

# Toplinski model električnog stroja

---

**Bivolčević, Marija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:698192>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-05**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**TOPLINSKI MODEL ELEKTRIČNOG STROJA**

**Završni rad**

**Marija Bivolčević**

**Osijek, 2020.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 16.09.2020.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na  
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Marija Bivolčević
<b>Studij, smjer:</b>	Prediplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	4350, 21.09.2019.
<b>OIB studenta:</b>	94233206534
<b>Mentor:</b>	Izv.prof.dr.sc. Tomislav Barić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Toplinski model električnog stroja
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Predložena ocjena završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	16.09.2020.
<b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>	23.09.2020.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 24.09.2020.

**Ime i prezime studenta:**

Marija Bivolčević

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4350, 21.09.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

10 %

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Toplinski model električnog stroja**

izrađen pod vodstvom mentora Izv.prof.dr.sc. Tomislav Barić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

---

**SADRŽAJ**

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
<b>2.FIZIKALNE i TEORIJSKE OSNOVE PRIJENOSA TOPLINE .....</b>	<b>2</b>
2.1. Važnost prijenosa topline i toplinskih proračuna .....	2
2.2. Osnovne fizikalne veličine i zakoni važni za prijenos topline.....	2
<b>3. MEHANIZMI PRIJENOSA TOPLINE .....</b>	<b>4</b>
3.1. Prijenos topline kondukcijom .....	4
3.2. Prijenos topline konvekcijom .....	7
3.2.1. Prirodna konvekcija.....	11
3.2.2. Prisilna konvekcija .....	14
3.3. Prijenos topline radijacijom .....	20
<b>4. UTJECAJ TEMPERATURE NA RAD ELEKTRIČNOG STROJA.....</b>	<b>24</b>
4.1. Utjecaj nadtemperature na radni vijek stroja i parametre .....	24
4.2. Metode toplinske zaštite električnih strojeva.....	32
4.3. Hlađenje električnih strojeva .....	36
<b>5. TOPLINSKI MODEL ELEKTRIČNOG STROJA .....</b>	<b>40</b>
<b>6.MJERENJE I PRORAČUN TOPLINSKOG OTPORA.....</b>	<b>45</b>
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>56</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>57</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>60</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>61</b>
<b>PRILOZI .....</b>	<b>62</b>
Popis korištenih oznaka i simbola.....	62
<b>PRILOG 4.1 .....</b>	<b>66</b>

---

## 1. UVOD

Radom električnog stroja dolazi do zagrijavanja njegovih dijelova ili stroja u cijelosti stoga je važno poznavati utjecaj temperature na rad stroja. Pri normalnom radu temperatura stroja je različita od temperature okoline, a zbog prirodnih pojava koje teže uspostavljanju temperaturne ravnoteže dolazi do izmjene topline. Kako bi električni stroj ostao u normalnom radu pri određenoj radnoj temperaturi potrebno je modelirati hlađenje, tj. odvođenje topline. Toplinsko modeliranje omogućava ispravan i učinkovit rad stroja jer stroj je projektiran za rad samo unutar određenih granica temperature ovisno o izvedbi, snazi, materijalu te gdje se on nalazi. Potreba i važnost je poznavanje prijenosa topline i utjecaja temperature na životni vijek izolacije koje je opisano u ovom radu. Također je važno provoditi toplinske proračune da bi se moglo predvidjeti kako stroj radi pri normalnim uvjetima i pri preopterećenju. Način odvođenja topline definira koliko dugo stroj može raditi pri opterećenju jer povećanjem opterećenja dolazi do zagrijavanja i upravo to zagrijavanje i opterećenje određuje izvedbu i snagu stroja.

U ovom završnom radu opisan je prijenos topline, zatim utjecaj temperature na parametre i životni vijek. Nakon toga opisane su metode toplinske zaštite te hlađenje i proračun toplinskog otpora električnih strojeva. Mjerenje je provedeno uz prisilno strujanje zraka kroz rebrasti hladnjak za koje je pomoći Kirchhoffovih toplinskih shema izračunat toplinski otpor.

### 1.1. Zadatak završnog rada

U završnom radu potrebno je izložiti fizikalne osnove prijenosa topline kondukcijom, konvekcijom i zračenjem. Izložiti i opisati toplinske modele električnog stroja, odnosno njegovog hlađenja. Opisati utjecaj nadtemperature na životni vijek i parametre strojeva. Opisati metode zaštite od toplinskih preopterećenja strojeva. U dogovoru s mentorom odabrali jednostavnije primjere toplinskih modela strojeva te njihovom upotrebom izvršiti proračune toplinskog otpora i/ili raspodjele temperature stroja. Za jednostavne geometrije stroja te njegovog rashladnog sustava prikazati odgovarajuće toplinske sheme zasnovane na elementima mreža odgovarajuće Kirchhoffove toplinske sheme te prikazati analitičke ili numeričke postupke (metoda konačnih elemenata, ili neka druga) određivanja toplinskih otpora i/ili raspodjele temperature. Izlaganje je potrebno poduprijeti izračunima, grafičkim prikazima i shemama.

## 2.FIZIKALNE i TEORIJSKE OSNOVE PRIJENOSA TOPLINE

### 2.1. Važnost prijenosa topline i toplinskih proračuna

Grana znanosti koja proučava prijenos topline i utjecaj temperature naziva se termodinamika i opisuje osnovne fizikalne veličine vezane uz toplinu [1]. No prijenos topline se odvija kad god postoji temperaturna razlika [2] te prema osnovnoj literaturi koja je korištena u ovom radu *Principles of Heat Transfer* [3] jako je važna primjena prijenosa topline u: kemijskoj industriji, tj. izmjenjivačima topline; prijenosnom i distribucijskom sustavu električne energije; hlađenju električnih strojeva, elektroničkih komponenti, prijevoznih sredstava i elektroničkih uređaja; klimatizaciji prostora; medicinskoj industriji za očuvanje temperature tkiva ili organa, itd.

Stoga u posljednje vrijeme u inženjerstvu proučavanje prijenosa topline i toplinskih modela naglo raste i dobiva sve značajniju ulogu u procesima modeliranja i proizvodnje elektroničkih uređaja, automobila, elektrana i dr. [4]

Iz osnovnih mehanizama prijenosa topline izvedene su praktične metode toplinske zaštite i hlađenja opisane u nastavku rada te uz pomoć Kirchhoffovih toplinskih shema koje su ekvivalentne Kirchhoffovim električnim shemama računaju se toplinski otpori koji modeliraju prijenos topline.

### 2.2. Osnovne fizikalne veličine i zakoni važni za prijenos topline

Temperatura  $T$  je mjera zagrijanosti nekog tijela i jedna je od osnovnih fizikalnih veličina međunarodnog sustava jedinica SI. Mjerna jedinica koja se najčešće koristi je K (kelvin), a može se izraziti u °C (stupanj Celzijev) tako da vrijedi izraz [1]:

$$T(\text{K}) = 273,15 + t(^{\circ}\text{C}) . \quad (2-1)$$

Iz ovog izraza također je vidljivo da temperaturna razlika (interval) ne ovisi o mjernoj jedinici, tj.  $\Delta T(\text{K}) = \Delta t(^{\circ}\text{C})$ .

Toplina  $Q$  je fizikalna veličina koja opisuje energiju koja prelazi s tijela više temperature na tijelo niže temperature, a ovisi o masi tijela  $m$ , specifičnom toplinskom kapacitetu  $c$  i razlici temperatura  $\Delta T$ . Mjerna jedinica je džul (J) i opisana je sljedećim izrazom [1]:

$$Q = mc\Delta T . \quad (2-2)$$

Specifični toplinski kapacitet  $c$  (J/(kgK)) je fizikalna veličina koja opisuje svojstvo primanja ili predavanja topline uz promjenu temperature.

Grana fizike koja proučava prijenos topline između sustava i okoline te pretvorbu topline u mehanički rad naziva se termodinamika [2]. Nulti zakon termodinamike govori kako su dva tijela koja se međusobno dodiruju u ravnoteži ako su njihove temperature jednake, a ako postoji razlika u temperaturama tijela koja se dodiruju nastojat će se postići stanje ravnoteže i dolazi do prijenosa topline i energije [2]. Prvi zakon termodinamike odnosi se na zatvoren sustav i tvrdi da je zbroj količina topline i mehaničkog rada stalan [2]. Tako se prvi zakon termodinamike može poopćiti u zakon očuvanja energije prema kojem u svakom zatvorenom sustavu zbroj svih oblika energije stalan [2]. Drugi zakon termodinamike ističe smjer u kojem se odvija pretvorba topline u mehanički rad. Carnot je zaključio da prema njegovom pokusu s dva spremnika topline na različitim temperaturama pri prelasku topline s toplijeg spremnika na hladniji samo dio se pretvara u mehanički rad, a ostatak prelazi na spremnik niže temperature [2]. Treći zakon termodinamike govori da je entropija sustava pri temperaturi apsolutne nule (0 K) jednaka nuli, ako se sustav nalazi u svom najnižem energetsom stanju [2].

Klasična termodinamika se većinom bavi prijenosom energije na molekularnoj razini, dok u primjeni na električnim strojevima prijenos energije se opisuje pomoću mehanizama prijenosa topline. Osnovna podjela tih mehanizama je na kondukciju, konvekciju i zračenje [2].



### 3. MEHANIZMI PRIJENOSA TOPLINE

#### 3.1. Prijenos topline kondukcijom

Kondukcija je prijenos topline koji se pojavljuje u krutim tvarima i materijalima tako da prijenos topline nastaje zbog razlike u temperaturama tijela koja se dodiruju. Prijenos topline se odvija tako da zagrijanije tijelo, koje zbog više temperature ima veću unutarnju energiju te se na molekularnoj razini može uočiti brže kretanje čestica elektrona, u dodiru s hladnijim tijelom će zbog sudara tih brzih i sporih čestica unutarnja energija hladnijeg tijela se povećavati, a toplijeg smanjivati dok se ne uspostavi temperaturna i energijska ravnoteža. Dva tijela u koja se dodiruju će izmijeniti toplinu kondukcijom. Osim što kondukcija ovisi o strukturi molekule, ovisi i o materijalu te njegovim električnim svojstvima, a razlikujemo električne izolatore i vodiče. Dobar vodič ima vrlo velik tok elektrona pa je stoga i dobar toplinski vodič. Što se tiče kondukcije fluida i plinova puno je složenije jer se u obzir mora uzeti difuzija i nestabilna kristalna rešetka, te je većina plinova i fluida loš električni vodič pri visokim temperaturama, izuzetak je samo voda.

Toplinsku vodljivost kondukcijom potiče temperaturni gradijent i onda kada on postoji u krutom mediju proizlazi da će se toplina prenositi iz područja više temperature u područje niže temperature. Ta toplina prenesena kondukcijom  $q_k$  bit će proporcionalna temperaturnom gradijentu  $dT/dx$ , gdje je  $x$  udaljenost u smjeru toplinskog toka te  $A$  je površina prijenosa topline [3]:

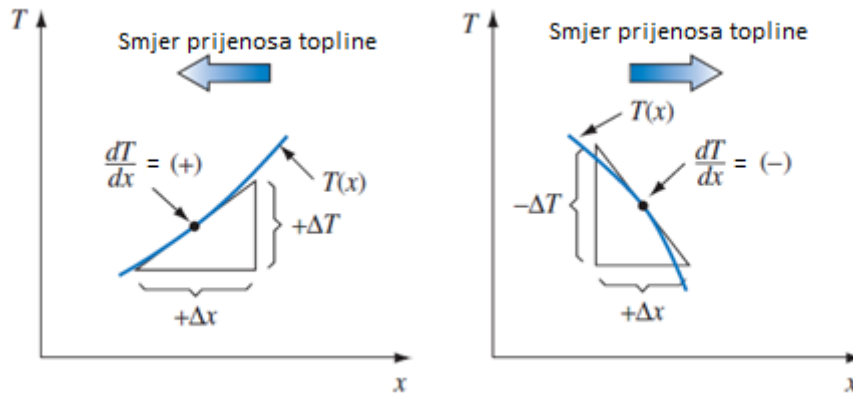
$$q_k \sim A \frac{dT}{dx}. \quad (3-1)$$

U obzir se treba uzeti i fizikalno svojstvo medija koje definira ovisnost toplinskog toka o vodljivosti  $k$ , a zbog drugog zakona termodinamike dodajemo predznak minus [3]:

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx}. \quad (3-2)$$

Ova jednadžba definira toplinsku vodljivost (kondukciju), a nazvana je Fourierov zakon vodljivosti po francuskom znanstveniku J. B. J. Fourieru koji ga je predložio 1822. godine.

Na slici 3.1 [3] je prikazano zašto se dodaje negativan predznak koji ovisi o temperaturnom gradijentu i smjeru  $x$  toplinskog toka. Predznak će biti negativan ako temperatura opada s porastom vrijednosti  $x$ .



**Slika 3.1.** Ovisnost predznaka jednadžbe (3-2) o smjeru toplinskog toka

Iz Fourierovog zakona (3-2) toplinsku kondukciju možemo izraziti na sljedeći način [3]:

$$k \equiv \frac{q_k/A}{|dT/dx|} \quad (3-3)$$

Mjerna jedinica toplinske kondukcije biti će  $W/(m \text{ K})$ , jer toplinski tok  $q_k$  se mjeri u  $W$ , površina  $A$  u  $m^2$ ,  $x$  u metrima i temperatura  $T$  u  $K$ . Za proračune se koriste eksperimentalno dobivene vrijednosti toplinske vodljivosti iako su predložene teorije za izračune toplinske kondukcije. U tablici 3.1 [3] bit će vrijednosti kondukcije za određene materijale te se može uočiti da metali su najbolji vodiči topline, a plinovi su loši. Između se smještaju tekućine i nemetali te se toplinska vodljivost može povezati s molekulskom strukturom tvari, a za plinove u obzir se mora uzeti ovisnost toplinske vodljivosti o tlaku.

**Tablica 3.1.** Toplinska vodljivost metala, nemetala, fluida i plinova

<b>Materijal</b>	<b>Toplinska vodljivost pri 300 K [W/(m K)]</b>
<i>Bakar</i>	399
<i>Aluminij</i>	237
<i>Ugljični čelik, 1%C</i>	43
<i>Staklo</i>	0,81
<i>Plastika</i>	0,2-0,3
<i>Voda</i>	0,6
<i>Etilen glikol</i>	0,26
<i>Motorno ulje</i>	0,15
<i>Freon (tekući)</i>	0,07
<i>Vodik</i>	0,18
<i>Zrak</i>	0,026

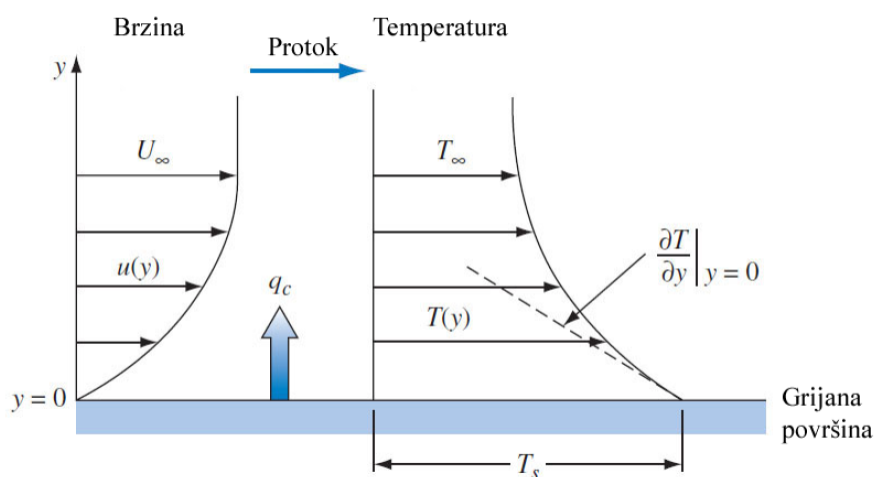
Plinovi imaju jako niske vrijednosti toplinske provodljivosti jer ona ovisi o promjenama tlaka te bi trebali poznavati kinetičku teoriju plinova koja je povezana s promjenama temperature. Isto tako za tekućine se teško mogu opisati mehanizmi kondukcije jer za većinu tekućina toplinska vodljivost opada s porastom temperature osim za vodu, a tekućine iako slične molekularno plinovima neosjetljive su na tlak osim u blizini kritične točke. Stoga u inženjerstvu vrijednosti toplinske provodljivosti se uspoređuju sa zasićenim stanjem.

Toplinski izolatori imaju isto tako važnu ulogu u prijenosu topline. Izolatori su krute tvari čija struktura ima šupljine koje ispunjava neki plin te tako smanjuju mogućnost vođenja topline jer plinovi imaju jako niske vrijednosti toplinske provodnosti te tako usporavaju ili vrlo slabo prenose toplinu te su zbog toga i nazvani toplinski izolatori.

### 3.2. Prijenos topline konvekcijom

Konvekcija kao prijenos topline pojavljuje se kada topliji fluid struji prema hladnijem i predaje toplinu okolini. Strujanje topline, tj. konvekcija, se zapravo sastoji od prijenosa topline kondukcijom na atomskoj razini zbog gibanja molekula fluida i na makroskopskoj zbog gibanja fluida koje može uzrokovati prisilna i slobodna konvekcija. Prirodna ili slobodna konvekcija nastaje razlikom u gustoći fluida koja je najčešće uzrokovana temperaturnim gradijentom, a brzinu strujanja fluida određuju svojstva i temperatura fluida te dimenzije posude ili cijevi koju fluid ispunjava. Naziv prirodna se može povezati s prirodnim tokom i silom uzgona koja topliji fluid manje gustoće diže gore, a hladniji zadržava dolje. Takav primjer imamo svakodnevno dok zagrijavamo vodu na štednjaku. Prisilna konvekcija za razliku od prirodne se događa pod utjecajem neke vanjske sile poput pumpe ili ventilatora koji određuju strujanje fluida. Prijenos topline biti će veći jer brzina fluida osim o dimenzijama posude i svojstvima fluida ovisi o pumpi ili ventilatoru koji ubrzavaju proces konvekcije. Primjer takve prisilne konvekcije imamo u izmjenjivačima topline kao što su radijatori kroz koje strujanje vode potiče pumpa.

