 5.17 је приказано хлађење из почетног стања са већим порастом температуре $\theta_0 (t = 0)$ од вредности θ_{st} која се постиже у стационарном стању са оптерећењем на које је смањено оптерећење трансформатора у тренутку $t = 0$ ($\theta_0 (t = 0) = 55$ К, $\theta_{st} = 25$ К).



Слика 5.17 - Хлађење трансформатора као хомогеног тела по једној временској константи, при константним губицима и константној температури амбијента, из задатог почетног стања ($\theta_0 (t = 0) = 55$ К)

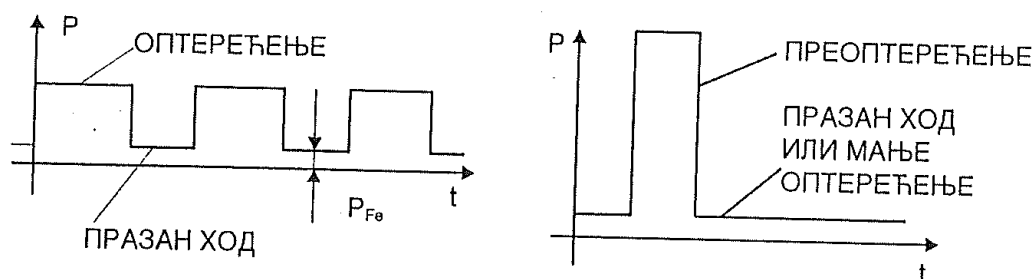
Из претходно наведених израза и слика може се закључити следеће:

- По истеку једне временске константе температура се промени од почетног пораста температуре (θ_0) за износ 63.2% разлике између стационарне вредности пораста температуре која одговара новом оптерећењу (θ_{st}) и почетног пораста температуре: ($\theta_{st} - \theta_0$)
- У почетном делу крива промене се мења приближно линеарно, при чему је нагиб праве одређен временском константом, па се временска константа може проценити на основу снимка промене пораста температуре (при порасту или при смањењу пораста температуре)
- Да би се одредила стационарна вредност пораста температуре (која одговара номиналном режиму рада, на пример), потребно је да загревање траје јако дуго (3 - 4 временске константе - за 4 временске константе пораст температуре прилази стационарном на око 2%)
- Имајући у виду да временска константа уља оријентационо износи од 3 сата, за оглед провере стационарног пораста температуре било би потребно око 4×3 сата = 12 сати. Типски оглед загревања, којим се врши провера пораста температуре у устаљеном режиму, врши се као типски оглед загревања трансформатора. Због његовог дугог трајања и трошкова енергије и заузеће испитне станице постоји интерес да се овај оглед скрати. Због тога се примењују математички поступци којима се из регистроване промене пораста температуре у времену израчунава пораст температуре у стационарном стању. Један од таквих поступака је да се у неком тренутку измери пораст температуре $\Delta\theta_1$, а после њега, у два еквидистантна тренутка измере пораста температура $\Delta\theta_2$ и $\Delta\theta_3$, пораст температуре у стационарном стању одређује се према изразу

$$\Delta\theta_{st} = \frac{\Delta\theta_2^2 - \Delta\theta_1 \Delta\theta_3}{2 \Delta\theta_2 - \Delta\theta_1 - \Delta\theta_3} \quad (5.30)$$

Препорука је да временски размак између мерења не буде много мањи од T , као и да буде испуњен услов $\Delta\theta_3 / \Delta\theta_{st} \geq 0.95$.

Описани једноставан математички модел са једном временском константом може се лако применити и на променљиве дијаграме оптерећења, као што су они приказани на слици 5.18; крајња температура израчуната за један период са константним оптерећењем представља почетну температуру за период са следећим константним оптерећењем.

