

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

**Spoj kapilarne in sesalne cevi v parno-
kompresijskih sistemih
(CTSL prenosnik toplote)**

Seminarska naloga pri predmetu Prenosniki Toplote

Avtorja:
Žiga Perne in Urban Stare

Mentor:
asist. Luka Lorbek

Ljubljana, april 2021

Kazalo

1. Uvod.....	1
2. Parno kompresijski proces hlajenja.....	2
2.1. Idealni parno-kompresijski cikel	3
2.2. Parno-kompresijski proces s diabatnim tokom v kapilarni cevi.....	4
2.3. Prenosnik toplote	5
2.4. Izvedba prenosnika toplote.....	6
3. Izračun parametrov hladilnega procesa s spojem sesalne in kapilarne cevi.....	7
3.1. Postavitev algoritma	7
4. Rezultati in komentarji.....	10
5. Viri	15
6. Priloga A: Koda.....	16
6.1. Izračun	16
6.2. Obdelava.....	19

Kazalo slik

Slika 2.1: (a) hladilni cikel v deljeni klimatski napravi, povzeto po [1], (b) hladilni cikel v gospodinjskih aparatih, povzeto po [1].....	3
Slika 2.2: (a) poenostavljena shema parno-kompresijskega sistema, (b) idealni parno-kompresijski proces [4].....	4
Slika 2.3: Graf adiabatnega parno-kompresijskega procesa (1-4) in diabatnega prano-kompresijskega procesa (1*-4*).....	5
Slika 2.4: Shema rekuperator toplote [3], shema cevnega prenosnika toplote [5]	5
Slika 2.5 Graf protitočnega prenosa toplote [5]	6
Slika 2.6: Izvedbe prenosnika (1-12), izvedbe lepljenja (13-19), ekstruzija (20) [3].....	6
Slika 3.1: Shema delovanja računskega algoritma	9
Slika 4.1: Definicija geometrijskih in obratovalnih pogojev	10
Slika 4.2: Rekurzivna zanka algoritma	11
Slika 4.3: Primerjava razlike temperatur $t_{s,o} - t_{s,i}$ [K]	12
Slika 4.4: učinkovitosti prenosnika toplote ε [/].....	13
Slika 4.5: Primerjava masnih tokov w [kg/h]	13

Kazalo preglednic

Tabela 3.1: Koeficienti korekcije masnega toka	9
Tabela 4.1: Vhodni merjene vrednosti ter geometrijski in obratovalni pogoji [3].....	12

Seznam uporabljenih simbolov

Oznaka	Enota	Pomen
C_p	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	specifična toplota
D	m	premer
h	J kg^{-1}	entalpija
L	m	dolžina
p	Pa	Tlak
t	K	temperatura
w	kg/s	masni tok
v	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	specifični volumen
V	m^3	volumen
λ	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	toplotna prevodnost
ε	/	učinkovitost
η	Pa s	dinamična viskoznost
Indeksi		

c	kapilara, kondenzacija
e	evaporacija
f	začetna točka uparjanja
i	vstop
o	izstop
s	sesalna cev
v	nasičena tekočina

1. Uvod

Potreba po hlajenju se je pojavila pred našim štetjem, ko so predniki nabirali in shranjevali sneg z namenom, da so živila dlje časa ohranili sveža. Prvi, ki je predstavil hladilno napravo je bil William Cullen, ki je leta 1755 zasnoval hladilni stroj, ki je s pomočjo črpalke ustvaril delni vakum nad posodo dietil-etera. Dietil-eter je nato zavrel in absorbiral toploto iz okoliškega zraka.

Leta 1834 se je pojavil prvi prototip parno-kompresijskega hladilnega sistema. Izdelal ga je Jacob Perklins. Omenjeni prototip ni nikoli prišel na tržišče.

Vse do konca 19. stoletja sta pridelovanje in transport ledu po svetu predstavljala pomembno gospodarsko panogo. Za transport ledu so uporabljali preko 170 ladji.

Prvič so parno-kompresijske hladilne stroje v komercialne namene uporabili 20. stoletja. Na trgu se je pojavil prvi hladilnik. Prva hladilna transportna vozila pa so se pojavila nekaj let kasneje.

Parno-kompresijski stroji iz prejšnjega stoletja so za hladilno tekočino v večini uporabljali amonijak. Izkoristki teh naprav pa so bili v primerjavi z modernimi parno-kompresijskimi stroji dokaj nizki.

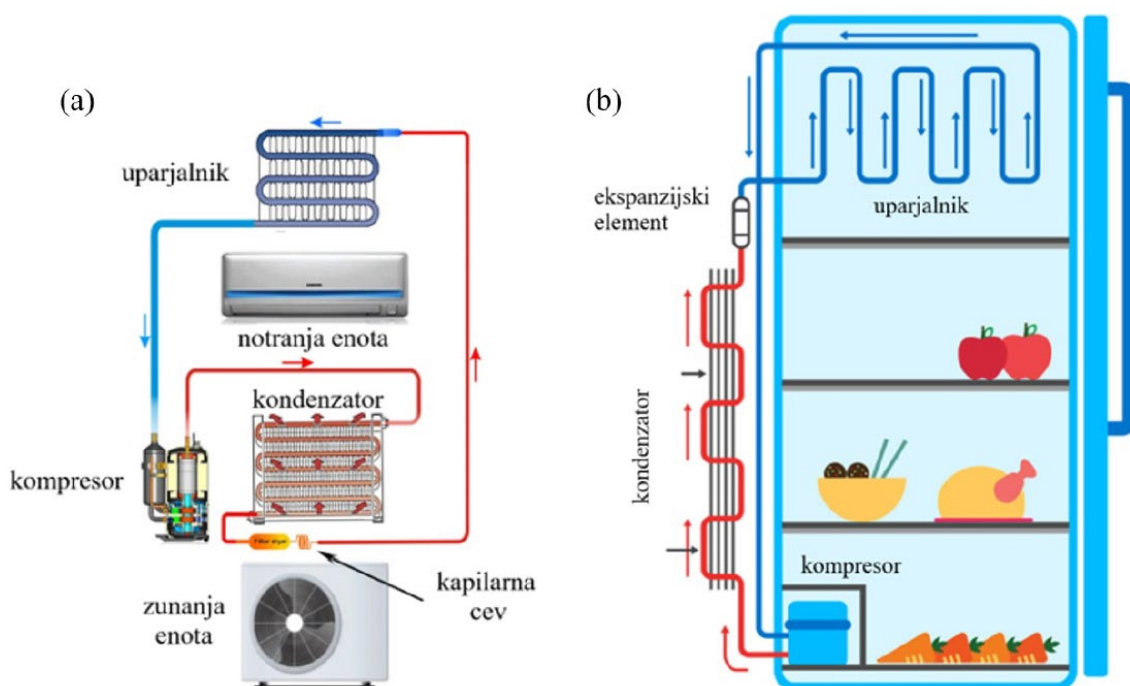
Klub temu, da parno-kompresijski način hlajenja ni nova tehnologija, je prostora za razvoj še veliko. Raziskovalci iščejo rešitve, kako izboljšati učinkovitost delovanja strojev ter znižati proizvodne stroške. Komponentam, katerim se posveča veliko pozornosti, so: kompresor, kateremu želimo izboljšati učinkovitost, izolacija, s katero zmanjšujemo toplotne izgube na okolico, optimizacija prenosa toplote na uparjalniku in kondenzatorju.[1] Učinkovitost parno-kompresijskega stroja se lahko izboljša tudi z razvojem novih hladilnih tekočin, optimizacijo toka hladiv v kapilarni cevi ter s pomočjo prenosa toplote med kapilarami in sesalnimi cevmi, katerega bova predstavila v seminarju.

