

Univerzitet u Beogradu  
Mašinski fakultet

Aleksandar Sićović

**UPOREDNA DINAMIČKA ANALIZA POSEBNIH  
TIPOVA RAZMENJIVAČA TOPLOTE**

doktorska disertacija

Beograd, 2015

University of Belgrade  
Faculty of Mechanical Engineering

Aleksandar Sićović

**COMPARATIVE DYNAMIC ANALYSIS OF  
SPECIAL TYPES OF HEAT EXCHANGERS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

## **Komisija za pregled, ocenu i odbranu doktorskog rada:**

**Mentor:** Prof. dr. Dragutin Lj. Debeljković redovni professor  
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

**Članovi komisije:** Prof. dr. Momčilo Milinović redovni professor  
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Prof. dr. Cvetko Crnojević redovni professor  
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Prof. dr. Vladimir Stevanović redovni professor  
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Prof. dr. Tomislav Šekara vanredni professor  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

## Abstrakt

Predmet ove doktorske disertacije su teorijska i eksperimentalna istraživanja u vezi sa dinamičkim ponašanjem savremenih kriogenih razmenjivača toplote poznatih kao Džul-Tomsonovi minihladnjaci. Istraživanje je usmereno na komponente glave za samonavođenje kao i druge IC tipove senzora za jednokratnu upotrebu. U skladu sa realnim kao i uvek osavremenjenim novim zahtevima funkcionisanja razmenjivača toplote i njegovih ciljnih funkcija i ponekad suprotnih projektnih zahteva razmatrano je njihovo ponašanje sa aspekta termodinamike, gasodinamike kao i sa aspekta razmene toplote i mase. Razmatran je realan gas kao rashlađivač sa posebnom pažnjom na osnovna termodinamička svojstva sadržana u Džul Tomsonovom koeficijentu kao i prilagođenim jednačinama idealnih na realni gas primenjenih na konstrukciju minihladnjaka i njegovo optimalno usaglašavanje. Promene gustine realnih gasova, u odnosu na pritisak i stepen suvoće ekskluzivno oko jedinice je bilo oformljeno kao i teoretski izraz za trenje kod realnih gasova. Rad takođe razmatra potpuni ciklus od izvora rashlađivača do korisnika rashlađivača (IC detektora) kao i optimizacije razmene toplote i mase do zahtevanih temperature detektora. Eksperimentalna instalacija je dodatno projektovana i testirana kao univerzalna oprema za projektne varijacije kao i promociju i utvrđivanje novih koncepata Džul Tomsonovih minihladnjaka. Automatsko upravljanje je dodata kao poseban deo ovog rada. Nelinearan matematički model je linearizovan za rashladni process u posmatranom kriogenom razmenjivaču toplote i ultimativno razmatran jednačinama prostora stanja i izraženim kvazi stacionarnim numeričkim vrednostima. Rad nudi rešenja za poboljšanje nereguliranih kriogenih mini hladnjaka i nove savremene delimično ili potpuno regulisane sa istim ili sličnim konstrukcijom.

Rad razmatra frekventni impulsni tip upravljanja procesom hlađenja spregnut sa nestacionarnom termodinamikom kriogenih minihladnjaka. Istraživanje uključuje novi fenomenološki pristup na bazi karakterističnog vremena gasodinamičkog sistema, primenjen na ovu vrstu regulacije. Takođe je razvijen i novi sistem upravljanja sastavljen od klasičnog PID regulatora sa pridodeljenom posebno razvijenim PWM kontrolerom na bazi diskretno impulsnog modela upravljanja. Teorijski pristup je razrađen i za definisanje graničnog kapaciteta izvora rashlađivača vezanu sa frekventnu karakteristiku regulatora.

Novi tipovi Džul Tomsonovih minihladnjaka integrisani u ovom radu zadovoljavaju širok spektar temperaturske regulacije i usmeravaju na dalja istraživanja u ovoj oblasti.

Autor

**Ključne reči:** kriogeni razmenjivači toplote, matematičko modeliranje, dinamičko ponašanje, Džul Tomsonovi minihladnjaci, Infracrvena glava za samonavođenje

**Naučna oblast:** Mašinstvo

**Uža naučna oblast:** Automatsko upravljanje – termodinamički pristup

**UDK broj:** 536.24:66.045.1:519.8(043.3)  
66.045.1:621.383(043.3)

## Abstract

The subject of the PhD thesis is the theoretical and experimental research related to the dynamic behaviour of modern cryogenic heat exchangers known as the Joule-Thomson minicoolers. Research is orientated to the IR homing head components as well as the other IR cooling types of sensors for the particular single operation. According to the real as well as always advancing requirements, of the heat exchanger operation and aimed function, sometimes opposite in design demands, their behaviour is considered thermodynamically, gasdynamically and from the heat and mass transfer point of view. The real gases as the coolants are considered with pointed out consideration of the fundamental thermodynamically capability content in to the Joule Thomson coefficient as well as adopted equations of ideal to real gases employed on the minicooler design and its optimal consideration. Changes of density of real gases, related to the pressure and the degree of humidity exclusively about one value was formed as well as the theoretical expression to explain the real gas friction. Paper also considered full cycle of coolant source to the coolant consumer (IR detector) and heat and mass transfer optimizing according to detector temperature requirements. Experimental set up is additionally designed and tested as universal equipment for the design variation as well as promoted and maturated new concepts of Joule Thomson mini coolers. Automatic control is contributed as the special part considered in this paper. Nonlinear mathematical model of coolant flow process is made as the linear in the observed cryogenic heat exchanger and ultimately led as space of state equations, expressed by numerical values for quasi-steady state operating regimes. Paper offer solution for upgrading of unregulated cryogenic mini-cooler into the new, improved type, partially or fully regulated, with the same or similar design.

Paper considered the frequency pulse-type of cooling process control coupled with the unsteady thermodynamics cryogenic minicooler. Research involved the new phenomenological approach based on the analysis of the characteristic time of the gas dynamic system, to employ this type of regulation. A new type of control system was also developed, composed of a classical PID regulator, associated with the developed PWM-control unit based on the discretely (pulse) control known in literature as the width amplitude modulation. The theoretical approach is done regarding threshold capacity of coolant source as the relation to the frequent characteristics.

The new types of Joule-Thomson minicoolers integrated in this paper satisfies a wider spectra of temperature control and orientated to the further research in this area.

