

Испит спремат по овом тексту.

Делове текста између маркера

и

прочитати информативно (из тог дела градива се неће 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. У устаљеном стању, комплетна количина топлота која се генерише услед губитака енергије одводи се у околину. Као што ће се видети, механизми преноса топлоте су такви да су увек повезани са падом температуре на местима преласка топлоте са топлијег на хладније тело. Са друге стране, за сваки од примењених материјала, пре свега чврсте изолације и расхладног флуида (уља), постоје граничне вредности температуре које се не смеју прећи, како се не би десило тренутно оштећење трансформатора, али и како би се избегло њихово убрзано старење и смањено његов животни век трансформатора. При прорачуну и експлоатацији трансформатора потребно је познавати механизме загревања, односно поседовати нумеричке методе за израчунавање карактеристичних температура, односно проверу да ли су оне испод дозвољених вредности.

У поглављу 4 објашњено је 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 електромоторне силе која је резултат промене флукса кроз магнетно коло: $P_{Fe} \sim E^2$. У пракси се ова зависност уобичајено не узима у обзир, већ се термички прорачуни обично врше претпостављајући да су губици у магнетном колу једнаки номиналним губицима, одређеним у огледу празног хода при номиналном напону, номиналној позицији регулатора напона и номиналној учестаности.

Губици у намотају се састоје од две компоненте (обе су сразмерне квадрату ефективне вредности струје): Цулових губитака, одређених као производ отпора намотаја једносмерној струји и квадрата струје, и допунских губитака, који су последица магнетног поља у зони проводника намотаја (зона расутог флукса). Обе компоненте губитака у намотају зависе од специфичне електричне отпорности ρ (прва је сразмерна, а друга обрнуто сразмерна са ρ), која расте 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 (и језгра и конструкционих делова) мења са променом температуре. Ова зависност није интензивна, пре свега у смислу укупних утицаја на загревање, па се у пракси обично не узима у обзир.

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 $3 U_{nf} I_{nf}$ за трофазне трансформаторе).

Овај производ је практично исти за примар и секундар, односно утицај одступања карактеристика реалног од идеалног трансформатора (занемарени отпори, реактансе расипања и грана магнећења), у смислу снаге која се преноси кроз трансформатор је мали, па се може занемарити. Дакле, може се сматрати да са великом тачношћу 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, одакле следи да постоји и веза између снаге трансформатора дефинисане преко напона и струје, и снаге трансформатора дефинисане преко граничних вредности температуре (максималних температура које се смеју достићи).

Повећање снаге трансформатора повећањем напона преко номиналног би имало више негативних последица, при чему би се повећано загревање могло окарактерисати као мање штетно од других лоших ефеката:

- Несразмерно велико повећање губитака у гвожђу
- Несразмерно велико повећање струје магнећења и реактивне снаге потребне за магнећење магнетног кола
- Повећање буке услед магнетострикције магнетног кола

Идеја да се снага повећа тако да се смањи напон и губици у магнетном колу, а на рачун тога повећа струја и снага која се преноси трансформатора није реална, из два разлога:

- Са становишта укупних губитака, и последичне температуре уља, снага губитака у магнетном колу је много мања од снаге губитака у намотају (при номиналној струји), тако да би се због велике промене напона врло мало могла повећати струја
- Други разлог је што су губици у намотајима лоцирани на критичним местима, у околини најтоплије тачке намотаја, док загревање језгра по правилу није критично. Дакле, смањење губитака у језгру практично нема никаквог утицаја јер смањује и онако мале температуре

у магнетном колу, док повећање губитака у намотају директно доводи до повећања критичне вредности температуре најтоплије тачке.

Повећање струје трансформатора изнад номиналне у принципу није препоручљиво, јер доводи до повећања губитака и загревања, и то на најугроженијем месту, на изолацији проводника.

Ипак, постоје ситуације када је то могуће, и сасвим безбедно. У пракси се ово дозвољава да струја повремено буде већа од номиналне. Потреба за овим се јавља, на пример, када оптерећење на секундару расте због прикључења нових потрошача или при хаваријским режимима рада у којима трансформатор треба да преузме оптерећења неког трансформатора на коме је дошло до квара и који је испао из погона. У одређеним ситуацијама повећање струје преко номиналне не доводи до прекомерног загревања и погоршавања својстава изолације:

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 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 номиналне (вредности при којој се има нормално старење изолације). То је последица прорачуна током којих се по правилу усвајају вредности на страну сигурности. Дакле, струја може бити већа од њене номинално декларисане вредности, а да температура буде мања или једнака номиналној.

3) Температура амбијента може бити мања, на пример у зимским месецима, 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 за примењени тип изолације.

4) У краћим временским периодима је дозвољено да температура изолације буде већа од номиналне температуре, јер по правилу постоје периоди мањег оптерећења, у којима је температура мања од номиналне, па је и слабење својстава изолације у тим периодима мањег интензитета. Деградиција изолације, као кумулативни ефекат у периодима са убрзаном деградацијом и периодима са деградацијом споријом од нормалне, на тај начин може бити нормална или чак спорија (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 тренутно долази до оштећења изолације, али и кумулативни ефекат погоршања својстава изолације не треба да буде већи од планиране вредности ако трансформатор ради у цикличном раду (на пример у интермитентном режиму рада) са периодима преоптерећења у току циклуса.

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, као и температура најтоплијег места у уљу), испод дозвољених. За трофазне трансформаторе до 100 MVA у стандардима за оптерећивање трансформатора (IEC 60076-7, последње издање из децембра 2019. 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**. 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** или **везе између намотаја и проводних изолатора**, који имају мању топлотну инерцију и могу достићи недозвољено високе температуре.

5. 1. 2. ТЕРМИЧКА ЗАШТИТА ТРАНСФОРМАТОРА

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. О граничним вредностима и заштити трансформатора се детаљније говори у одељку 5.1.3.

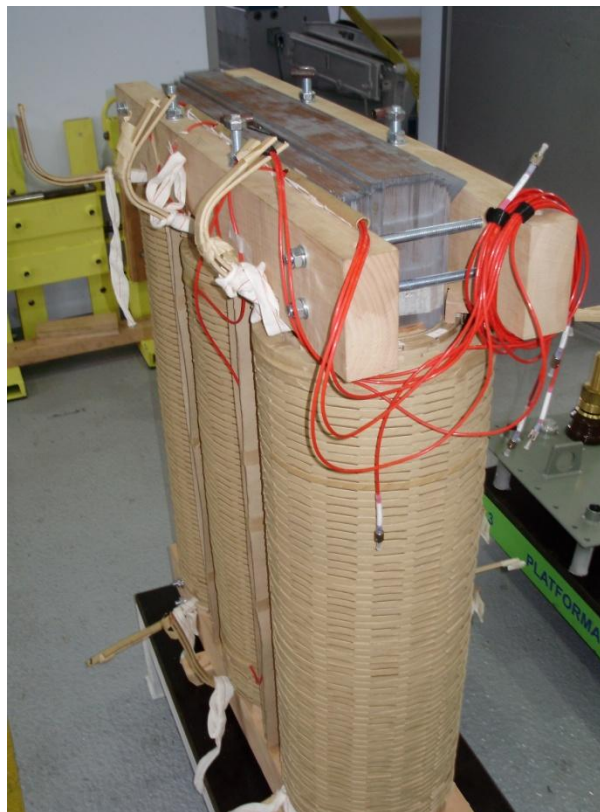
Критичне вредности температура се јављају на местима где су присутни високи напони према маси, због чега се не смеју применити сензори на бази метала (уобичајени сензори садрже металне делове). Поред тога, ни веза сензора са мерним уређајем, који се налази ван трансформатора, не сме бити остварена металним проводницима. Разлог је што би присуство метала довело до ремећења расподеле јаких електричних и магнетних поља унутар трансформатора, што може да изазове проблеме у раду трансформатора, па чак и диелектрични пробој. Јака магнетна поља на месту постављања металних сензора могу да изазову индуковане струје, последично загревање и повишење температуре - температура сензора би тада била виша од места на које је сензор постављен, па тиме би се добили лоши резултати мерења температуре. Због тога се у пракси као сензори за мерење температуре најтоплијих тачака изолације намотаја користе **оптички сензори (fiber-optics)** (слика 5.1).



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 је прошло доста времена (двадесетак 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.

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 које се уводи горње уље се поставља 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 вредности измерене температуре горњег уља и вредности измерене струје оптерећења. Ове вредности се могу једноставно измерити, односно њихове вредности добити у микроконтролеру као број. То се може остварити коришћењем класичних мерних сензора температуре и мерних претварача. Температура се у електрични сигнал (отпор или напон) добија помоћу термоотпорника или помоћу термопарова. Мерним претварачима вредност ове електричне величине се преводи у једносмерни напон / струју, прилагођену улазним тачкама микроконтролера (на пример 0 – 10 V или 4 – 20 mA). Информација о струји се добија применом струјних мерних трансформатора, који на секундару имају, на пример, струју мрежне учестаности и ефективне вредности 1 A или 5 A. Струја на секундару струјног трансформатора се, опет помоћу мерног претварача, претвара у једносмерни напон / струју 0 – 10 V или 4 – 20 mA. По правилу, мерни претварачи генеришу сигнал који је сразмеран електричној величини на његовим улазним крајевима. Добијени једносмерни сигнали напона или струја се доводе на аналогно - дигиталне конверторе микроконтролера, где се врши аналогно - дигитална конверзија и у микроконтролеру добија број из кога се прерачунавањем по коефицијентима конверзије претварача добија вредност температуре горњег уља / струје кроз намотај.