V prvem delu seminarja bova predstavila termo dinamski proces parno-kompresijskega stroja ter proces v katerem imamo dodaten prenos toplote med kapilaro in sesalno cevjo. Nato bova predstavila različne rešitve spajanja kapilarne in sesalne cevi, v osrednjem delu pa bova za izhodišče uporabila algebrائيčni model avtorjev Hermes et. al [2] in ga primerjala z eksperimentalnimi meritvami avtorjev Boenga et. al [3].

2. Parno kompresijski proces hlajenja

Parno-kompresijski sistemi so prisotni v večini aparatov, s pomočjo katerih želimo ohladiti izbrani prostor na nižjo temperaturo od okolice. Primer so hladilniki in klimatske naprave, ki so lahko različnih velikosti. Za prenos toplote se uporabljajo hladilne tekočine, katere morajo imeti dobre termo dinamske lastnosti, predvsem zadostno razliko v uparjalni toploti. Prav tako morajo izpolnjevati okoliške in konstrukcijske zahteve. Hladivo ne sme biti korozivno in ne sme imeti prevelikega negativnega vpliva na okolje. Za črpanje hladiva po zaprtem sistemu uporabljamo kompresor, kateri v sistem vnaša delo, ki je potrebno za prenos energije/toplote.

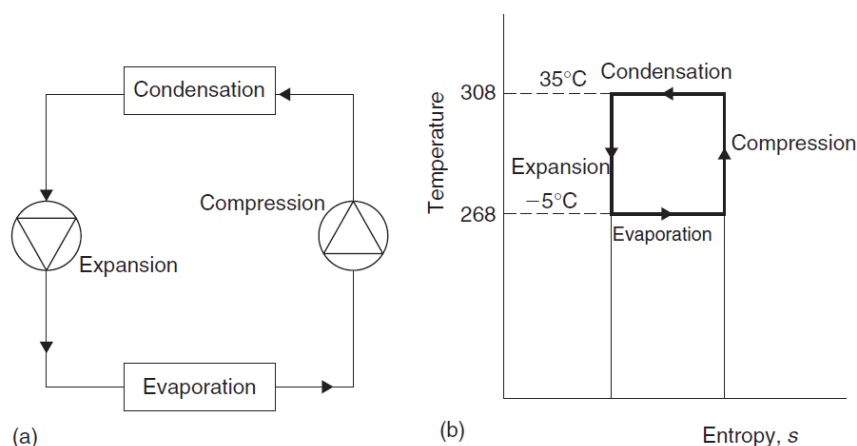
Hladilna tekočina se v uparjalniku upari ter tako iz prostora, katerega želimo ohladiti, sprejme toploto. V plinastem stanju nato po sesalni cevi potuje proti kompresorju, v katerem pride zaradi vnosa mehanske energije do dviga tlaka in temperature. Ko hladivo zapusti kompresor je njegova temperatura višja od temperature okolice. Nato potuje do kondenzatorja, v katerem skondenzira in s tem preko njega odda toploto na okolico. Hladivo v kapljevitem stanju nato potuje proti ekspanzijskem elementu. V našem primeru v kapilarno cev, kjer se mu hipno zniža tlak. Posledica znižanja tlaka je pričetek uparjanja hladiva. Hladivo se ne upari hipno, zato imamo v sistemu prisoten dvofazni tok.



Slika 2.1: (a) hladilni cikel v deljeni klimatski napravi, povzeto po [1], (b) hladilni cikel v gospodinjskih aparatih, povzeto po [1]

2.1. Idealni parno-kompresijski cikel

V parno-kompresijskem procesu je hladilna tekočina izpostavljena štirim različnim procesom: kompresiji, kondenzaciji, ekspanziji in uparjanju. Pri idealnem kompresijskem procesu kompresija in ekspanzija potekata pri konstantni entropiji, torej pod predpostavko, da je proces izotropen. Izotropna preobrazba je povračljiv proces pri katerem ne pride do izgube energije. Izotropna preobrazba je prikazana na 2.2 (b) kot vertikalne črte v T-s diagramu, kjer je T temperatura, s pa entropija. S puščicami je prikazana smer toka tekočine. Na sliki 2.2 (a) je prikazana poenostavljena shema parno-kompresijskega sistema z označenimi vsemi glavnimi komponentami: kompresor (Compression), kondenzator (Condensation), ekspanzijski element (Expansion) in uparjalnik (Evaporator).