Na slici 3.2. [3] fluid zagrijava površina s temperature  $T_s$ , a na beskonačno dalekoj udaljenosti  $y$  od te površine fluid ima ustaljenu temperaturu  $T_\infty$ , viskoznost fluida utječe na brzinu fluida  $U_\infty$  u stacionarnom stanju beskonačno udaljenom. Temperaturni gradijent ovisi o spoju površine i fluida te o brzini protoka, a brzina protoka o viskoznosti fluida. Brzina uz površinu je najmanja dok u sredini će biti jednaka slobodnom strujanju ili brzini koju zadaje pumpa.



**Slika 3.2.** Raspodjela brzine i temperature za prijenos topline konvekcijom na fluid preko zagrijane površine

Prijenos topline konvekcijom ovisi o karakteristikama fluida, viskoznosti, gustoći i temperaturnim svojstvima fluida, ali i o brzini strujanja koja može biti prirodnog toka ili nametnuta nekim vanjskim uređajem. Brzina prijenosa topline  $q_c$  između fluida i površine može se izračunati [3]:

$$q_c = \bar{h}_c A \Delta T, \quad (3-4)$$

gdje su:  $\Delta T$  razlika temperature površine i temperature fluida na nekoj udaljenosti,  $\bar{h}_c$  je koeficijent konvekcije,  $A$  je površina zagrijane ploče.

Ova formula (3-4) [3] se naziva Newtonov zakon hlađenja, po britanskom znanstveniku Isaacu Newtonu koji ju je predložio 1701. godine. Faktor  $\bar{h}_c$  je dosta složen jer ovisi o geometriji površine, brzini, temperaturnom gradijentu i o fizikalnim svojstvima fluida, a ti parametri nisu konstantni i variraju s promjenom položaja pa razlikujemo lokalni i prosječni koeficijent konvekcije. Izrazom (3-5) definirati ćemo lokalni koeficijent konvekcije  $h_c$  [3]:

$$dq_c = h_c dA (T_s - T_\infty), \quad (3-5)$$

gdje je  $A$  zagrijana površina, a  $T_s$  temperatura zagrijane površine i  $T_\infty$  ustaljena temperatura zraka, a prosječni koeficijent  $\bar{h}_c$  možemo onda definirati sljedećim izrazom [3]:

$$\bar{h}_c = \frac{1}{A} \iint_A h_c dA. \quad (3-6)$$

Možemo zaključiti da koeficijent konvekcije ovisi o parametrima fluida i dodirne površine pa ga je stoga dosta teško odrediti i smjestiti u tablicu s vrijednostima, ali u inženjerstvu se mogu koristiti prosječne vrijednosti koje su prikazane u tablici 3.2. [5].

**Tablica 3.2.** Koeficijent konvekcije za različita stanja fluida

		$\bar{h}_c$ [W/m <sup>2</sup> K]
<b>Slobodna konvekcija</b>	Plinovi	5-30
	Tekućine	20-1000
<b>Prisilna konvekcija</b>	Plinovi	20-300
	Tekućine	50-20.000
	Tekući metali	5.000-50.000
<b>Promjena agregatnog stanja</b>	Vrenje	2.000-100.000
	Kondenzacija	5.000-100.000

Za procjenu koeficijenta prijenosa topline konvekcijom postoji 5 metoda [3]:

1. Analiza dimenzija u kombinaciji s eksperimentima
2. Točna matematička rješenja jednadžbi graničnog sloja
3. Približne analize jednadžbi graničnog sloja integralnim metodama
4. Analogija između prijenosa topline i prijenosa momenta
5. Numerička analiza, ili modeliranje metodom računarske dinamike fluida (CFD methods).

Svih pet tehnika pomažu u razumijevanju prijenosa topline konvekcijom, ali svaka od njih ima neka svoja ograničenja te za potpunu procjenu koeficijenta konvekcije potrebno je koristiti više postupaka i metoda.

Prva metoda Analiza dimenzija je matematički jednostavna i ima širok spektar korištenja, a ograničena je time da je beskorisna ako nema podatke izmjerene pokusom koji se proširuju uspoređivanjem s bezdimenzijskim grupama[3].

Metoda točnih matematičkih analize zahtjeva istodobno rješavanje jednadžbi gibanja fluida i prijenosa energije fluida koji se kreće. Pretpostavka je da se ti fizikalni procesi mogu opisati matematičkim postupcima te to ograničava opseg točnih rješenja jer matematika može opisati samo laminarno strujanje fluida, ali i to je komplicirano te se sustavi dodatno pojednostavljaju protokom ravne ploče ili kružnog cilindra. Stoga točna rješenja su jako važna te se ona mogu provjeriti eksperimentom[3].

Sljedeća metoda približne analize se bavi protokom uz granični sloj fluida i posude i nije ograničena na laminarni tok već se može primijeniti i na turbulentan tok. Korištenjem

jednostavne jednačbe za opis brzine i temperature na graničnom sloju dolazi do rješenja koja matematički proračuni ne bi mogli riješiti[3].

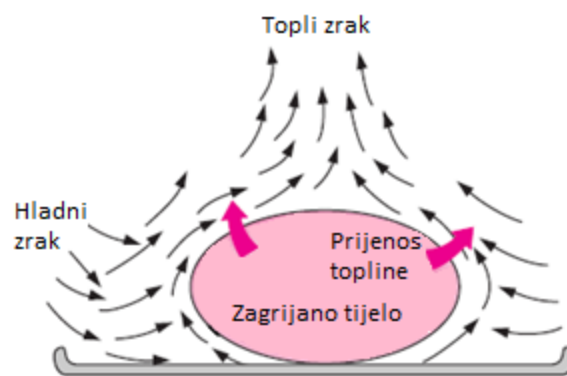
Zatim za analizu turbulentnog strujanja se koristi metoda analogije prijenosa topline i momenta. Pojednostavljeni model koji prikazuje gibanje molekula plina u kinetičkoj teoriji prikazuje prijenos topline kao prijenos momenta. Nije potpuno prihvaćen, ali model pokazuje dosta dobre praktične rezultate u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima[3].

Posljednje numeričke metode koje se bave jednačbama gibanja fluida te uzimaju se diskretne vremenske točke imaju mogućnost pohrane rješenja te raščlanjivanja složenih slojeva fluida[3].

Sve metode se koriste iako su ograničene, no kombiniranjem istih se može postići jako dobra procjena numeričkih i eksperimentalnih vrijednosti koeficijenta konvekcije.

### 3.2.1. Prirodna konvekcija

Prijenos topline prirodnom konvekcijom se odvija kad se u neposrednoj blizini nađu fluid i tijelo ili površina čije se temperature razlikuju. Ako je površina zagrijanija, tj. ima višu temperaturu, a zrak ili fluid niže temperature onda dolazi do pojave konvekcije u površinskom sloju se zrak zagrijava te počinje prirodnom tokom strujati gore, a hladniji dolje zbog sile uzgona i gravitacije. To strujanje zraka iznad zagrijane površine će se odvijati i zrak će odvoditi toplinu konvekcijom sve dok se ne uspostavi temperaturna ravnoteža. Primjer zagrijanog tijela koje zagrijava okolni zrak prikazan je na slici 3.3. [4].



**Slika 3.3.** Hlađenje zagrijanog tijela u hladnoj okolini prirodnom konvekcijom

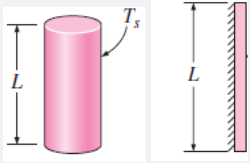
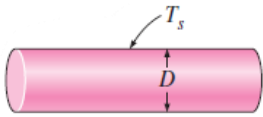
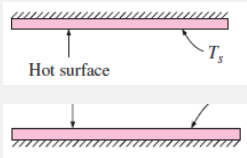
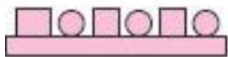
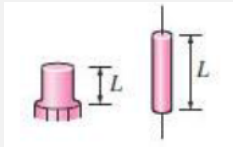
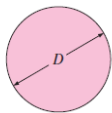
Količina prenesene topline konvekcijom ovisi o brzini i protoku fluida pa ako fluid ima veći protok i prijenos topline će se odvijati brže. No prirodna konvekcija se ne može kontrolirati kao prisilna pomoću ventilatora pa prijenos i brzina ovise o temperaturnom gradijentu te sili uzgona. Strujanje fluida utječe na prijenos tako što se može pojaviti sila trenja između slojeva hladnog i toplog zraka ili trenje između površine i fluida usporavajući prijenos, ali i laminarno i turbulentno strujanje imaju velik utjecaj na proces prijenosa topline. Već smo spominjali koeficijent konvekcije  $h_c$  te jednadžbu koja opisuje prijenos topline konvekcijom, Newtonov zakon hlađenja (3-4).

Možemo zaključiti da brzina prijenosa ovisi o koeficijentu konvekcije, a on ovisi o geometriji zagrijane površine i temperaturnom gradijentu. U tablici 3.3. [4] prikazat ćemo pojednostavljene formule za računanje koeficijenta konvekcije za različite geometrije. Također treba naglasiti da se formule mogu koristiti i pri tlaku različitom od atmosferskog, ali tako da se pomnože s  $\sqrt{P}$  gdje je  $P$  tlak izražen u  $atm$  (  $1 atm = 101,325 kPa$ )[4]:

$$h_{c,P atm} = h_{c,P atm} \sqrt{P}. \quad (3-7)$$



**Tablica 3.3.** Pojednostavljene formule za računanje koeficijenta kondukcije pri laminarnom strujanju za različite geometrije i pri atmosferskom tlaku

GEOMETRIJA	IZRAZ ZA KOEFICIJENT KONVEKCIJE
<p><b>Vertikalna ploča ili cilindar</b></p> 	$h_c = 1,42 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \text{ (W/(m}^2 \text{ K))}$
<p><b>Horizontalna ploča ili cilindar</b></p> 	$h_c = 1,32 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \text{ (W/(m}^2 \text{ K))}$
<p><b>Horizontalna ploča, površine A i opsega P</b></p> <p><math>L=A/P</math></p> 	$h_c = 1,32 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \text{ (W/(m}^2 \text{ K))}$ $h_c = 0,59 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \text{ (W/(m}^2 \text{ K))}$
<p><b>Komponente na tiskanoj pločici</b></p> 	$h_c = 2,44 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \text{ (W/(m}^2 \text{ K))}$
<p><b>Male komponente i žica u zraku</b></p> 	$h_c = 3,53 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \text{ (W/(m}^2 \text{ K))}$
<p><b>Kugla</b></p> 	$h_c = 1,92 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \text{ (W/(m}^2 \text{ K))}$

Važnu ulogu u empirijskom određivanju koeficijenta prijenosa topline kondukcijom imaju bez dimenzijske veličine određene Buckinghamskim  $\pi$  teoremom [3]:

Reynoldsov broj: 
$$Re = \frac{U_{\infty}L}{\nu}, \quad (3-8)$$

Prandtllov broj: 
$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad (3-9)$$

Grashofov broj: 
$$Gr = \frac{g \beta (T_s - T_{\infty})L^3}{\nu^2}, \quad (3-10)$$

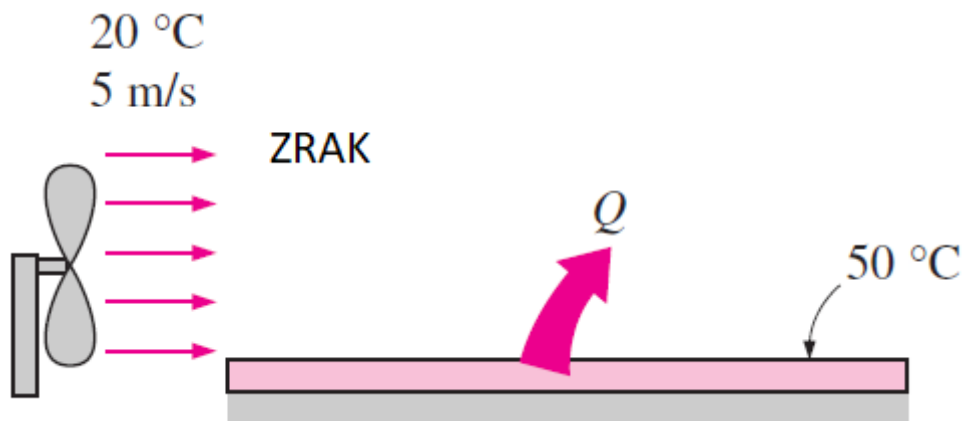
Nusseltov broj: 
$$Nu = \frac{h_c L}{k}, \quad (3-11)$$

gdje je:  $U_{\infty}$ - ustaljena brzina strujanja fluida (m/s),  $L$ - karakteristična duljina zagrijane geometrije (m),  $\nu$  - kinematička viskoznost fluida ( $m^2/s$ ),  $\alpha$  – koeficijent termalne difuzivnosti ( $m^2/s$ ),  $g$  - ubrzanje sile teže ( $m/s^2$ ),  $\beta$  - koeficijent toplinske ekspanzije fluida ( $1/K$ ),  $(T_s - T_{\infty})$  - temperaturni gradijent (K),  $k$ - koeficijent toplinske vodljivosti fluida ( $W/(m K)$ ).

Nusseltov broj predstavlja omjer prijenosa topline kondukcijom i konvekcijom. Ako je vrijednost  $Nu=1$  onda se prijenos u graničnom sloju odvija samo kondukcijom, a što je veći Nusseltov broj to je izraženiji prijenos topline konvekcijom pa se udio kondukcije može zanemariti.

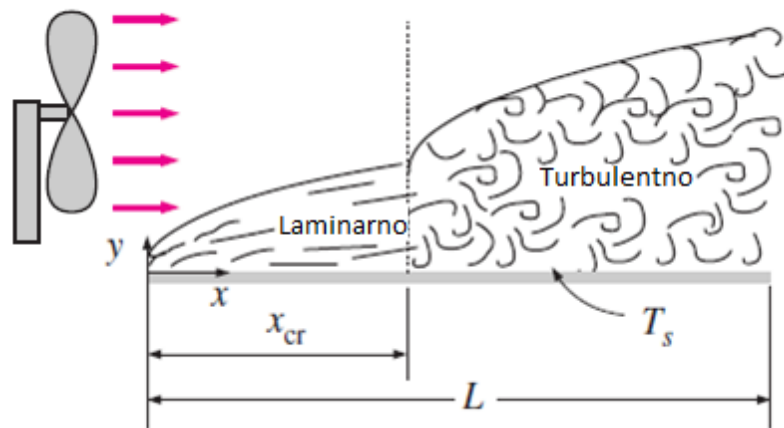
### 3.2.2. Prisilna konvekcija

Prilikom prijenosa topline prisilnom konvekcijom brzina prijenosa ovisi o brzini strujanja fluida te što je veća brzina gibanja fluida veći je protok pa se i toplina brže prenosi. Ako u sustav dodamo ventilator koji određuje i povećava brzinu strujanja fluida pa time i tok znači da sustav prenosi toplinu prisilnom konvekcijom. Ovisno o veličini i svojstvima ventilatora koeficijent prijenosa topline se može uvećati nekoliko puta. Na slici 3.4.[4] prikazana je prisilna konvekcija gdje se topli zrak zagrijan vrućom površinom izmjenjuje s hladnim zrakom kojeg pokreće ventilator te dolazi do prisilne konvekcije i prijenosa topline  $Q$  između zračnih masa različite temperature.



Slika 3.4. Prikaz prisilne konvekcije

Primjere vanjske prisilne konvekcije imamo kao ventilatore i hladnjake na elektroničkim uređajima poput osobnih i prijenosnih računala. Ventilatori potiču brže strujanje zraka i hlađenje električnih komponenti koje se prilikom rada zagrijavaju. Unutarnju prisilnu konvekciju potiču pumpe koje ubrzavaju protok tekućine kroz cijevi kako bi se prijenos topline brže odvijao, takvi primjeri su izmjenjivači topline ili kućno grijanje gdje pumpe ubrzavaju protok tople vode do radijatora. Strujanje fluida vanjsko ili unutarnje može uzrokovati laminarni (uredni i pravocrtni) protok ili turbulentni (pojave vrtložnih strujanja i nepravilnog gibanja fluida) protok. Na slici 3.5. [4] prikazano je kako laminarno strujanje ventilatora iznad zagrijane površine postane turbulentno.



**Slika 3.5.** Laminarno i turbulentno strujanje u graničnom sloju iznad zagrijane površine

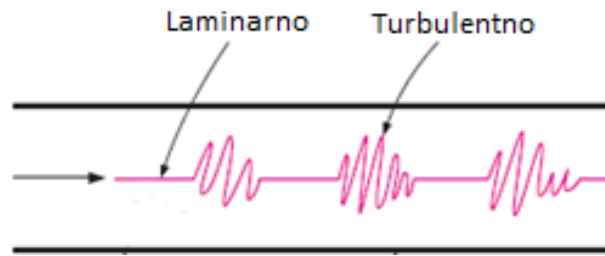
Prijelaz laminarnog u turbulentno strujanje ovisi o geometriji površine, hrapavosti površine, brzini hladnog zraka, temperaturi zagrijane površine, vrsti fluida, ali i o puno drugih faktora koji mogu utjecati na protok fluida. Sve ove faktore koji utječu na promjenu toka fluida na nekoj udaljenosti  $x_{cr}$  od ruba zagrijane ravne površine najbolje opisuje Reynoldsov broj, spomenut u poglavlju 3.2.1. jednažba (3-8).