Author

**Key words:** cryogenic heat exchangers, mathematical modelling,  
dynamic behaviour, Joule-Thompson mini-coolers, IR homing head

**Scientific discipline:** Mechanical Engineering

**Scientific sub-discipline:** Automatic control – thermodynamically approach

**UDC:** 536.24:66.045.1:519.8(043.3)

66.045.1:621.383(043.3)

# **SADRŽAJ**

## **UVOD**

### **1.0. TEORIJSKE OSNOVE INFRACRVENIH SENZORA I DETEKTORA**

#### **1.1. Pojam IC senzora**

#### **1.2. Problemi detekcije i detektora**

#### **1.3. Principi savremenih IC senzora**

#### **1.4. Osnovne karakteristike detektora**

##### **1.4.1. Osetljivost**

##### **1.4.2. Odziv detektora (vreme odziva)**

##### **1.4.3. Energijska rezolucija. Fano faktor**

##### **1.4.4. Efikasnost detektora**

##### **1.4.5. Vreme reagovanja**

#### **1.5. Razlozi za hlađenje detektora**

#### **1.6. Principi hlađenja detektora**

### **2.0. OSNOVI TEORIJE RAZMENE TOPLOTE I MASE KOD IDEALNIH I REALNIH GASOVA I DŽUL-TOMSONOV EFEKAT**

#### **2.1. Jednačina stanja idealnog i realnog gasa**

#### **2.2. Džul Tomsonov efekat**

#### **2.3. Termodinamički uslovi za obezbeđenje Džul-Tomsonovog efekta**

#### **2.4. Adijabatski proces realnih fluida**

#### **2.5. Majerova jednačina za idealan i realan gas**

#### **2.6. Adijabatsko-izentalpsko isticanje gasa kroz konvergentan mlaznik (jednofazni fluid)**

#### **2.7. Dvofazna strujanja**

##### **2.7.1. Struktura dvofazne struje**

##### **2.7.2. Protočne karakteristike strujanja mešavine tečnosti i pare**

##### **2.7.3. Realne karakteristike strujanja mešavine tečnosti i pare**

##### **2.7.4. Adijabatsko-izentalpsko isticanje kroz konvergentan mlaznik (jednofazno - dvofazni fluid)**

### **3.0. RAZMENJIVAČI TOPLOTE: OSNOVNI PRINCIPI HLAĐENJA DETEKTORA UPOTREBOM DEWAR- POSUDE I KONSTRUKCIONA ŠEMA DŽUL- TOMSONOVOG MINI-HLADNJAKA**

#### **3.1. Osnovni tipovi razmenjivača toplote i njihov značaj**

#### **3.2. Kriogeni razmenjivači toplote**

##### **3.2.1. Cevaasti razmenjivači toplote**

##### **3.2.2. Giauque Hampson - razmatrani kriogeni razmenjivač toplote**

##### **3.2.3. Pločasto orebreni razmenjivači toplote**

##### **3.2.4. Perforirani (izbušeni) pločasti razmenjivači**

##### **3.2.5. Sinterovani metalnim prahom razmenjivači toplote**

##### **3.2.6. Kriogeni (rekuperativni) razmenjivači toplote – konstruktivni problemi**

##### **3.2.7. Kriogeni (regenerativni) razmenjivači toplote – prednosti i nedostaci**

#### **3.3. Principijalna šema razmatranog mini sistema za hlađenje**

#### **3.4. Različite mogućnosti sistema za hlađenje**

### **4.0. TERMODINAMIČKE I GASODINAMIČKE KARAKTERISTIKE KRIOGENIH SISTEMA**

#### **4.1. Osnovna termodinamička svojstva kriogenih fluida**

#### **4.2. Termodinamičke karakteristike uslova rada Džul-Tomsonovog minihladnjaka**

#### **4.3. Pregled do sada postignutih rezultata na polju izučavanja dinamike kriogenih razmenjivača toplote**

### **5.0. ODABRANI TERMODINAMIČKI I CIKLUSNI MODEL DŽUL-TOMSONOVOG MINI-HLADNJAKA SA FIKSNIM IZVOROM NAPAJANJA I OGRANIČENIM MASENIM KAPACITETOM RASHLADNOG FLUIDA**

#### **5.1 Tipovi rada Džul Tomsonovog mini hladnjaka**

##### **5.1.1. Minihladnjak sa otvorenim ciklusom bez upravljanja (neregulisani minihladnjak)**

- 5.1.2. Minihladnjak sa dvostrukim ciklusom (dvostrukim strujanjem)
- 5.1.3. Minihladnjak sa kontinualno upravljanim ciklusom
- 5.1.4. Minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom (aktivno regulisan)

## **6.0. ODABRANI DŽUL-TOMSONOV MINIHLADNJAK ZA HLAĐENJE IC DETEKTORA NA ZADATOM VREMENSKOM INTERVALU**

### **6.1. Prelaženje toplote sa i bez fazne transformacije**

- 6.1.1. Prelaz toplote bez fazne transformacije
- 6.1.2. Prelaz toplote sa faznom transformacijom (prenos toplote isparavanjem)

### **6.2. Korišćeni zakoni konzervacije u primeni na razmenjivače toplote**

- 6.2.1. Opšte strujanje u cevima razmenjivača toplote
- 6.2.2. Razmena toplote u toku strujanja neviskoznog gasa
- 6.2.3. Uticaj trenja pri strujanju fluida u cevima sa proizvoljnim poprečnim presekom
- 6.2.4. Izotermno strujanje sa trenjem

### **6.3. Strukturni dijagram sistema za hlađenje**

### **6.4. Dinamika segmenata (sastavnih delova) sistema hlađenja sa kriogenim razmenjivačem**

- 6.4.1. Model ponašanja izvora kriogenog rashlađivača
- 6.4.2. Model ponašanja visoko – pritisna strana
- 6.4.3. Model ponašanja mlaznica
- 6.4.4. Model ponašanja komora
- 6.4.5. Model ponašanja detektor
- 6.4.6. Model ponašanja nisko – pritisna strana

## **7.0. DINAMIKA KRIOGENOG RAZMENJIVAČA TOPLOTE KAO OBJEKTA UPRAVLJANJA**

### **7.1. Matematičko modeliranje**

### **7.2. Dinamika strujnih i strujno-termičkih procesa**

### **7.3. Izbor upravljačkih, upravljanih, poremećajnih veličina**



#### **7.4. Matematički model razmatranog procesa - nestacionarne jednačine ponašanja procesa trajanje (period) hlađenja**