Slika 2.2: (a) poenostavljena shema parno-kompresijskega sistema, (b) idealni parno-kompresijski proces [4]

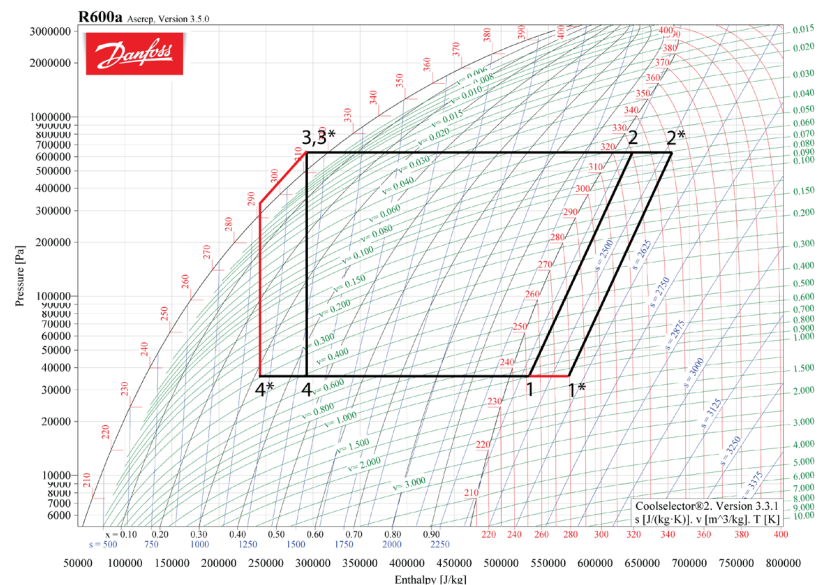
2.2. Parno-kompresijski proces s diabatnim tokom v kapilarni cevi

Pri realnem parno-kompresijskem ciklu prihaja do nepovračljivih izgub pri fazni preobrazbi hladilne tekočine, tlačnega padca v povezovalnih ceveh in prenosniku toplote in do disipacije energije zaradi turbulentnega toka. Iz teh razlogov v sistemu entropija neprestano narašča.

V grobem delimo parno-kompresijski cikel na adiabatnega in diabatnega. Poimenovanje se navezuje na stanje kapilarne cevi. V primeru adiabatnega procesa se toplota minimalno prenaša na okolico, ko pa govorimo o diabatnem procesu, obravnavamo prenos toplote iz kapilare na sesalno cev. Prenos toplote izvajamo koncentrično ali lateralno. Pri koncentrični postavitvi imamo kapilarno cev nameščeno znotraj sesalne cevi. Prenos toplote se odvija med kapilarno cevjo in hladilno tekočino v plinastem stanju, za razliko od lateralnega principa, pri katerem se prenos toplote vrši med kapilarno in sesalno cevjo. V seminarju bosta obravnavana oba principa prenosa toplote.

V termodinamskem smislu je razlika med adiabatnim in diabatnim procesom, da iz kapilare prenašamo toploto na sesalno cev, s čimer hladilno tekočino v plinastem stanju dodatno pregrejamo od točke 1 do točke 1*, kar pomeni, da se pregrete pari poveča entalpija ter posledično izkoristek parno-kompresijskega procesa. Točka 4 pa se zamakne v levo v točko 4*.

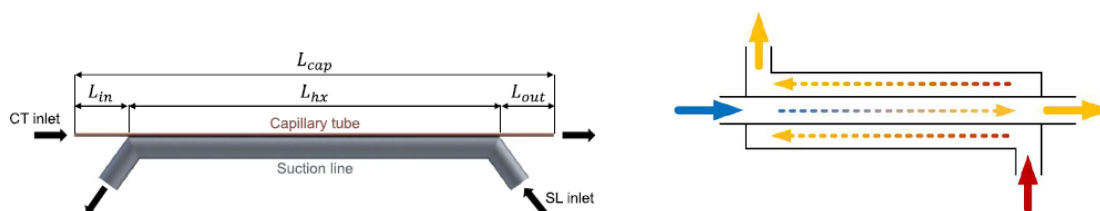
Na sliki 2.3 je prikazan graf adiabatnega procesa, označenega z indeksi (1-4) in diabatnega procesa, označenega z indeksi (1*-4*).



Slika 2.3: Graf adiabatnega parno-kompresijskega procesa (1-4) in diabatnega prano-kompresijskega procesa (1*-4*)

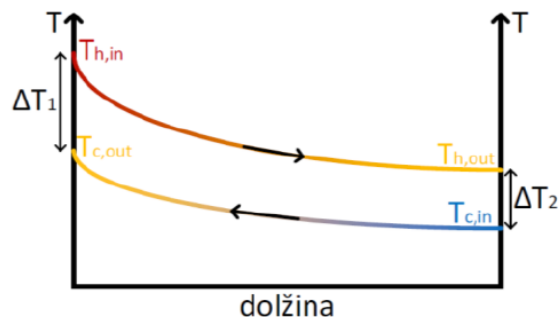
2.3. Prenosnik toplote

Cevni prenosnik toplote je sestavljen iz okroglih cevi, pri čemer ena tekočina teče znotraj cevi, drugi pa zunaj. Njegova izdelava je dokaj enostavna, področje uporabnosti pa zelo široko, saj je njegova zasnova zelo fleksibilna, kar omogoča prilagodljivost potrebam uporabe. Poleg cevnega prenosnika toplote slika 2.4 desno, bova v numerični simulaciji obravnavala tudi rekuperator toplote slika 2.4 levo.



Slika 2.4: Shema rekuperator toplote [3], shema cevnega prenosnika toplote [5]

V obeh primerih bova obravnavala protitočni režim delovanja, katerega učinek je boljši od sotočnega. Na sliki 2.5 je prikazan protitočni režim prenosa toplote v cevem prenosniku toplote.



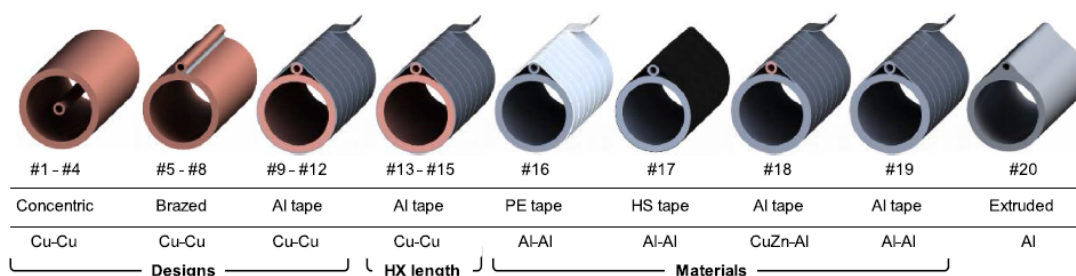
Slika 2.5 Graf protitočnega prenosa toplote [5]

2.4. Izvedba prenosnika toplote

Izvedba prenosnika toplote močno vpliva na kontaktno upornost prenosa toplote med kapilarno in sesalno cevjo. Prav tako ima material cevi vpliv na prenos toplote iz hladilne tekočine na paro.