Jednostavniji slučaj je unutarnje strujanje fluida kroz cijevi gdje Reynoldsov broj kao Nusseltov broj i faktor trenja ovisi o hidrauličkom promjeru cijevi  $D_h$  [4]:

$$D_h = \frac{4A_c}{p}, \quad (3-12)$$

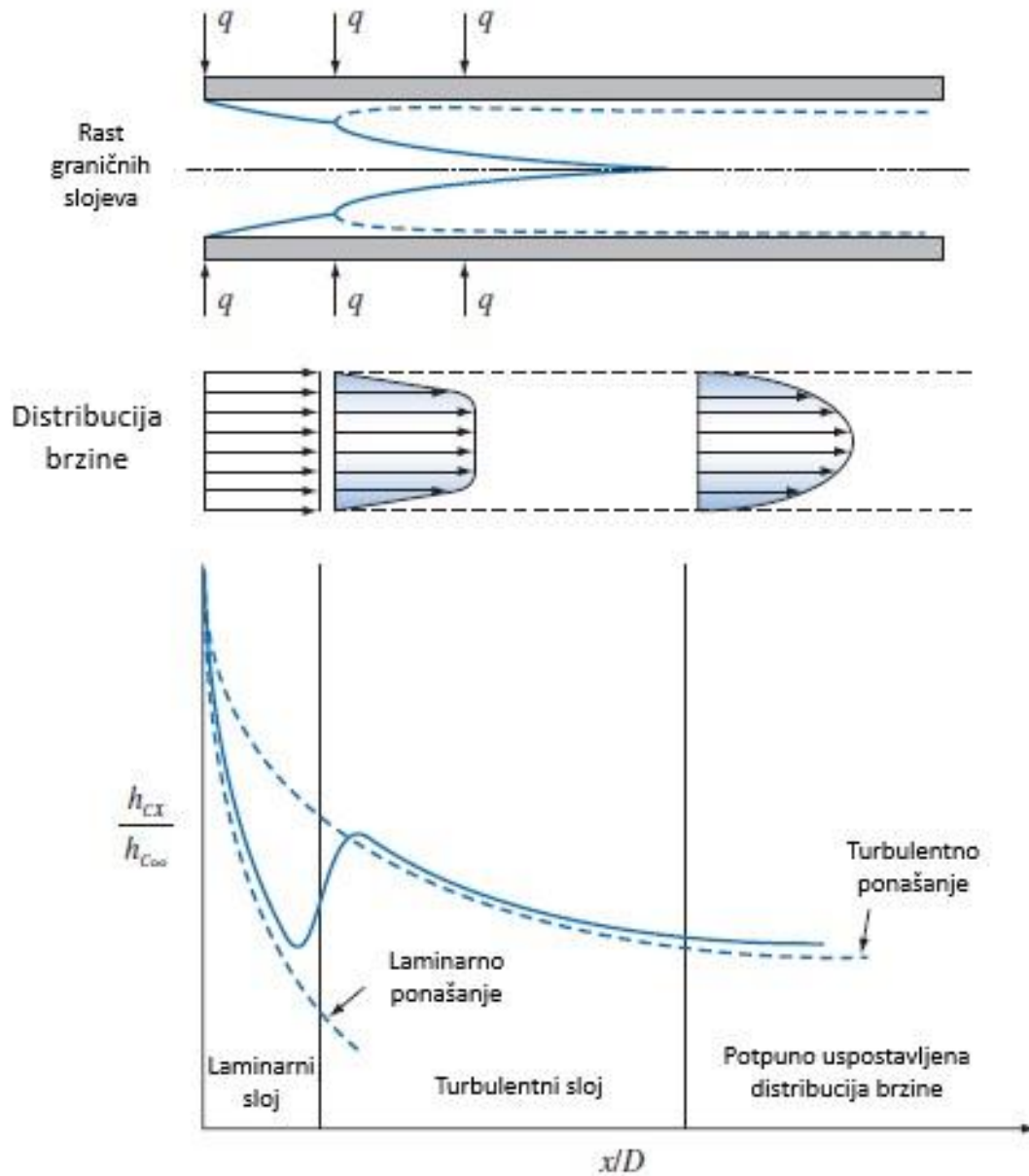
gdje je  $A_c$  poprečni presjek cijevi, a  $p$  je opseg iste. Za cilindrične cijevi  $D_h$  je jednak promjeru cijevi  $D$ .

Poželjno bi bilo poznavati Reynoldsov broj za laminarni protok, prijelazni ili turbulentni, no u stvarnosti puno faktora utječe i stvara smetnje pri točnom određivanju. Stoga uzimajući u obzir praktične uvjete laminarni protok je za  $Re < 2300$ , turbulentni za  $Re > 10000$ , a prijelazni između laminarnog i turbulentnog. Na slici 3.6.[4] kroz cijev hidrauličkog promjera  $D_h$  prikazan je prijelaz iz laminarnog u turbulentni tok fluida.



**Slika 3.6.** Prijelaz laminarnog u turbulentno strujanje za  $2300 \leq Re \leq 4000$

Početno stanje na ulasku u cijev prisilnom konvekcijom ima zadanu i pravilno raspoređenu brzinu i temperaturu fluida te ulaskom u područje ustaljene temperature i brzine dolazi do prijelaznog stanja na granici fluida i cijevi te pojave gibanja fluida kroz cijev i protoka. Oblici raspodjele temperature i brzine kroz cijev ovise je li protok potpuno laminaran ili turbulentan te postoji prijelaz. Omjer trenutnog koeficijenta konvekcije  $h_{cx}$  i ravnotežnog stanja  $h_{c\infty}$  ovisi o graničnim slojevima brzine i temperature te o faktorima trenja između slojeva. Na sljedećoj slici 3.7. [3] prikazuje se raspodjela brzine i omjera koeficijenata kroz cijev prisilnom konvekcijom te prijelaz laminarnog u turbulentni tok.



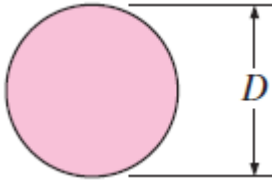

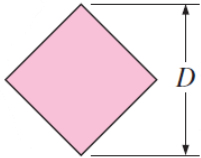
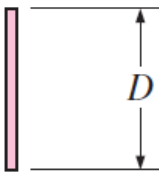
**Slika 3.7.** Raspodjela brzine i trenutnog koeficijenta konvekcije blizu ulaza u ravnomjerno zagrijan fluid

Već prije smo spominjali Nusseltov broj kao omjer prijenosa topline kondukcijom i konvekcijom i hidraulički promjer  $D_h$  pa koeficijent konvekcije možemo izraziti na sljedeći način [4]:

$$h_c = \frac{k}{D_h} Nu, \quad (3-13)$$

gdje je  $k$  koeficijent kondukcije. Spomenuto je da što je veći Nusseltov broj izraženiji je prijenos konvekcijom, dok prijenos kondukcijom se smatra za  $Nu=1$ . Tablica 3.4. [4] prikazuje vrijednosti Nusseltovog broja za vanjsku prisilnu konvekciju dobivenog eksperimentalnim putem.

**Tablica 3.4.** Vrijednosti Nusseltovog broja za prisilnu vanjsku konvekciju preko kružnih i drugih cilindara

Poprječni presjek	Reynoldsov broj	Nusseltov broj
<p><b>Krug</b></p> 	<p>0,4 - 4 4 - 40 40 - 4 000 4 000 - 40 000 40 000 - 400 000</p>	<p><math>Nu = 0,989 Re^{0,330} Pr^{1/3}</math> <math>Nu = 0,911 Re^{0,385} Pr^{1/3}</math> <math>Nu = 0,638 Re^{0,466} Pr^{1/3}</math> <math>Nu = 0,193 Re^{0,618} Pr^{1/3}</math> <math>Nu = 0,027 Re^{0,805} Pr^{1/3}</math></p>
<p><b>Kvadar</b></p> 	<p>5 000 – 100 000</p>	<p><math>Nu = 0,102 Re^{0,675} Pr^{1/3}</math></p>
<p><b>Kvadar pod kutom 45°</b></p> 	<p>5 000 – 100 000</p>	<p><math>Nu = 0,246 Re^{0,588} Pr^{1/3}</math></p>
<p><b>Vertikalna površina</b></p> 	<p>4 000 – 15 000</p>	<p><math>Nu = 0,228 Re^{0,731} Pr^{1/3}</math></p>

Ovom tablicom prikazane su vrijednosti za vanjsko strujanje zraka ili nekog fluida ovisno u području nekih karakterističnih oblika. Nusseltov broj nije točno određen već ovisi osim o geometriji još o svojstvu fluida izraženo preko Reynoldsovog broja, gdje smo spomenuli da za laminarni tok  $Re < 2300$ , te o ovisnosti prijenosa topline o brzini strujanja fluida izraženo

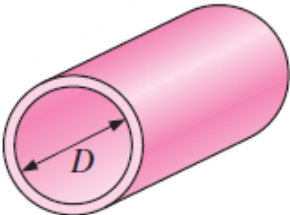
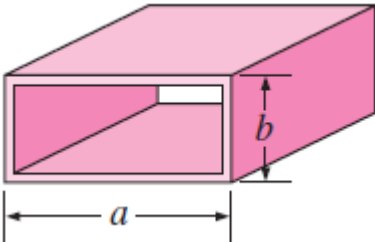
bezdimenzijskim Prandtlvim brojem koji za zrak pri 300 K i 101,325 kPa iznosi 0,71 dok za vodu iznosi 6 [6].

Unutarnji protok kroz cijevi također ovisi je li strujanje turbulentno ili laminarno, zatim ovisi o geometrijama cijevi i brzini strujanja fluida. Nusseltov broj za turbulentno strujanje kroz kanale i glatke cijevi određuje Dittus-Boelterova korelacija [4]:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} . \quad (3-14)$$

Za laminarni tok Nusseltov broj prikazan je u tablici 3.8. [4], a ovisi o hidrauličkom promjeru cijevi i odnosu stranica ako cijev nije kružnog presjeka.

**Tablica 3.8.** Nusseltov broj za potpuno razvijeno laminarno strujanje

Geometrija cijevi	Omjer karakterističnih veličina	Nusseltov broj
<p><b>Kružna cijev</b></p> 	-	4,36
<p><b>Pravokutna cijev</b></p> 	a/b 1 2 3 4 6 8 ∞	3,61 4,12 4,79 5,33 6,05 6,49 8,24



### 3.3. Prijenos topline radijacijom

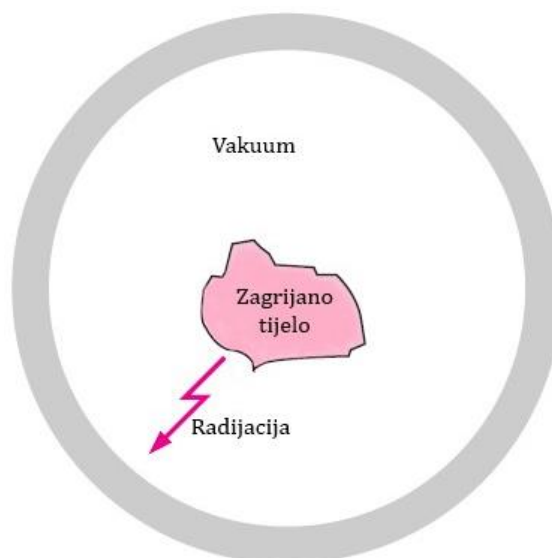
Radijacija (zračenje) je oblik prijenosa topline elektromagnetskim valovima ili snopovima subatomske čestice koje se usmjereno gibaju kroz prostor [7]. Taj prostor ne mora biti ispunjen plinom jer zagrijano tijelo u vakuumu također okolini predaje toplinu koju je sadržavalo u obliku unutarnje energije. To znači da radijacija kao postupak prijenosa topline za razliku od kondukcije i konvekcije ne zahtijeva medij kojim se prenosi toplina. Teorijske osnove postavio je J.C. Maxwell u teoriji polja koja se ubrzano izmjenjuju nazvao ih elektromagnetski valovi, a kreću se brzinom svjetlosti u vakuumu, koja iznosi  $c_0 = 2,9979 \times 10^8$  m/s. Karakteristike elektromagnetskog vala su frekvencija  $\nu$  ( $s^{-1} = Hz$ ) i valna duljina  $\lambda$  (m) [4]:

$$c = \lambda \nu . \quad (3-15)$$

Brzina širenja elektromagnetskog vala kroz medij  $c$  jednaka je omjeru brzine svjetlosti u vakuumu  $c_0$  s indeksom refrakcije  $n$  [4]:

$$c = \frac{c_0}{n} . \quad (3-16)$$

Na slici 3.8. [4] prikazano je zagrijano tijelo koje prenosi toplinu u svoju okolinu zračenjem.



**Slika 3.8.** Prikaz radijacije u vakuumu

Elektromagnetski spektar uključuje gama zračenje, X- zrake, ultraljubičasto zračenje, vidljivu svjetlost, infracrveno zračenje, termalnu radijaciju, mikrovalove i radio valove. Kratkovalnim zračenjem u koje se ubrajaju gama i X- zrake bave se nuklearni inženjeri, dok se dugovalnim poput mikrovalova i radio valova bave inženjeri elektrotehnike.

Tip zračenja koji je povezan s prijenosom energije je termalna radijacija koja se emitira kao posljedica prijenosa energije molekula, atoma i elektrona. Termalna radijacija postoji uvijek kad je temperatura bilo koje tvari ili čestice iznad apsolutne nule ( $0 \text{ K} = -273,15 \text{ °C}$ ). To znači da sve oko nas uključujući zidove, namještaj, ljude, konstantno emitira ili apsorbira radijaciju.

Maksimalan prijenos topline radijacijom koje emitira površina  $A_s$  apsolutne temperature  $T_s$  dan je Stefan-Boltzmannovim zakonom [3]:

$$q_r = \sigma A_s T_s^4, \quad (3-17)$$

gdje je  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  Stefan-Boltzmannova konstanta u  $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ .

Idealizirana površina koja maksimalno zrači toplinu naziva se crno tijelo, a realne površine iste temperature emitiraju manje topline nego crno tijelo izraženo faktorom emisivnosti  $\varepsilon$  [4]:

$$q_r = \varepsilon \sigma A_s T_s^4. \quad (3-18)$$

Faktor emisivnosti je mjera koliko površina aproksimira crno tijelo, raspon  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  dok za  $\varepsilon = 1$  površina potpuno aproksimira crno tijelo, savršeni emiter. Isto tako važan je faktor apsorpcije  $\alpha$ , raspona  $0 \leq \alpha \leq 1$ , za crno tijelo  $\alpha = 1$  i naziva se savršena apsorpcija.

Realno tijelo koje ne ispunjava zahtjeve potpune emisivnosti i apsorpcije kao idealni radijator ili crno tijelo već za istu temperaturu emitira radijaciju slabije naziva se sivo tijelo. Brzina prijenosa topline između sivog tijela površine  $A_1$  temperature  $T_1$  i okoline crnog pri temperaturi  $T_2$  definira izraz [3]:

$$q_r = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4), \quad (3-19)$$

gdje je  $\varepsilon_1$  faktor emisivnosti sivog tijela s obzirom na emisiju crnog tijela.

Ako ni jedno od dva tijela nije savršeni radijator onda se u jednadžbu unosi bezdimenzijski broj koji modificira jednadžbu s obzirom na emisivnost i relativnu geometriju stvarnih tijela [3]:

$$q_r = \mathcal{F}_{1-2} \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) . \quad (3-20)$$

U stvarnosti radijacija se pojavljuje u kombinaciji s drugim mehanizmima kondukcijom i konvekcijom pa to može inženjerstvu raditi probleme, no to se pojednostavljuje uvođenjem toplinske kondukcije  $K_r$  ili toplinskog otpora  $R_r$  radijacije. Jednadžba toplinskog prijenosa onda izgleda [3]:

$$q_r = K_r (T_1 - T_2') , \quad (3-21)$$

gdje je  $T_2'$  referentna temperatura koju često uvjetuje jednadžba konvekcije, onda koeficijent radijacijske kondukcije uzimajući u obzir (3-20) i (3-21) izgleda [3]:

$$K_r = \frac{\mathcal{F}_{1-2} \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2'} . \quad (3-22)$$

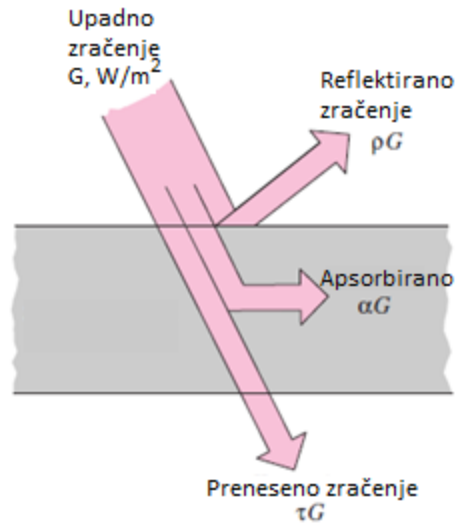
Slijedi da je koeficijent prijenosa topline radijacijom  $\bar{h}_r$  (W/(m<sup>2</sup>K)) izražen na sljedeći način [3]:

$$\bar{h}_r = \frac{K_r}{A_1} = \frac{\mathcal{F}_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2'} , \quad (3-23)$$

slično tome možemo izraziti termalni otpor radijacije  $R_r$  (K/W) [3]:

$$R_r = \frac{T_1 - T_2'}{\mathcal{F}_{1-2} \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)} . \quad (3-24)$$

Važno je spomenuti dijelove upadnog zračenja refleksija, apsorpcija i preneseno zračenje. Upadno zračenje možemo zamisliti poput zrake koja u dodiru s površinom se djelomično odbija, djelomično apsorbira, a dio se prenese preko površine. Na slici 3.9. [4] je slikovito prikazano zračenje te kako se ono ponaša u dodiru s nekom poluprozirnom površinom.



**Slika 3.9.** Apsorpcija, refleksija i prijenos slučajnog zračenja kroz poluprozirni materijal

Prvi zakon termodinamike zahtjeva da zbroj apsorbiranog  $G_\alpha$ , reflektiranog  $G_\rho$  i prenesenog  $G_\tau$  zračenja bude jednak upadnom zračenju  $G$  [4]:

$$G_\alpha + G_\rho + G_\tau = G, \quad (3-25)$$

ako podijelimo cijelu jednadžbu s  $G$  dobije se izraz [4]:

$$\alpha + \rho + \tau = 1, \quad (3-26)$$

gdje je  $\alpha$  koeficijent apsorpcije,  $\rho$  je koeficijent refleksije, a  $\tau$  koeficijent transmisije

## 4. UTJECAJ TEMPERATURE NA RAD ELEKTRIČNOG STROJA

Energija koja se u stroju troši na pokrivanje gubitaka na kraju se pretvara u toplinu. Tom toplinom stroj se zagrijava, tj. povisi mu se temperatura, najprije na mjestima gdje toplina nastaje, a onda se prijenosom topline zagriju i drugi dijelovi stroja, a toplina se sa stroja prenosi na okolinu i sredstva za hlađenje. Za izračun prenesenih količina topline i povišenja temperature primjenjuju se zakoni prijenosa topline vođenjem (kondukcijom), konvekcijom i zračenjem (radijacijom) opisani u prethodnom poglavlju. Najveće količine topline razvijaju se u vodičima namota i iz njih se prenose najprije na izolaciju namota pa je potrebno da izolacija izdrži određene nadtemperature [8]. Osim što se koriste pogodni izolacijski materijali potrebno je održavati temperaturu u određenim granicama hlađenjem.