7.4.1. Izvor kriogenog rashlađivača (boca)

7.4.2. Visoko-pritisna strana razmenjivača toplote

7.4.3. Komora

7.4.4. Detektor

7.4.5. Nisko-pritisna strana razmenjivača toplote

### **8.0. MOGUĆI IZBOR KONCEPTA UPRAVLJANJA U PRIMENI NA OBJEKTE UPRAVLJANJA PRI RAZMATRANJU RAZLIČITIH TIPOVA HLADNJAKA**

**8.1. Osnove teorije regulisanja**

**8.2. Uslovi za uvođenje automatskog upravljanja objektima**

**8.3. Sistemi u otvorenom kolu dejstva sa i bez delovanja poremećaja – otvoreni sistemi automatskog upravljanja**

**8.4. Sistemi u zatvorenom kolu dejstva sa i bez delovanja poremećaja – zatvoreni sistemi automatskog upravljanja**

**8.5. Sistem u zatvorenom kolu dejstva sa indirektnom kompenzacijom poremećaja i amplitudno frekventnim upravljanjem**

**8.6. Kombinovani sistemi automatskog upravljanja**

### **9.0. LINEARNA ANALIZA SLOŽENOG REGULATORA**

**9.1. Linearna analiza složenog regulatora - kontinualna regulacija složenog mikroobjekta**

9.1.1. Redukcija reda modela procesa

9.1.2. Projektovanje složenog regulatora za proces funkcije prenosa  $W_o(s)$

9.1.3. Primena prethodnih jednačina na realnu prenosnu funkciju

**9.2. Upravljanje sa diskretnim (impulsnim) regulatorom protoka – isticanje iz boce (izvora rashlađivača)**

## **10.0. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE RADA SISTEMA U ZATVORENOM KOLU DEJSTVA**

**10.1. Šema merenja**

**10.2. Eksperimentalno ispitivanje termodinamičkih parametara detektora**

## **11.0. ANALIZA RAZLIČITIH TIPOVA ISPARAVANJA I DISKUSIJA NAČINA REGULACIJE**

**11.1. Osnovne termodinamičke jednačine za regulaciju temperature u zoni detektora**

**11.2. Analiza karakterističnih vremena sistema i načina impulsne regulacije**

## **12.0. DOPRINOSI I ZAKLJUČAK**

**12.1. Doprinosi i zaključak**

**12.2. Predlozi za dalja istraživanja**

## **PRILOZI**

## **LITERATURA**

## SPISAK OSNOVNIH OZNAKA

$A$	matrica objekta, procesa ili koeficijenata stanja sistema, površina poprečnog preseka, referentna površina, ekvivalentna površina, amplituda,
$A_t$	površina poprečnog preseka koji zauzima tečna faza u ukupnom poprečnom preseku,
$A_p$	površina poprečnog preseka koji zauzima parna faza u ukupnom poprečnom preseku,
$A_{kr}$	površina (ukupnog) poprečnog preseka pri kritičnim uslovima strujanja (isticanja) fluida,
$A(\omega)$	amplitudno frekventna karakteristika,
$a$	elementi matrice $A$ , ubrzanje, konstanta, koeficijent,
$B$	matrica koeficijenata ulaza, matrica upravljanja, matrica ulaza sistema,
$Bo$	Bondov broj,
$b$	elementi matrice $B$ , rastojanje, koeficijent, konstanta,
$\mathbf{b}$	vektor kolona upravljanja, vektor ulaza,
$C$	matrica koeficijenata izlaza, konstanta početnih uslova,
$c$	elementi matrice $C$ , brzina zvuka, koeficijent, konstanta,
$c_p$	specifična toplota pri konstantnom pritisku,
$c_v$	specifična toplota pri konstantnoj zapremini,
$\mathbf{c}$	vektor kolona izlaza,
$D$	matrica direktne veze ulaz-izlaz, zapreminski protok, prečnik,
$d$	elementi matrice $D$ , prečnik,
$\mathbf{d}$	vektor kolona,
$e$	specifična energija, konstanta,
$\mathbf{e}$	vektor,
$F$	matrica poremećaja, sila,
$F_m$	sila kojom rotor strujne mašine deluje na posmatranu masu fluida,
$F(j\omega)$	frekventna karakteristika,
$f$	elementi matrice $F$ ,
$f(\cdot)$	funkcija,
$f(s)$	karakteristični polinom,
$\mathbf{f}$	vektor kolona poremećaja,
$G$	matrica, maseni protok, sila težine,
$G_m$	maseni protok mešavine, maseni fluks,
$G_p$	maseni protok pare, maseni protok parne faze,
$G_t$	maseni protok tečnosti, maseni protok tečne faze,
$g$	elementi matrice $G$ , ubrzanje zemljine teže,
$\mathbf{g}$	vektor kolona,
$g(t)$	odskočni odziv,
$H$	matrica, entalpija,
$h$	nivo, visina nivoa, specifična entalpija,
$\mathbf{h}$	vektor,
$h(t)$	odskočna funkcija,
$I$	jedinična matrica,

$I(t)$  jačina električne struje,  
 $\text{Im}(\omega)$  imaginarni deo kompleksne promenljive,  
 $i(t)$  impulsni odziv,  
 $Ja$  Jakobov broj,  
 $j$  imaginarna jedinica, tekući indeks,  
 $K_p$  konstanta Kutateladzea,  
 $k$  koeficijent prolaza toplote, faktor, konstanta, koeficijent, tekući indeks, faktor pojačanja,  
 $L$  ukupna dužina,  
 $l$  dužina, širina, pomeranje,  
 $Ma$  Mahov broj, molekularna težina,  
 $M_p$  maksimalna komplementarna osetljivost,  
 $M_s$  maksimalna osetljivost,  
 $m$  masa,  
 $m_p$  masa pare,  
 $m_t$  masa tečnosti,  
 $Nu$  Nuseltov broj,  
 $n$  dimenzija (red) sistema, eksponent politrope, eksponent, koeficijent,  
 $\bar{n}$  ort normale,  
 $O$  objekat, obim, koordinatni početak,  
 $0$  nula matrica,  
 $\mathbf{0}$  nula vektor,  
 $Pe$  Pekletov broj,  
 $Pr$  Prandtlov broj,  
 $p$  pritisak, polovi prenosne funkcije,  
 $p_0$  pritisak na kraju (konačni pritisak) ekspanzije,  
 $p_{sat}$  pritisak zasićenja fluida,  
 $Q$  toplotni protok, toplotna snaga,  
 $q$  toplotni protok po jedinici površine, ili po jedinici dužine, ili po jedinici zapremine,  
 $R$  otpornost, gasna konstanta, ekvivalentni otpor, poluprečnik, sila reakcije,  
 $\text{Re}(\omega)$  realni deo kompleksno promenljive,  
 $Re$  Rejnoldsov broj,  
 $r$  poluprečnik, radijus, toplota faze (latentna toplota isparavanja), konstanta, tekući indeks,  
 $S$  matrica, sistem, entropija, klizanje faza,  
 $S(s)$  funkcija osetljivosti,  
 $s$  elementi matrice  $S$ , kompleksan broj, specifična entropija, korak,  
 $T$  vremenska konstanta, apsolutna temperatura,  
 $T(s)$  komplementarna funkcija osetljivosti,  
 $T_z(s)$  željena komplementarna funkcija osetljivosti,  
 $T_f$  temperatura zida, vremenska konstanta,  
 $T_{sat}$  temperatura zasićenja fluida,  
 $t$  vreme,