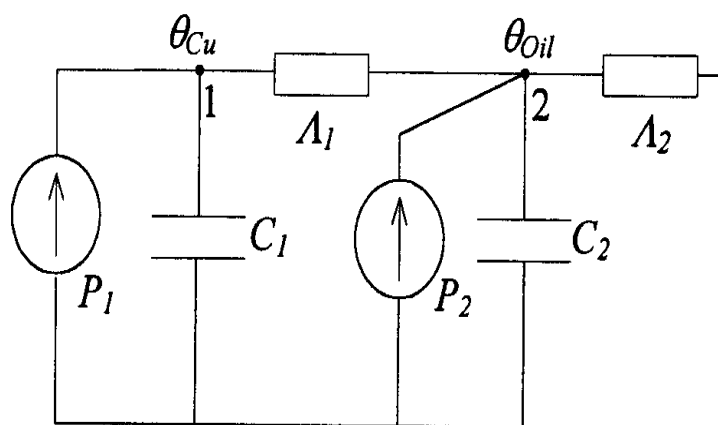


Слика 5.18 – Илустрација променљивих дијаграма оптерећења

5. 3. 2. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ СА ДВА ЧВОРА

У претходном тексту је објашњен најједноставнији модел, који, уместо две вредности пораста температуре (намотаја и уља), даје само једну, јер се трансформатор посматра као хомогено тело чија је температура иста по читавој запремини. Због тога је његова примена ограничена и могло би се рећи да служи више као модел који квалитативно описује загревање трансформатора и указује на могућност коришћења велике масе и топлотне инерције трансформатора у циљу повећања оптерећења изнад номиналног.

Минимални модел чијом се применом може одредити температура намотаја садржи два чвора: један за намотаје и један за остале делове трансформатора (уље, језгро и суд). Модел са два чвора је приказан на слици 5.19.



Слика 5.19 - Топлотна шема са два чвора (чвор 1 - намотај, чвор 2 - остали делови трансформатора)

Топлотна шема прати пренос топлоте: топлотна проводност Λ_1 описује прелаз топлоте провођењем кроз изолацију намотаја и струјањем са намотаја на уље, док топлотна проводност Λ_2 описује прелаз топлоте струјањем са уља на хладњак и суд, провођење кроз зидове хладњака и суда и струјање са њих на амбијентални ваздух. Топлотни капацитет C_1 представља топлотни капацитет намотаја, а C_2 топлотни капацитет остатка трансформатора. Снага губитака P_1 представља губитке у самим намотајима, а P_2 у осталим деловима (у језгру и услед расутог флукса у конструкционим деловима трансформатора).

У пракси се примењује и варијанта топлотне шеме са слике 5.19 из које се изоставља топлотни капацитет C_1 ; тиме се чини извесна грешка у прорачуну температуре намотаја, која је од реалног

значаја само за краткотрајна велика оптерећења (оријентационо, од 15 минута до пола сата, јер је временска константа брзог процеса пораста температуре намотаја у односу на остатак трансформатора око 5 минута; временска константа спорог процеса пораста температуре уља, језгра и суда је реда величине 3 сата). Дакле, изостављање топлотног капацитета C_1 приближно има ефекат да се израчуната вредност пораста температуре намотај - уље по промени оптерећења успостави тренутно уместо по временској константи од око 5 минута.

Било која од наведене две варијанте (са или без топлотног капацитета C_1) једноставна је за примену и једначине које одговарају топлотној шеми лако се аналитички решавају ако се задрже претпоставке да се топлотне проводности Λ_1 и Λ_2 не мењају, односно да је топлотни систем линеаран. Изрази за промену температуре ће се дати за случај константних снага губитака и загревање из почетног стања у коме се трансформатор налазио на температури амбијента. Константна снага губитака би одговарала константном оптерећењу трансформатора, при чему није уважена зависност губитака од температуре.

Пораст температуре намотаја за случај да се C_1 везује у чвор 1, као што је приказано на слици 5.19., приближно (апроксимација је доста добра јер је $C_1 \ll C_2$) гласи:

$$\theta_{Cu}(t) = \theta_{Cu-u} \left(1 - e^{-t/T_{Cu}}\right) + \theta_u \left(1 - e^{-t/T_{u1}}\right) \quad (5.31)$$

$$T_{Cu} = \frac{C_1}{\Lambda_1} = \frac{m_{Cu} c_{Cu}}{\Lambda_1} \quad (5.32)$$

$$T_{u1} = \frac{C_2}{\Lambda_2} \quad (5.33)$$

$$\theta_{Cu-u} = \frac{P_1}{\Lambda_1} \quad (5.34)$$

$$\theta_u = \frac{P_1 + P_2}{\Lambda_2} \quad (5.35)$$

Пораст температуре намотаја за случај да се занемари C_1 ,

$$\theta_{Cu}(t) = \theta_{Cu-u} + \theta_u \left(1 - e^{-t/T_{u1}}\right) \quad (5.36)$$