### 4.1. Utjecaj nadtemperature na radni vijek stroja i parametre

Rad stroja uzrokuje zagrijavanje stroja i njegovih komponenti, a o temperaturi ovise kemijska, električna i mehanička svojstva. Analize utjecaja ovih svojstava na radni vijek stroja češće se zasniva na empirijskim izrazima nego na analitičkim proračunima.

Promjena temperature u elektrotehnici često ima utjecaj na komponente i materijale koji se koriste za izradu strojeva, elektronike, kablova i dr. S vremenom dolazi do trošenja materijala zbog fizikalnih i kemijskih proces koji se neprestano odvijaju, stoga je potrebno zaštititi materijale. Osim zaštite od mehaničkih oštećenja potrebna je zaštita od kemijskih oštećenja kao što je korozija. Bitno je zaštititi se od trošenja materijala jer poznato je da povećanjem temperature raste i brzina reakcije što znači i brže oštećenje i trošenje materijala.

Promjena kemijskih, fizikalnih i drugih svojstava s vremenom također ima znatnu ulogu radnom vijeku stroja. Svaki materijal koji nije na temperaturi apsolutne nule mijenja početni kemijski sastav, a time se mijenjaju njegova mehanička i kemijska svojstva. Povišenom temperaturom reakcije se odvijaju brže, a to znači da brže dolazi do starenja materijala. Ovisnost brzine o promjeni temperature je nelinearna tako da se intenzitet kemijske reakcije može primijetiti golim okom kao na primjer topljenje, izvijanje, eksplozija, isparavanje i dr.

Matematička formula koja objašnjava brzinu kemijske reakcije  $k$  s temperaturom  $T$  (K) postavio je Svante Arrhenius 1889. godine, a dana se taj izraz naziva Arrheniusova jednadžba i izgleda ovako [9]:

$$k = Ae^{\frac{-E_A}{RT}}, \quad (4-1)$$

gdje je  $A$  faktor frekvencije, a još se naziva i eksponencijalni prefaktor i uključuje čimbenike poput učestalosti sudara i njihove orijentacije, varira s temperaturom no uzima se kao konstanta za male temperaturne intervale, a mjerna jedinica ovisi o redu reakcije pa slijedi ako je prvog reda onda je mjerna jedinica  $s^{-1}$ , zatim  $e$  je Eulerov broj i baza prirodnog logaritma,  $R$  je opća plinska konstanta (J/(mol K)), a  $E_A$  se naziva energija aktivacije, to je minimalna energija potrebna za aktivaciju (J/mol).

Slijedi da je  $k$  broj sudara tijekom reakcije u sekundi, jer ako je  $A$  ukupni broj sudara onda je  $\exp(-E_A/RT)$  vjerojatnost da sudar rezultira reakcijom. Povećanjem temperature ili smanjenjem energije aktivacije povećava se brzina reakcije što znači da svakim porastom temperature smanjuje se radni vijek, a smanjenjem temperature se radni vijek produljuje. Zbog toga je preporučljivo hladiti komponente i strojeve da bi se očuvala maksimalna pouzdanost i životni vijek.

Dozvoljeno zagrijavanje, odnosno maksimalnu nadtemperaturu određuju propisi koji ovise o kvaliteti materijala. Općenito se smatralo da svaki materijal može izdržati grijanje do neke određene temperature, a pri prekoračenju te temperature da relativno brzo dotraje. To mišljenje naravno nije odgovaralo stvarnosti pa se tek 1930. godine uveo pojam životni vijek izolacije kao veličine ovisne o temperaturi. Montsinger je američki znanstvenik koji je na osnovi velikog broja pokusa vršenih na transformatorima, za ovisnost životnog vijeka o temperaturi postavio jednadžbu [8]:

$$Z = Z_0 \cdot 2^{\frac{-(\vartheta - \vartheta_0)}{\Delta_0}}, \quad (4-2)$$

gdje je  $Z$  životni vijek,  $Z_0$  referentni životni vijek,  $\vartheta$  temperatura materijala,  $\vartheta_0$  temperatura za koju materijal ima referentni životni vijek, a  $\Delta_0$  ono povišenje ili sniženje temperature kojim se životni vijek u odnosu na referentni smanjuje na pola odnosno povisuje dvostruko.

Zbog spoznaje o utjecaju nadtemperature i promjene životnog vijeka danas se često susrećemo sa strojevima, uređajima ili elektroničkim komponentama kod kojih postoje sustavi hlađenja da bi im se radni vijek produžio, a prethodna jednadžba pokazuje da se sniženjem radne temperature produljuje životni vijek.

## Utjecaj temperature na svojstva materijala

### Promjena dimenzija

Porast temperature utječe i na fizičke promjene materijala kao na primjer linearno i volumno rastezanje, ali i promjena mehaničkih svojstava poput čvrstoće materijala.

Gotovo svi materijali se zagrijavanjem istežu, a koliko je njihovo istežanje s obzirom na početno stanje opisuju koeficijent linearnog istežanja  $\alpha$  i to prema sljedećem izrazu [1]:

$$l = l_0(1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (4-3)$$

gdje je  $l$  dužina materijala na temperaturi  $T$ ,  $l_0$  dužina na početnoj temperaturi  $T_0$ , a  $\Delta T$  je razlika temperatura. Ova formula (4-3) se naziva linearno termičko rastezanje materijala jer su druge dvije dimenzije zanemarive kao na primjer kod štapova, šipki, cijevi i dr., također za tijela čija je debljina zanemariva poput tankih ploča ističe se površinsko širenje.

Koeficijent linearnog istežanja se mjeri u  $K^{-1}$ , a neke njegove vrijednosti su dane u tablici 4.1.[10]

**Tablica 4.1:** Vrijednost koeficijenta linearnog rastežanja  $\alpha$  za neke tipične materijale pri 25 °C

Materijal	Koeficijent linearnog rastežanja $\alpha$ ( $10^{-6} K^{-1}$ )	Materijal	Koeficijent linearnog rastežanja $\alpha$ ( $10^{-6} K^{-1}$ )
<i>aluminij</i>	21-24	<i>olovo</i>	29
<i>mesing</i>	18-19	<i>PVC</i>	54-110
<i>bakar</i>	16-16,7	<i>silicij</i>	3-5
<i>zlato</i>	14,2	<i>srebro</i>	19-19,7
<i>željezo</i>	12	<i>čelik</i>	9,9

Ako se prilikom zagrijavanja istežu sve tri dimenzije tijela onda se to naziva volumno termičko istežanje, a opisano je jednadžbom [1]:

$$V = V_0(1 + \gamma \cdot \Delta T), \quad (4-4)$$

gdje je  $V$  dužina materijala na temperaturi  $T$ ,  $V_0$  dužina na početnoj temperaturi  $T_0$ , a  $\Delta T$  je razlika temperatura. Koeficijent volumnog istezanja  $\gamma$  mjeri se također u  $K^{-1}$ , a povezan je s linearnim na sljedeći način [1]:

$$\gamma = 3 \cdot \alpha . \quad (4-5)$$

U tablici 4.2. dani su koeficijenti volumnog istezanja za neke materijale [11].

**Tablica 4.2.** Vrijednost koeficijenta volumnog rastezanja  $\gamma$  za neke materijale

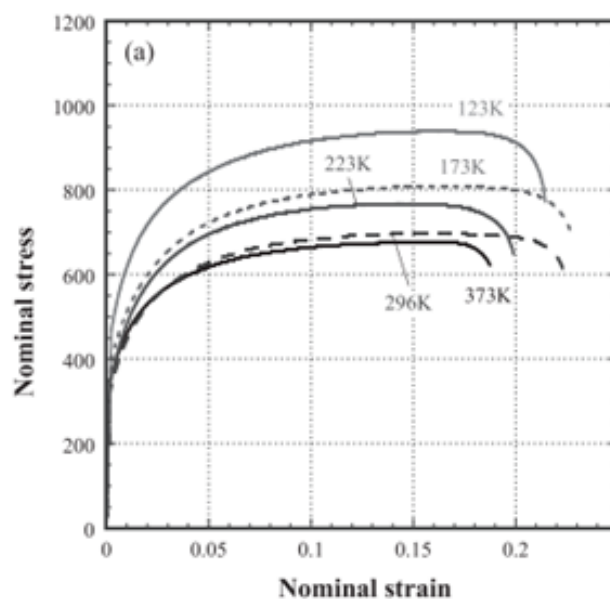
Materijal	Koeficijent volumnog rastezanja $\gamma$ ( $10^{-6} K^{-1}$ )	Materijal	Koeficijent volumnog rastezanja $\gamma$ ( $10^{-6} K^{-1}$ )
<i>aluminij</i>	69	<i>olovo</i>	84
<i>mesing</i>	57	<i>porculan</i>	8,1
<i>bakar</i>	49,9	<i>platina</i>	26,5
<i>zlato</i>	44,1	<i>srebro</i>	58,3
<i>željezo</i>	35,5	<i>beton</i>	36

Sve dok uređaj ili stroj radi u rasponu nazivnih vrijednosti temperatura se drži konstantnom i nema znatnih promjena u prostornim dimenzijama. Tek dolaskom do kvara ili preopterećenja i povišenja radne temperature može doći onda i do širenja materijala i mogućnosti puknuća, izvijanja ili zaglavljivanja. Zbog toga bitno je pri projektiranju uzeti ovo u obzir i ostaviti dovoljan prostor za širenje materijala, takav primjer svakodnevno susrećemo na tračnicama gdje postoje ekspanzijski spojevi da se spriječi izvijanje.

#### *Promjena mehaničkih svojstava*

Osim na širenje materijala porast temperature može utjecati na mehanička svojstva materijala. Prikaz takvog utjecaja je dijagram naprezanja-istezanja materijala koji pokazuje ovisnost vlačnog naprezanja (eng. *Stress*) i istezanja (eng. *Strain*) materijala. Na slici 4.1. [12] koja prikazuje graf naprezanja možemo primijetiti da s porastom temperature opada naprezanje, a raste istezanje te da je brži prijelaz iz linearnog područja elastičnosti u plastičnost.





**Slika 4.1.** Utjecaj temperature na graf naprezanja

#### *Promjena otpora*

Električna otpornost materijala mijenja se s promjenom temperature isto kao i prostorne dimenzije materijala jer je otpor povezan sa duljinom i površinom vodiča. Tako kod metala otpor raste s porastom temperature, a kod nemetala s porastom temperature opada. Poznato je da su toplinski (Joulovi) gubitci proporcionalni s kvadratom struje, ali također i linearno rastu ako se otpor povećava stoga nije poželjno zagrijavanje metala. Kod vodiča otpor se s promjenom temperature mijenja na sljedeći način [13]:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (4-6)$$

gdje je  $R_t$  otpor pri temperaturi  $T$ , a  $R_0$  je otpor pri temperaturi  $T_0$ , a  $\Delta T$  je razlika tih temperatura. Koeficijent  $\alpha$  je temperaturni koeficijent otpora koji ovisi o vrsti vodiča.

U tablici 4.3. [14] dane su vrijednosti temperaturnog koeficijenta za neke materijale te treba uočiti da je potreban dosta velika promjena temperature da bi se otpor promijenio, ali vodiči svakim zagrijavanjem proizvode toplinske gubitke.

**Tablica 4.3.** Vrijednosti temperaturnog koeficijenta otpora nekih materijala

Materijal	Temperaturni koeficijent otpora $\alpha$ (K <sup>-1</sup> )	Materijal	Temperaturni koeficijent otpora $\alpha$ (K <sup>-1</sup> )
<i>nikal</i>	0,005866	<i>srebro</i>	0,003819
<i>željezo</i>	0,005671	<i>platina</i>	0,003729
<i>aluminij</i>	0,004308	<i>zlato</i>	0,003715
<i>bakar</i>	0,004041	<i>čelik</i>	0,003000
<i>cink</i>	0,003847	<i>konstantan</i>	-0,000074

*Promjena stupnja djelovanja*

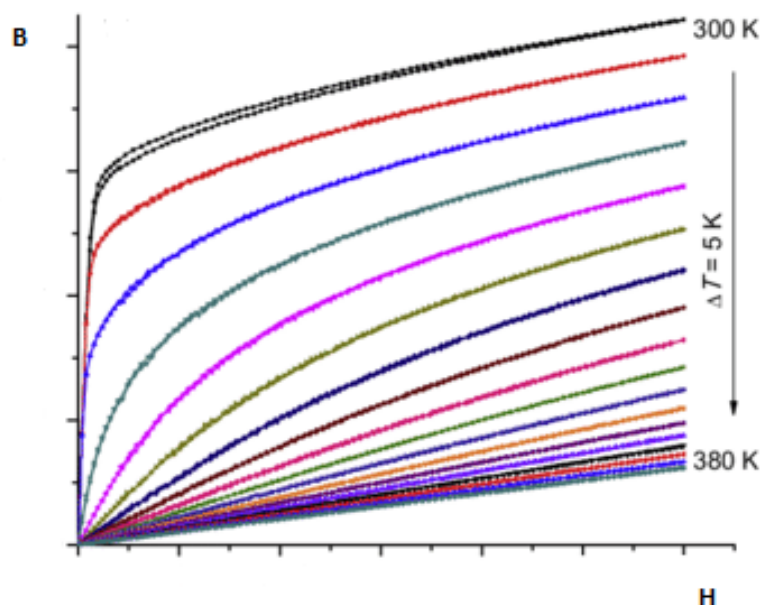
Radni termodinamički sustav idealnog toplinskog stroja opisan je Carnotovim kružnim procesom i temelj je drugog zakona termodinamike. Važan je jer opisuje kako se odvija prijelaz topline između toplinskog stroja i okoline te omjer toplina koje se izmjenjuju ovisi o temperaturama. Tako i djelotvornost  $\eta$  ne ovisi o vrsti radne tvari već o temperaturama, a izraz je dan na sljedeći način [15]:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (4-7)$$

gdje je  $T_1$  temperatura toplinskog stroja, a  $T_2$  temperatura okoline koja je hladnija. Slijedi da nijedan stroj ne može imati veću korisnost od stroja koji radi po Carnotovu kružnom procesu i niti jedan stroj ne može svu toplinu pretvoriti u mehanički rad jer to bi značilo da su temperature  $T_1$  i  $T_2$  jednake, a ako su jednake onda nema izmjene topline prema nultom zakonu termodinamike.

*Promjena magnetskih svojstava*

Sva električna i elektromagnetska svojstva poput specifičnog otpora, dielektričnosti, B-H karakteristike i drugih se mijenjaju s promjenom temperature. Na primjer porastom temperature dolazi do promjene magnetiziranja materijala tako da za istu jakost magnetskog polja H smanjuje se gustoća magnetskog toka B. kao što je prikazano na slici 4.2. [16].



**Slika 4.2.** Promjena krivulje magnetiziranja s porastom temperature

Povećanjem temperature svi magnetski materijali pokazuju smanjenje remanentne magnetske indukcije  $B$  te se razmagnetiziraju na točki Curie temperature koja je specifična za feromagnetske materijale i na toj temperaturi dolazi do slabijeg magnetskog ponašanja koje se naziva paramagnetizam [17].

#### *Utjecaj nadtemperature na izbor izolacijskog materijala*

Spomenuto je kako temperatura utječe na životni vijek i svojstva materijala stoga su IEC (International Electrotechnical Commission) i NEMA (National Electrical Manufacturers Association) propisali standarde IEC 60034-1 i NEMA MG1-12.43 [18] [19] koji opisuju dozvoljene maksimalne nadtemperature i dijele izolacijske materijale prema njihovim toplinskim i električnim svojstvima na klase prikazane u tablici 4.4. [20]. Također klase izolacije i dozvoljene temperature opisuje norma HRN EN 60085:2008.

Napomena: Ostali materijali ili kombinacije materijala mogu se uključiti u određenu klasu ako se iskustvom ili ispitivanjima može pokazati da mogu raditi na temperaturi klase.

**Tablica 4.4.** Klase izolacije i dozvoljene temperature pri nazivnom opterećenju i kratkom spoju

Klasa	Materijali	Najviša dopuštena temperatura pri nazivnom opterećenju	Max. dozvoljena prosječna nadtemperatura namota	
			Pri nazivnom opterećenju	U kratkom spoju
<b>A</b>	<i>Pamuk, svila, PVC, papir prikladno impregnirani ili uronjeni u dielektrik poput ulja, smole i dr.</i>	105 °C	60 °C	130 °C
<b>E</b>	<i>Lak za žicu s dodacima celuloze, slojeviti papir, polietilenska vlakna, materijali ili kombinacija materijala za koje se iskustvom ili ispitivanjima može pokazati da su sposobni za rad na temperaturi klase E</i>	120 °C	75 °C	135 °C
<b>B</b>	<i>Tinjac, staklena vlakna, azbest i dr., vezni i impregnirani asfaltnim i sintetičkim lakovima</i>	130 °C	80 °C	145 °C
<b>F</b>	<i>Tinjac, staklena vlakna, azbest, lak za žicu, sve na bazi poliestera, vezani i impregnirani odgovarajućim tvarima</i>	155 °C	100 °C	170 °C
<b>H</b>	<i>Tinjac, silikonski elastomer, staklena vlakna, azbest i dr., impregnirani materijalima poput silikonske smole</i>	180 °C	135 °C	200 °C
<b>C</b>	<i>Tinjac, porculan, staklo, politetrafluoroetilena smola, kvarc s anorganskim vezivom</i>	> 180 °C	150 °C	250 °C

## 4.2. Metode toplinske zaštite električnih strojeva

Kad kažemo električni stroj pomisao je da se on nalazi u nekom električnom postrojenju, no strojeve možemo pronaći i u svakodnevnom životu i kućanstvu stoga je potrebno zaštititi sebe, okolinu, ali i strojeve od mogućih loših posljedica.