5. 1. 3. ГРАНИЧНЕ ВРЕДНОСТИ TEMПЕРАТУРЕ И СТАРЕЊЕ ИЗОЛАЦИЈЕ

Максимално дозвољене вредности су различите за различите материјале и делове трансформатора. По правилу, најкритичније су **температуре чврсте изолације и уља**, које зависе од типа материјала примењене чврсте и течне изолације. Поред те две температуре, постоје и ограничења температуре **језгра** и **конструкционих делова**, али су те граничне температуре много више. Пројектовање и провера хлађења језгра и намотаја се може сматрати задатком који се решава током пројектовања хлађења, док се провера температуре конструкционих делова пре може сматрати темом конструкције (пре свега каналисања расутог флуksа), него проблем пројектовања хлађења.

Једна од мера за спречавање загревања конструкционих делова је **постављање екрана од магнетних лимова или шина од метала малог специфичног електричног отпора** (бакар, алуминијум) на унутрашњој страни суда, у зони малог растојања између намотаја и суда. Ови

екрани спречавају појаву зона са великим магнетним пољем и флуksom у суду, због којих би се појавиле велике 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 оштећење 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, а смер на страни од суда према уљу је по правилу ка уљу, на тај начин изазивајући загревање уља).

Лоши контакти или **слаба изолација** такође могу да изазове негативне ефекте. На лошим контактима кроз које протиче струја се због великог прелазног отпора јавља 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.

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 :

$$V = k e^{\left(A + \frac{B}{T}\right)} \quad (5.1)$$

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 се трансформатор мора заменити, односно да се морају израдити нови намотаји)

$$V = c e^{-p \vartheta} \quad (5.2)$$

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 пракси је погодно исказати век изолације као релативну вредност у односу на век изолације које 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 се често примењује вредност **релативног старења (RS)**, дефинисана као реципрочна вредност релативног века изолације:

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

Пример: у периоду у коме је температура ϑ мања од номиналне за 6 К, $RS = 0.5$, а у периоду у коме је температура ϑ већа од номиналне за 6 К, $RS = 2$; уколико је трајање ова два периода иста (T), средња вредност t -релативног старења у периоду $2T$ износи $(0.5 + 2) / 2 = 1.25 > 1$.

Ако се за животни век трансформатора који ради у режиму са приближно константном температуром најтоплије тачке изолације једнакој номиналној ($\vartheta_n = 98 \text{ }^\circ\text{C}$) као реална процени вредност од 30 година, може се одредити константа c :

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

Према важећем ИЕС стандарду за оптерећивање трансформатора (ИЕС 60076-7 [1]), старење изолације намотаја (папира) се одређује на основу температуре најтоплије тачке изолације намотаја. У стандарду се констатује да на старење **утиче и садржај влаге, кисеоника и киселина**. У верзији стандарда из децембра 2018. Године, по први пут, у Анексу А стандарда се дају изрази и вредности параметара у зависности од садржаја влаге и присуства кисеоника:

Табела 5. 1

Table A.1 – Activation energy (E_A) and environment factor (A) for oxidation, hydrolysis

Paper type/ageing parameters		Free from air and 0,5 % moisture	Free from air and 1,5 % moisture	Free from air and 3,5 % moisture	With air and 0,5 % moisture
Non-thermally upgraded paper	A (h^{-1})	$4,1 \times 10^{10}$	$1,5 \times 10^{11}$	$4,5 \times 10^{11}$	$4,6 \times 10^5$
	E_A (kJ/mol)	128	128	128	89
Thermally upgraded paper	A (h^{-1})	$1,6 \times 10^4$	$3,0 \times 10^4$	$6,1 \times 10^4$	$3,2 \times 10^4$
	E_A (kJ/mol)	86	86	86	82

$$V = \frac{k}{k_r} = \frac{A}{A_r} e^{\frac{1}{R} \times \left(\frac{E_r}{\theta_{n,r} + 273} - \frac{E}{\theta_n + 273} \right)} \quad (5.8)$$

Постоје публиковани резултати истраживања у вези са наведеним утицајима, али у стручној јавности још увек није постигнут консензус о поузданој и довољно тачној методи, која би као препоручена ушла у стандарде, како уважити утицај влаге, кисеоника и киселина на процес старења изолације. Вредности из Анекса А су дате као пример зависности, а не као коначни и поуздани изрази препоручени за примену у пракси. Данас постоје методе и системи за аутоматски надзор стања трансформатора, који обухвата праћење гасова у уљу и садржај фурана, као и праћење садржаја влаге и киселина. Са друге стране, један од кључних параметара на основи којих се утврђује стање чврсте изолације је његов индекс деполимеризације, који се одређује у лабораторији на узорку изолације који се узима на најкритичнијем месту у трансформатору. Поред тога, постоје и друге методе које говоре о стању изолационог система, као што је отпор изолованости. За очекивати је да ће на основу великог скупа података који се мониторинг системом прикупљају током рада трансформатора и мерења која се спроводе периодично (на пример, поменути индекс деполимеризације и отпор изолованости) довести до утврђивања законитости старења и методологије за одређивање старења изолације која поред температуре најтоплије тачке уважава и присуство влаге, кисеоника и киселина.

Поред једначине (5.6), у стандардима се даје још један израз, који важи за термички побољшани папир; за израз (5.6) се наводи да важи за нормални крафт 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):

$$RS = e^{\left(\frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\vartheta_v+273} \right)} \quad (5.9)$$

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

$$RS = \frac{1}{24 \cdot 60} \sum_{i=1}^{24 \cdot 60} RS_i = \frac{1}{1440} \sum_{i=1}^{1440} 2^{\frac{\vartheta_{vi} - 98^\circ\text{C}}{6}} \quad (5.10)$$

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 $\vartheta_n = 98\text{ }^\circ\text{C}$. Ова температура представља једно од основних својстава изолације и у стандардима постоји класификација типова изолације према вредности ове температуре. У следећој табели су приказане класе изолације према стандарду ИЕС 60085 из 2004. године. Изолација од крафт папира импрегнирана у уљу спада у класу А. С обзиром на дефиницију RTE и поменуте факторе који нису обухваћени у законитостима старења изолације (садржај влаге, кисеоника и киселина), може се видети да ситуација у погледу дефинисања номиналне температуре није тако једноставна, односно да постоје јаки разлози (непознат садржај и утицај влаге, кисеоника и киселина) да се за температуру при којој се има нормално старење не узима вредност од $105\text{ }^\circ\text{C}$, што одговара класи А, већ да се узме одређена сигурносна маргина и примени мања вредност $98\text{ }^\circ\text{C}$.

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 би довели до електричног пробоја уколико би мехурови дошли у зоне јаког електричног поља (што је веома вероватно).

Табела 5.2 - Термичка класификација електричних изолационих материјала

RTE	Термичка класа изолације	Ознака коришћена у претходним стандардима
< 90	70	
>90-105	90	Y
>105-120	105	A
>120-130	120	E
>130-155	130	B
>155-180	155	F
>180-200	180	H
>200-220	200	
>220-250	220	
>250	250	

RTE - релативни индекс термичке издржљивости (Relative thermal endurance index), дефинисан у стандарду: практично, он представља вредност температуре (y °C) при којој се има нормални (задовољавајући) животни век материјала у специфицираној примени (стварним експлоатационим условима)

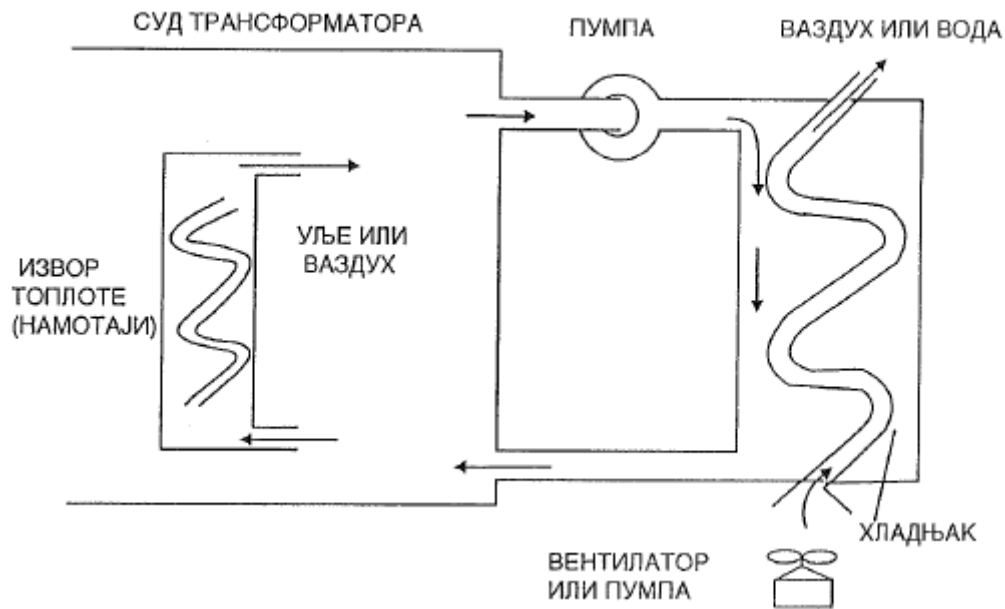
Слична ситуација као за чврсту изолацију се јавља и за **течни изолациони материјал (уље)**, за које такође постоји температура при којој долази до нормалне деградације, као и максимална температура која се не сме прећи како не би дошло до тренутног оштећења трансформатора или до паљења уља. Оријентационе вредности граничне температуре изолационе течности износе: за минерална уља 105 °C, за естре 130 °C и за силиконска уља 155 °C. Примена чврсте изолације више термичке класе (номекс, на пример, има граничну температуру 180 °C) логично са собом повлачи потребу за применом уља са вишим граничним вредностима температуре (наиме, код добро пројектованих трансформатора разлика температуре између намотаја и уља не треба да има велику вредност – могло би се рећи да она оријентационо не треба да буде већа од 30 K. Последично, разлика дозвољених температура чврсте изолације и изолационих флуида који се користе у трансформатору не треба да пређе тих 30 K, што значи да примена чврсте изолације више класе треба да буде праћена применом више термичке класе изолационог флуида.