Boeng [5] navaja možne načine izdelav spojev ter kombinacije uporabljenih materialov za kapilarno in sesalno cev, katere bova predstavila v nadaljevanju.

V eksperimentu je uporabljal sledeče kombinacije materialov: Cu-Cu (baker-baker), Al-Al (aluminij-aluminij), CuZn-Al (baker cinkova zlitina-aluminij). Izvedbe je razdelil na: koncentrične, lateralne s spajanjem, lateralne s lepljenjem ter lateralne z ekstruzijo kapilarne cevi. Za lepljenje je uporabljal lepilne trakove iz treh različnih materialov: Al (aluminij), PE (poli etilen) PVC-HS (klasični izolirni trak). Material lepilnega traku vpliva na toplotne izgube z okolico. Vsi navedeni načini izdelave so predstavljeni na sliki 2.6.



Slika 2.6: Izvedbe prenosnika (1-12), izvedbe lepljenja (13-19), ekstruzija (20) [3]

3. Izračun parametrov hladilnega procesa s spojem sesalne in kapilarne cevi

V viru [2] je postavljen ekspliciten algebraičen model za računsko določanje parametrov hladilnega procesa s spojem kapilarne in sesalne cevi. V okviru seminarske naloge je bil omenjen model realiziran v programskem jeziku Python v obliki rekurzivne funkcije. Za vhodne podatke v funkcijo so bili uporabljeni podatki eksperimentalne študije [3]. Na koncu sva za oceno natančnosti obravnavanega modela primerjala izračunane in izmerjene vrednosti.

3.1. Postavitev algoritma

Algoritem se izvaja po naslednjih korakih:

1. Definicija geometrijskih in obratovalnih pogojev;
2. Izračun masnega pretoka pri pogoju $h_f = h_{s,i}$;

$$w = \Phi \sqrt{\frac{D_C^5}{L_C} \left[\frac{p_i - p_f}{v_f} + \frac{p_f - p_c}{a} + \frac{b}{a^2} \ln \left(\frac{ap_e + b}{ap_f + b} \right) \right]} \quad (1)$$

Kjer je w masni pretok, D_C premer kapilarne cevi, L_C dolžina kapilarne cevi, p_i tlak na vstopu, p_f tlak začetne točke uparjanja, v_f specifični vilumen tekočine v začetni točki uparjanja, za preračun potrebujemo tudi sledeče koeficiente $a = v_f \cdot (1 - k)$, $b = v_f \cdot p_f \cdot k$ in $k = 1,63 \cdot 10^5 \cdot p_f^{(-0,72)}$.

Na podlagi izračunanega masnega toka izračunaj:

- a. Število *Heat transfer units*;

$$NTU = c \frac{w^{n-1} L_S}{D_S^n} \frac{\lambda_v^{\frac{2}{3}}}{\eta_v^{n-1} c_{p,v}^{\frac{2}{3}}} \quad (2)$$

Kjer je NTU število prenosnih enot, L_s dolžina sesalne cevi, D_s premer sesalne cevi, $c_{p,v}$ specifična toplota nasičene tekočine, η_v dinamična viskoznost nasičene kapljevine, λ_v toplotna prevodnost nasičene tekočine, kjer je vrednost konstant c in n : $c = 4$ in $n = 0,405$.

- b. Učinkovitost prenosnika toplote;

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad (3)$$

Kjer je ε učinkovitost prenosnika toplote.

- c. Temperaturo na izhodu iz sesalne cevi;

$$t_{s,o} = t_{s,i} + \varepsilon(t_{c,i} - t_{s,i}) \quad (4)$$

Kjer je $t_{s,o}$ temperatura na izstopu iz sesalne cevi, $t_{s,i}$ temperatura na vstopu v sesalno cev, $t_{c,i}$ temperatura na vstopu v kapilarno cev.

- d. Entalpijo na izstopu iz kapilare;

$$h_{s,o} = h_{c,i} + \varepsilon c_{p,s}(t_{c,i} - t_{s,i}) \quad (5)$$

Kjer je $h_{s,o}$ entalpija na izstopu iz sesalne cevi, $h_{c,i}$ entalpija na vstopi v kapilarno cev ter $c_{p,s}$ specifična toplota tekočine v sesalni cevi.

- e. Povprečno entalpijo v kapilarni cevi, h_{avg} ;

$$h_{avg} = \frac{1}{2}(h_{c,i} - h_{c,o}) \quad (6)$$

Kjer h_{avg} predstavlja povprečno vrednosti entalpije med točko 3 in 4 ter $h_{c,o}$ entalpijo na izstopu iz kapilarne cevi.

3. Izračun masnega pretoka pri pogoju $h_f = h_{avg}$;
4. Vrnitev na korak (3), dokler ni dosežena konvergenca.
5. Korekcija masnega toka. Pri tem so koeficienti prikazani v tabeli 3.1

$$\Lambda = \frac{w'}{w} = c_0 \left(\frac{L_s}{L_c}\right)^{c_1} \left(\frac{D_s}{D_c}\right)^{c_2} \varepsilon^{c_3} \left(\frac{v_f \eta_f}{v_v \eta_v}\right)^{c_4} \quad (7)$$