$U$	napon, unutrašnja energija,
$u$	upravljačka veličina, specifična unutrašnja energija,
$\mathbf{u}(t)$	vektor upravljanja,
$V$	zapremina,
$v$	specifična zapremina,
$W$	matrica,
$W(s)$	prenosna funkcija, matrica prenosnih funkcija,
$W_{(ij)}$	elementi matrice $W(s)$ ,
$W_O(s)$	prenosna funkcija objekta upravljanja,
$W_R(s)$	prenosna funkcija regulatora,
$w$	elementi matrice $W$ , brzina, brzina strujanja, svedena brzina,
$w'$	srednja svedena brzina tečnosti,
$w''$	srednja svedena brzina pare,
$w_0$	srednja brzina tečnosti na ulazu,
$w_m$	srednja brzina mešavine tečnosti i pare,
$w_t$	srednja brzina tečnosti,
$w_p$	srednja brzina pare,
$x$	stepen-suvoće, prostorna koordinata,
$x_s$	maseni (statički kvalitet pare),
$x_t$	termodinamički kvalitet,
$x(t)$	stanje objekta, procesa ili sistema, promenljiva veličina, prostorna koordinata,
$\mathbf{x}(t)$	vektor stanja,
$\mathbf{x}_i(t)$	vektor izlaza,
$\mathbf{x}_{iz}(t)$	vektor željenih vrednosti,
$x_u(t)$	ulazna veličina,,
$x_i(t)$	izlazna veličina,
$x_{iz}(t)$	željena izlazna veličina,
$Y$	položaj, hod, pomeranje izvršnog organa,
$y(t)$	regulišuća veličina, prostorna koordinata,
$z$	koeficijent kompresibilnosti,
$z(t)$	poremećajna veličina, prostorna koordinata,
$\mathbf{z}(t)$	vektor kolona poremećaja,
$\alpha$	koeficijent prelaza toplote, Koriolisov koeficijent, udeo zapremine pare,
$\beta$	konstanta, zapreminski protočni udeo pare, Businesskov koeficijent,
$\gamma$	koeficijent, konstanta,
$\delta$	debljina, hrapavost, konstanta, koeficijent,
$\varepsilon(t)$	greška regulisane veličine,
$\rho$	gustina,
$\rho'$	gustina tečnosti,

$\rho''$	gustina pare,
$\rho_t$	gustina tečnosti,
$\rho_p$	gustina pare,
$\xi$	prostorna koordinata, faktor relativnog prigušenja,
$\zeta$	koeficijent lokalnog gubitka energije, koeficijent otpora,
$\varsigma$	bezdimenziona veličina, koeficijent,
$\nu$	prostorna koordinata, kinematska viskoznost,
$\eta$	prostorna koordinata, dinamička viskoznost, konstanta, parametar,
$\mu$	koeficijent suvog trenja, koeficijent isticanja,
$\mu_J$	Džul Tomsonov koeficijent,
$\mu_v$	Džul Tomsonov koeficijent sveden na konstantnu unutrašnju energiju,
$\theta$	temperatura u $[^{\circ}C]$ ,
$\kappa$	eksponent izentropie, koeficijent, konstanta,
$\lambda$	koeficijent provođenja toplote, vremenska konstanta, koeficijent trenja,
$\pi$	Ludolfovo brojevi,
$\sigma$	realni deo kompleksnog broja $s$ , realni polovi prenosne funkcije, površinski napon, spektar sopstvenih vrednosti matrice, <i>Štefan-Bolcmanova</i> konstanta,
$\tau$	tangencijalni napon,
$\tau_w$	tangencijalni napon na zidu cevi,
$\psi$	bezdimenzioni koeficijent, koeficijent,
$\psi(\cdot)$	neka funkcija,
$\chi$	protočni kvalitet pare, konstanta,
$\Phi(\ )$	fluks
$\phi$	bezdimenzioni koeficijent, koeficijent,
$\varphi$	bezdimenzioni koeficijent, koeficijent,
$\varphi(\omega)$	fazna frekvencija karakteristika,
$\varphi(s)$	polinom po $s$ ,
$\omega$	učestanost, brzina,
$\omega_n$	neprigušena, prirodna sopstvena učestanost sistema.

## POSEBNA OZNAKA

$N$  nominalni radni režim.

## UVOD

Rekuperativni razmenjivači toplote predstavljaju posebnu klasu termodinamičkih mašina koje služe za hlađenje od kojih je svaki od njih različit u odnosu na ostale u nekom sadržaju u komponenti i konstrukciji. Opšti princip rekuperativnih razmenjivača toplote je da se u njima vrši i grejanje i hlađenje fluida preko konstrukcije razmenjivača toplote pomoću graničnih površina između fluida koji se u radnom ciklusu hladi, a nakon toga zagreva.

U kriogenoj tehnici ima posebnu važnost s obzirom da se upotreba vrlo niskih temperatura koristi kao preduslov za funkcije posebnih svojstava nanotehnologije primenljivih na savremene senzorske uređaje kao što su moderno hlađeni detektori infra crvenog zračenja.

Razvoj samonavođenih raketa na principima IC tehnologije, kao i uopšte IC senzora, karakteristika je savremenih vojnih kao i aerokosmotehničkih i satelitskih tehnologija bez obzira na to gde se koriste. Detektori IC zračenja u principu su razvijeni kao nanotehnologije. Zavisno od talasne dužine željenog infracrvenog područja (tzv. prozora) koriste različite materijale sa željenim performansama na sobnim i nižim temperaturama. Korišćenje nižih temperatura vezano je za detektore čije karakteristike prepoznavanja IC zračenja određene talasne dužine zahtevaju osetljivost koju često mogu ostvariti isključivo na vrlo niskim kriogenim temperaturama. Tako razvijena tehnologija ultimativno je zahtevala razvoj hladnjaka odgovarajućih karakteristika pre svega temperaturskih i vremenskih. Oni treba da, kao integralni sklopovi sa detektorom smešteni u izolovane vakuumske mini prostore, obezbede željenu nisku temperaturu radi postizanja efikasne funkcije detektora IC zračenja od materijala takvih svojstava. lit.[1]-[12].