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. Загревање настаје као последица губитака снаге (P_s) у трансформатору и да би се они пренели са места где се генеришу (температура ϑ) до спољашњег расхладног флуида (температура ϑ_0) мора да постоји разлика температура. Може се написати

$$P_{\gamma} \sim \vartheta - \vartheta_0 \quad (5.11)$$

С обзиром да губици зависе од снаге (оптерећења трансформатора), 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

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_0 - температура спољашњег расхладног флуида ($^{\circ}\text{C}$)

θ - пораст температуре у односу на спољашњи расхладни флуид: $\vartheta - \vartheta_0$ (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, као ни да 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.

Такође, на основу неравномерности загревања проводника намотаја трансформатора (различити губици у различитим проводницима) могло се претпоставити 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 врућој тачки изолације, па чак ни њену локацију, 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 топлоту предаје расхладном систему преко кога се топлота одводи спољашњем расхладном флуиду. Ни код уља се не може једноставно предвидети локација где је његова температура највиша. Ипак, овом проблему се поклања мање пажње у пракси (по правилу температура уља је мања критична); иако се констатује да највиша температура уља није једнака температури уља у термометарском цепу на поклопцу трансформатора, где се мери температура уља на врху трансформатора (ово је уље које улази у хладњак), као репрезент температуре уља се по правилу узима температура измерена у термометарском цепу.

Након што је трансформатор произведен, потребно је проверити да ли је његово загревање, односно пораст температуре у односу на амбијент, мање од стандардима дозвољеног (односно оног које је дефинисано 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) - користи се **II метода** мерења отпора намотаја једносмерној струји, из кога се, применом познате везе између отпора од температуре, одређује средња температура намотаја. **Температура уља у термометарском цепу** се једноставно мери **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 се израчунава преко средње температуре намотаја и температура уља на врху и дну трансформатора, као и фактора најтоплије тачке, као што ће касније бити објашњено. Фактор најтоплије тачке је вредност која се мења у широком опсегу, зависно од конструкције трансформатора и практично једини начин да се он поуздано одреди је преко комплексних детаљних термичких прорачуна. Софтвер за овакве прорачуне је свакако будућност за сваког великог произвођача трансформатора, а данас их поседује неколико великих светских фирми - програми су у различитим фазама увођења у свакодневну пројектантску праксу као стандардни софтверски алат у овим фирмама.

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 ПРОЈЕКОВАЊА ТРАНСФОРМАТОРА

5. 2. 1. ПРЕНОС ТОПЛОТЕ

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

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

1) Провођење

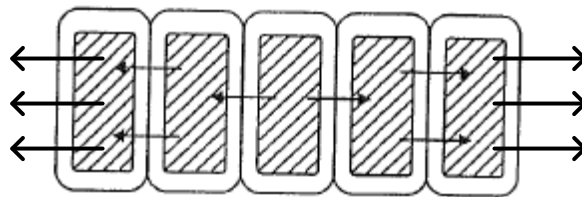
Основна законитост која описује пренос топлоте провођењем, које је карактеристично за пренос топлоте кроз чврсто тело, је Фуријеов закон, који за случај једнодимензионог преноса топлоте гласи:

$$p = \lambda S \frac{\Delta\theta}{x} = \lambda S \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{x}. \quad (5.12)$$

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) по правилу може занемарити.

На слици 5.3 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 дата скица преноса топлоте провођењем у радијалном правцу, за случај да је у аксијалном правцу пренос топлоте ка уљу занемариво мали.



Слика 5.3

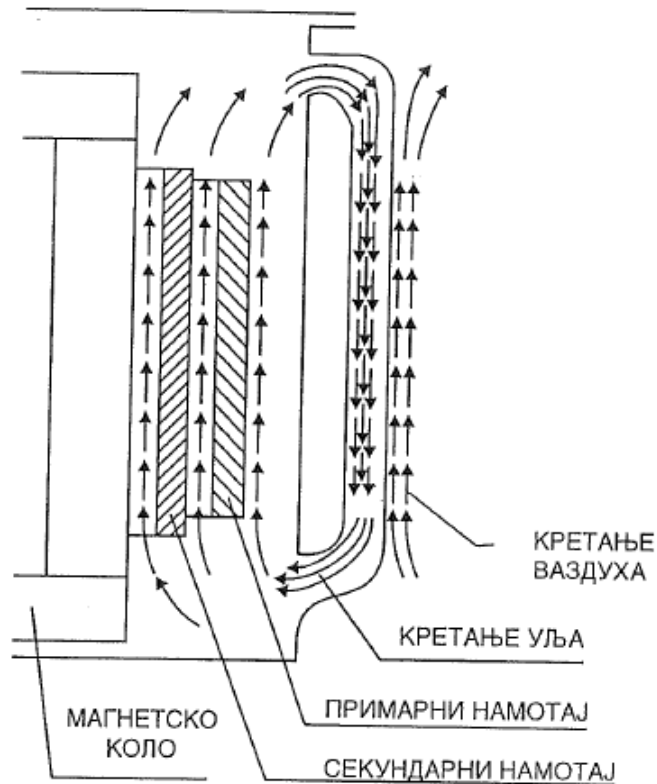
2) Струјање

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

$$p = \alpha S \Delta\theta \quad (5.13)$$

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

Топлота се струјањем преноси од површи активних делова (намотаја и језгра) ка уљу. Зависно од вредности губитака у конструкционим деловима, топлота се се са њих струјањем може преносити ка уљу (за случај веће вредности губитака) или са уља на конструкционе делове (за случај мање вредности губитака). На хладњацима (радијатори или компактни хладњаци) топлота се струјањем преноси од уља ка страни хладњака која је у додиру са уљем. Коначно, топлота се струјањем преноси од стране хладњака према спољашњем расхладном флуиду (ваздух код радијатора, односно ваздух или вода код компактних хладњака) према спољашњем расхладном флуиду. Скица струјања уља и ваздуха је приказана на слици 5.2.



Слика 5.4

Кретање флуида у трансформатору, које је неопходно за успостављање преноса топлоте струјањем, може бити изазвано пумпама или вентилаторима (тај случај се карактерише као принудно струјање). До кретања флуида долази и у случајевима када нема спољашњег погона за покретање (пумпе / вентилатори) - у том случају услед преласка топлоте на флуид он се загрева, густина честица флуида постаје мања и оне се крећу на горе; услед преласка топлоте са флуида он се хлади, густина честица флуида постаје већа и оне се крећу на доле. Овај феномен се назива термо-сифонски ефекат.

Израчунавање коефицијента преласка топлоте струјањем (α) није једноставно јер он зависи од низа фактора, као што је врста флуида, његова температура, разлика температура површи и флуида, геометрија струјања флуида (слободна површ или канал, на пример), брзина струјања флуида 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 у литератури не могу наћи формуле за α за геометрије и услове струјања уља унутар трансформатора, 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) Природно струјање, примери:

$$\alpha = 2.5 \Delta\vartheta^{\frac{1}{4}} \left(\frac{293}{T} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5.14)$$

за вертикалну површину у мирном ваздуху; T представља апсолутну температуру. За исту геометрију, али за случај да се вертикална површина налази у уљу:

$$\alpha = 38 \Delta\vartheta^{\frac{1}{4}} \left(\frac{293}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.15)$$

Б) Принудно струјање, пример:

Ваздушно хлађење, за брзине $v < 5$ m / s и за вредност средње температуре површи и ваздуха до 50 °C:

$$\alpha = 6 + 4 v \quad (5.16)$$

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

$$p = \varepsilon \sigma_c S (T_1^4 - T_2^4) \quad (5.17)$$

p - снага преноса топлоте (W)

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

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

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 ваздуху (према амбијенту - суд и радијатори). Наиме, вредност коефицијента преласка топлоте струјањем (α) са површи на ваздух је много мања од α између површи и уље, због чега је снага преноса топлоте за исту температурну разлику много већа за уље него за ваздух. Снага преноса топлоте зрачењем у реалном опсегу температура код трансформатора је самерљива са снагом преноса топлоте струјањем према ваздуху, а доста мања него снаге размене топлоте струјањем са уљем.