Prema pravilniku o sigurnosti i zdravlju s električnom energijom [21] pri radu s električnim postrojenjima, instalacijama i opremom propisuje se da se postrojenja i instalacije izgrađene u skladu s propisima i održavaju u ispravnom stanju. Člankom 14. propisana su osnovna pravila od kojih je važno održavanje ispravnosti i postupanje s kvarom te električni strojevi moraju imati ugrađene naprave za zaštitu od samo uključivanja u slučaju prekida i ponovnog napajanja. Također potrebno je zaštititi uređaje i one koji rukuju njima od napona dodira s dijelovima ili kućištima pod naponom. Svi električni strojevi pogotovo oni većih snaga u postrojenjima se napajaju pa je potrebno paziti na rukovanje električnom energijom i držati se pravila o sigurnosti. Stoga električna postrojenja treba projektirati, izvoditi i održavati na način da ne mogu nastati opasni električni naboji koji bi mogli uzrokovati električne iskre ili napone dodira.

Osim električne zaštite jako je bitna i mehanička zaštita električnih strojeva od dodira rotirajućih dijelova, stupnjem zaštite od prodiranja čvrstih stranih tijela i vode. Različite su izvedbe strojeva od potpuno zatvorenog do potpuno otvorenog ovisno o veličini predmeta kojim se više ne mogu dodirnuti dijelovi stroja, a za zaštitu od vode stupnjevi se razlikuju od kapljice vode do vode koja potpuno prekriva stroj. Često montiranje strojeva tropskim krajevima stvara problem vlage i plijesni pa je potrebno upotrebljavati izolacijske materijale koji nisu higroskopni, a za vrijeme mirovanja potrebno je spriječiti stvaranje kondenzacije vlage ugrađivanje grijača, a protiv plijesni potrebno je površinski premazati namot specijalnim fungicidnim lakovima. Uz sve to potrebno je i sprječavanje pojave korozije pa dijelovi koji se ne mogu zaštititi premazom trebaju biti od ne hrđajućeg materijala ili presvučeni galvanskim prevlakama [8].

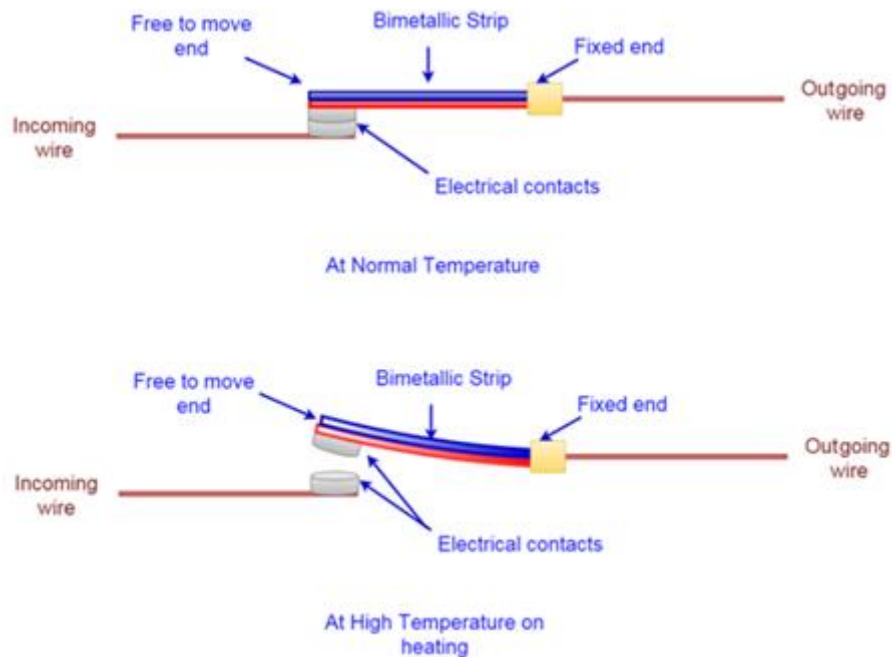
Mjere zaštite vidimo ovisno o području u kojem se strojevi nalaze tako postrojenja s opasnosti od eksplozije u atmosferi eksplozivnih ili zapaljivih plinova. Zbog toga strojevi moraju biti specijalno izrađeni i označeni da imaju atest za određeni stupanj zaštite. U zapašenoj okolini potrebno je da je stroj potpuno zatvoren i da je spriječeno prodiranje prašine, a u kemijski agresivnoj okolini moraju se upotrijebiti određeni otporni materijali. Slijedi da je vrstom mehaničke zaštite i okolinom stroja određena konstrukcija stroja i vrsta materijala za određene dijelove [8].

Primjer stupnjeva zaštite strojeva od prodora stranih tijela, prašine ili vode prema normi **IEC 529 (EN 60 529)** ima oblik *IP ??* gdje prva brojka označava stupanj zaštite od krutih tijela ili prašine detaljnije u tablici 4.5.[22], a druga brojka označava stupanj zaštite od prodora vode te su opisi dani u tablici 4.6. [22] koja se nalazi u prilogu 4.1.

Primjer [22]: „ ***IP 56** označava zaštitu od prodora prašine u štetnoj mjeri i od snažnog mlaza vode. Takvu zaštitu bi trebao imati primjerice elektromotor izložen prašenju pri radu, koga se smije prati mlazom vode bez štetnih posljedica po mehaničke elemente ili elektrouređaje / instalacije.*“

Zaštita stroja služi da sačuva stroj od mehaničkih oštećenja, nedopuštenog zagrijavanja i trajnih oštećenja. Strojevi koji su u pogonu najprije trebaju biti zaštićeni od kratkog spoja, preopterećenja i pregrijavanja pa se zbog toga upotrebljavaju osigurači, sklopnici s bimetalnim okidačima i motorne zaštitne sklopke. Rad motora može preopteretiti moment tereta veći od nazivnog tako da preopterećenje dovede do prisilnog zaustavljanja elektromotora te stanja kratkog spoja. U tom slučaju se motor štiti kratkospojnom i toplinskom zaštitom. Strujni krug se brzo prekida rastalnim osiguračima, a vrijeme prekidanja je kraće ako je struja veća pa se tako izrađuju i postavljaju osigurači ovisno o potrebi brzog ili sporog prekidanja. Rastalni osigurači ne štite od toplinskih preopterećenja pa se u tu svrhu ugrađuju bimetalni zaštitni releji [23].

Na slici 4.3.[24] prikazana je bimetalna sonda čije su bimetalne pločice napravljene tako da su ravne dok su u hladnom stanju, a zagrijavanjem motora bimetal se izvine te otvori kontakt, odnosno daje signal za isključenje motora. Na slici s lijeva na desno je tok struje, lijevo je ulazna žica (eng. *Incoming wire*) spojena sa slobodnim krajem bimetalne trake koja pri normalnoj temperaturi kontakt drži zatvorenim tek zagrijavanjem kontakt se otvara zbog izvijanja trake, a desno izlazna žica bimetalne trake (eng. *Outgoing wire*) čvrsto spojena na bimetal.



Slika 4.3. Bimetalna sonda

Temperaturna zaštita se zasniva na stvarnoj temperaturi stroja i u tome se razlikuje od bimetalnih zaštita. Mjerači temperatura poput bimetalnih sondi i poluvodičkih otpornika s pozitivnim temperaturnim koeficijentom često su ugrađeni direktno u namot niskonaponskog motora. Drugi naziv za poluvodičke otpornike s pozitivnim koeficijentom je termistor, a veličine je 3 do 7 milimetara i ugrađuje se direktno u namot te napaja iz pomoćnog izvora. Djeluju tako da otpornik mijenja iznos otpora s temperaturom, a time mu se mijenja i struja jer je napon stalan. Zaštitno isključenje se podešava prema iznosu struje u tom pomoćnom krugu. Promjena otpora ovisno o temperaturi daje dvije vrste termistora, tip NTC- negativni temperaturni koeficijent znači da mu vrijednost otpora pada s porastom temperature, a PTC- pozitivni temperaturni koeficijent znači da s porastom temperature raste i njegov otpor. Ove elektroničke komponente imaju jako brz rad s minimalnom pogreškom i velikim rasponom temperatura, a nedostatak je što su nelinearni i napajaju se izvana. Slika 4.4. [25] prikazuje različite izvedbe termistora.



**Slika 4.4.** Termistori



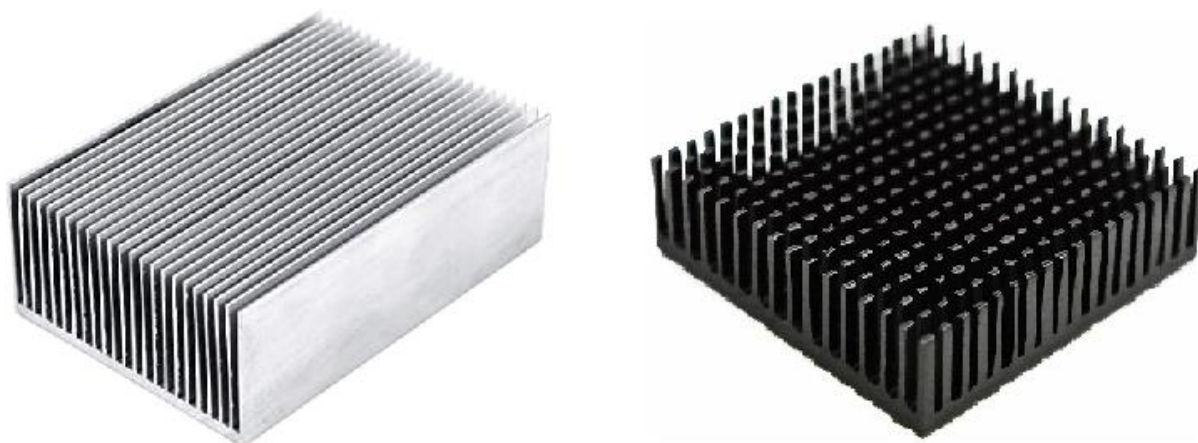
### 4.3. Hlađenje električnih strojeva

Toplinsko naprezanje strojeva uzrokovano je gubitcima koji nastaju i zagrijavaju namote, kaveze rotora, magnete i ostale dijelove stroja te zbog toga trebaju biti smanjeni. Smanjenje gubitaka se može postići ograničavanjem struje ili boljim izborom materijala no to ponekad je skupo i zahtjevno za izvesti stoga sastavni dio strojeva su hladnjaci koji mogu imati i ventilatore da bi se postiglo brže hlađenje. Bržim i intenzivnijim hlađenjem može se postići veća nazivna snaga, no tu može doći do smanjenja korisnosti. Korištenje više toplinske klase izolacije se može povećati nazivna snaga, ali pri modeliranju i izradi stroja treba tražiti najučinkovitije i ekonomično rješenje.

Većina strojeva se hladi zrakom samo turbogeneratori i sinkroni kompenzatori se hlade vodikom ili vodom. Hlađenje zrakom se najčešće odvija preko površine statora koja se može povećati rebrima, a za bolje odvođenje topline može se dodati ventilator koji potiče brže strujanje zraka. Električni strojevi srednjih i većih snaga mogu imati ugrađene ventilatore koji potiču strujanje zraka unutar stroja i hlade dijelove koji se zagrijavaju. Hlađenje vodikom se provodi zbog male gustoće vodika koja uzrokuje male gubitke trenja, a omogućuje cirkulaciju kroz uske ure. Takvim hlađenjem se omogućuje izrada strojeva velikih snaga od 600 do 1000 MW. Također strojevi velikih snaga se mogu direktno hladiti vodom čije strujanje potiče pumpa, a radi sigurnosti namoti se spajaju sa cjevovodom pomoću izolacijskih cijevi i stalno se mjeri vodljivost vode da ne bi došlo do proboja.

Osim zraka i vode rashladni fluid može biti neko sintetsko ulje, plin ili kruti materijal. Ovisno o snazi i zagrijavanju stroja izabire se ono što je potrebno da održava stroj na određenoj temperaturi, a da je osiguran pravilan rad i sigurnost.

Izvedbe rashladnog sustava električnih strojeva su stvarno raznolike i sve se koriste, no najčešće se kod motora malih snaga susrećemo s rebrastim pasivnim hladnjacima. Oni odvede toplinu tako da ju kondukcijom preuzimaju na sebe i rasprostiru u okolinu prenoseći ju na zrak prirodnom konvekcijom i zračenjem. Prijenos topline se ne odvija samo jednim mehanizmom već se ti procesi odvijaju istovremeno. Hladnjak se postavi direktno na komponentu ili uređaj koji hladi, a na spoju površina hladnjaka i stroja gdje postoje zračni raspori se postavi toplinski vodljiva pasta ili termoastučić. Na slici 4.5. [26] prikazan je rebrasti hladnjak i hladnjak koji umjesto rebara ima igličaste lamele u obliku valjka ili kvadra čime je povećana površina prijenosa i efikasnost s obzirom na rebrasti oblik.



**Slika 4.5.** Pasivni hladnjaci

Na sličan način se izvodi odvođenje topline električnih strojeva ovisno o snazi motora tako da vanjski dio sadrži rebra te se tako povećava površina za prijenos topline. Na slici 4.6. [27] prikazan je elektromotor gdje su vidljiva rebra kojima se odvodi toplina.



**Slika 4.6.** Pasivni hladnjak na elektromotoru

Za još bolje odvođenje topline na pasivne hladnjake se dodaju ventilatori koji potiču brže strujanje i učinkovitiji prijenos topline. Na slici 4.7. [28] prikazan je CPU hladnjak koji se koristi u stolnim računalima, a sastoji se od rebrastog pasivnog hladnjaka i ventilatora.



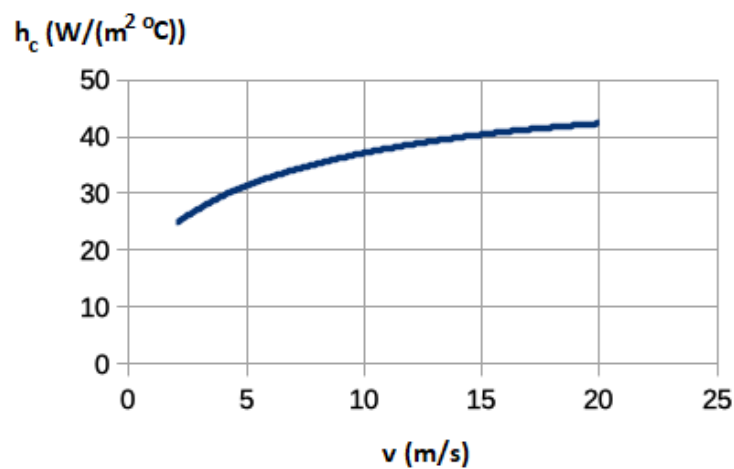
**Slika 4.7.** CPU hladnjak s ventilatorom

Korištenjem ventilatora ostvaruje se prisilna konvekcija između rebara pasivnog hladnjaka koju možemo opisati empirijskom relacijom [29]:

$$h_c = 12,12 - 1,16 v + 11,6 \sqrt{v} , \quad (4-8)$$

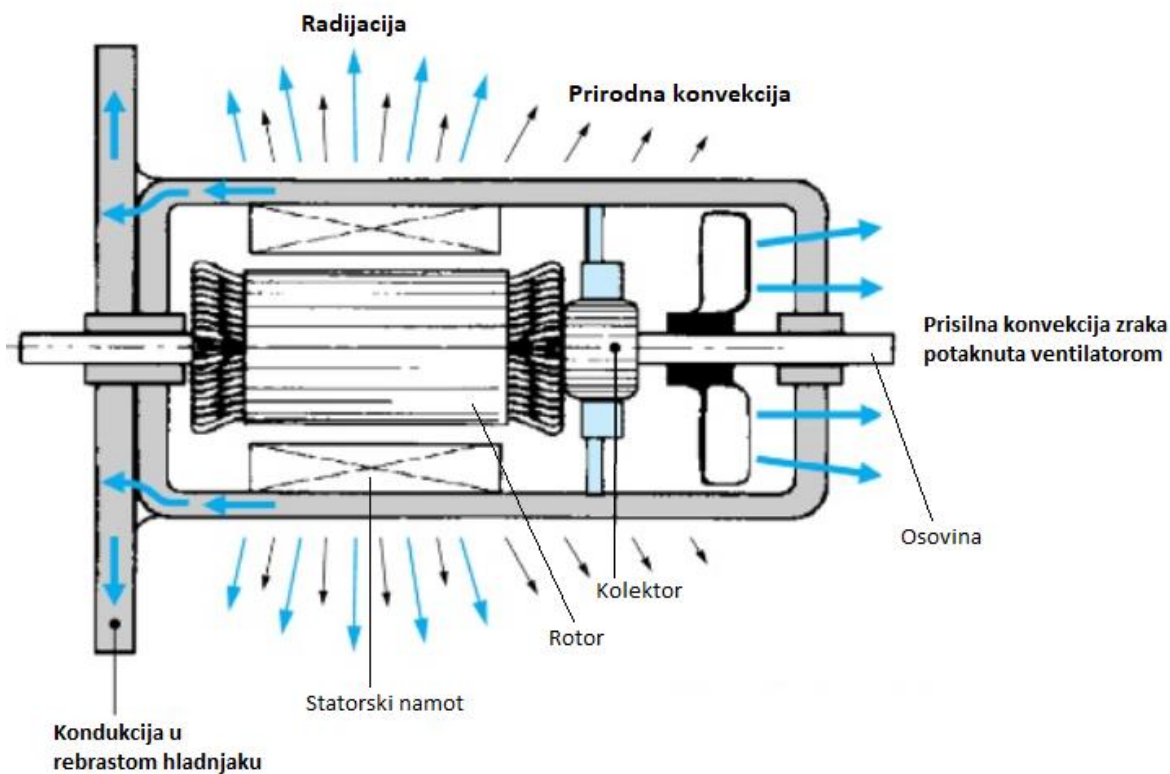
gdje je  $h_c$ - koeficijent prijenosa topline konvekcijom, a  $v$ - je brzina strujanja zraka.