или изостави из чвора 1 и придружи капацитету C_2 :

$$\theta_{Cu}(t) = \theta_{Cu-u} + \theta_u \left(1 - e^{-t/T_{u2}}\right) \quad (5.37)$$

$$T_{u2} = \frac{C_2 + C_1}{\Lambda_2} \quad (5.38)$$

Занемарење мале временске константе T_{Cu} не доводи до значајне грешке за температуру намотаја у периоду после (3 - 4) $T_{Cu} \approx 15 - 20 \text{ min}$.

Примена израза

$$\theta_{Cu}(t) = (\theta_{Cu-u} + \theta_u) \left(1 - e^{-t/T_u}\right) \quad (5.39)$$

би, без обзира да ли се за T_u узима T_{u1} или T_{u2} , доводи до значајне грешке за $\theta_{Cu}(t)$, јер се уместо стварне брзе промене компоненте $\theta_{Cu-u} \left(1 - e^{-t/T_{Cu}}\right)$ узима да се овај сабирак споро мења у

времену: $\theta_{Cu-u} \left(1 - e^{-t/\tau_u}\right)$; резултат је да се температура намотаја током прелазног топлотног процеса потцењује.

Побољшање модела, које воде ка тачнијим резултатима прорачуна, али, као што је за очекивати, по цену његовог усложњавања, је увођење зависности топлотних проводности (пре свега због температурне зависности коефицијената преласка топлоте струјањем) од температуре:

$$\Lambda_1 = K_1(\theta_{Cu} - \theta_{Oil})^{n_1} \quad (5.40)$$

$$\Lambda_2 = K_2\theta_{Oil}^{n_2} \quad (5.41)$$

Топлотне проводности зависе не само од пораста и разлике температура, већ и од апсолутних температура, јер од њих зависе термичке карактеристике уља и ваздуха (пре свега њихова вискозност); због тога се у пракси, као приближни приступ, може срести примена два скупа параметара топлотних проводности - "зимски" и "летњи", као једно од „унапређења модела“.

Параметри K_1 , n_1 , K_2 , n_2 , C_1 и C_2 се могу одредити из резултата огледа загревања (на пример, из вредности θ_{Cu} и θ_{Oil} измерених током прелазног процеса у току загревања трансформатора са кратко спојеним нисконапонским намотајем; ово је могуће применом методе континуалног инјектирања једносмерне мерне струје, којом се током читавог огледа може регистровати промена средње температуре намотаја).

Опционо, параметри K_1 , n_1 , K_2 и n_2 се могу одредити из резултата прорачуна базираног на детаљном термо-хидрауличком моделу [6], а топлотни капацитети C_1 и C_2 из конструкционих параметара трансформатора (преко масе и специфичног топлотног капацитета материјала $\Sigma(m c_p)$); вредности C_1 и C_2 добијене на тај начин нису тачне јер су чворовима топлотне шеме придружене карактеристичне (најтоплије) тачке намотаја и уља, што значи да је за добијање исте акумулисане енергије по заменској топлотној шеми и у реалности потребно да C_1 и C_2 буду мањи од вредности добијених као $\Sigma(m c_p)$). Оријентационо, типична вредност параметра n за природно струјање износи 0.25, док је за пренос топлоте принудним струјањем овај параметар мањи, и смањује се ка нули, што значи да се топлотна проводност приближава константној вредности, независној од оптерећења трансформатора.

Следеће побољшање модела је увођење температурне зависности губитака, пре свега P_1 , који се рачунају на основу оптерећења и температуре намотаја.

