|  |  |
| --- | --- |
| proba | ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ **УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ** Катедра за енергетске претвараче и погоне |

**Испит / други колоквијум (други термин) из предмета Термички процеси у електроенергетици**

*Испит траје максимално 180 минута / 150 минута*  22. 2. 2021.

*Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић*

1. Одредити минималну и максималну вредност фактора виђења површи (2) са елементарне површи (1), приказаних на слици (дати су погледи са стране и одозго), при чему се висина *h* мења у опсегу -20cm (десни полудиск испод левог) до 30cm (десни полудиск изнад левог – ситуација приказана на слици). Површ 2 се састоји од два полудиска и вертикалне правоугаоне површи димензија 10cm x 50cm. (2п/0п)

2. Написати израз за снагу хлађења размењивача топлоте уље - вода, за размењивач за који се у литератури може наћи зависност коефицијената *F*. На који се начин квантификује, односно у математички модел уводи, запрљање хладњака? Површи ка уљу (*Su*) и ка води (*Sv*) се разликују. (2п/2,5п)

3. У стационарном температурном стању трансформатора са ON хлађењем познате су температуре доњег уља, на изласку из хладњака и уласку у намотаје (*ϑdu*), уља на врху од сваког од два намотаја (*ϑgun1* и*ϑgun2*) и помешаног горњег уља на уласку у хладњак (*ϑguh*). Позната је промена густине уља са температуром: *ρ* = *ρ0*-*β*∙*ϑ* (где је *ρ0* густина уља на 0°C, а *ϑ* температура уља). Термосифонска сила се може одредити као површина затворене контуре промене густине уља. Шрафирати површи термосифонских сила које делују у контури струјања уља која се затвара кроз први намотај и контури струјања уља која се затвара кроз други намотај. Позната је висина хладњака (*Hh*), висине намотаја (*Hn1* и *Hn2*) и вертикално растојање од дна сваког од намотаја до дна хладњака (*hhn1* и *hhn2*). Дно намотаја 1 се налази на најнижој позицији, изнад њега се налази дно намотаја 2, а изнад њега дно хладњака. Врх намотаја 1 се налази на најнижој позицији, изнад њега се налази врх намотаја 2, а изнад њега врх хладњака. (2,5п/3п)

4. Посматра се један навојак *shell type* трансформатора (слика) у вертикалној равни. Познате су температуре уља у зонама 1 и 2 – *ϑu1*, у зони 3 – *ϑu2* и у зони 4 – *ϑu3*, при чему се може сматрати да су оне мало променљиве по свакој зони. Навојак се састоји од више концентричних проводника, од којих је један приказан на слици испрекиданим линијом. Губици у проводнику се генеришу запреминском густином *qv*. Специфична топлотна проводност материјала износи *λ*. Попречни пресек проводника износи *S*, а обим попречног пресека према околном уљу за хлађење износи *O*. Део навојка, означен на слици као зона 1, се слабо хлади и може се сматрати да у том делу нема преноса топлоте ка уљу. У зонама 2, 3 и 4 коефицијенти преласка топлоте струјањем су једнаки *α2*, *α3* и *α4*, респективно. Поставити скуп од четири диференцијалне једначине које потпуно описују систем и написати њихово опште решење. Написати и граничне услове за одређивање 8 интеграционих константи. Занемарити провођење топлоте ка суседним проводницима, као и пренос топлоте зрачењем. (2,5п/3п)

5. Посматра се проводника од бакра површине попречног пресека 95 mm2 и максималне дозвољене температуре изолације 180°C. Кратак спој на проводнику настаје при номиналном оптерећењу (температура 100°C). Познате су карактеристике бакра: *cCu* = 385 J/(kg°C), *ρCu* = 8933 kg/m3, специфична електрична проводност на 20°C *σ20 Cu* = 56∙106 S/m и коефицијент линеарног пораста специфичне електричне отпорности са температуром *αCu20* = 4,29∙10–3°C–1. Одредити температуру изолације проводника која се достиже у тренутку искључења кратког споја у случају: а) да је заштита реаговала након 1s при струји од *Iks1* = 9600 A; б) да је заштита реаговала након 1,2s при струји од *Iks2* = 7600 A. При прорачуну сматрати да је термички процес по настанку кратког споја адијабатски. При прорачуну снаге генерисања топлоте узети у обзир температурну промену електричне проводности; може се сматрати да струја током кратког споја има константну вредност. (2п/2,5п).