Треба поменути још једну важну ствар - 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. Код већ поменутих 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 приближно једнака површи преко које се топлота одводи зрачењем.

Понекад се у пракси и теорији струјање и зрачење не издвајају, већ се пренос топлоте на површи приказује као пренос топлоте струјањем, при чему се коефицијент преласка топлоте повећава у односу на вредност коефицијента преласка топлоте струјањем, на следећи начин:

$$\begin{aligned} \varepsilon \sigma_c S (T_1^4 - T_2^4) &= \varepsilon \sigma_c S (T_1^2 + T_2^2)(T_1^2 - T_2^2) \\ &= \varepsilon \sigma_c S (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2) = \varepsilon \sigma_c S (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)\theta \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$p = p_s + p_z = \alpha_k S \theta = (\alpha_s + \alpha_z) S \theta \quad (5.19)$$

α_k - коефицијент комбинованог преласка топлоте струјањем и зрачењем

$$\alpha_z = \varepsilon \sigma_c (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) \quad (5.20)$$

5. 2. 2. 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

O (*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 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 суштинска 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 "струјања 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:

A (*Air*) = ваздух

G (*Gas*) = гас

W (*Water*) = вода

4) Начин струјања спољашњег расхладног средства (у случају да је унутрашње расхладно средство уље или синтетички флуид или да се суви трансформатор налази у кућишту):

N (*natural*) - природно

F (*forced*) - принудно

У случају да је суви трансформатор (хлађење намотаја ваздухом) без кућишта, тада постоји само унутрашње расхладно средство. Тада у ознаци хлађењафигуришу само прва два од наведена четири словна симбола.

Најчешће коришћени системи хлађења:

AN - суви трансформатор без кућишта, са природним струјањем ваздуха

ANAN - суви трансформатор са кућиштем, 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

ONAF / OFAF - уљни трансформатор код кога постоји пумпа која се укључује само по потреби (у периодима већих оптерећења) и принудним струјањем ваздуха споља

OFAF - уљни трансформатор код кога је пумпа стално укључена (принудно струјање уља) и принудним струјањем ваздуха споља

ODAF - уљни трансформатор код кога је пумпа стално укључена и уље усмерено у намотај (дириговано струјање уља) и принудним струјањем ваздуха споља

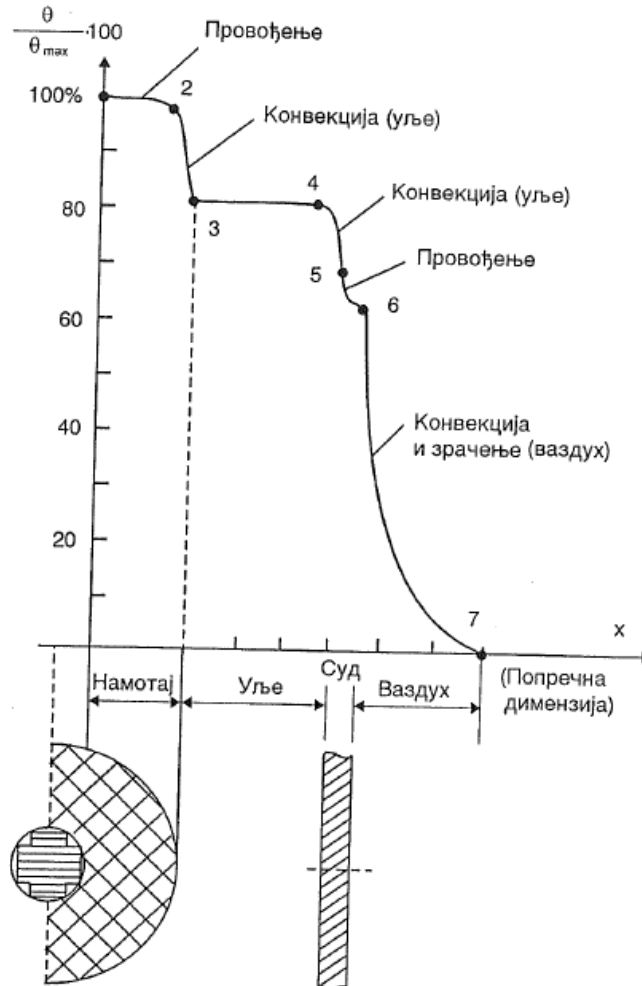
ODAF / ONAF / ONAN - трансформатор са диригованим струјањем уља у намотаје који је предвиђен за рад у три режима (1. укључене пумпе и укључени вентилатори, 2. искључене пумпе и укључени вентилатори, 3. искључене пумпе и искључени вентилатори).

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. 2. 3. СКИЦА РАСПОДЕЛЕ ПОРАСТА ТЕМПЕРАТУРЕ

Након прегледа основних законитости преласка топлоте, који представљају основу за развој метода за термичке прорачуне трансформатора, даће се скица расподеле температуре у хоризонталном пресеку (по хоризонтали) – слика 5.5 и вертикалном пресеку (по вертикали) – слика 5.6.

Слику 5.5 треба схватити као слику која објашњава падове температуре између појединих делова трансформатора. Укупан пад температуре од 100 % не представља разлику између температуре вруће тачке намотаја и спољашњег расхладног флуида, јер се на слици 5.5 не види пораст температуре уља по висини трансформатора.

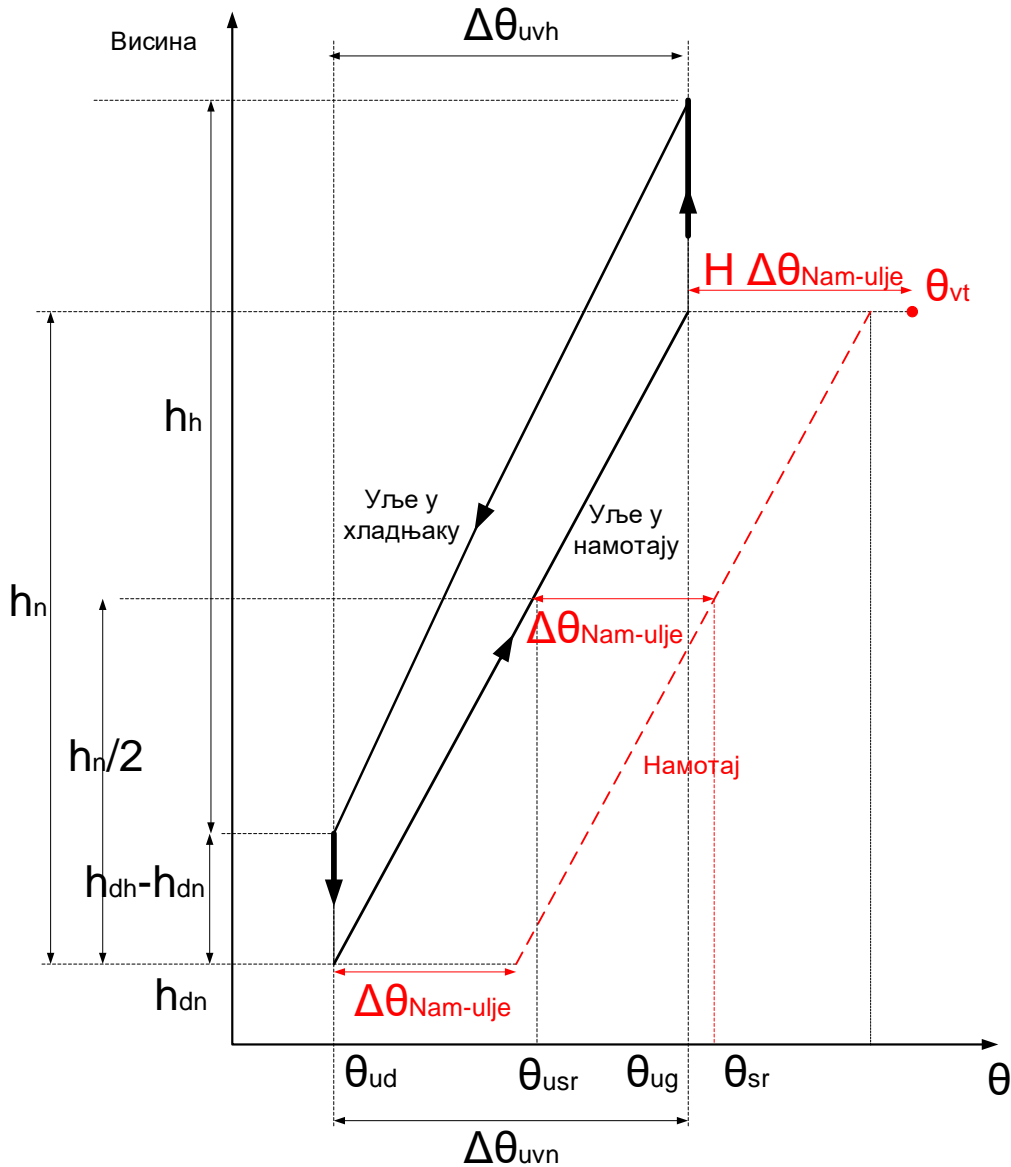


Слика 5.5

Шематски упрошћен распоред промене температуре по висини је дат на слици 5.6, при чему се посматра само један намотај. Вертикални градијент температуре уља у намотају ($\Delta\theta_{uvn}$) зависи од снаге губитака у намотају P_g (W), запреминског протока уља Q (m³/s) и параметара уља – густине (ρ (kg/m³)) и специфичног масеног топлотног капацитета (c_p (J/(kg K))):