Ova empirijska jednadžba se može koristiti za brzine od 2 do 20 m/s i prikazana je grafom na slici 4.8. [29] te se pomoću Newtonovog zakona hlađenja (3-4) opisanog u poglavlju 2.2. može izračunati koliki je prijenos topline za određenu brzinu strujanja i razliku temperatura.



**Slika 4.8.** Graf ovisnosti koeficijenta konvekcije o brzini

Hlađenje električnih strojeva je složen proces gdje sudjeluju svi načini prijenosa topline, a izvedbe hladnjaka i fluida odabiru se ovisno o namjeni stroja, gdje se on nalazi i koristi, koliki su toplinski gubitci i kolika je njegova snaga. Na slici 4.9. [30] je prikazan poprječni presjek elektromotora koji se hladi strujanjem zraka uz pomoć ventilatora i prirodnim procesima konvekcije, kondukcije i zračenja.



Slika 4.9. Presjek elektromotora i sustav hlađenja

## 5. TOPLINSKI MODEL ELEKTRIČNOG STROJA

Rješavanje toplinskog proračuna je složeno jer zahtjeva rješavanje diferencijalnih jednadžbi pa se iz tog razloga modeliraju toplinski procesi pomoću toplinskih veličina pomoću analogije s električnim veličinama. Toplinske veličine i zakone koji ih opisuju smo upoznali u drugom poglavlju pa analogno sa zakonima koji opisuju električne veličine možemo primijetiti povezanost. Zbog te analogije sheme koje sadrže toplinske veličine nazivamo Kirchhoffove toplinske sheme te u tablici 5.1. je prikazana ekvivalencija toplinskih i električnih veličina.

**Tablica 5.1.** Kirchhoffove ekvivalentne toplinske i električne veličine

Toplinska veličina	Električna veličina
Količina topline $Q_t$ [J]	Električni naboj $Q$ [C]
Toplinski tok $q$ [W]	Električna struja $I$ [A]
Razlika temperatura $\Delta T$ [K]	Razlika potencijala $\Delta U$ [V]
Koeficijent kondukcije $k$ [W/(m K)]	Električna vodljivost $\sigma$ [S/m]
Toplinski kapacitet $C_t$ [J/K]	Električni kapacitet $C$ [F]
Toplinski otpor $R_t$ [K/W]	Električni otpor $R$ [ $\Omega = V/A$ ]

Isto kao što je električni otpor svojstvo opiranja protjecanju struje tako toplinski otpor je svojstvo materijala ili fluida koje opisuje prijelaz topline.

Toplinski otpor kondukcije se računa na sljedeći način:

$$R_{t,kond} = \frac{1}{k} \frac{L}{A}, \quad (5-1)$$

gdje je  $k$  specifična toplinska vodljivost koja ovisi o vrsti materijala,  $A$  površina presjeka tijela kojim se odvija prijenos topline kondukcijom, a  $L$  karakteristična duljina.

U slučaju prijenosa topline konvekcijom izraz za toplinski otpor glasi:

$$R_{t,konv} = \frac{1}{h_c A}, \quad (5-2)$$

gdje je  $h_c$  koeficijent prijenosa topline kondukcijom te  $A$  površina presjeka tijela kojim se odvija prijenos topline konvekcijom.

Toplinski otpor uslijed radijacije je:

$$R_{t,rad} = \frac{1}{h_r A} , \quad (5-3)$$

gdje je  $h_r$  koeficijent prijenosa topline radijacijom te  $A$  površina presjeka tijela kojim se odvija prijenos topline radijacijom.

Toplinska Kirchhoffova shema je zapravo mreža ekvivalentnih toplinskih otpora i izvora topline koji opisuju geometriju i temperaturne vrijednosti. Otpore kruga čine toplinski otpori uslijed kondukcije, konvekcije i radijacije, a izvore kruga čini dio volumena gdje se generira toplina. u toplinskoj shemi čvorovi predstavljaju vrijednosti temperatura, a općenito se između dva čvora temperature  $T_1$  i  $T_2$  toplinski tok  $q_{12}$  računa na sljedeći način [31]:

$$q_{12} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{12}} . \quad (5-3)$$

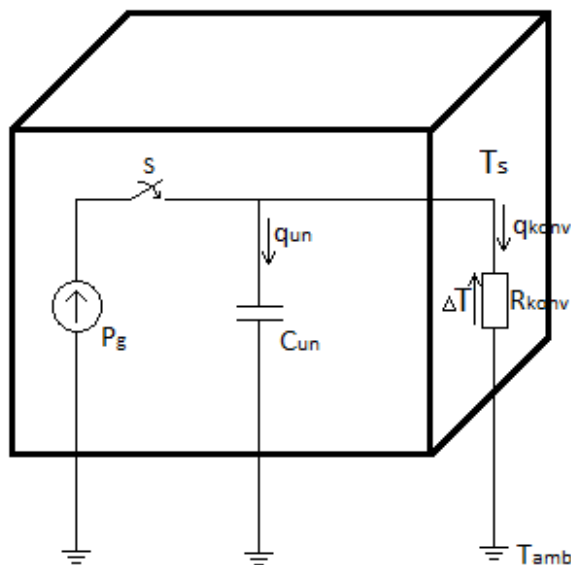
Primjer toplinske sheme prikazan je na slici 5.1. gdje volumen stroja je simbolički prikazan toplinski homogenim kvadrom kojem je u središtu točka zagrijavanja zbog gubitaka koji nastaju radom stroja  $P_g$ , zatim nakon uklapanja sklopke  $S$  toplinski tok kojeg stvara zagrijavanje stroja se raspodjeljuje na toplinski tok koji uzrokuje akumulaciju unutarnje energije  $q_{un}$  i na odvedeni toplinski tok konvekcijom  $q_{konv}$  pa iz toga slijedi energetska bilanca:

$$P_g = q_{un} + q_{konv} . \quad (5-4)$$

Unutarnja energija na shemi je prikazana pohranjena u spremniku energije toplinskom kapacitetu  $C_{un}$ , a toplinski tok koji uzrokuje dan je izrazom:

$$q_{un} = mc \frac{d(\Delta T)}{dt}, \quad (5-5)$$

gdje je  $m$  masa stroja,  $c$  specifični toplinski kapacitet, a  $\Delta T$  razlika temperature površine stroja  $T_s$  i temperature okolnog ambijenta stroja  $T_{amb}$ .



**Slika 5.1.** Kirchhoffova toplinska shema električnog stroja

Prema (5-3) toplinski tok konvekcije računamo:

$$q_{konv} = \frac{(T_s - T_{amb})}{R_{konv}}. \quad (5-6)$$

Za razumijevanje zagrijavanja ovakvog homogenog tijela polazi se od toplinske ravnoteže koja se uspostavlja tako da sva proizvedena toplina se akumulira u porastu temperature ili odvodi u okolinu preko površine  $A$ :

$$q_{konv} = h_c A \Delta T, \quad (5-7)$$

Gdje slijedi da je  $\Delta T = T_s - T_{amb} = \vartheta$  što nazivamo nadtemperaturom stroja u odnosu na temperaturu okoline.

Zatim jednačba (5-4) prelazi u diferencijalni oblik:

$$P_g = mc \left( \frac{d\vartheta}{dt} + \frac{dT_{amb}}{dt} \right) + h_c A \vartheta . \quad (5-8)$$

Ako uzmemo da je temperatura okoline konstantna slijedi da je član  $\frac{dT_{amb}}{dt} = 0$  te diferencijalna jednačba (5-8) postaje sljedećeg općeg oblika:

$$\frac{mc}{h_c A} \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta = \frac{P_g}{h_c A} , \quad (5-9)$$

a njeno rješenje je:

$$\vartheta = \vartheta_{max} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) , \quad (5-10)$$

gdje je:  $\tau = \frac{mc}{h_c A}$  - vremenska konstanta zagrijavanja, a  $\vartheta_{max} = \frac{P_g}{h_c A}$  - najviša postignuta nadtemperatura pri zagrijavanju.

Ovakav model nazivamo prijelaznim modelom zagrijavanja i hlađenja jer rješavanjem diferencijalnih jednačbi možemo doći do ovisnosti promjene temperature u nekom vremenu koji prikazuje kako se tijelo zagrijava, odnosno hladi. Rješenje tih diferencijalnih jednačbi pokazuje da nadtemperatura tijela pri zagrijavanju se mijenja po eksponencijalnom zakonu, a za ne homogena tijela postoji malo odstupanje. Vremenske konstante koje opisuju vrijeme potrebno da se stroj ohladi ili zagrije na određenu temperaturu iznose oko 10 minuta za male električne motore otvorene izvedbe, dok za motore većih snaga zatvorene izvedbe se kreću i do nekoliko sati.

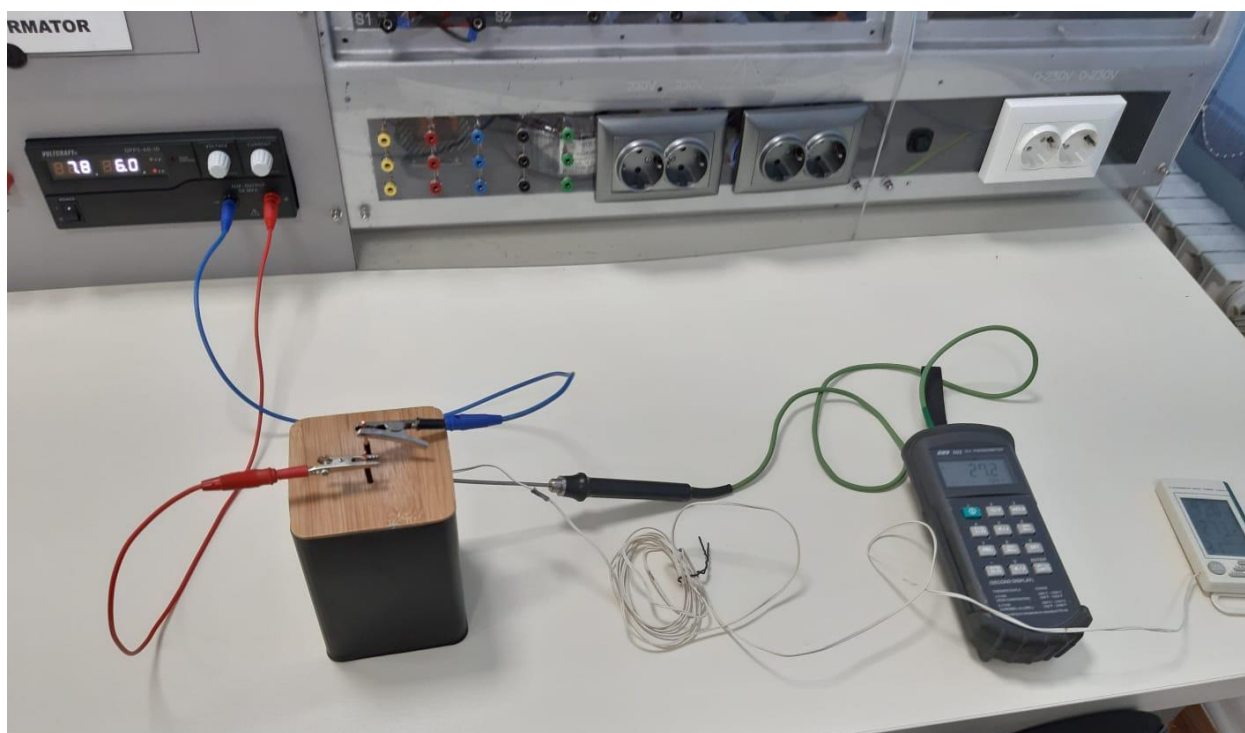


Toplinske sheme mogu biti komplicirane jer se toplina može odvoditi bilo kojim načinom prijenosa kondukcijom, konvekcijom ili radijacijom pa čak i kombinacijom istih te u krugu onda postoji više toplinskih otpora, a moguće je i više izvora topline koji nisu smješteni svi u središtu geometrije. Za Kirchhoffove električne krugove postoje različite metode rješavanja stoga su toplinske sheme napravljene da bi se olakšalo rješavanje.

Nakon što odredimo toplinski otpor homogenog tijela može se odrediti iznos toplinskog otpora rashladnog tijela uz osiguran dobar prijenos topline između njih. Kvalitetan prijenos topline između zagrijanog tijela i hladnjaka se osigurava termalnim jastučićima, termo folijama ili termalnom pastom između njih.

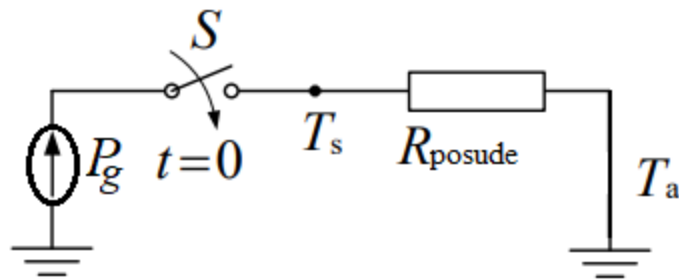
## 6.MJERENJE I PRORAČUN TOPLINSKOG OTPORA

Mjerenja su provedena 10., 13. i 14. srpnja 2020. godine u laboratoriju 1-23 na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Postupak mjerenja je proveden kako bi uočili prijelaznu pojavu zagrijavanja. Homogeno tijelo predstavljala je limena posuda s vodom u koju je uronjen električni grijač. Mjerenjem temperature okoline i temperature na površini tijela uočavamo prijelaznu pojavu zagrijavanja. Prvo mjerenje je provedeno zagrijavanje samo limene posude s vodom, a zatim smo dodali rebrasti pasivni hladnjak i na njega postavili ventilator kojim smo zadali 3 različite brzine vrtnje. Ukupno je provedeno 5 različitih mjerenja toplinskog otpora iz kojih pomoću Kirchhoffovih toplinskih shema proračunavamo toplinske otpore pojedinih elemenata.



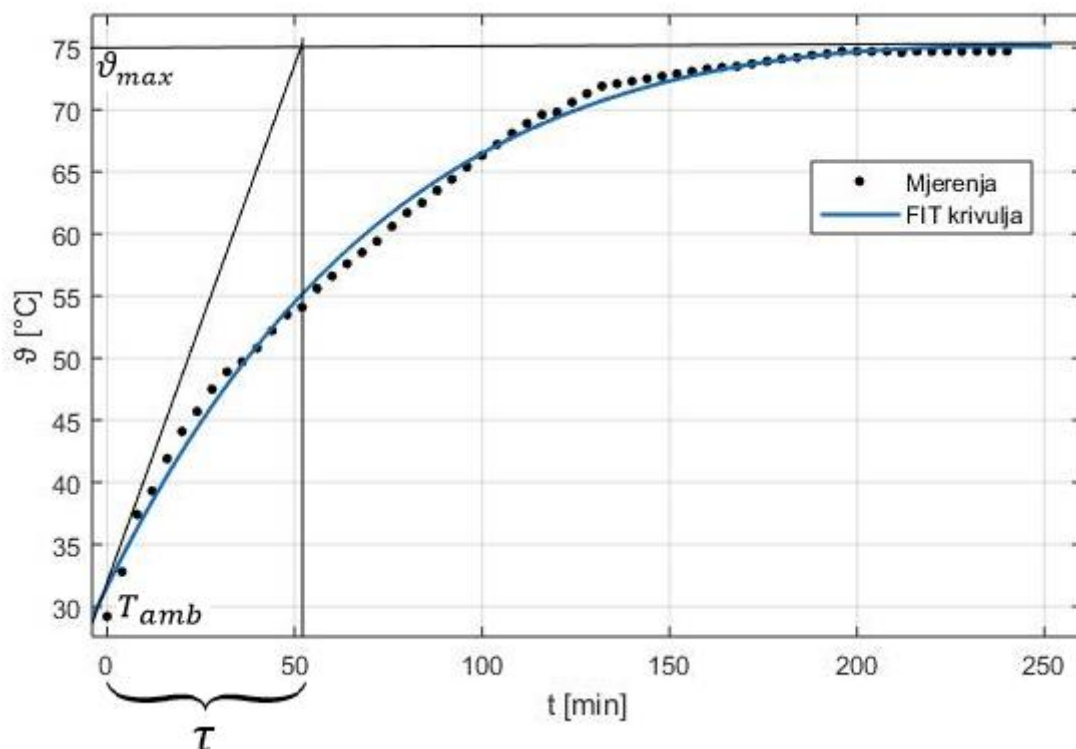
**Slika 6.1.** Prikaz limene posude s grijačem i termometrima

Opis prijenosa topline s grijača na vodu te s vode na posudu može se pojednostaviti jer konvekcija između vanjske plohe posude i okoline je puno veća nego kondukcija i konvekcija između vode i posude te ih možemo zanemariti. Toplinska shema s grijačem kao izvorom topline i toplinskim otporom uslijed konvekcije izgleda kao na slici 6.2.



Slika 6.2. Nadomjesna toplinska shema

Početno mjerenje sastoji se od grijača snage  $P_g = 7,8 \text{ V} \cdot 6 \text{ A} = 46,8 \text{ W}$  koji zagrijava limenu posudu s vodom. Slika 6.3. prikazuje graf prijelazne pojave s izmjerenim vrijednostima temperatura i best-fit krivuljom dobivenom metodom najmanjih kvadrata u programu MATLAB.



Slika 6.3. Prijelazna pojava zagrijavanja limene posude

Iz mjerenja temperature vidljivo je da se prijelazna pojava odvija po eksponencijalnom zakonu kao što je dobiveno rješavanjem diferencijalnih jednadžbi u prethodnom poglavlju te nakon određenog vremena temperatura se ustaljuje na temperaturu  $\vartheta_{max}$ :

$$\vartheta = \vartheta_{max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (6-1)$$

gdje je  $\tau$  vremenska konstanta koju određujemo grafički pomoću tangente na početnu točku, a  $\tau$  je ono vrijeme gdje ta tangenta presječe vrijednost ustaljenog stanja. Prema izvršenom mjerenju zagrijavanja limene posude s vodom  $\tau$  iznosi 52 minute, a nakon vremena od  $5\tau$  sustav dosegne stanje ustaljene temperature.