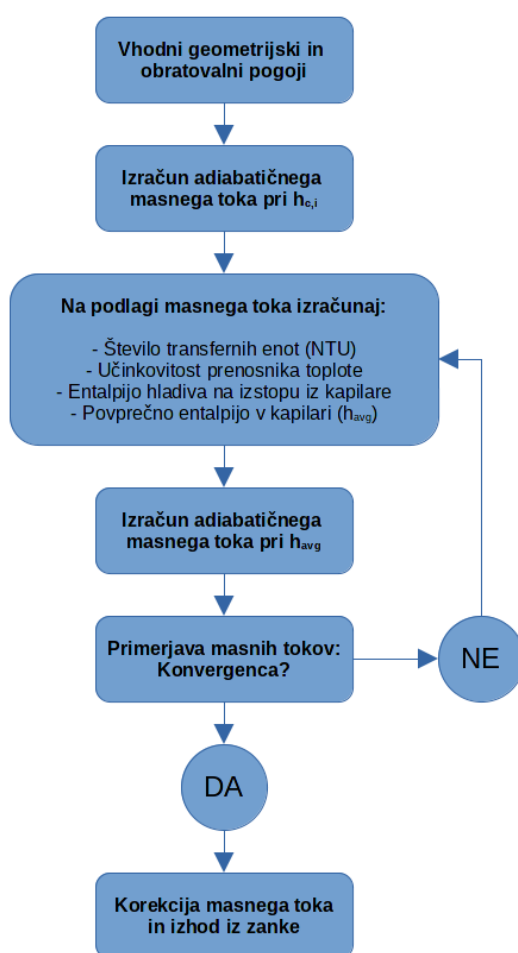
Kje Λ predstavlja korekcijski faktor, w' vrednost masnega toka iz prejšnjega koraka, L_s dolžino sesalne cevi, D_s premer sesalne cevi η_f dinamična viskoznost v začetni točki uparjanja, v_v specifični volumen nasičene tekočine, v_f specifični volumen tekočine v začetni točki uparjanja, c_{0-4} pa

predstavljajo koeficiente korekcije masnega toka, ki jih predstavljava v tabeli 3.1.

Tabela 3.1: Koeficienti korekcije masnega toka

c_0	c_1	c_2	c_3	c_4
1,103	0,3	-0,03	-0,45	-0,2

Delovanje algoritma shematsko prikazuje v diagramu na sliki 3.1.



Slika 3.1: Shema delovanja računskega algoritma

4. Rezultati in komentarji

Preračun je bil opravljen v programskem jeziku Python. Za določanje stanja hladiva je bila uporabljena knjižnica CoolProp.

Za izvedbo algoritma najprej definiramo geometrijske in obratovalne pogoje. Obratovalni pogoji so prikazani na sliki 4.1.

```
# Podatki za 2. točko algoritma:
D_c    = t[1]*10**(-3) # Premer kapilarne cevi      [m]
D_s    = t[2]*10**(-3) # Premer sesalne cevi       [m]
p_c    = t[3]*10**5    # Tlak na inlet              [Pa]
p_e    = t[4]*10**5    # Tlak uplinjanja            [Pa]
dt_sub = t[5]          # Podhlajenje                [K]

fi     = 6.0           # Kapilarna konstanta        [/]
L_c    = 2.7           # Dolzina kapilarne cevi    [m]
L_s    = 1.5           # Dolzina sesalne cevi      [m]

# Podatki za 3. točko algoritma:
t_s_i  = 273.15 + t[7] # Temperatura na vstopu v sesalno cev [K]

c      = 4             # Konstanta                 [/]
n      = 0.405         # Konstanta                 [/]

# Konstante za korekcijo masnega toka:
c0     = 1.103
c1     = 0.3
c2     = -0.03
c3     = -0.450
c4     = -0.2
```

Slika 4.1: Definicija geometrijskih in obratovalnih pogojev

Zanka je prikazana na sliki 4.2. Kot je vidno, najprej določimo parametre hladiva v začetni točki uparjanja (v kodi označeni s f). Nato izračunamo koeficiente k, a in b. S tem lahko izračunamo masni tok. Nato moramo določiti parametre hladiva pri izstopu iz kapilarne cevi (v kodi označeni z v). S tem lahko izračunamo NTU in posledično učinkovitost prenosnika

toplote. Ostane nam še izračun temperature na izhodu iz sesalne cevi, entalpija na izhodu iz kapilare ter povprečna entalpija v kapilari. Zanka se zaključi, če razmerje med masnim tokom iz prejšnje zanke ter trenutnim masnim tokom odstopa od 1 za manj kot $1 \cdot 10^{-8}$.

```
while(abs(K) > 1e-8):
    i = i+1

    h_f = h_avg
    t_f = cool.PropsSI("T", "H", h_f, "P", p_c, hladivo)
    p_f = cool.PropsSI("P", "Q", 0, "T", t_f, hladivo)
    v_f = 1 / (cool.PropsSI("D", "P", p_f, "Q", 0, hladivo))
    eta_f = cool.PropsSI("V", "P", p_f, "Q", 0, hladivo)

    # Entalpiji na vstopu v kapilaro
    # Temperatura na flash-point
    # Tlak na flash-point
    # Specifični volumen na Flash-Point
    # Viskoznost na flash-point

    k = 1.63e5 * p_f**(-0.72)
    a = v_f * (1 - k)
    b = v_f * p_f * k
    #
    # Koefficienti
    #

    # Izracun masnega toka:
    w_prev = w
    w = fi * np.sqrt((D_c**5 / L_c) * (((p_i - p_f) / v_f) + ((p_f - p_e) / a) + ((b / a**2) * np.log((a * p_e + b) / (a * p_f + b)))))

    t_s_avg = (t_s_i + t_s_o) / 2
    lam_v = cool.PropsSI("L", "H", h_avg, "P", p_e, hladivo)
    eta_v = cool.PropsSI("V", "H", h_avg, "P", p_e, hladivo)
    c_p_v = cool.PropsSI("C", "H", h_avg, "P", p_e, hladivo)
    v_v = 1 / (cool.PropsSI("D", "H", h_avg, "P", p_e, hladivo))
    c_p_s = cool.PropsSI("C", "P", p_e, "T", t_s_avg, hladivo)
    # Povprečna temperatura v sesalni cevi [K]
    # Termična prevodnost-nasícena tekocina [W/mK]
    # Viskoznost-nasícena tekocina [Pa s]
    # Specifična toplota-nasícena tekocina [J/kgK]
    # Specifični volumen-nasícena tekocina [m3/kg]
    # Specifična toplota v sesalni cevi [J/kgK]

    #3. Based on the calculated mass mass flow rate, calculate:
    #a. Number of transfer units (Eq. (15));
    #b. Heat exchanger effectiveness (Eq. (12));
    #c. Suction line outlet temperature (Eq. (11));
    #d. Refrigerant enthalpy at the evaporator inlet (Eq. (10));
    #e. Average enthalpy (Eq. (17)).

    NTU = (c * w**(n - 1) * L_s * lam_v**(2/3)) / (D_s**n * eta_v**(n - (1/3)) * c_p_v**(2/3))
    eps = NTU / (1 + NTU)
    t_s_o = t_s_i + eps * (t_c_i - t_s_i)
    h_c_o = h_c_i - eps * c_p_s * (t_c_i - t_s_i)
    # Number of Transfer Units
    # Učinkovitost prenosnika toplote
    # Temperatura na izstopu iz sesalne cevi
    # Entalpija na izstopu iz kapilare

    h_avg = 0.5 * (h_c_i + h_c_o)
    K = 1 - (w_prev / w)
```