$$P_g = \rho c_p Q \Delta\theta_{uvn} \quad (5.21)$$

У случају више намотаја, вредности вертикалног градијента температуре уља у сваком од намотаја се могу међусобно разликовати, а тиме 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, разлика $\Delta\theta_{uvn}$ и $\Delta\theta_{uvh}$ може настати и као последица протичања хладног уља поред активног дела (ово може да се деси, на пример, ако је пумпа која изазива струјање уља прејака) или као последица појаве протичања уља кроз језгро – по правилу вертикални градијент температуре уља које протиче кроз језгро ($\Delta\theta_{uvj}$) се разликује од вертикалног градијента температуре уља које протиче кроз намотаје ($\Delta\theta_{uvn}$). Разлика температура намотаја и уљана стаје као резултат падова температуре услед провођења кроз чврсту изолацију проводника и струјања између површи проводника и уља.



Слика 5.6 - Вертикална расподела температура уља и намотаја
 h_{dn} – растојање од дна суда до дна намотаја, $h_{dh}-h_{dn}$ – растојање од дна намотаја до дна радијатора,
 h_h – висина радијатора, h_n – висина намотаја

5. 2. 4. ТЕМПЕРАТУРА НАЈТОПЛИЈЕ ТАЧКЕ

На слици 5.6. су означени карактеристични градијенти температура и пораста температура у односу на амбијент:

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

Као што је наведено у претходном делу поглавља, од највећег практичног интереса је температура најтоплије тачке намотаја (ϑ_{vt}). Такође, констатовано је да је могуће њено мерење коришћењем оптичких сензора. С обзиром на наведена практична ограничења у реализацији оваквих мерења, у ИЕС стандардима је предложена следећа формула према којој се одређује температура најтоплије тачке намотаја преко вредности које је могуће добити коришћењем класичних и лако изводљивих мерења (горњег уља, средње вредности температура горњег и доњег уља и средње вредности температуре намотаја):

$$\vartheta_{vt} = \vartheta_{ug} + H (\vartheta_{sr} - \vartheta_{u,sr}) \quad (5.22)$$

Фактор H се назива фактор најтоплије тачке и одређивање његове вредности није једноставно јер се њиме обухвата неравномерност губитака и неравномерност хлађења појединих проводника у намотају [2]. Према ИЕС стандардима за оптерећивање трансформатора, вредност H се 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 сензором (нажалост, ово је могуће тек након израде трансформатора и његовог стављања у погон). 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 $H = 1.3$.

5. 2. 5. САВРЕМЕНЕ ПРОРАЧУНСКЕ МЕТОДЕ БАЗИРАНЕ НА ДЕТАЉНОМ ТЕРМО-ХИДРАУЛИЧКОМ МОДЕЛУ УЉНИХ ТРАНСФОРМАТОРА

У фази пројектовања потребно је израчунати вредности критичних температуре (најтоплије тачке намотаја и горњег уља), као и средњу температуру намотаја. Класичне прорачунске методе се заснивају на одређивању критичних температура - најтоплије тачке намотаја (θ_{vt}) и горњег уља (θ_{gu}) коришћењем дијаграма са слике 5.6, при чему постоје формуле, углавном са емпиријски подешеним коефицијентима, за израчунавање θ_{gu} , $\Delta\theta_{uvh}$, $\Delta\theta_{uvm}$, $\Delta\theta_{Nam-ulje}$, H . Облици формула су успостављени на основу основних израза теорије преноса топлоте провођењем, струјањем, евентуално зрачењем, као и теорије преноса топлоте преносом масе (струјање уља) и једнакости притисака у затвореној контури струјања 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 топлоте и теорије преноса топлоте преносом масе, и то на свакој микро-локацији где струји уље и где се одвија пренос топлоте. Дакле, термо-хидраулички модел се заснива на стриктној примени:

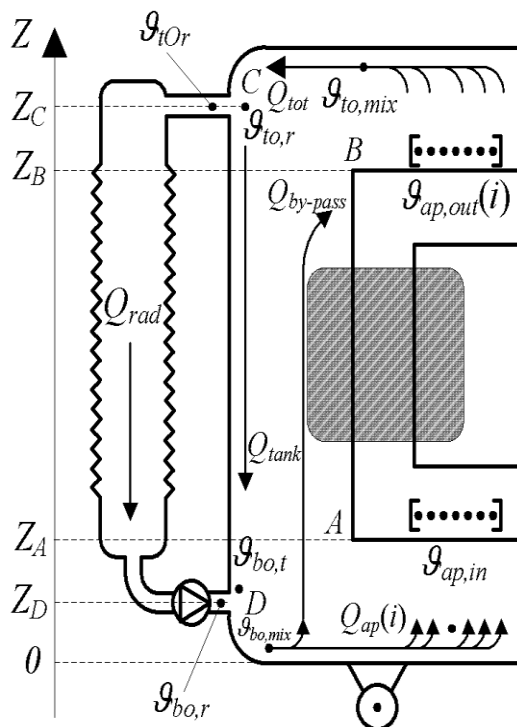
- а) закона одржања енергије,
- б) закона одржања масе,
- в) равнотеже притисака (Бернулијева једначина) у затвореним контурама уља,

г) закона преноса топлоте провођењем, струјањем и зрачењем.

Принципи се примењују:

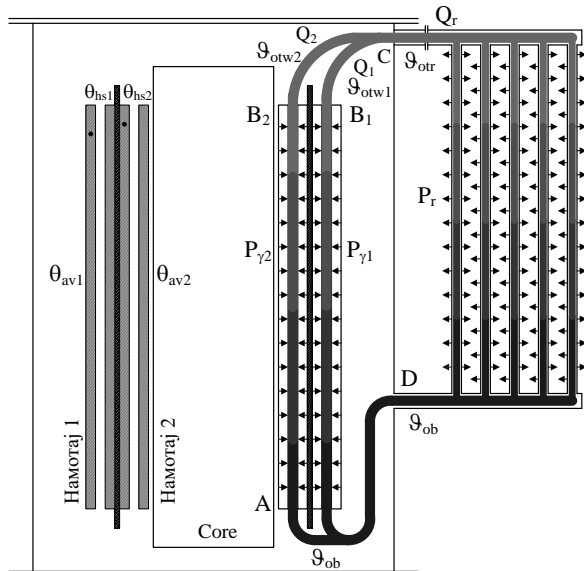
1. У моделовању глобалног струјања уља – одређивање расподеле протока између делова трансформатора (намотаји, језгро, хладњак итд.) - пример дат на сликама 5.7 - 5.9. Основне једначине из којих се одређује ова расподела су једначине равнотеже притисака: оних који су генерисани пумпама за струјање уља и термо-сифонским ефектом и падова притисака који настају као резултат струјања уља.

2. При прављењу хидрауличких и топлотних шема појединих делова трансформатора, намењених прорачуну расподеле: а) протока уља кроз канале за хлађење - пример дат на слици 5.10 и б) температуре: б1) уља, б2) сваког проводника намотаја - илустрација за б1) и б2) дата на слици 5.11 и б3) карактеристичних тачака језгра.

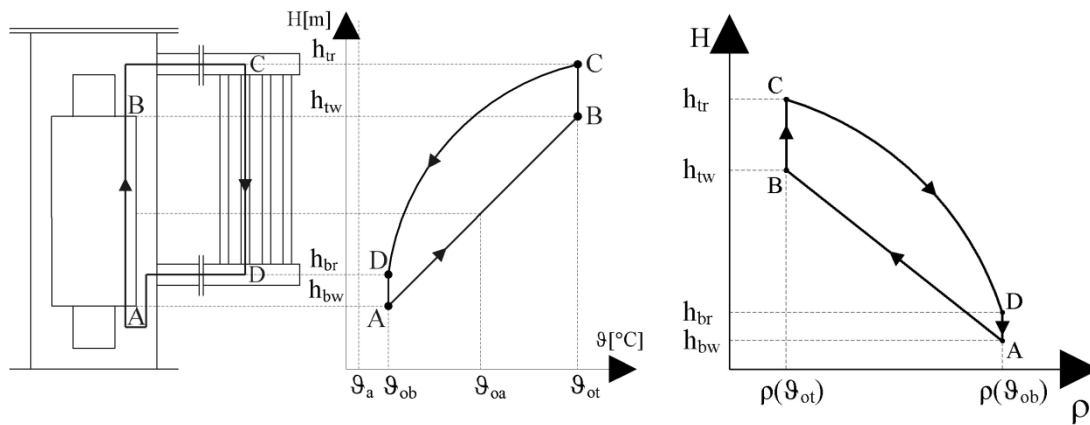


Q_{rad} - проток уља кроз радијаторе
 $Q_{by-pass}$ - by-pass уља - проток хладног уља које, поред активног дела унутар суда, без размене топлоте са активним делом, струји одоздо на горе
 Q_{tank} - проток уља које се хлади на површи суда и струји одозго ка доле
 Q_{ap} - проток уља које струји кроз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