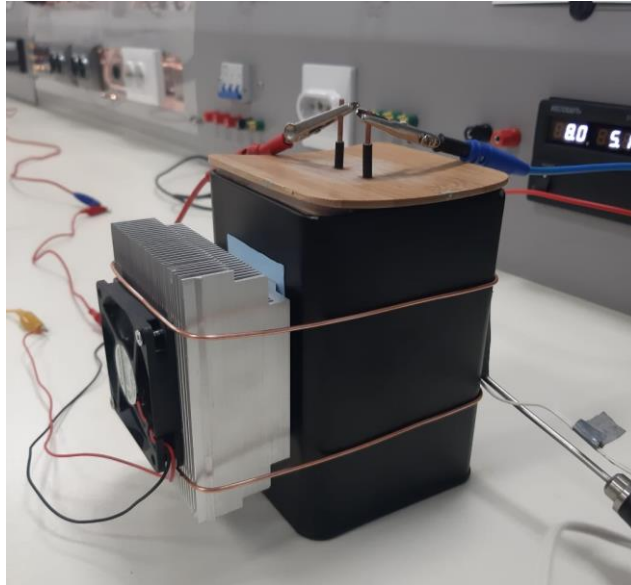
Proračun toplinskog otpora limene posude s vodom prema slici 6.1 koja prikazuje toplinski nadomjesnu shemu može se izračunati na sljedeći način:

$$R_{posude} = \frac{(\vartheta_{max} - T_a)}{P_g}. \quad (6-2)$$

Uvrštavanjem vrijednosti maksimalne nad temperature  $\vartheta_{max} = 74,7 \text{ }^\circ\text{C}$  i temperature okoline  $T_a = 27,1 \text{ }^\circ\text{C}$  te snage grijača dobiva se toplinski otpor posude  $R_{posude} = 1,0171 \text{ K/W}$ .

Zatim na posudu čije su dimenzije 9 cm x 9 cm x 14 cm postavljamo rebrasti hladnjak dimenzija 4 cm x 7 cm, ali da bi prijenos topline bio kvalitetan postavlja termalni jastučić 5 cm x 8 cm koji poboljšava prijenos topline s limene posude na hladnjak.

Slika 6.4. prikazuje posudu na koju je pričvršćen hladnjak pomoću bakrenih žica, a između hladnjaka i posude se nalazi termalni jastučić. Na hladnjak je pričvršćen ventilator nazivne snage 0,65 W pri istosmjernom naponu od 12 V.



**Slika 6.4.** Limena posuda s hladnjakom i ventilatorom

Dodavanje hladnjaka mijenja površinu prijenosa o kojoj ovisi toplinski otpor pa ga je potrebno korigirati.

Toplinski otpor posude:

$$R_{\text{posude}} = \frac{1}{h_c A} , \quad (6-3)$$

gdje je  $A$  ukupna površina oplošja limene posude, a  $h_c$  koeficijent konvekcije.

Prema jednadžbi (6-3) koeficijent konvekcije je:

$$h_c = \frac{1}{R_{\text{posude}} \cdot A} , \quad (6-4)$$

a kad uvrstimo brojčane vrijednosti  $h_c = 19.5077 \text{ W}/(\text{K m})$ .

Toplinski otpor limene posude s hladnjakom promijenjen zbog površine  $\Delta A$  gdje se nalazi hladnjak:

$$R'_{posude} = \frac{1}{h_c (A - \Delta A)} \quad (6-5)$$

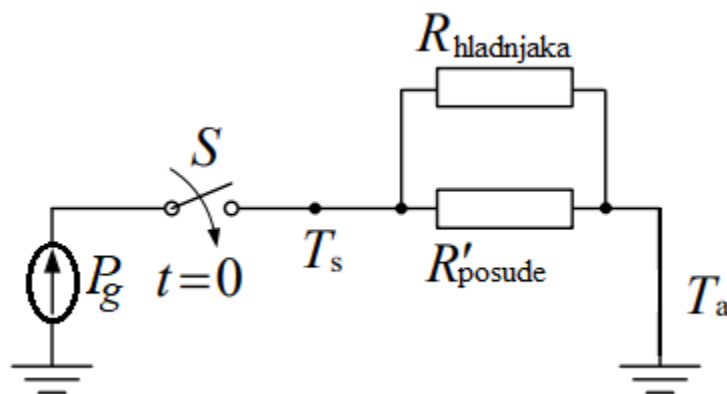
Preko omjera izraza (6-3) i (6-5) dobiva se da je:

$$R'_{posude} = \frac{A}{(A - \Delta A)} R_{posude} \quad (6-6)$$

Uvrštavanjem površina i toplinskog otpora dobivenog mjerenjem toplinski otpor posude na koju je postavljen hladnjak iznosi  $R'_{posude} = 1,0812 \text{ K/W}$ .

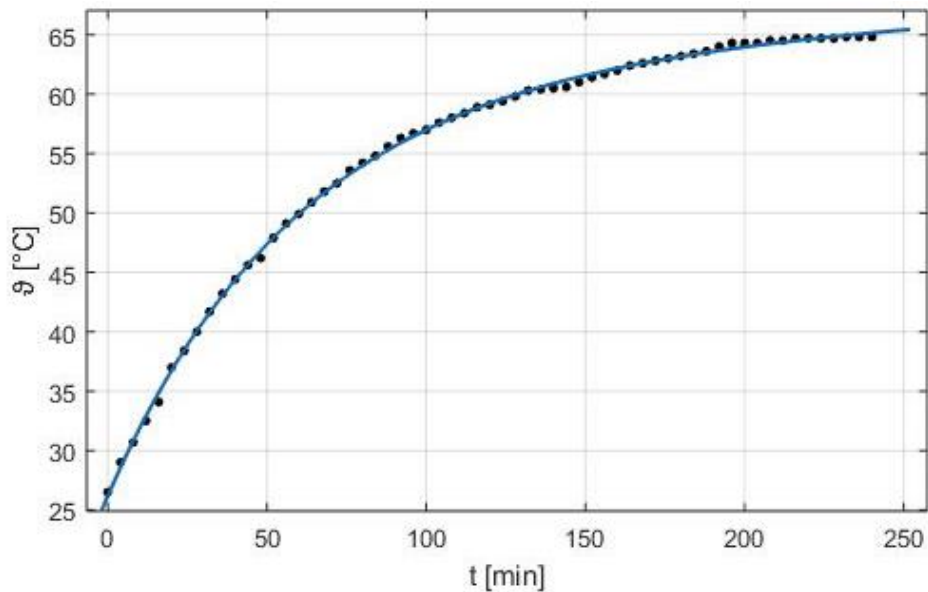
Toplinska shema nakon što se doda pasivni hladnjak s ventilatorom izgleda kao da paralelno dodajemo toplinske otpore. Iz prijelazne pojave se izračuna ukupni otpor stoga smo krenuli od najjednostavnijeg modela u kojem je izmjeren toplinski otpor posude s vodom zatim s hladnjakom, a na kraju s tri različite brzine vrtnje ventilatora.

Nakon dodavanja rebrastog hladnjaka na posudu toplinsku shemu prikazuje slika 6.5.



**Slika 6.5.** Toplinska shema limene posude s hladnjakom

Prijelazna pojava zagrijavanja posude s pasivnim rebrastim hladnjakom prikazana je na slici 6.6 te se može uočiti da je postignuta niža maksimalna nadtemperatura. To znači da je temperatura ustaljenog stanja niža što je puno povoljnije za rad stroja jer gubici su manji ako je temperatura manja.



**Slika 6.6.** Prijelazna pojava zagrijavanja limene posude s pasivnim hladnjakom

Ponovno pomoću vrijednosti temperature okoline i maksimalne nadtemperature izračunamo ukupni toplinski otpor:

$$R_t = \frac{(\vartheta_{max} - T_a)}{P_g} = \frac{64,8 - 26,5}{8,2 \cdot 6} = 0,7785 \text{ K/W}. \quad (6-7)$$

Prema toplinskoj shemi ukupni toplinski otpor je paralelni spoj toplinskog otpora hladnjaka i posude, pa prema tome slijedi da je toplinski otpor hladnjaka:

$$R_{\text{hladnjaka}} = \frac{R_t \cdot R'_{\text{posude}}}{R'_{\text{posude}} - R_t} = 2,7807 \text{ K/W}. \quad (6-8)$$

U obzir treba uzeti da se toplina na rebrasti hladnjak odvija preko termalnog jastučića površinom prijenosa 4cm x7 cm, debljine 0,5 mm i toplinske vodljivosti  $\lambda = 60 \text{ W/(m K)}$  čiji toplinski otpor se računa izrazom:

$$R_{\text{thpad}} = \frac{d}{\lambda A}. \quad (6-9)$$

Uvrštavanjem brojčanih vrijednosti dobiva se  $R_{\text{thpad}} = 0,0298 \text{ K/W}$ .

Iznosom toplinskog otpora termalnog jastučića trebalo bi umanjiti vrijednost toplinskog otpora hladnjaka, ali to je zanemarivo malen broj koji nema izraženog utjecaja na toplinski otpor hladnjaka jer termalni jastučić služi boljem i kvalitetnijem prijenosu topline s posude na hladnjak.

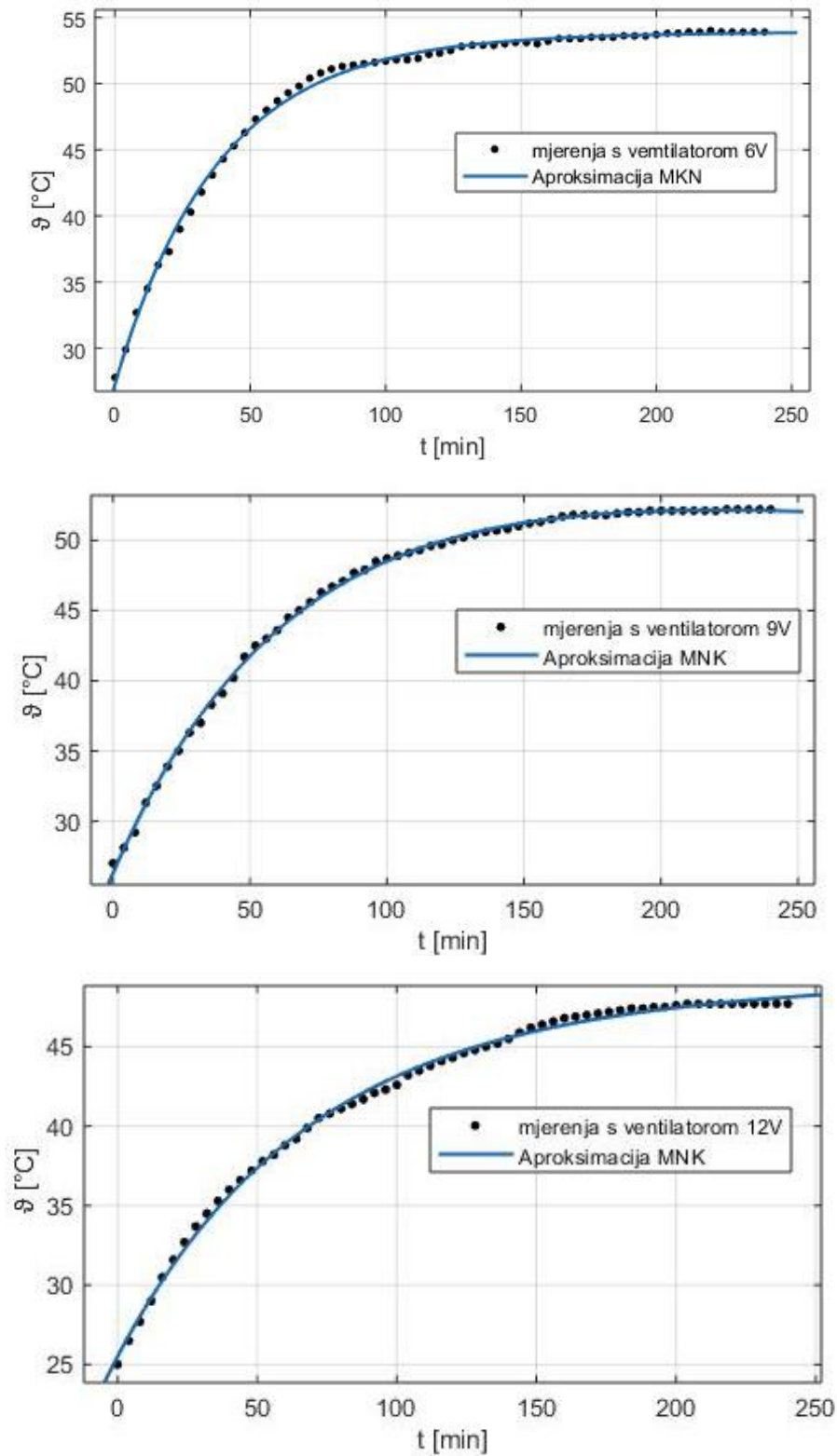
Koeficijent konvekcije kad je na posudu dodan hladnjak jednak je:

$$h_c = \frac{1}{R_t \cdot A} = 25,69 \frac{\text{W}}{\text{K m}}. \quad (6-10)$$

Uključivanjem ventilatora u sustav hlađenja želi se postići još niža ustaljena temperatura te su mjerenja provedena za tri različite brzine vrtnje. Ventilator potiče brže strujanje zraka kroz rebrasti hladnjak čime se postiže prijenos topline prisilnom konvekcijom.



Na slici 6.7. prikazane su prijelazne funkcije zagrijavanja posude s vodom na kojoj se nalazi hladnjak i ventilator pri naponima od 6 V, 9 V i 12 V.



**Slika 6.7.** Prijelazne funkcije zagrijavanja limene posude s vodom uz hladnjak s ventilatorom za 3 različite brzine

Brzinu vrtnje ventilatora za zadane vrijednosti napona odredili smo pomoću uređaja PeakTech 2795 koji omogućuje brzo i efikasno mjerenje brzine vrtnje u okretajima po minuti. Na jedno pero ventilatora smo postavili trakicu pomoću koje uređaj točnije mjeri brzinu koja se očitava na digitalnom zaslonu. Uređaj je prikazan na slici 6.8., a vrijednosti brzine za zadane napone dane su u tablici 6.1.



**Slika 6.8.** Uređaj za mjerenje brzine vrtnje ventilatora

**Tablica 6.1.** Izmjerene vrijednosti brzine vrtnje, struje i napona ventilatora

Napon	Struja	Brzina vrtnje
4 V	87 mA	1070 o/min
5 V	110 mA	1245 o/min
6 V	130 mA	1510 o/min
7 V	145 mA	1775 o/min
8 V	150 mA	1985 o/min
9 V	160 mA	2180 o/min
10 V	172 mA	2350 o/min
11 V	178 mA	2520 o/min
12 V	182 mA	2990 o/min
13 V	200 mA	3160 o/min

Toplinski otpor hladnjaka s ventilatorom se računa isto kao i u prethodnom slučaju za hladnjak te su vrijednosti prikazane u tablici 6.2.

**Tablica 6.2.** Vrijednosti toplinskih otpora hladnjaka s ventilatorom

Napon ventilatora	Brzina vrtnje	$\vartheta_{max}$	$T_a$	$P_g$	Ukupni toplinski otpor	Toplinski otpor hladnjaka s ventilatorom	$h_c$
6 V	1510 o/min	53,9 °C	27,8 °C	46,4 W	0,5625 K/W	1,1725 K/W	35,55 W/(Km)
9 V	2180 o/min	52,1 °C	27°C	44,8 W	0,5603 K/W	1,1629 K/W	35,69 W/(Km)
12 V	2990 o/min	47,7 °C	25 °C	40,8 W	0,5564 K/W	1,1463 K/W	35,95 W/(Km)

Povećanjem brzine ventilatora ukupni toplinski otpor se smanjuje što znači da ventilator brže odvodi toplinu u okolinu nego sam rebrasti hladnjak. Snaga grijača se smanjivala jer su mjerenja dugotrajna, struja je bila dosta visoka 5-6 A i voda je imala kamenca pa to dodatno uništava grijač. Iako se snaga promijenila nije utjecala na mjerenje te smo imali jednako brzu prijelaznu pojavu za svih pet mjerenja.

Mjerenjem temperature i proračunom toplinskih otpora se pokazalo da dodavanjem hladnjaka i ventilatora se toplinski otpor posude uslijed konvekcije smanjuje što znači da je koeficijent prijenosa topline veći te je više topline predano u okolinu.

Do zagrijavanja strojeva dolazi zbog kvarova ili dugotrajnog rada stoga je važno da su radne temperature niže odnosno da je osigurano dobro odvođenje topline koje pomaže očuvanju strojeva.

Slike 6.9. i 6.10. prikazuju rad u laboratoriju.



Slika 6.9. Studentica Marija Bivolčević tijekom mjerenja



Slika 6.10. Radno mjesto u laboratoriju za mjerenja

## 7. ZAKLJUČAK

U završnom radu opisane su teorije prijenosa topline kondukcijom, konvekcijom i zračenjem uz naglasak na prirodnu i prisilnu konvekciju. Prijenos topline uzrokuje temperaturni gradijent te se kondukcija odvija kada se u kontaktu nalaze krute tvari, a kada su u kontaktu fluidi ili fluid i kruta tvar onda se događa prijenos prirodnom konvekcijom ili prisilnom uz neki poticaj strujanja. Radijacija ne zahtjeva medij prijenosa jer se zasniva na elektromagnetskim valovima te je uvijek prisutna uz kondukciju i konvekciju iako se često zanemaruje. Iznesena je važnost toplinskih proračuna, odnosno utjecaj temperature na izolacijske materijale kojima je opisan utjecaj na mehanička, fizikalna i magnetska svojstva materijala te metode toplinske zaštite i načini hlađenja električnih strojeva. Uz to su opisane Kirchhoffove toplinske sheme koje su ekvivalentne električnim Kirchhoffovim shemama te proračuni toplinskih otpora za kondukciju, konvekciju i zračenje. Na primjeru homogenog tijela provedena su mjerenja toplinskog otpora uslijed prirodne i prisilne konvekcije za koja je izvršen toplinski proračun otpora i koeficijenta prijenosa topline konvekcijom. Mjerenjem temperature u kratkim vremenskim intervalima uočena je prijelazna pojava zagrijavanja i dosezanje maksimalne nadtemperature stroja prikazana pomoću fit krivulje u programu MATLAB-u.