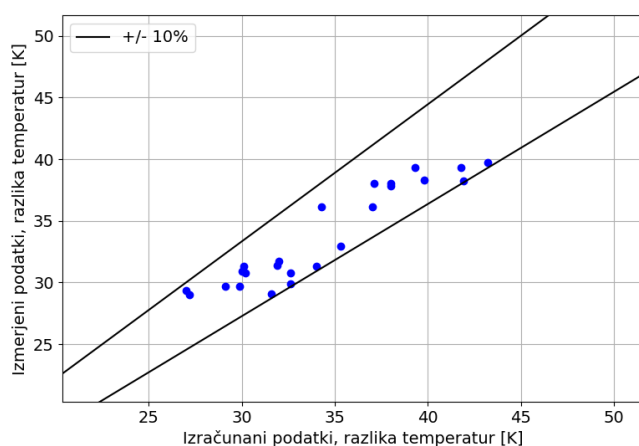
Slika 4.2: Rekurzivna zanka algoritma

Spodaj je prikazana tabela vhodnih podatkov v algoritem. Zadnji trije stolpci ($T_{s,o}$, \dot{m} in ε) predstavljajo eksperimentalne meritve, katere se bodo primerjale z rezultati izračuna.

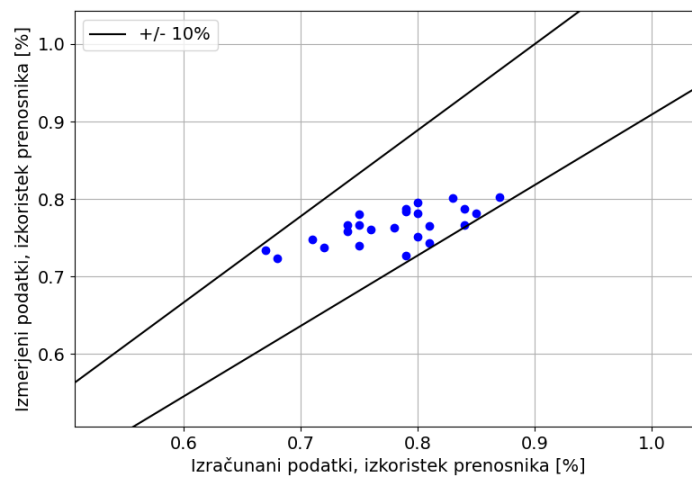
Tabela 4.1: Vhodni merjene vrednosti ter geometrijski in obratovalni pogoji [3].

Sample#	D_c [mm]	D_s [mm]	$P_{c,i}$ [bar]	$P_{c,o}$ [bar]	SUB [°C]	SUP [°C]	$T_{s,i}$ [°C]	$T_{s,o}$ [°C]	\dot{m} [kg h ⁻¹]	ε [-]
1	0.660	7.94	6.84	1.09	9.8	9.8	0.0	30.2	2.09	0.75
1	0.660	7.94	4.64	0.60	5.0	4.3	-20.0	19.3	1.76	0.79
2	0.740	7.94	6.84	1.15	10.0	8.4	0.0	27.0	3.15	0.67
2	0.740	7.94	4.65	0.65	4.9	2.5	-20.0	17.1	2.39	0.74
3	0.660	6.32	6.84	1.09	9.8	9.8	0.0	31.9	2.06	0.80
3	0.660	6.32	4.60	0.59	6.0	5.5	-19.2	20.6	1.72	0.83
4	0.771	6.32	6.84	1.15	9.8	8.4	0.0	29.9	3.80	0.75
4	0.771	6.32	4.64	0.73	5.0	2.3	-17.4	19.6	3.09	0.78
5	0.660	7.94	6.84	1.11	9.9	9.3	-0.1	32.5	2.27	0.81
5	0.660	7.94	4.65	0.61	5.1	3.9	-20.0	21.8	1.77	0.84
6	0.760	7.94	6.84	1.13	9.9	8.9	0.1	31.7	3.17	0.79
6	0.760	7.94	4.64	0.81	4.9	3.5	-13.8	21.5	2.75	0.80
7	0.660	6.32	6.84	1.11	9.9	9.4	0.0	34.0	2.22	0.85
7	0.660	6.32	4.64	0.61	5.0	4.3	-19.6	23.6	1.84	0.87
8	0.764	6.32	6.84	1.15	9.8	8.3	-0.1	32.5	3.72	0.81
8	0.764	6.32	4.64	0.64	5.0	2.9	-20.0	21.9	2.78	0.84
9	0.660	7.94	6.84	1.10	9.8	9.3	-0.2	29.8	2.15	0.74
9	0.660	7.94	4.65	0.61	7.0	3.7	-20.2	17.8	1.79	0.79
10	0.770	7.94	6.84	1.14	9.8	8.7	0.0	27.2	3.38	0.68
10	0.770	7.94	4.64	0.70	5.0	2.4	-18.4	15.9	2.98	0.71
11	0.664	6.32	6.84	1.10	9.9	9.5	-0.1	30.0	2.55	0.75
11	0.664	6.32	4.64	0.60	10.0	9.4	-14.9	17.1	1.87	0.80
12	0.780	6.32	6.84	1.12	9.8	9.0	-0.1	29.0	3.15	0.72
12	0.780	6.32	4.64	0.63	5.0	3.2	-20.0	18.0	2.59	0.76