Po svom karakteru njihova konstrukcija podleže zahtevima detektora koji se hladi kao i sistemu na kome je smešten kao prateći termodinamički uređaj namenjen za radnu funkciju objekta. Sam objekat može biti sa opštim i posebnim zahtevima pa samim tim rekuperativni razmenjivač može biti različito konstruisan što će biti posebno objašnjeno u petom Poglavlju u ovom radu. Potrebe objekta i njihovo modeliranje za regulacijom ili bez regulacije kao što je rečeno zavisi i od tipa ali pre svega od namenskih uslova njegovog korišćenja kao podsistema na odgovarajućem sistemski integrisanom sklopu. Stepen složenosti razmenjivača toplote i njegove smeštajne prateće konstrukcije mogu da zahtevaju posebne uslove sa dodatnim podsistemima i komponentama koje integralno obezbeđuju ponašanje i upravljanje objektom koji se hladi. Takav je primer i predmet rada u ovom doktoratu i predstavlja poseban, u literaturi poznat uređaj, kao kriogeni minihladnjak. Ovakav uređaj često se koristi na raketnim i municijskim samonavođenim podsklopovima u glavi za samonavođenje poznatim pod imenom infracrveni koordinator cilja.

Inače, kriogeni minihladnjaci predstavljaju inženjerska rešenja minitehnologija s obzirom da se obično zahteva da svoju namenu hlađenja detektora kompaktno smeste u prostor veoma male zapremine kao što su glave za samonavođenje na infra crvenom principu različitih kopnenih i vazduhoplovnih ubojnih sredstava (municije) sa vrlo oštrim ali jednokratnim eksploatacionim

karakteristikama. Zbog toga je princip rekuperativnosti veoma teško ostvariti s obzirom da je dominantna kontaktna površina za uspešnu razmenu toplote, pa je samim tim komplikovano obezbediti oblike materijala i konstrukcije kojima se realizuje kontaktna površina u malim zapreminama.

Drugi, takođe značajan tehnički problem, je korišćenje kriogenih fluida, kao što su vazduh, azot, argon, za rekuperativnu razmenu i njihove uglavnom specifične (izobličene) karakteristike strujanja u odnosu na idealne fluide i konvektivno konduktivne razmene unutar zatvorenog sistema razmenjivača. Ta svojstva značajnog odstupanja realnih od idealnih fluida daju mogućnost da se takođe koriste pravilnim usmeravanjem radnog ciklusa u poboljšanju ukupne efikasnosti a samim tim i uspešnog prevazilaženja sukobljenih zahteva velike rashladne površine sa malom zapreminom u minihladnjaku. Takav primer, kod kriogenih minihladnjaka namenjenih za senzorske funkcije vojnih i dualnih tehnologija, je upotreba poznatog Džul Tomsonovog koeficijenta čije promenljive vrednosti u toku ciklusa hlađenja bitno doprinose njegovoj efikasnosti. Zbog toga se ovaj uređaj često naziva Džul Tomsonov minihladnjak.

U vezi sa prethodno rečenim predmet rada u ovoj doktorskoj disertaciji je ovakav tip rekuperativnog razmenjivača toplote.

Navedeni problemi i njihove međusobne zavisnosti predmet su suštinske analize daljih poglavlja u ovom doktoratu. Pristup analizi obično je deterministički ali neke međuzavisnosti sinergijskih determinističkih procesa termodinamike i razmene toplote i mase, mehanike fluida (gasodinamike) kriogene tehnologije sistema automatskog upravljanja sa aspekta regulisanja, kao i neke druge prateće oblasti ipak su povezane ili holističkim ili eksperimentalnim aproksimativnim pristupom što je opravdano s obzirom na težinu predmeta i obim rada u ovom doktoratu.

Uglavnom metodologija analize i sinteze u radu počiva na fundamentalnom ali fenomenološkom teorijskom pristupu i daljem razvoju opšte prihvaćenih aproksimativnih metoda analitičke matematike pripremljene za opšte i posebne numeričke postupke čiji dobijeni rezultati potvrđuju sinergijske rezultate na eksperimentima sa proverenim izvedenim minihladnjacima.

Sa tog aspekta metodologija istraživanja koja je teorijska praktično konstruktivna, numeričko-simulaciona i eksperimentalna imala je za cilj da potpuno integriše dovoljan broj kontrolnih veličina procesa hlađenja, njegovih promena koje garantuju pouzdanost funkcija izvedeenih rešenja Džul Tomsonovih minihladnjaka.

U radu je posebno analiziran i širi spektar teorijskih pitanja opštih i posebnih zakona termodinamike i gasodinamike kako bi se precizno poentirali egzaktni uslovi i parametri koji se usvajaju za primenu baš na ovakvim specijalnim mini rashlađivačima. Sa druge strane namena rashlađivača za obezbeđenje rada objekta diktirala je inverzne zahteve samoj konstrukciji mini rashlađivača bez obzira na pitanje njegove optimizacije sa aspekta razmene toplote.



Na taj način je u ovom radu postavljen novi zahtev da objekat mora da ima upravljive termodinamičke parametre a pre svega zahteva temperaturu u propisanom opsegu i vremenu. To je u ovom radu nametnulo posebno istraživanje objekta sa aspekta automatskog upravljanja. Upravljanje objektom tj. njegovim parametrima je ili pitanje celovite integracije minihladnjaka sa postignutim parametrima objekta ili je postavljen kao nezavisni zahtev celovitom sistemu upravljanja sa integrisanom funkcijom. Ovakav novi pristup zahteva od analize da se detaljnije opredeli u pogledu načina upravljanja objektom, i to da odabere ili sistemski ili procesni pristup. S obzirom da je navedeni sistem namenjen jednokratnoj upotrebi za koju je karakteristično da se nakon otpočinjanja rada ne vrši prekid funkcionisanja sistema i ponovno uspostavljanje njegove funkcije, analiza u ovom radu morala je da bude orijentisana ka procesnom pristupu. To znači da je usvojeno i konstruktorski zadato kao zahtev da se upravlja regulisanom veličinom. Takođe, treba reći da se procesom upravlja na bazi unapred zadatih zahteva ili upravlja jednim od njegovih parametara koristeći podatke o zahtevanoj, upravljanoj regulisanoj veličini.