Na temelju ovog rada slijedi da je za ispravan i kvalitetan rad strojeva važno poznavati toplinski model stroja, kako ga od temperature zaštititi te na učinkovit način ohladiti i spriječiti pregrijavanje. Prema vrijednostima koje su dobivene možemo uočiti da se dodavanjem hladnjaka i ventilatora smanjuje toplinski otpor i povećava koeficijent prijenosa topline konvekcijom. Prema tome konačne nadtemperature zagrijavanja dodavanjem hladnjaka i ventilatora su niže i time se postižu bolje performanse stroja. Ovaj toplinski model mogao bi se proučiti za više različitih brzina ventilatora kojim bi dobili uvid u odnos koeficijenta konvekcije o brzini vrtnje te bi se onda ovakvi proračuni i modeli mogli primijeniti u sličnim situacijama poput toplinskih cijevi i dr.

---

**LITERATURA**

- [1] P. Kulišić: *Mehanika i toplina*, Školska knjiga, Zagreb, 2005.
- [2] Termodinamika. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020. url: <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=60967> Pristupljeno 21.4.2020.
- [3] F. Kreith, R. M. Manglik, M. S. Bohn: *Principles of Heat Transfer*, Cengage Learning, Inc.2011 ISBN-13: 978-0-495-66770-4
- [4] Yunus A. Cengel: *Heat Transfer A Practical Approach*, McGraw Hill Science 2002, ISBN 0-07-123042-4
- [5] M. Latif: *Heat Convection*, second edition, The City University of New York, New York, 2009
- [6] Prandtlov broj. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., url: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=70862> Pristupljeno 6. 5. 2020.
- [7] Zračenje. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., url: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=67437> Pristupljeno 6. 5. 2020.
- [8] Električni strojevi. *Tehnička enciklopedija, 4. svezak. 1973*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža. Zagreb., url: [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektricni\\_strojevi.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektricni_strojevi.pdf) Pristupljeno 13.5.2020.
- [9] Arrheniusova jednačba, url: <https://www.chemguide.co.uk/physical/basicrates/arrhenius.html> Pristupljeno 13.5.2020.
- [10] Koeficijent linearnog rastezanja materijala, url: [https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d\\_95.html](https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html) Pristupljeno 15.5.2020.
- [11] Koeficijent volumnog istežanja materijala, url: [https://www.engineeringtoolbox.com/volum-expansion-coefficients-solids-d\\_1894.html](https://www.engineeringtoolbox.com/volum-expansion-coefficients-solids-d_1894.html) Pristupljeno 15.5.2020.

- 
- [12] *Effects of Temperature and Strain Rate on Stress-Strain Curves for Dual-Phase Steels and Their Calculations by Using the KocksMecking Model*, ISIJ International, Vol. 52 (2012), No. 4, url: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/52/4/52\\_4\\_729/pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/52/4/52_4_729/pdf) Pristupljeno 15.5.2020.
- [13] Temperaturna promjena otpora, url: <https://riverglennapts.com/hr/resistance/748-temperature-coefficient-of-resistance.html> Pristupljeno 18.5.2020.
- [14] Temperaturni koeficijent otpora, <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-12/temperature-coefficient-resistance/> Pristupljeno 18.5.2020.
- [15] Carnotov kružni proces. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020., url: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=70169> Pristupljeno 20. 5. 2020.
- [16] Dijagram ovisnosti krivulje magnetiziranja o promjeni temperature, url: [https://www.researchgate.net/figure/a-c-Selected-isothermal-magnetization-curves-at-different-temperatures-d-Magnetic\\_fig5\\_273400884](https://www.researchgate.net/figure/a-c-Selected-isothermal-magnetization-curves-at-different-temperatures-d-Magnetic_fig5_273400884) Pristupljeno 21.5.2020.
- [17] Temperaturna Curie točka, url: <https://www.britannica.com/science/Curie-point> Pristupljeno 21.5.2020.
- [18] Materijali izolacijskih klasa, url: <https://www.theaemt.com/technical-info/general-engineering/classification-of-insulation-systems> Pristupljeno 22.6.2020.
- [19] Dozvoljene nadtemperature izolacijskih klasa, url: <https://threebond-europe.com/wp-content/uploads/technical-news-pdf/tech13.pdf> Pristupljeno 22.6.2020.
- [20] Dozvoljene nadtemperature izolacijskih klasa, url: <http://www.elektrosklop.hr/tehnicki-podaci/klase-izolacije/> Pristupljeno 22.6.2020.
- [21] Pravilnik o sigurnosti i zdravlju s električnom energijom, url: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2012\\_08\\_88\\_2019.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2012_08_88_2019.html) Pristupljeno 21.5.2020.
- [22] B. Nemet: STUPNJEVI ZAŠTITE STROJEVA PREMA IEC 60 529 (EN 60 529), IPC Rijeka <http://inovatori.hr/wp-content/uploads/sites/225/2018/02/zastita-i-polozaji-elektromotora.pdf> Pristupljeno 22.5.2020
-

- [23] D. Srpak, K., Keglević, J., Huđek: 'Zaštita elektromotora u elektromotornim pogonima', *Tehnički glasnik*, 5(2) 2011., str. 29-32., url: <https://hrcak.srce.hr/83814> Pristupljeno 27.05.2020.
- [24] Bimetal, url: <https://www.electrical4u.com/bimetals/> Pristupljeno 22.6.2020.
- [25] Termistori, url: <https://www.baseapp.com/nodesense/wireless-temperature-sensors/> Pristupljeno 22.6.2020.
- [26] Rebrasti pasivni hladnjak, url: <https://www.amazon.com/Cooling-Source-Inc-31x31x19-5mm-CS9463119BP/dp/B014EEO13Y> Pristupljeno 23.6.2020.
- [27] Pasivni hladnjak na elektromotoru, url: <http://www.koncar-mes.hr/proizvodi/elektromotori/> Pristupljeno 23.6.2020.
- [28] CPU hladnjak s ventilatorom, url: <https://www.conrad.hr/alpenfoehn-brocken-3-cpu-hladnjak-sa-ventilatorom> Pristupljeno 24.6.2020.
- [29] Empirijska relacija prisilne konvekcije između rebara pasivnog hladnjaka, url: [https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d\\_430.html](https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html) Pristupljeno 24.6.2020.
- [30] Presjek elektromotora i sustav hlađenja, url: <https://www.slideshare.net/sustenergy/cooling-of-electric-motors> Pristupljeno 24.6.2020.
- [31] Primjer toplinske sheme jednog dijela namota statora hidrogenatora, url: <https://manualzz.com/doc/14154128/mr.sc.-vilijan-mato%C5%A1evi%C4%87--dipl.ing.-kvalifikacijski-dokt...> Pristupljeno 30.6.2020.



## SAŽETAK

U ovom završnom radu cilj je bio opisati i pojasniti mehanizme prijenosa topline kondukcijom, konvekcijom i zračenjem. Poseban naglasak je na prijenosu topline konvekcijom koja može biti prirodna ili prisilna. Zatim su opisane metode toplinske zaštite, toplinske klase izolacije te načini hlađenja električnih strojeva. Na primjeru je pokazan toplinski proračun i Kirchhoffove toplinske sheme za prijelaznu pojavu zagrijavanja stroja. Provedenim mjerenjem određeni su toplinski otpori uslijed prirodne i prisilne konvekcije te zaključujemo da prisilnim strujanjem zraka toplina se bolje odvodi te stroj doseže nižu vrijednost maksimalne nadtemperature zagrijavanja.

**Ključne riječi:** konvekcija, hlađenje, prijenos topline, toplinska zaštita, toplinski otpor

## ABSTRACT

### **The thermal model of the electric machine**

In this final paper, the aim was to describe and explain the mechanisms of heat transfer by conduction, convection and radiation. Special emphasis is on convection heat transfer, which can be natural or forced. Then, the methods of thermal protection, thermal insulation classes and methods of cooling electrical machines are described. The example shows the thermal calculation and Kirchhoff thermal schemes for the transient phenomenon of machine heating. The performed measurements determined the thermal resistances due to natural and forced convection, and we conclude that the forced airflow dissipates heat better and the machine reaches a lower value of the maximum excess heating temperature.

**Keywords:** convection, cooling, heat transfer, thermal protection, thermal resistance

## ŽIVOTOPIS

Marija Bivolčević rođena je 14. listopada 1998. godine u Novoj Gradiški, s prebivalištem u Vrbju. Osnovnu školu „Ljudevit Gaj“ Nova Gradiška završava 2013. godine te upisuje Opću Gimnaziju također u Novoj Gradiški. Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku upisuje 2017. godine te se na drugoj godini studija opredjeljuje za izborni blok elektroenergetika. Aktivno se služi engleskim jezikom, a poznaje i osnove njemačkog. Informatički je pismena i koristi programe u programskom paketu Microsoft Office te MATLAB. Uz studiranje i tokom srednje škole aktivno se bavi folklornim sviranjem i pjevanjem u KUD-u Vrbje i HKUD „1862“ Osijek.

Nakon završenog preddiplomskog studija planira upisati diplomski studij na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.

U Osijeku, rujan 2020. godine,

Marija Bivolčević

Potpis: \_\_\_\_\_

## PRILOZI

## Popis korištenih oznaka i simbola

Oznaka ili simbol	Naziv	Iznos	Mjerna jedinica
$A$	Eksponencijalni prefaktor	-	$s^{-1}$
$A$	Površina	-	$m^2$
$A_c$	Poprječni presjek cijevi	-	$m^2$
$\alpha$	Koeficijent linearnog istezanja materijala	-	$K^{-1}$
$\alpha$	Temperaturni koeficijent otpora	-	$K^{-1}$
$\alpha$	Koeficijent apsorpcije	-	-
$\alpha$	Koeficijent termalne difuzivnosti	-	$m^2/s$
$\beta$	Koeficijent toplinske ekspanzije fluida	-	$K^{-1}$
$B$	Gustoća magnetskog toka	-	T
$C_t$	Toplinski kapacitet	-	J/K
$c$	Specifični toplinski kapacitet	-	J/(kgK)
$c$	Brzina širenja elektromagnetskog vala kroz medij	-	m/s
$c_0$	Brzina svjetlosti u vakuumu	$2,9979 \times 10^8$	m/s
$\gamma$	Koeficijent volumnog istezanja	-	$K^{-1}$
$D_h$	Hidraulički promjer cijevi	-	m
$\Delta_0$	Povišenje ili sniženje temperature	-	K
$\Delta T$	Temperaturna razlika	-	K
$E_A$	Aktivacijska energija	-	J/mol
$e$	Eulerov broj	2,71828	-
$e^{\frac{-E_A}{RT}}$	Vjerojatnost reakcije sudara	-	-
$\varepsilon$	Faktor emisivnosti	-	-
$\varepsilon_1$	Faktor emisivnosti sivog tijela	-	-
$\mathcal{F}_{1-2}$	Bezdimenzijski modul	-	-
$g$	Ubrzanje sile teže	9,81	$m/s^2$
$G$	Upadno zračenje	-	-

$G_\alpha$	Apsorbirano zračenje	-	-
$G_\rho$	Reflektirano zračenje	-	-
$G_\tau$	Preneseno zračenje	-	-
$Gr$	Grashofov broj	-	-
$H$	Jakost magnetskog polja	-	A/m
$\bar{h}_c$	Koeficijent konvekcije	-	W/(m <sup>2</sup> K)
$h_c$	Lokalni koeficijent konvekcije	-	W/(m <sup>2</sup> K)
$\bar{h}_r$	Koeficijent radijacije	-	W/(m <sup>2</sup> K)
$\vartheta$	Temperatura materijala	-	K
$\vartheta_0$	Temperatura referentnog životnog vijeka	-	K
$k$	Broj sudara tijekom reakcije	-	-
$k$	Koeficijent kondukcije	-	W/(m <sup>2</sup> K)
$K_r$	Koeficijent radijacijske kondukcije	-	W/K
$L$	Karakteristična duljina	-	m
$l$	Duljina materijala pri nekoj temperaturi	-	m
$l_0$	Duljina materijala pri početnoj temperaturi	-	m
$\lambda$	Valna duljina	-	m
$m$	Masa stroja	-	kg
$\nu$	Frekvencija	-	Hz
$\nu$	Kinematička viskoznost fluida	-	m <sup>2</sup> /s
$n$	Indeks refrakcije	-	-
$Nu$	Nusseltov broj	-	-
$\eta$	Stupanj korisnosti	-	-
$P$	Tlak	1 atm = 101,325 kPa	atm
$p$	Opseg cijevi	-	m
$Pr$	Prandtlov broj	-	-
$Q$	Toplina	-	J
$Q_t$	Količina topline	-	J
$q$	Toplinski tok	-	W
$q_k$	Toplina prenesena kondukcijom	-	W

$q_c$	Toplina prenesena konvekcijom	-	W
$q_r$	Toplina prenesena radijacijom	-	W
$q_{un}$	Toplinski tok unutarnje energije	-	W
$R$	Opća plinska konstanta	-	J/(mol K)
$Re$	Reynoldsov broj	-	-
$R_r$	Toplinski otpor radijacije	-	K/W
$R_0$	Otpor pri početnoj temperaturi	-	$\Omega$
$R_t$	Otpor pri nekoj temperaturi	-	$\Omega$
$R_t$	Ukupni otpor posude s hladnjakom		
$R_{t,kond}$	Toplinski otpor uslijed kondukcije	-	$\Omega$
$R_{t,konv}$	Toplinski otpor uslijed konvekcije	-	$\Omega$
$R_{t,rad}$	Toplinski otpor uslijed radijacije	-	$\Omega$
$R_{posude}$	Toplinski otpor limene posude	-	$\Omega$
$R'_{posude}$	Toplinski otpor posude umanjen za površinu hladnjaka	-	$\Omega$
$R_{hladnjaka}$	Toplinski otpor hladnjaka	-	$\Omega$
$R_{thpad}$	Toplinski otpor termalnog jastučića	-	$\Omega$
$\rho$	Koeficijent refleksije	-	-
$s$	Zagrijana površina	-	m <sup>2</sup>
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	$5,67 \times 10^{-8}$	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
$\tau$	Koeficijent transmisije	-	-
$\tau$	Vremenska konstanta prijelazne pojave zagrijavanja	-	-
$t$	Vrijeme	-	min
$\vartheta_{max}$	Nadtemperatura stroja	-	K
$\vartheta$	Temperatura	-	K
$T$	Temperatura	-	K
$T_{amb}$	Temperatura ambijenta	-	K
$T_s$	Temperatura zagrijane površine	-	K
$T_\infty$	Ustaljena temperatura	-	K
$U_\infty$	Ustaljena brzina strujanja fluida	-	m/s
$V$	Volumen pri nekoj temperaturi	-	m <sup>3</sup>

---

$V_0$	Volumen na početnoj temperaturi	-	$m^3$
$v$	Brzina strujanja zraka	-	m/s
$x$	Udaljenost u smjeru toka topline	-	m
$y$	Referentna udaljenost	-	m
$Z$	Životni vijek	-	-
$Z_0$	Referentni životni vijek	-	-

## PRILOG 4.1

Tablica 4.5. Opis značenja prvog broja IP ??

Broj	Zaštićeno od:	Objašnjenje
1	<i>Krutih stranih tijela promjera 50mm i većih</i>	Sonda, kugla promjera 50 mm, ne smije posve ući kroz ni jedan otvor kućišta.
2	<i>Krutih stranih tijela promjera 12,5mm i većih</i>	Sonda, kugla promjera 12,5 mm, ne smije posve ući kroz ni jedan otvor kućišta. Člankoviti ispitni prst smije prodrijeti do svoje duljine od 80 mm no mora održavati dovoljan razmak.
3	<i>Krutih stranih tijela promjera 2,5mm i većih</i>	Sonda, kugla promjera 2,5mm, ne smije posve ući kroz ni jedan otvor kućišta.
4	<i>Krutih stranih tijela promjera 1,0mm i većih</i>	Sonda, kugla promjera 1,0 mm, ne smije posve ući kroz ni jedan otvor kućišta.
5	<i>Zaštićeno od prašine</i>	Prodiranje nije posve spriječeno, ali prašina ne smije prodrijeti u tolikoj mjeri da to negativno utječe na zadovoljavajući rad uređaja ili sigurnost.
6	<i>Ne propušta prašinu</i>	Nema prodiranja prašine u kućište pri podtlaku od 20 milibara.

Tablica 4.6. Opis značenja drugog broja IP ??

Broj	Zaštićeno od:	Objašnjenje
1	<i>Kapajuće vode</i>	Kapi koje padaju okomito ne smiju štetno djelovati.
2	<i>Vode koja kapa ako je kućište nagnuto do 15°</i>	Kapi koje padaju okomito ne smiju štetno djelovati ako je kućište nagnuto za kut 15°.
3	<i>Voda koja pršti</i>	Voda, koja pršti u kutu do 60°obostrano u odnosu na okomicu ne smije štetno djelovati.
4	<i>Prskajuće vode</i>	Voda koja iz bilo kojeg smjera prska po kućištu ne smije štetno djelovati.
5	<i>Mlaza vode</i>	Voda koja je iz bilo kojeg smjera u mlazu usmjerena prema kućištu ne smije štetno djelovati.
6	<i>Snažnog mlaza vode</i>	Voda koja je iz bilo kojeg smjera u snažnom mlazu usmjerena prema kućištu ne smije štetno djelovati.
7	<i>Dopušteno povremeno uranjanje u vodu</i>	Voda ne smije ulaziti u količini koja štetno djeluje ako se kućište pod normiranim uvjetima tlaka i vremena povremeno uroni u vodu.
8	<i>Dopušteno trajno uranjanje u vodu</i>	Voda ne smije ulaziti u količini koja štetno djeluje ako se kućište povremeno uroni u vodu pod uvjetima dogovorenima između proizvođača i korisnika. Uvjeti moraju biti teži od uvjeta za brojku 7.
9	<i>Dopušteno je čišćenje visokim tlakom ili mlazom pare</i>	Voda koja je iz bilo kojeg smjera pod velikim tlakom usmjerena prema kućištu ne smije štetno djelovati.