Увођење температурне зависности топлотних проводности и губитака доводи до тога да једначине више није могуће решавати аналитички, већ само нумерички. Нумеричко решење једначина гласи

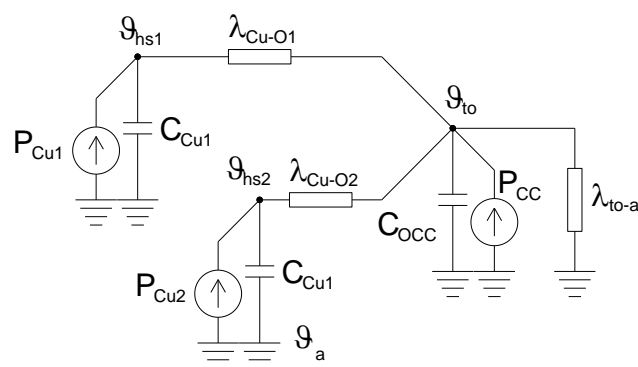
$$\begin{aligned} \theta_{Cu,k+1} &= \theta_{Cu,k} + \frac{\Delta t}{C_1} \cdot \left(P_1 - \lambda_{1,k} \cdot (\theta_{Cu,k} - \theta_{Oil,k}) \right) \\ &= \theta_{Cu,k} + \frac{\Delta t}{C_1} \cdot \left(P_1 - K_1 \cdot (\theta_{Cu,k} - \theta_{Oil,k})^{n_1+1} \right), \end{aligned} \quad (5.42)$$

$$\begin{aligned} \theta_{Oil,k+1} &= \theta_{Oil,k} + \frac{\Delta t}{C_2} \cdot \left(P_2 + \lambda_{1,k} \cdot (\theta_{Cu,k} - \theta_{Oil,k}) - \lambda_{2,k} \cdot (\theta_{Oil,k} - \theta_{a,k}) \right) \\ &= \theta_{Oil,k} + \frac{\Delta t}{C_2} \cdot \left(P_2 + K_1 \cdot (\theta_{Cu,k} - \theta_{Oil,k})^{n_1+1} - K_2 \cdot \theta_{Oil,k}^{n_2+1} \right). \end{aligned} \quad (5.43)$$

Топлотне проводности λ_1 и λ_2 и снаге губитака P_1 и P_2 се током времена мењају, односно њихова вредност се израчунава у сваком тренутку $k \Delta t$ (нумеричким поступком температуре се израчунавају у дискретним временским тренуцима $(k + 1) \Delta t$, $k = 0, 1, 2, \dots$; почетне температуре морају бити познате).

Иако бољи, ни описани топлотни модел са два чвора не решава проблем неравномерности температуре по висини, односно феномена који се тичу динамике промене температуре. Због разлике динамике промене температуре горњег уља у цефу (које се увек мери) и уља на врху намотаја (за које је ретко доступна мерена вредност) у функцији разлике температура најтоплије тачке изолације и уља у цефу појављује се пребачај, што је разматрано у стандарду [1], где је дат и поступак којим је покушано да се овај феномен математички опише. Претходно приказане шеме са два чвора, при коме је један придружен најтоплијој тачки изолације, а други уљу у цефу, не описују наведени пребачај. Предлог решења, заснован на примени температуре доњег уља, дат у референци [7]; доступно на http://term-procesi.etf.rs/dokumenti/istrazivanja/paper_2.pdf

Поменимо још један аспект "напредног термичког моделовања" - температуре намотаја нису исте (зависе од конструкције намотаја), што значи да би сваки од намотаја требало представити посебним чвором - на пример, топлотна шема трансформатора са два намотаја (нисконапонским (НН) и високонапонским (ВН)) би имала три чвора - слика 5.20.