U ovom doktoratu posebno će biti razmotren veoma složen proces odabira upravo onih veličina u matematičkim modelima koji presudno utiču na vrednost termodinamičkog parametra regulisane veličine (temperature hladnog detektora), a pomoću glavnih parametara procesa u rashlađivaču kao i na samom detektoru, opisanih složenim međusobno zavisnim matematičkim modelima.

Takođe pored navedenog, u matematičkom smislu, u ovom radu obrađena je posebna klasa objekata upravljanja opisana nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednačinama sa kašnjenjem kao reprezentima procesnog upravljanja i to: ili kao otvoreni sistem automatskog upravljanja ili kao zatvoreni sistem automatskog upravljanja. Model je simuliran na bazi jednačina prostora stanja, a postavljen za kritične uslove režima rada kako bi bio validan i za ostale režime sa aspekta stabilnosti upravljanja procesom i njegovog (aspekt stabilnosti upravljanja procesom) interaktivnog dejstva na regulisanu veličinu.

Poznato je da samo u ograničenom broju slučajeva, koristeći analitički pristup, rešenja ovakvih sistema se mogu dobiti u zatvorenom obliku.

U ovoj doktorskoj disertaciji biće obrađeni bazični rezultati teorije matematičkog modeliranja ove klase razmenjivača toplote pod navedenim uslovima indirektna kompenzacija poremećaja, kroz koncept upravljanja u zatvorenom kolu dejstva.

Biće primenjena tehnika simulacije radi tumačenja rezultata i analize njihove upotrebne vrednosti u daljim postupcima poređenja i verifikacije sa eksperimentalno dobijenim i izmerenim podacima.

Poseban se akcenat stavlja na razvoj i unapređenje eksperimentalnog postrojenja na kome su izvršena merenja koja treba da ukažu na svu valjanost simulacionih rezultata kao i omogućiti efikasnu identifikaciju određenih parametara.

Inače ova klasa razmenjivača toplote izaziva veoma veliku pažnju vrlo uzanog kruga naučne javnosti koji uglavnom rade u vojnim i specijalnim laboratorijama na istraživanjima sa ograničenim pristupom u objavljivanju podataka. Sam podsistem hladnjak i njegov objekat detektor inače imaju dva karakteristična režima rada čije se performanse visoko ocenjuju po dostignutom kvalitetu i smatraju vrhunskim rezultatima savremene tehnologije. Te performanse su karakteristike nestacionarnog uspostavljanja, poznatog kao cooldown režim, i kvazi-stacionarnog režima rada (poznatog kao run-time, režim trajanja hlađenja), i njihov odnos u modelima predviđenog ili upravljano korigovanog procesa u toku rada. Oba ova režima takođe su predmet razrade u ovoj disertaciji i to u oba tipa konstrukcije sa unapred predviđenim resursnim performansama (neregulisanim i regulisanim hladnjacima), na modelima za jednokratnu upotrebu.

Iako su oba koncepta (konstrukcije) u operativnoj primeni na senzorima različitih tipova glava za samonavođenje, međusobne dinamičke karakteristike su komplementarne pa samim tim postoji mogućnost da se iste ili slične konstrukcije upotrebljavaju i kao neregulisane i kao regulisane. To je poseban zadatak predviđen za detaljno razmatranje u ovom radu i suštinski predstavlja generacijsku nadgradnju jednog tipa neregulisanih minihladnjaka u novi poboljšani tip delimično regulisanih ili regulisanih minihladnjaka iste ili slične konstrukcije.

## 1.0. TEORIJSKE OSNOVE INFRACRVENIH SENZORA I DETEKTORA

### 1.1. Pojam IC senzora

Savremene tehnologije teško se mogu zamisliti bez kontrole različitih procesa u svim industrijskim i saobraćajnim granama sa aspekta provere toplotnog stanja njihove konstrukcije ili radne materije. Razvoj modernih tehnologija dostigao je jedan od najznačajnijih rezultata u oblasti bezkontaktnog merenja temperature i raspodele toplotnog fluksa upotrebom infracrvene tehnologije a pre svega detektora za kontrolu i praćenje spektra u ovoj oblasti. Na bazi detektora bila je moguća konstrukcija senzora, njihova digitalizacija i svi aspekti kontrole i upravljanja uključujući i njihovu upotrebu na ekstremnim daljinama kao što su udaljena područja sunčevog sistema.. Ovakvi najsavremeniji kao i senzori nižeg tehnološkog nivoa upotrebe poznati su kao infracrveni senzori lit.[2].

Infracrveni senzori su bazirani na detekciji promene karakteristike elektromagnetskog zračenja u infracrvenom domenu talasnih dužina. Infracrveni senzori se uglavnom dele na aktivne i pasivne. Pasivni IC senzori detektuju sopstvena zračenja objekta u IC spektru. Aktivni IC senzori osvetljavaju objekat sopstvenim izvorom i mere reflektovani signal sa objekta. Kod ovakvih tipova senzora sreću se i kombinacije infracrvenih i mikrotalasnih senzora.

Infracrveno zračenje pripada optičkoj nevidljivoj oblasti elektromagnetskog spektra, opsega od  $0.76\mu\text{m}$  -  $15\mu\text{m}$  tj. većoj od svetlosnih zraka  $0.38\mu\text{m}$  -  $0.76\mu\text{m}$ , u okviru kojih su i jonosferski "prozori" spektara talasnih dužina toplotnog i prelaznog svetlosno toplotnog zračenja.

"Prozori" spektra talasnih dužina za infracrvene senzore se koriste na sledećim talasnim dužinama:

- talasne dužine od  $0.77\mu\text{m}$  -  $3\mu\text{m}$  blisko svetlosnom zračenju.
- talasne dužine od  $3\mu\text{m}$  -  $5\mu\text{m}$  srednje IC zračenje.
- talasne dužine od  $8\mu\text{m}$  -  $15\mu\text{m}$  daleko IC zračenje, lit.[2].

### 1.2. Problemi detekcije i detektora

Problemi detekcije infracrvenog zračenja pomenutih spektara predstavljaju suštinu konstrukcije detektora. Konstrukcija detektora mora biti izvedena tako da može detektovati tj. apsorbovati fotone IC zračenje. Prilikom rada detektora pojavljuju se toplotni šum i Ožeov proces, koji smanjuju mogućnost apsorbovanja fotona IC zračenja. Takođe vremenski uslovi (kiša, magla, oblačnost) kao i najveći izvor IC zračenja Sunce; rastinje (trava, granje) kao i drugi predmeti mogu stvarati prigušenje ili sprečavati prostiranje infracrvenog zračenja, a samim tim i detekciju detektora. Toplotni šum i Ožeov proces su detaljno analizirani u lit.[13], tako da ovde neće biti razmatrani.