Ugotovili smo, da model, postavljen v delu *Hermes et al.* uspešno napoveduje obravnavane izmerjene vrednosti z napako $\pm 10\%$. V vseh primerih za razliko temperatur na vstopu in izstopu iz sesalne cevi in za učinkovitost prenosnika toplote izračunane vrednosti ne odstopajo od meritev za več kot $\pm 10\%$. Povprečno odstopanje izračunanih vrednosti od meritev je 4,3 % za razliko temperatur in 4,4 % za učinkovitost prenosnika. Na sliki 4.3 prikazujeva rezultate preračunov temperatur, na sliki 4.4 pa preračune masnega toka

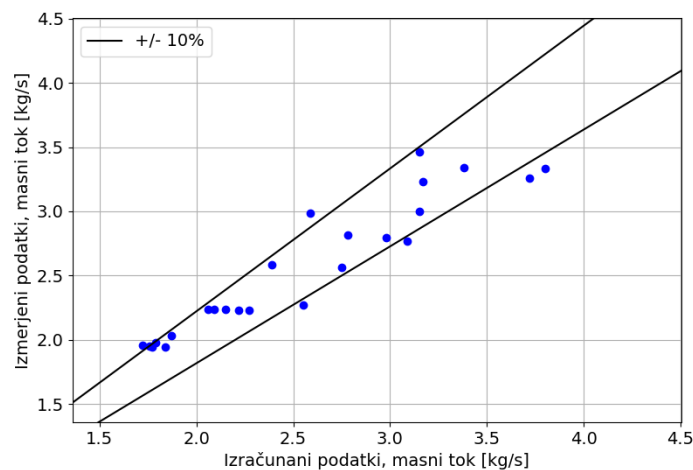


Slika 4.3: Primerjava razlike temperatur $t_{s,o} - t_{s,i}$ [K]



Slika 4.4: učinkovitosti prenosnika toplote ε [/]

V primeru preračuna masnega toka se 77,8% izračunanih vrednosti nahaja znotraj intervala $\pm 10\%$ izmerjenih vrednosti. Pri tem želiva izpostaviti, da je bilo potrebno prilagoditi koeficiente $c_0 - c_4$ (predstavljeni v tabeli 4.1), da sva dobljene rezultate premaknila bližje izmerjenim vrednostim. Povprečno odstopanje izračunanih vrednosti od meritev za masni tok je 7,6%.



Slika 4.5: Primerjava masnih tokov w [kg/h]

Pokazano je bilo, da lahko model uspešno uporabimo za računanje hladilnega procesa pri določenih geometrijskih in obratovalnih pogojih. Za nadaljnje testiranje modela bi bilo potrebno opraviti še dodatne meritve pri širših pogojih delovanja ter ponovno primerjati izračunane vrednosti.

5. Viri

- [1] A. Kuhelj, "Vizualizacija tokovnih vzorcev v kapilari hladilnega sistema," magistrsko delo. Fakulteta za Strojništvo UL 2020.
- [2] C. J. L. Hermes, C. Melo, and F. T. Knabben, "Algebraic solution of capillary tube flows. Part II: Capillary tube suction line heat exchangers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 6–7, pp. 770–775, 2010.
- [3] J. Boeng, R. Stahelin, J. M. Gonçalves, and C. J. L. Hermes, "Performance ratings of concentric and lateral (taped, brazed and extruded) capillary tube suction line heat exchangers running with isobutane," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 171, no. February, p. 115079, 2020.
- [3] T. C. Welch, G. F. Hundi, and A. R. Trott, *Refridgeration and Air Conditioning* (Fourth Edition). Elsevier, 2008.
- [5] J. Tušek, A. Poredoš, "Metode za preračun in dimenzioniranje prenosnikov toplote", shripta pri predmetu Prenosniki toplote, FS UL, 2021.

6. Priloga A: Koda

6.1. Izračun

```
import numpy as np
import CoolProp.CoolProp as cool

def izracun(t, hladivo, prt):

    # Podatki za 2. točko algoritma:
    D_c = t[1]*10**(-3)      # Premer kapilarne cevi
    [m]
    D_s = t[2]*10**(-3)      # Premer sesalne cevi
    [m]
    p_c = t[3]*10**5          # Tlak na inlet
    [Pa]
    p_e = t[4]*10**5          # Tlak uplinjanja [Pa]
    dt_sub = t[5]             # Podhlajenje
    [K]

    fi = 6.0                  # Kapilarna konstanta
    [/]
    L_c = 2.7                  # Dolzina kapilarne cevi [m]
    L_s = 1.5                  # Dolzina sesalne cevi
    [m]

    # Podatki za 3. točko algoritma:
    t_s_i = 273.15 + t[7]     # Temperatura na vstopu v sesalno
    cev [K]

    c = 4                      # Konstanta [/]
    n = 0.405                  # Konstanta [/]
```

```

# Konstante za korekcijo masnega toka:
c0      = 1.103
c1      = 0.3
c2      = -0.03
c3      = -0.450
c4      = -0.2

#2. Calculate the adiabatic mass flow rate (Eq. (9))
using hi,c as the enthalpy path

# Podatki za vstop v zanko - se spreminjajo vsako
iteracijo
t_sat    = cool.PropsSI("T", "Q", 0, "P", p_c, hladio)
          # Temperatura nasicene tekocine na
kondenzatorju
t_c_i    = t_sat - dt_sub                      #
Temperatura na vstopu v kapilaro
h_c_i    = cool.PropsSI("H", "T", t_c_i, "P", p_c,
hladio)    # Entalpija na vstopu v kapilaro
t_s_o    = t_s_i + 30                          #
Začetni približek izstopne temperature iz sesalne cevi
p_i      = p_c                                  # Tlak
na vhodu v kapilarno cev (enak tlaku kondenzacije)
h_avg    = h_c_i                                #
Prvotna definicija h_avg (to racunamo z zanko)

# Definicija spremenljivk za izvedbo iteracije
w        = 3 / 3600
i        = 0
K        = 1

while(abs(K) > 1e-8 ):
    i = i+1

    h_f    = h_avg                                # Entalpiji
na vstopu v kapilaro
    t_f    = cool.PropsSI("T", "H", h_f, "P", p_c, hladio) #
Temperatura na flash-point
    p_f    = cool.PropsSI("P", "Q", 0, "T", t_f, hladio)
    # Tlak na flash-point
    v_f    = 1 / (cool.PropsSI("D", "P", p_f, "Q", 0,
hladio)) # Specifčni volumen na Flash-Point
    eta_f  = cool.PropsSI("V", "P", p_f, "Q", 0, hladio)
    # Viskoznost na flash-point