Слика 5.20 - Топлотна шема са три чвора (чвор 1 (G_{hs1}) - НН намотај, чвор 2 (G_{hs2}) - ВН намотај, чвор 3 (G_{to}) - остали делови трансформатора)

Механизам преноса топлоте код сувих трансформатора доста се разликује од механизма преноса топлоте код уљних трансформатора. Неке од битних разлика су:

- 1) Код сувих трансформатора расхладни флуид (ваздух) по правилу не кружи, већ у расхладне канале у активним деловима улази ваздух температуре амбијента, који из канала за хлађење на врху активних делова излази у слободан простор.
 - 2) Не постоји велика топлотна инерција, односно она је мања него код уљних трансформатора, и огледа се пре свега кроз утицај језгра: утицај загревања језгра, односно његове температуре, на загревање намотаја зависи и од конструкције трансформатора, пре свега од броја изолационих цилиндара између језгра и намотаја који је најближи језгру.
 - 3) Код сувих трансформатора утицај преноса топлоте зрачењем постаје значајан, односно мора се уважити у термичким прорачунима.
- Због тога за суве трансформаторе постоје посебни стандарди за типске огледе загревања [8] и за оптерећивање трансформатора [9].

5. 4. ДИМЕНЗИОНА АНАЛИЗА

Од практичног је интереса постојање једноставних поступака помоћу којих се може извршити процена основних параметара трансформатора као што су димензије и цена, у зависности од снаге трансформатора.

Анализа се заснива на претпоставци да су магнетна индукција у магнетном колу и густина струје константне величине. Сматра се да се број навојака не мења, тако да пораст струје значи сразмерно повећање пресека проводника, док повећање напона значи сразмерно повећање пресека магнетног кола. Означимо са k однос линеарних димензија два трансформатора различитих напона и струја ($k = l' / l$). Везе између појединих карактеристичних вредности трансформатора и односа линеарних димензија k приказане су у табели 5.1.

Табела 5.1. – Димензиона анализа по критеријуму (1)

Р. бр.	Величина	Формула	Однос
1	Густина струје	J	1
2	Густина флукса	B_m	1
3	Површина пресека и хлађења	$S=K l^2$	k^2
4	Запремина и маса	$M=\gamma V=C l^3$	k^3
5	Струја	$I=J S_{Cu}$	k^2
6	Флукс и (индуковани) напон	$U=c \omega \phi = C B_m S_{Fe}$	k^2
7	Привидна снага	$S_n=U I$	k^4
8	Отпорност	$R=N \rho l / S_{Cu}$	$1/k$
9	Губици у бакру	$P_{Cu}=R I^2$	k^3
10	Губици у гвожђу	$P_{Fe}=B_m^2 V$	k^3
11	Пораст температуре	$\theta=(P_{Cu} + P_{Fe}) / (\alpha S)$	k
12	Релативни губици	$p=(P_{Cu} + P_{Fe}) / S_n$	$1/k$
13	Релативна цена	$\xi=M / S_n$	$1/k$
14	Реактанса расипања	$X_\sigma=(K \delta' / h) D_m$	k
15	Релативна реактанса расипања	$x_\sigma=X_\sigma I / U$	k
16	Релативна снага	$p=S_n / M$	k
17	Реактанса магнећења	$X_\mu=\mu \omega N^2 S / l$	k
18	Релативна реактанса магнећења	$x_\mu=X_\mu I / U$	k
19	Релативна струја магнећења	$i_\mu=1 / x_\mu$	$1/k$
20	Термичка временска константа	$T_{th}=C / K=c M / S$	k
21	Електрична временска константа	$T_{el}=x_\sigma / (\omega R)$	k^2

Коментар: површина за хлађење S расте са k^2 јер је једнака $S = a b + a H + b H$, где су a дужина трансформатора, b ширина трансформатора и H висина трансформатора. Дакле, ако све димензије трансформатора расту линеарно (за фактор k), површина за хлађење расте са фактором k^2 . Слично расуђивање примењено је и на остале величине у табели 5.1.

Неки од интересантнијих закључака из табеле 5.1. су:

- Привидна снаге расте сразмерно са k^4 ;
- Однос снаге и масе (цене) расте сразмерно са k ;
- Однос губитака у односу на снагу опада са $1 / k$;
- Пораст температуре расте сразмерно са k ;
- Термичка временска константа расте сразмерно са k ;
- Релативна струја магнећења опада сразмерно са $1 / k$;

Један од најважнијих параметара је однос снаге и цене. Из наведеног се закључује да цена по јединици снаге опада са порастом снаге и димензија трансформатора; то значи да би један трансформатор веће снаге био јефтинији од два трансформатора чије су снаге једнаке половини снаге великог трансформатора.