**1. Задатак**

Фактор виђења између површи (1) и (2) одређује се по формули:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

Обзиром да се површ (1) може сматрати елементарном (углови *γ1* и *γ2* и растојање *R* са слике 1.1 су приближно константни за све тачке површи *S1*), израз (1.1) се трансформише у

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

Углови *γ1* и *γ2* су углови са паралелним крацима, па важи *γ1* = *γ2* = *γ*, односно

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.3) |



Слика 1.1

Површ (2) се састоји из два хоризонтална полукруга (на различитим висинама, *H* и *H*+*h*) и вертикалног правоугаоника који их спаја. Површински интеграл из израза (1.3) се може написати као сума три површинска интеграла по ова три елемента површине (2). Како је правоугаоник вертикалан и пошто је површ (1) елементарна, површински интеграл по овој површини је једнак нули. Дакле, израз (1.3) се може написати као:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.4) |

где индекс L означава леви полукруг, а индекс D десни. За величине у изразу (1.4) важи:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.5) |
|  | (1.6) |
|  | (1.7) |
|  | (1.8) |

Израз (1.4) сада постаје:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.9) |
|  | (1.10) |

Први интеграл једнак је:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.11) |

Аналогно, други интеграл једак је:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.12) |

Коначно, добија се израз за вредност фактора виђења:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.13) |

при чему се *h* мења у опсегу од -20 cm до 30 cm. Посматрањем угла под којим површ (2) „хвата“ зраке са површи (1) – од до , закључује се да он, а самим тим и фактор виђења, има највећу вредност у случају када је *h* негативно, односно -0,2 m, a најмању када је 0,3 m. Тражене вредности су:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.14) |
|  | (1.15) |

Алтернатива овом начину је диференцирање израза (1.13) по променљивој *h* и његово изједначавање са нулом. Једино решење ове једначине је *h* = -*H* = -1 m. Пошто се оно налази ван посматраног опсег, закључује се да су екстремуми функције (1.13) на крајевима посматраног интервала.

**2. Задатак**

За типичне стварне облике размењивача топлоте, у литератури се могу наћи вредности коефицијената F, чијим се множењем са снагом елементарног размењивача топлоте која би се имала при истом коефицијенту преласка топлоте, истој површини хладњака и истим температурама, добија снага преноса топлоте од топлог ка хладном флуиду код реалног размењивача:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.1) |

где су и разлике температуре топлог и хладног флуида на уласку (крај на којем топли флуид улази) и изласку из хладњака, а *Kp* коефицијент преласка топлоте са топлог на хладни флуид, који се одређује као:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2) |

при чему је површ ка води усвојена као референтна.

Запрљање хладњака се математички квантификује тако што се у израз за коефицијент преласка топлоте (2.2) додају додатни топлотни отпори провођењу топлоте кроз сваки од два „нова слоја“ настала таложењем:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.3) |

где *fDu* представља додатни топлотни отпор по јединици површине услед наталожених материја на спољашњој страни цеви (ка уљу), а *fDv* додатни топлотни отпор по јединици површине услед наталожених материја на унутрашњој страни цеви (ка води).

**3. Задатак**

Дијаграм промене температуре уља по висини тренсформатора приказан је на слици 3.1. На основу познате зависности густине уља од температуре, могуће је, на основу дијаграма на слици 3.1, нацртати и дијаграм промене густине уља са висином (слика 3.2).

Слика 3.1

Слика 3.2

Вредност термосифонске силе која делују у контури струјања уља која се затвара кроз први намотај је једнака површини затворене контуре поромене густине уља ABCDEFA (слика 3.3), док је вредност термосифонске силе која делују у контури струјања уља која се затвара кроз други намотај је једнака површини затворене контуре поромене густине уља GHDEFG (слика 3.4).

Слика 3.3

Слика 3.4

**4. Задатак**

На основу геометрије и расподеле коефицијента преноса топлоте струјањем, закључује са да навојак има једну раван симетрије (која пролази кроз средину зоне 1 и хоризонталне зоне 3), па се у даљим разматрањима може посматрати само једна половина навојка (слика 4.1). Такође, на основу симетрије, закључује се да су граничне површи у равни симетрије адијабатске, односно да кроз њих нема преноса топлоте провођењем.



Слика 4.1

Тражени систем од четири диференцијалне једначине, односи се на једначине којима се описује промена температуре дуж једног проводника навојка у свакој од четири зоне означене на слици (у тексту задатка и слици 4.1).

Математички исказ биланса снага, за елементарни део проводника у зони 1, дужине d*x*, на растојању *x* (слика 4.2), где је координатни почетак *х*-осе на граничној површи између зона 1 и 2, гласи:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.1) |

где је *qx* снага којом се топлота преноси провођењем у правцу осе *x* (на месту *x*), запреминска густина генерисане снаге губитака, a d*qstrujanja* снага којом се топлота одводи струјањем са омотача проводника, који је у контактну са уљем, дужине d*x*.