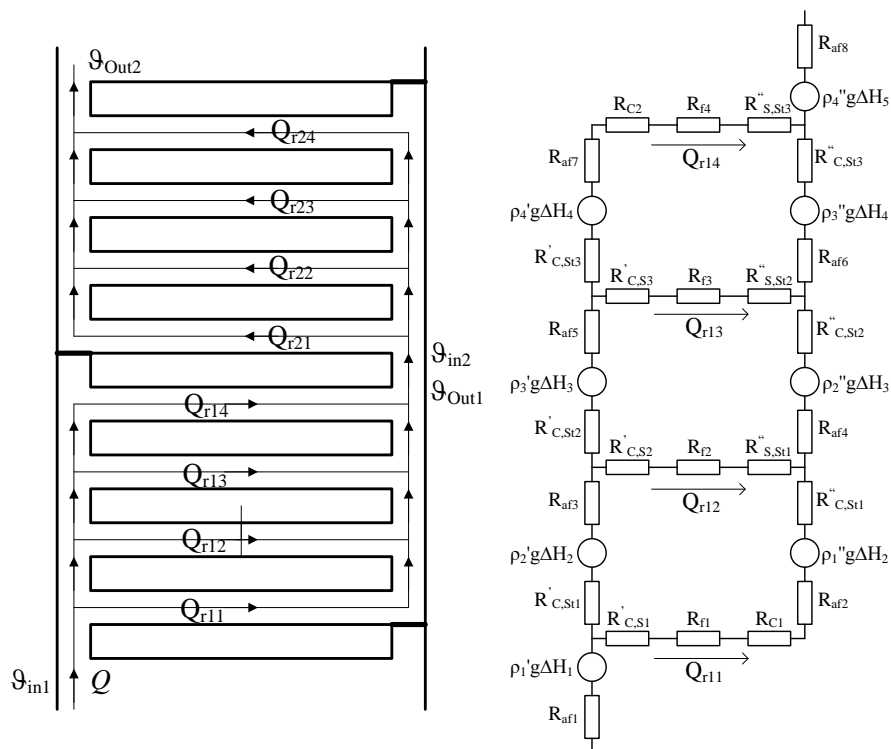
Слика 5.7 - Расподела протока између делова трансформатора



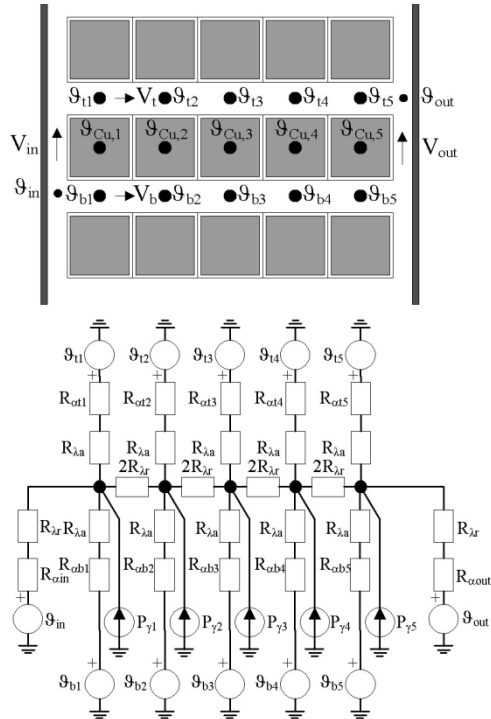
Слика 5.8 - Принцип формирања више затворених контура уља на упрошћеном примеру - две тубе уља кроз намотаје струје на горе, мешају се и формирају тубу уља која струји кроз радијаторе



Слика 5.9 - 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 термо-сифонског 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 5.10 - 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 се добија расподела протока по каналима, као и укупни пад притиска у делу намотаја моделованом хидрауличком шемом.



Слика 5.11 - Распoдела температуре унутар једног диска који је у додиру са уљем, за који су познати брзина кроз сваки од канала (израчунато помоћу хидрауличке шеме) – битно за R_{cin} , R_{cout} , R_{ab1} , R_{ab2} , R_{ab3} , R_{ab4} , R_{ab5} , R_{at1} , R_{at2} , R_{at3} , R_{at4} , R_{at5} , и температура поред сваког од провoдника ϑ_{in} , ϑ_{out} , ϑ_{b1} , ϑ_{b2} , ϑ_{b3} , ϑ_{b4} , ϑ_{b5} , ϑ_{t1} , ϑ_{t2} , ϑ_{t3} , ϑ_{t4} , ϑ_{t5}

Детаљније о методи се може наћи у референци [3]; доступно на <http://term-procesi.etf.rs/dokumenti/istrazivanja/RadakovicIEEEApril2010PrintedPaper.pdf>

5.3. ПРОРАЧУН TEMПЕРАТУРЕ У ПРЕЛАЗНИМ ТОПЛОТНИМ РЕЖИМИМА

Из текста поглавља 5.1.2 и 5.1.3 може се закључити да је потребно пратити температуру у сваком тренутку. Чак и да постоје мерења критичних температура, у пракси постоји потреба за прорачуном температура у прелазним топлотним стањима – на пример провера температура за случај да оператор електроенергетског система мора да расподели оптерећење које је напајао неки трансформатор који је испао из погона: тада је потребно проценити температуру која би се имала на крају периода са специфицираним трајањем и специфицираним преоптерећењем намењеним преосталим трансформаторима.

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 напајања потрошачима који су били искључени неко време (на пример неколико сати). 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 може приближно користити за добијање временске промене температуре уља, је математички модел са једном временском константом. Овај модел се може охарактерисати и као модел у коме се трансформатор посматра као тело чија је температура константна по запремини (ϑ) и чији је топлотни капацитет једнак суми топлотних капацитета сваког од делова трансформатора. Због промене температуре по запремини, топлотни капацитет се не може одредити једноставним сабирањем производа маса делова (m) и њихових специфичних масених топлотних капацитета (c_p). Они делови који имају већу температуру утичу у укупном топлотном капацитету више него што износи њихов $m c_p$, а делови са мањом температуром утичу мање у укупном топлотном капацитету више него што износи њихов $m c_p$. „Коефицијент“ којим се множи $m c_p$ за поједине делове зависи и од вредности за коју је усвојено да представља репрезент температуре трансформатора ϑ . Ова представа је врло груба и њеном применом се не може добити вредност температуре уља и намотаја, које се значајно разликују, па је самим тим при моделовању неопходно кренути од концепта да се трансформатор посматра бар као два тела која имају различите температуре.

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 наведеним условима, може се написати следећи израз енергетског биланса, по коме је ослобођена топлота (енергија губитака) у временском интервалу dt , $P dt$, једнака збиру акумулисане топлоте $C d\theta$ и енергије која је током времена dt пренета ка спољашњем расхладном флуиду $\alpha S \theta dt = K \theta dt$:

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

Опште решење диференцијалне једначине (5.23) гласи

$$\theta(t) = \theta_{st} - (\theta_{st} - \theta_0) e^{-t/\tau} \quad (5.24)$$

где је θ_0 вредност температуре у почетном тренутку, $\theta_{st}=P/K$ и $\tau=C/K=(m c)/(\alpha S)$.

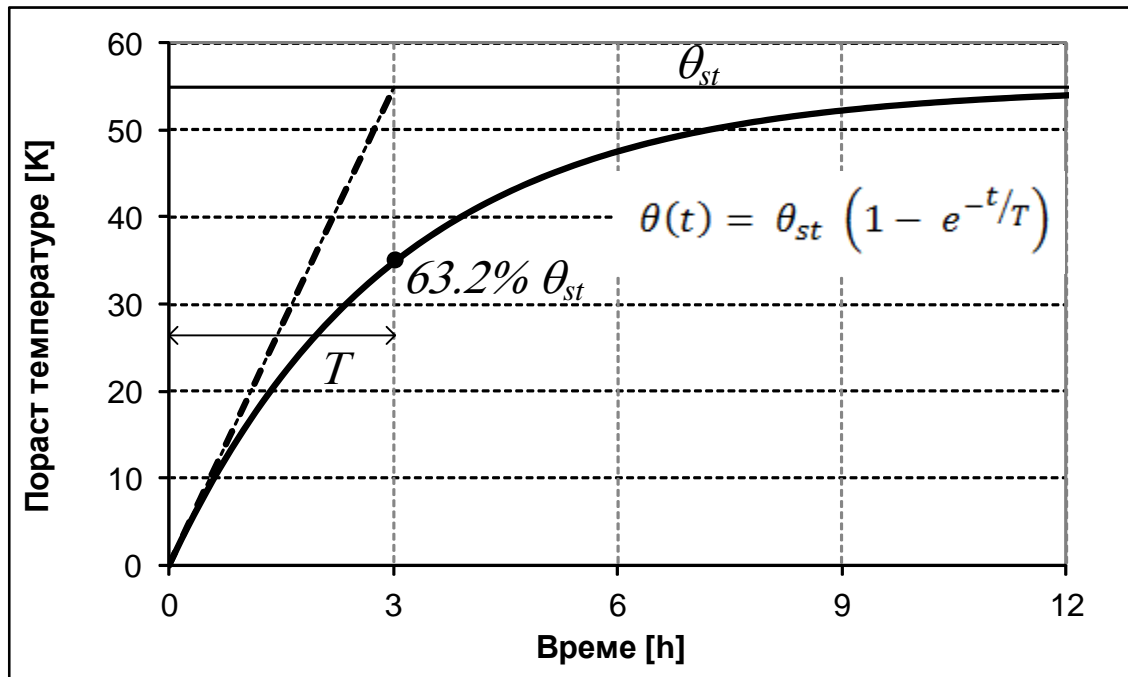
Израз (5.24) се може написати у форми

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-t/\tau} + \theta_{st} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (5.25)$$