Osnovna namena detektora je prihvatanje ili merenje optičkog zračenja. Detektor je optoelektronska komponenta, čiji se princip rada zasniva, na pretvaranju optičke energije u druge vidove energije. U toku rada detektora, sva pretvorena energija se može elektronski obrađivati. Načini pretvaranja energije su: pomoću termičkog efekta, fotoelektričnog efekta, fotohemijaskog efekta. lit.[14].

Detektori koji prilikom svoga rada koriste termički efekat nazivaju se neselektivni detektori. Karakteristika ovih detektora je da odziv detektora na upadno optičko zračenje ne zavisi od talasne dužine optičkog zračenja već samo od fluksa (snage) optičkog zračenja. Međutim, postoje i detektori kod kojih odziv na upadno optičko zračenje zavisi kako od fluksa (snage) optičkog zračenja tako i od talasne dužine optičkog zračenja. To su tzv. selektivni detektori koji su osetljivi u relativno uskom području talasnih dužina, i koji za svoj rad koriste fotoelektrični efekat ili fotohemijski efekat.

Detektori se mogu podeliti prema: načinu pretvaranja optičke energije u druge vidove energije - mehanizmu detekcije; radnoj temperaturi i oblasti spektra u kojoj su detektori osetljivi. lit.[14].

Termički detektor omogućava konverziju infracrvenog zračenja u električni signal. Oni služe kao detektori fluksa upadnog zračenja i izrađuju se od materijala, koji imaju karakteristiku da se neka osobina materijala menja usled zagrevanja, prilikom apsorpcije optičkog zračenja. Najčešće se kao posledica apsorpcije optičkog IC zračenja menjaju električna otpornost ili dimenzije detektora. Termički detektori obično rade na sobnoj temperaturi, a najčešće se primenjuje piroelektrični detektor. On ima najveću primenu u alarmnim uređajima.

Fotoelektrični efekat stvara električni signal unutar detektora, i predstavlja proces pri kojem fotoni iz upadnog optičkog IC zračenja izazivaju elektronske prelaze unutar atoma materijala fotoelektričnih (kvantnih) detektora. Pouzdano registrovanje elektronskih prelaza zahteva hlađenje detektora na temperaturu od oko 77 K. Fotoelektrični efekat, se pojavljuje u dva oblika, i to kao: unutrašnji i spoljašnji fotoelektrični efekat. Detektori sa unutrašnjim fotoelektričnim efektom su oni kod kojih fotoni iz upadnog optičkog zračenja izbijaju elektrone iz atoma, pri čemu fotogenerisani elektroni ostaju u okviru materijala detektora i na pogodan način se registruju. Fotoelektrični detektori sa unutrašnjim fotoefektom mogu biti fotoprovodni detektori (fotootpornici) i fotonaponski detektori (fotodiode). Spoljašnji fotoelektrični efekat karakteriše da fotoni iz upadnog optičkog zračenja izbijaju elektrone iz materijala u spoljašnju sredinu, pri čemu fotogenerisani elektroni se na odgovarajući način registruju. Fotoelektrični detektor sa spoljnjim fotoefektom, koji se najčešće primenjuje, je fotokatoda pretvarača i pojačavača slike, lit.[14].

Fotohemijski detektori, predstavljaju klasu detektora koja poseduju filmsku traku, na kojoj dolazi do hemijskih promena pod uticajem fotona iz upadnog optičkog zračenja. lit.[14].

U vidljivoj i bliskoj infracrvenoj oblasti spektra, u vojnoj primeni, silicijumski ili germanijumski detektori najčešće se javljaju kao PIN fotodiode radi registrovanja zračenja poluprovodničkih lasera.

Detektori imaju veliku primenu u vojne namene, i u kratkotalasnoj i srednjetalasnoj infracrvenoj oblasti spektra najčešći su:

- hladeni fotonaponski indijum-antimonidni (InSb) detektori i fotoprovodni olovo-sumporni (PbS), detektori koji rade na talasnim dužinama do  $\lambda = 3.5 \mu\text{m}$ ;
- nehlađeni fotoprovodni olovo-sumporni (PbS), detektori koji rade na talasnim dužinama do  $\lambda = 2.7 \mu\text{m}$ ;

a u dugotalasnoj infracrvenoj oblasti spektra, koriste se sledeći detektori:

- hladeni fotoprovodni i fotonaponski živa-kadmijum-telurijumski (HgCdTe) detektori,
- hladeni fotonaponski olovo-kalaj-telurijumski (PbSnTe) detektori. lit.[14].

Najjednostavniji detektori su bili jednoćelijski detektori. Njihovim tehnološkim usavršavanjem razvijeni su matrični detektori u kojima se može nalaziti više hiljada elementarnih detektora kvadratnog ili pravougaonog oblika, karakterističnih dimenzija u rasponu od  $25 \mu\text{m}$  do  $50 \mu\text{m}$ . Osetljivost matričnog detektora zavisi od ukupnog broja elementarnih detektora. Elementarni detektori, su u suštini, termički ili kvantni (fotoelektrični) detektori, čija je debljina obično  $10 \mu\text{m}$  za kvantne detektore, a nekoliko desetina  $\mu\text{m}$  za termičke detektore.

Tačkasti detektori i detektori slike su vrste detektora, pod čijom klasifikacijom, se mogu podvesti svi napred pobrojani detektori. Tačkasti detektori su oni detektori kod kojih se kao izlazni signal dobija promena struje ( $I$ ) i napona ( $U$ ) koja zavisi od fluksa, intenziteta upadnog optičkog zračenja. Ukoliko je optički sistem na fotoosetljivom delu detektora formirao sliku predmeta reč je o detektoru slike. U pojedinim slučajevima ne dobija se slika koja može da se posmatra na samom izlazu iz detektora već struja ili napon modulirana sa informacijama slike posmatranog predmeta. Ovo je karakteristika pojedinih tipova detektora slike, pri čemu se dobijene informacije obično koriste za dalju elektronsku obradu. lit.[013],[14].

### 1.3. Principi savremenih IC senzora

Principi rada savremenih senzora tj. detektora zavise od vrste detektora. U prethodnom odeljku su razmatrani najčešće korišćeni toplotni i fotonski detektori. Napomenuće se da postoje još i fotoemisioni vakuumski detektori i detektori sa uzajamnim dejstvom elektromagnetnog zračenja. Principi rada ovih detektora neće biti razmatrani u ovom radu. Prema tome, u daljem izlaganju biće navedeni samo osnovni principi rada najčešće korišćenih termalnih i fotonskih detektora.