Слика 4.2

Зависност снаге провођења од координате *x* гласи:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.2) |

па је њен диференцијал, у случају да се попречни пресек проводника не мења по координати *x*, једнак:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.3) |

Израз (4.3) важи само за линеарну топлопроводну средину тј. средину где је вредност топлотне проводности константна. Снага којом се енергија одводи струјањем са омотача једног делића дужине d*x* је

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.4) |

Снага којом се генеришу губици у делићу дужине d*x* је

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.5) |

Уврштавањем у једначину (4.1) израза за диференцијал функције (4.3), снаге преноса топлоте струјањем (4.4) и снаге генерисања губитака (4.5), долази се до следећег израза:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.6) |

односно до диференцијалне једначине расподеле температуре дуж проводника:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.7) |

За део проводника у зони 1, дужине *L1*/2 тј. за важи па једначина (4.7) постаје:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.8) |

Опште решење ове диференцијалне једначине је:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.9) |

где је .

Диференцијална једначина, која описује промену температуре дуж проводника у зони 2, има исти облик као и једначина(4.7):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.10) |

где је , а координатни почетак *х*-осе се, у овом случају, налази на граничној површи између зона 2 и 3. Опште решење диференцијалне једначине (4.10) гласи:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.11) |

где је *m* параметар одређен изразом:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.12) |

Слична ствар важи и за део проводника у зони 3, само се коефицијент преласка топлоте струјањем (*α3*) и дужина () разликују. У овом случају, диференцијална једначина гласи:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.13) |

где је , а координатни почетак *х*-осе се налази на граничној површи између зоне 3 и зоне 4. Опште решење диференцијалне једначине (4.13) гласи:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.14) |

где је *n* параметар одређен изразом:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.15) |

Коначно, за део проводника у зони 4, коефицијент преласка топлоте струјањем је *α4*, а дужина проводника је . У овом случају, диференцијална једначина гласи:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.16) |

где је , а координатни почетак *х*-осе се налази на граничној површи зоне 4 која се поклапа са равни симетрије. Опште решење диференцијалне једначине (4.13) гласи:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.17) |

где је *p* параметар одређен изразом:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.18) |

На крају, потребно је написати и осам граничних услова, на основу којих је могуће одредити вредности непознатих интеграционих константи (*С*1 – *С*8):

1. Први гранични услов се поставља за адијабатску површ у зони 1 ():

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.19) |

1. Други гранични услов се добија из једнакости температура на граничној површи између зона 1 и 2:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.20) |

1. Трећи гранични услов се добија из једнакости снага преноса топлоте на граничној између зона 1 и 2, од ње и ка њој:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.21) |

1. Четврти гранични услов се добија из једнакости температура на граничној површи између зона 2 и 3:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.22) |

1. Пети гранични услов се добија из једнакости снага преноса топлоте на граничној између зона 2 и 3, од ње и ка њој:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.23) |

1. Шести гранични услов се добија из једнакости температура на граничној површи између зона 3 и 4:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.24) |

1. Седми гранични услов се добија из једнакости снага преноса топлоте на граничној између зона 3 и 4, од ње и ка њој:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.25) |

1. Осми гранични услов се поставља за адијабатску површ у зони 4 ():

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.26) |

**5. Задатак**

Пошто се термички процес по настанку кратког споја сматра адијабатским, занемарује се снага којом се топлота размењује са околином у току кратког споја и сматра да се целокупна топлотна енергија генерисана у том периоду акумулира у проводнику. Оваква претпоставка је при проверама загревања у току кратког споја на страни сигурности тј. стварно загревање проводника у току кратког споја je мало мање од тако израчунатог.

Снага којом се топлотна енергија акумулира у бакру једнака је снази којом се топлота генерише услед Џулових губитака.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.1) |

Подужна снага којом се топлотна енергија генерише у проводнику дата је изразом

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.2) |

Подужна снага којом се енергија акумулише у проводнику дата је изразом

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.3) |

Подужни топлотни капацитет проводника је једнак

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.4) |

Из претходник израза се добија диференцијална једначина која описује промену температуре бакарног проводника. То је уједно и температура најтоплијих тачака изолације (унутрашња површ изолације, уз сам проводник).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.5) |
|  |  | (5.6) |

Решавањем диференцијалне једначине добија се температура проводника у тренутку прекида струје кратког споја (*ϑp*):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.7) |
|  |  | (5.8) |
|  |  | (5.9) |
|  |  | (5.10) |
|  |  | (5.11) |
|  |  | (5.12) |

Заменом бројних вредности добијају се тражене температуре проводника:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5.13) |
|  |  | (5.14) |