За вредност почетног пораста температуре $\theta_0 = 0$, израз постаје

$$\theta(t) = \theta_{st} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (5.26)$$

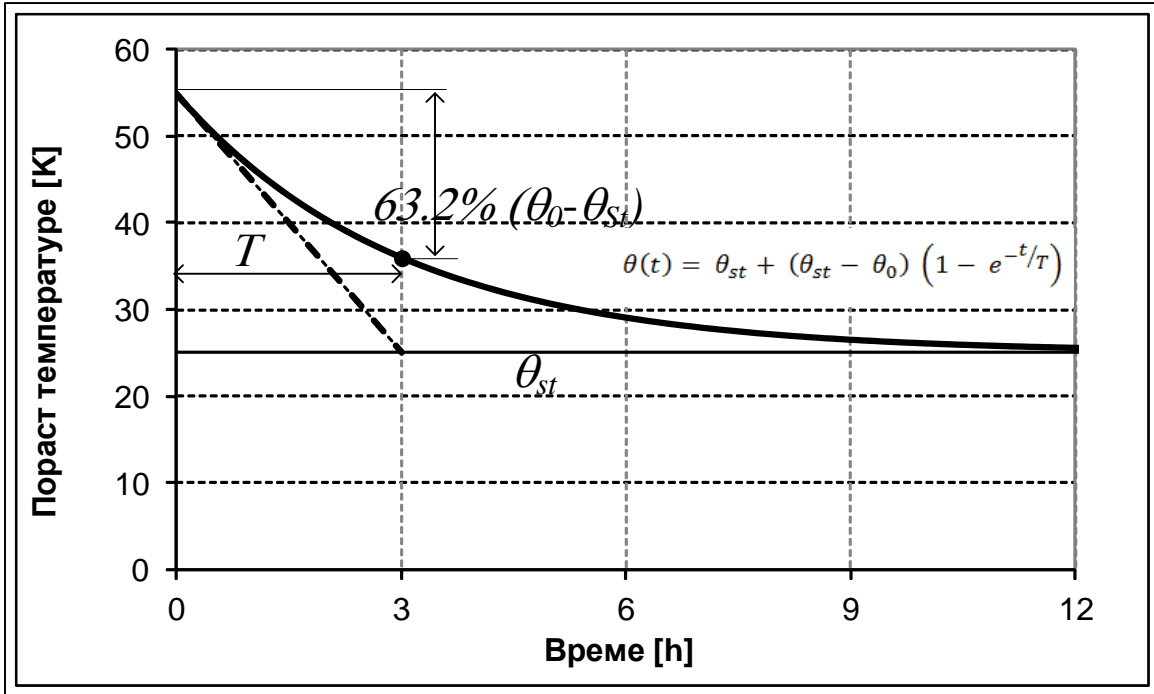
Временска промена пораста температуре која одговара случају $\theta_0 = 0$ је приказана на слици 5.12.



Слика 5.12 - 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 5.13 је приказано хлађење из почетног стања са већим порастом температуре θ_0 ($t = 0$) од вредности θ_{st} која се постиже у стационарном стању са оптерећењем на које је смањено оптерећење трансформатора у тренутку $t = 0$ (θ_0 ($t = 0$) = 55 К, θ_{st} = 25 К).

$$\theta(t) = 25 - (25 - 55) e^{-t/T} = 25 + 30 e^{-t/T} \quad (5.27)$$



Слика 5.13 - Хлађење трансформатора као хомогеног тела по једној временској константи, при константним губицима и константној температури амбијента, из задатог почетног стања (θ_0 ($t = 0$) = 55 K

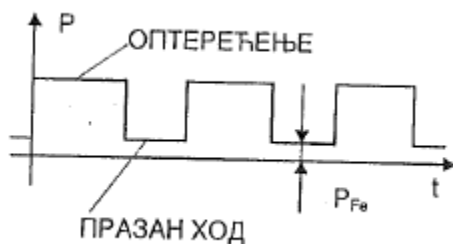
Из претходно наведених израза и слика може се закључити следеће:

- 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 температура (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 %)
- Из претходног проистиче јасна потреба да се **оглед загревања**, који служи за проверу пораста температуре у устаљеном режиму, **скрати** (оријентационо, за временску константу уља од 3 сата, оглед би трајао 4 x 3 сата = 12 сати). Због тога се примењују математички поступци којима се из регистроване промене пораста температуре у времену израчунава пораст температуре у стационарном стању: ако 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 се одређује према изразу

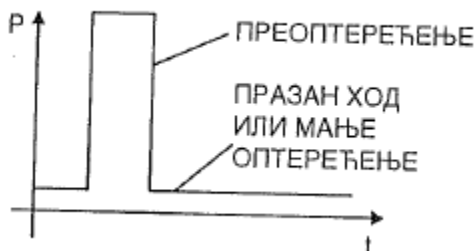
$$\Delta\theta_{st} = \frac{\Delta\theta_2^2 - \Delta\theta_1 \Delta\theta_3}{2 \Delta\theta_2 - \Delta\theta_1 - \Delta\theta_3} \quad (5.28)$$

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

Описани једноставан математички модел са једном временском константом лако се може применити и на променљиве дијаграме оптерећења, као што су они приказани на сликама 5.14 и 5.15: крајња температура израчуната за један период са константним оптерећењем представља почетну температуру за период са следећим константним оптерећењем.



Слика 5.14

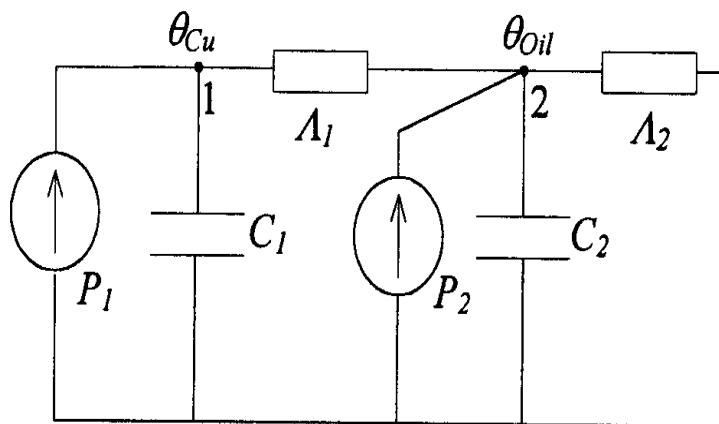


Слика 5.15

5.3.2. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ СА ДВЕ ВРЕМЕНСКЕ КОНСТАНТЕ

У претходном тексту је објашњен најједноставнији модел, који, уместо две вредности пораста температура (намотаја и уља), даје само једну, јер се трансформатор посматра као хомогено тело чија је температура иста по читавој запремини.

Због тога је минимално потребни модел из кога се може добити информација о температури намотаја термички модел у коме се користе два чвора: један за намотаје и један за остале делове трансформатора (уље, језгро у суд). Модел са два чвора је приказан је на слици 5.16.



Слика 5.16 - Топлотна шема са два чвора
(чвор 1 - намотај, чвор 2 - остали делови трансформатора)

Топлотна шема прати пренос топлоте: топлотна проводност A_1 описује прелаз топлоте провођењем кроз изолацију намотаја и струјањем са намотаја на уље, док топлотна проводност A_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 сами 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 5.16 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, оријентационо, око 3 сата). Дакле, изостављање топлотног капацитета C_1 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) је једноставна за примену и једначине које одговарају топлотној шеми се лако аналитички решавају ако се задрже претпоставке да се топлотне проводности Λ_1 и Λ_2 не мењају, односно да је топлотни систем линеаран. Поред тога, услов за једноставну примену модела је да се губици P_1 и P_2 мењају скоковито, због промене оптерећења (снаге која се преноси кроз трансформатор), односно да се не уважава промена губитака са променом температуре.