Линеарна димензија је сразмерна са четвртим кореном привидне снаге (позиција (7) у табели 5.1.):

$$l = A \sqrt[4]{P_s}. \quad (5.44)$$

Треба приметити да температура расте са параметром k . То значи да би у случају да се не предузму мере интензивирања хлађења температура прешла граничну вредност. Дакле, мора се повећати производ коефицијента преласка топлоте струјањем. То се може учинити интензивирањем хлађења (постављањем вентилатора, на пример) или повећањем расхладне површи (број радијатора, на пример).

Ако се не би додавала расхладна површ (применом радијатора), већ се трансформатор хладио само са страница паралелоипеда, расхладна површ би била $S = 2 \cdot (a \cdot b + a \cdot H + b \cdot H)$. Номинални пораст температуре би се могао постићи и смањењем губитака. Ако би се густина струје и магнетна индукција смањили $1 / \sqrt{k}$ пута, губици би били мањи k^2 пута (уместо k^3 пута, што је случај када се густина струје и магнетна индукција не мењају). У табели 5.2. приказана су промене карактеристичних величина уколико се изврши смањење густине струје и магнетне индукције $1 / \sqrt{k}$ пута, уз одржавање граничне температуре без интервенције на расхладном систему (повећање расхладне површине или интензитета хлађења). У оваквом случају, однос снаге трансформатора и цене био би константан, односно не би опадао са снагом.

Табела 5.2. – Димензиона анализа по критеријуму (2)

Р. бр. (из табеле 5.1)	Величина	Формула	Однос
11	Пораст температуре	$\theta = (P_{Cu} + P_{Fe}) / (\alpha S)$	1
9, 10	Губици у бакру и гвожђу	$P_g = K S$	K^2
8	Отпорност	$R = N \rho l / S_{Cu}$	$1/k$
5	Струја	$I = \sqrt{(P_g / R)}$	$k^{3/2}$
1	Густина струје	$J = I / S_{Cu}$	$1/\sqrt{k}$
2	Густина флукса	$B_m = \sqrt{(P_{Fe} / V)}$	$1/\sqrt{k}$
6	Флукс, напон	$\phi_m = B_m S$	$k^{3/2}$
7	Привидна снага	$S_n = U I$	k^3
16	Релативна снага	$p = S_n / M$	1
12	Релативни губици	$p = (P_{Cu} + P_{Fe}) / S_n$	$1/k$

Литература:

- [1] IEC 60076-7, Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers, Edition 2.0, 2018-01.
- [2] Vasovic, V., Lukic, J., Mihajlovic, D., Pejovic, B., Radakovic, Z., Radoman, U., Orlovic, A.: Aging of transformer insulation — experimental transformers and laboratory models with different moisture contents: Part I — DP and furans aging profiles, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 26, No. 6 (2019), pp. 1840-1846. DOI: 10.1109/TDEI.2019.008183
- [3] Vasovic, V., Lukic, J., Mihajlovic, D., Pejovic, B., Milovanovic, M., Radoman, U., Radakovic, Z.: Aging of transformer insulation of experimental transformers and laboratory models with different moisture contents: Part II — moisture distribution and aging kinetics, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 26, No. 6 (2019), pp. 1847-1852. DOI: 10.1109/TDEI.2019.008184
- [4] IEC 60076-2 ed3.0, Power transformers - Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers, 2011-02.
- [5] Radakovic, Z., Radoman, U., Kostić, P. (2015): Decomposition of the Hot-Spot Factor, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 30, No. 1, 403-411.
- [6] Z. Radakovic, M. Sorgic (2010): Thermal-Hydraulic Model for Thermal Design of Oil Power Transformers, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 25 (April), Issue 2, pp. 790-802
- [7] Radakovic, Z., Feser, K. (2003): A new method for the calculation of the hot-spot temperature in power transformers with ONAN cooling. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 18, No. 4, 1284-1292.
- [8] IEC 60076-11 ed1.0, Power transformers - Part 11: Dry-type transformers, 2004-05.
- [9] IEC 60076-12 ed1.0, Power transformers - Part 12: Loading guide for dry-type power transformers, 2008-11.