```

```

k = 1.63e5 * p_f**(-0.72) #
a = v_f * (1 - k) #
Koeficienti
b = v_f * p_f * k #

# Izracun masnega toka:
w_prev = w
w = fi * np.sqrt((D_c**5 / L_c) * (((p_i - p_f) / v_f) +
((p_f - p_e) / a) + ((b / a**2) * np.log((a * p_e + b) /
(a * p_f + b)))))

t_s_avg = (t_s_i + t_s_o) / 2 #
Povprečna temperatura v sesalni cevi [K]
lam_v = cool.PropsSI("L", "H", h_avg, "P", p_e,
hladivo) # Termična prevodnost-nasícena tekocina
[W/mK]
eta_v = cool.PropsSI("V", "H", h_avg, "P", p_e,
hladivo) # Viskoznost-nasícena tekocina
[Pa s]
c_p_v = cool.PropsSI("C", "H", h_avg, "P", p_e,
hladivo) # Specifična toplota-nasícena tekocina
[J/kgK]
v_v = 1 / (cool.PropsSI("D", "H", h_avg, "P", p_e,
hladivo)) # Specifični volumen-nasícena tekocina
[m3/kg]
c_p_s = cool.PropsSI("C", "P", p_e, "T", t_s_avg,
hladivo) # Specifična toplota v sesalni cevi
[J/kgK]

#3. Based on the calculated mass mass flow rate,
calculate:
#a. Number of transfer units (Eq. (15));
#b. Heat exchanger effectiveness (Eq. (12));
#c. Suction line outlet temperature (Eq. (11));
#d. Refrigerant enthalpy at the evaporator inlet
(Eq. (10));
#e. Average enthalpy (Eq. (17)).

NTU = (c * w**(n - 1) * L_s * lam_v**(2/3)) / (D_s**n *
eta_v**(n - (1/3)) * c_p_v**(2/3)) # Number of Transfer
Units
eps = NTU / (1 + NTU)
# Učinkovitost prenosnika toplote
t_s_o = t_s_i + eps * (t_c_i - t_s_i)
# Temperatura na izstopu iz sesalne cevi
h_c_o = h_c_i - eps * c_p_s * (t_c_i - t_s_i)
# Entalpija na izstopu iz kapilare

```

```

h_avg = 0.5 * (h_c_i + h_c_o)
K = 1 - (w_prev / w)

```

```

if(prt == 1):
    print("Iteracija", i)
    print("Masni tok =", w * 3600)
    print("K_multiplier =", K)
    print("c_p_s", c_p_s)
    print("tlak", p_f * 10**(-5))
    print("v_f", v_f)
    print("razlika", t_s_o - t_s_i)
    print("eps", eps)
    print("tso", t_s_o)
    print("\n")

```

```

w      = c0 * (L_s / L_c)**(c1) * (D_s / D_c)**(c2) *
eps**c3 * ((v_f * eta_f) / (v_v * eta_v))**(c4) * w

```

```

return np.array([i, t_s_o - 273.15, w * 3600, eps])

```

6.2. Obdelava

```

import numpy as np
from izracun import *
import matplotlib.pyplot as plt
plt.rcParams['figure.figsize'] = [9, 6]
plt.rc('font', size=14)

# Branje, obdelava podatkov:
podatki = np.loadtxt("tocke.txt")
podatki = podatki.reshape([24, 11])
prt = 0

izmerjene = np.array([])
for i in podatki:
    izmerjene = np.append(izmerjene, i[-3:])
izmerjene = izmerjene.reshape(24, 3)
izmerjene[:, 0] = izmerjene[:, 0] - podatki[:, 7]

# Izracun:
rezultati = np.array([])

```

```

for i in podatki:
    rezultati = np.append(rezultati, (izracun(i, "R600A",
prt)))
rezultati = rezultati.reshape(24, 4)
rezultati[:, 1] = rezultati[:, 1] - podatki[:, 7]

napake = np.array([])
for i in range(0, len(rezultati)):
    for j in range(0, 3):
        napake = np.append(napake, abs((rezultati[i][j+1] -
izmerjene[i][j]) / izmerjene[i][j]) * 100)
napake = napake.reshape(24, 3)

# Izpis relativnih napak:
print("-----T_s_o-----w-----eps-----")
print(napake)

# Izris diagramov (shrani v ./slike)
p1 = np.array([0, 36])
o = np.array(["razlika temperatur [K]", "masni tok [kg/s]",
"izkoristek prenosnika [%]" ])
for i in range(0, 3):
    x = izmerjene[:, i]
    y = rezultati[:, i+1]
    p1y = np.linspace(min(y) * 0.3, max(y)*1.9, 100)
    p1x = 1.1 * p1y
    p2y = np.linspace(min(y) * 0.3, max(y)*1.9, 100)
    p2x = 0.9 * p2y

    plt.figure()
    plt.plot(x, y, "bo");
    plt.plot(p1x, p1y, "k-", label="+/- 10%");
    plt.plot(p2x, p2y, "k-");
    plt.xlim(min(y) * 0.7, max(y) * 1.3)
    plt.ylim(min(y) * 0.7, max(y) * 1.3)
    plt.xlabel(f"Izračunani podatki, {o[i]}")
    plt.ylabel(f"Izmerjeni podatki, {o[i]}")
    plt.legend()
    plt.grid();
    plt.savefig(f"./slike/graf{i}.png");

# Stevilo meritev, ki odstopajo za več kot 10%:
napakeT = np.transpose(napake)
cez_10 = np.array([])
avg = np.array([])
n = 0

for i in napakeT:
    for j in range(0, len(napakeT[0])):

```



```
        if(i[j] >= 10):    n = n+1

    avg  = np.append(avg, sum(i) / len(i))
    cez_10 = np.append(cez_10, n)
    n = 0

print("Povprečno odstopanje:", avg)
print("Št. odstopanj čez 10%:", cez_10)
```