Пораст температуре намотаја за случај да се C_1 везује у чвор 1, као што је приказано на слици 5.16.:

$$\theta_{Cu}(t) = \theta_{Cu-u} \left(1 - e^{-t/T_{Cu}}\right) + \theta_u \left(1 - e^{-t/T_{u1}}\right) \quad (5.29)$$

$$T_{Cu} = \frac{C_1}{\Lambda_1} = \frac{m_{Cu} c_{Cu}}{\Lambda_1} \quad (5.30)$$

$$\theta_{Cu-u} = \frac{P_1}{\Lambda_1} \quad (5.31)$$

$$\theta_u = \frac{P_1 + P_2}{\Lambda_2} \quad (5.32)$$

Пораст температуре намотаја за случај да се занемари C_1 ,

$$\theta_{Cu}(t) = \theta_{Cu-u} + \theta_u \left(1 - e^{-t/T_{u1}}\right) \quad (5.33)$$

или изостави из чвора 1 и придружи капацитету C_2 :

$$\theta_{Cu}(t) = \theta_{Cu-u} + \theta_u \left(1 - e^{-t/T_{u2}}\right) \quad (5.34)$$

$$T_{u2} = \frac{C_2 + C_1}{\Lambda_2} \quad (5.35)$$

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

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

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: $\theta_{Cu-u} \left(1 - e^{-t/T_u}\right)$; 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 разлике температура:

$$\Lambda_1 = K_1 (\theta_{Cu} - \theta_u)^{n_1} \quad (5.37)$$

$$\Lambda_2 = K_2 \theta_u^{n_2} \quad (5.38)$$

Топлотне проводности зависе не само од разлике пораста температура $(\theta_{Cu} - \theta_u)$, односно пораста температуре θ_u , 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 K_1, n_1, K_2 и n_2 , - "зимски" и "летњи".

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_u измерених током прелазног процеса у току загревања трансформатора у кратком споју; 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 [3], а топлотни капацитети C_1 и C_2 из конструкционих параметара трансформатора (маса и специфичног топлотног капацитета материјала; вредности C_1 и C_2 се не могу добити једноставним сабирањем $\Sigma(m c_p)$, већ се мора уважити и просторна нехомогеност температуре и свођење вредности $m c_p$ сваког од делова који имају исту температуру (на пример сваки од навојака намотаја) на температуру која је додељена чвору у топлотној шеми; с обзиром да се по правилу чворовима додељују највише температуре у намотају / уљу, за добијање исте акумулисане енергије по заменској топлотној шеми и стварне акумулисане енергије, C_1 и C_2 буду мањи од вредности добијеној као $\Sigma(m c_p)$).

Оријентационо, за природно струјање типична вредност параметра n 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_I , 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

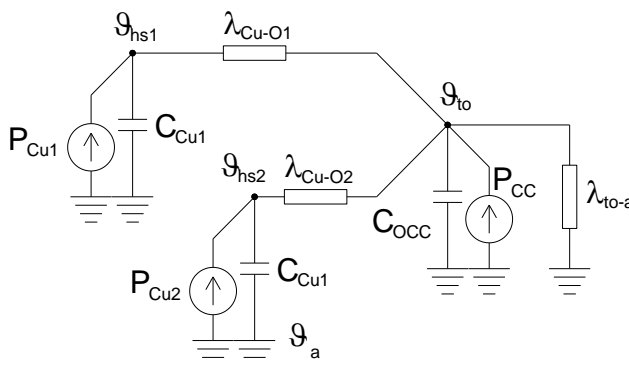
$$\theta_{Cu,k+1} = \theta_{Cu,k} + \frac{\Delta t}{C_1} \cdot (P_1 - \lambda_{1,k} \cdot (\theta_{Cu,k} - \theta_{u,k})) = \theta_{Cu,k} + \frac{\Delta t}{C_1} \cdot (P_1 - K_1 \cdot (\theta_{Cu,k} - \theta_{u,k})^{n_1+1}) \quad (5.39)$$

$$\begin{aligned} \theta_{u,k+1} &= \theta_{u,k} + \frac{\Delta t}{C_2} \cdot (P_2 + \lambda_{1,k} \cdot (\theta_{Cu,k} - \theta_{u,k}) - \lambda_{2,k} \cdot (\theta_{u,k} - \theta_{a,k})) \\ &= \theta_{u,k} + \frac{\Delta t}{C_2} \cdot (P_2 + K_1 \cdot (\theta_{Cu,k} - \theta_{u,k})^{n_1+1} - K_2 \cdot \theta_{u,k}^{n_2+1}) \end{aligned} \quad (5.40)$$

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 (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 одређивања температуре најтоплије тачке изолације и највеће температуре уља током променљивог оптерећења и температуре амбијента. Практични феномени који се тичу динамике промене температуре, пре свега горњег уља у цефу и последичног пребачаја функције разлике температура најтоплије тачке изолације и уља у цефу разматрани су у стандардима [1], где је дат и поступак којим је покушано да се овај феномен математички опише. Овај аспект и решења применом напредног термичког моделовања су разматрани у референци [4]; 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 5.17.



Слика 5.17 - Топлотна шема са три чвора (чвор 1 - НН намотај, чвор 2 - ВН намотај, чвор 3 - остали делови трансформатора)

Механизам преноса топлоте код сувих трансформатора се доста 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 она се огледа пре свега кроз утицај језгра: утицај загревања, односно температуре, језгра на загревање намотаја зависи и од конструкције трансформатора, пре свега од броја изолационих цилиндара између језгра и намотаја који је најближи језгру – већи број изолационих цилиндара смањује и снагу размене топлоте између језгра и намотаја.

3) Код сувих трансформатора утицај преноса топлоте зрачењем постаје значајан, односно он се мора укључити у термичке моделе који се користе за термичке прорачуне.

Због тога за суве трансформаторе постоје посебни стандарди за типске огледе загревања [5] и за оптерећивање трансформатора [6].

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 струја расте са пресеком проводника, а напон са порастом пресека магнетног кола. Ако се са k означи однос линеарних димензија два слична трансформатора $k = l' / l$, долази се до карактеристика приказаних у табели 5.2.

Неки од интересантнијих закључака из табеле 5.2. су:

- Привидна снага расте пропорционално са k^4
- Релативна снага у односу на масу и цену расте пропорционално са k
- Релативни губици у односу на снагу опадају пропорционално са $1/k$
- Пораст температуре се повећава пропорционално са k
- Термичка временска константа расте пропорционално са k
- Релативна струја магнећења опада пропорционално са $1/k$

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

Линеарна димензија је сразмерна са четвртим кореном привидне снаге (позиција (7) у табели 5.2.):

$$l = A \sqrt[4]{P_S}$$

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 и расхладне површине. Коефицијент преласка топлоте струјањем се постиже интензивирањем хлађења - постављањем вентилатора, на пример. Расхладна површ се повећава повећањем број радијатора, на пример.

Ако се не би додавала расхладна површ (применом радијатора), већ се трансформатор хладио само са страница паралелопипеда, 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 5.3. је приказана 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.

Табела 5.2. – Димензиона анализа по критеријуму (1)

Р. бр.	Величина	Формула	Однос
1	Густина срује	J	1
2	Густина флуksа	B_m	1
3	Површина пресека и хлађења	$S = KI^2$	k^2
4	Запремина и маса	$M = \gamma V = CI^3$	k^3
5	Струја	$I = JS_{Cu}$	k^2
6	Флуks и (индуковани) напон	$U = c\omega\Phi = CB_m S_{Fe}$	k^2
7	Привидна снага	$P_s = UI$	k^4
8	Отпорност	$R = N\rho l/S_{Cu}$	$1/k$
9	Губици у бакру	$P_{Cu} = RI^2$	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	$p = (P_{Cu} + P_{Fe})/P$	$1/k$
13	Релативна цена	$\zeta = M/P_s$	$1/k$
14	Реактанска расипања	$X_\sigma = (K\delta'/h) D_m$	k
15	Релативна реактанса расипања	$x_\sigma = X_\sigma / U$	k
16	Релативна снага	$p = P_s / M$	k
17	Реактанса магнећења	$X_\mu = \mu \omega N^2 S/l$	k
18	Релативна реактанса магнећења	$x_\mu = X_\mu / U$	k
19	Релативна струја магнећења	$i_\mu = 1/x_\mu$	$1/k$
20	Времанска константа, термичка	$T = C/K = cM/S$	k
21	Временска константа, електрична	$T_{el} = x_\sigma / (\omega R)$	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 је примењено и на остале величине у табели 5.2.

Табела 5.3. – Димезиона анализа по критеријуму (2)

Р. бр. (из таб. 5.2)	Величина	Формула	Однос
11	Пораст температуре	θ	1
9, 10	Губици у бакру и гвожђу	$P_g = K S$	k^2
8	Отпорност	$R = N\rho l/S$	$1/k$
5	Струја	$I = \sqrt{P_{Cu} / R}$	$k^{3/2}$
1	Густина струје	$J = I/S$	$1/\sqrt{k}$
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	$p_s = UI$	k^3
16	Релативна снага	$p_s = P_s / V$	1
12	Релативни губици	$p_g = P_g / P_s$	$1/k$

Литература:

- [1] IEC 60076-7, “Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers”, Edition 2.0, 2018-01-12
- [2] Radakovic, Z., Radoman, U., Kostić, P. (2015): Decomposition of the Hot-Spot Factor, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 30, No. 1, 403-411.
- [3] 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
- [4] 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.
- [5] IEC 60076-11 ed1.0, Power transformers - Part 11: Dry-type transformers, 2004-05.
- [6] IEC 60076-12 ed1.0, Power transformers - Part 12: Loading guide for dry-type power transformers, 2008-11.