Podela IC detektora je usaglašena sa načinom detekcije, a u skladu sa literaturom, pri čemu je njihovo funkcionisanje bazirano na primenljivim principima, i vrši se na sledeći način:

- termoparovi: kod kojih promena temperature izaziva promenu napona, pri čemu se promena napona dešava na spoju dva različita materijala;
- termopar: niz termoparova;
- toplotni bolometar: kod koga se grejanjem menja otpornost materijala; metalan – izrađen je od materijala koji predstavljaju tanak metalni sloj; termistor - kod koga postoji negativni koeficijent otpornosti materijala tj. kod koga se grejanjem smanjuje otpornost; superprovodljivi-kod koga je otpornost jednaka nuli; superinduktivan- kod koga opada induktivnost sa povećanjem

temperature; kriogeni-izrađivan od ugljenika ili poluprovodničkog filma, a funkcioniše pri temperaturi tečnog helijuma;

- bimetalni uređaji: koji rade na principu razlike između koeficijenta toplotne ekspanzije dva materijala u bliskom kontaktu, tako da temperatura menja fizički oblik detektora, koje može biti vizualno posmatrano; IC radijacija je direktno pretvorena u vidljivi signal;
- pneumatski detektor (Golay ćelija): predstavlja IC ozračenu membranu koja greje šupljinu ispunjenu gasom i menja njegovu zapreminu;
- kapacitvan prijemnik sa gasnim punjenjem: koji je sličan kao Golay ćelija, ali gas direktno apsorbuje toplotu i menja kapacitet prijemnika;
- piroelektrični detektor: radi na principu promene električne polarizacije prouzrokovane promenom temperature u nekim od feroelektričnih kristala;
- piromagnetski detektori: rade na principu promene magnetnih svojstava materijala usled grejanja pri grejanju;
- evaporograf: sastoji se od membrane, a radi na principu, da se usled kondenzacije tankog sloja ulja koja je praćena promenom temperature menja debljina ulja na membrani;
- detektori sa termo-jonskom emisijom: radi na principu promene gradijenta emisije jona pri čemu je katoda obložena oksidom;
- absorpcija pretvarača slike: radi na principu promene temperature koju pokreće tzv. ivična absorpcija
- tečno kristalni detektori: rade na principu promene optičkih osobina tečnih kristala u zavisnosti od temperature;
- Nernst detektori: je detektor koji vrši stvaranje fotonaponske napona u ukrštenom električnom i magnetnom polju pri prisustvu toplotnog gradijenta. lit.[13].

Fotonski detektori, su uređeni prema njihovom mehanizmu detekcije (otkrivanja), te postoje sledeći osnovni tipovi koji rade na sledećim principima:

- fotoprovodnički: detektor radi na principu IC zračenja pri čemu se menja električna provodljivost materijala, a upotrebljeni materijal ima svojstvo poluprovodnika;
- fotonaponski detektori: rade na principu elektronske fotopobude, i tako stvaraju fotonaponsku struju. lit.[13].
- fotonaponski bolometar sa toplim elektronima: detektor radi na principu da u poluprovodniku fotoni uzajamno deluju sa slobodnim elektronima i na taj način prenose količinu kretanja do njih, pri čemu menjaju njihovu efektivnu temperaturu, lit.[13].

Napred navedeni principi rada koriste se za izbor vrste detektora u zavisnosti od uslova upotrebe.

#### **1.4. Osnovne karakteristike detektora**

Da bi se obezbedio prijem IC signala razmatraju se sledeće karakteristika detektora: osetljivost, odziv detektora ili vreme odziva, energetska rezolucija, efikasnost detektora, vreme

reagovanja (nereagovanja). U ovom radu nije cilj detaljno razmatranje navedenih performansi, već obezbeđivanje uslova za njihovu funkcionalnost i njihove nominalne vrednosti. Ovo se odnosi pre svega na hlađenje fotonaponskih detektora u okviru grupe fotonskih detektora, koji da bi održali potrebne karakteristike zahtevaju rad na vrlo niskim temperaturama.

#### 1.4.1. Osetljivost

Osetljivost detektora zavisi od inherentnog detektorskog šuma, mase detektora, a definiše se kao sposobnost detektora da proizvede upotrebljiv signal za određenu vrstu zračenja u određenom energetskom regionu. Efikasnost detektora značajno opada ili signal postaje neupotrebljiv izvan definisanog energetskog regiona. Osetljivost detektora takođe zavisi i od preseka za jonizaciju u detektoru kao i zaštitnog materijala oko detektora. Uticaj svakog od navedenih parametara na osetljivost detektora, detaljno je opisan u preporučenoj literaturi, lit.[15].

#### 1.4.2. Odziv detektora (vreme odziva)

Odziv detektora predstavlja vreme potrebno detektoru da formira signal posle pada zračenja na detektor. Inače, za vreme trajanja signala drugi događaj se ne može registrovati zbog toga što se drugi signal dodaje na prvi ili zbog toga što je detektor neosetljiv. Ovo ograničava broj registrovanih događaja i doprinosi mrtvom vremenu detektora. Takođe, potrebno je da se signal brzo formira u oštar impuls sa rastućim bočnim stranama koje su, što je moguće bliže vertikali. Da bi se mogli detektovati, zraci IC zračenja se moraju prvo prevesti u naelektrisane čestice putem osnovnih mehanizama: fotoefektom, Komptonovim rasejanjem i stvaranjem parova, lit.[15].

#### 1.4.3. Energijska rezolucija. Fano faktor

Energetska rezolucija predstavlja sposobnost detektora da razlikuje dve bliske linije u spektru. Rezolucija se može izmeriti posmatranjem rezultujućeg spektra ili slanjem monoenergetskog snopa zračenja u detektor, pri čemu je potrebno dobiti oštar pik delta-funkcije. U stvarnosti obično se dobija pik određene širine, koji se pojavljuje zbog fluktuacija u nekim jonizacionim i ekscitacionim procesima, i najčešće je Gausovog tipa. Rezolucija se uglavnom daje u odnosu na poluširinu maksimuma, pri čemu se relativna rezolucija uglavnom izražava u procentima. Rezolucija je funkcija energije deponovane u detektoru i bolja je pri višim energijama.

Fano faktor predstavlja unutrašnju konstantu detektujućeg medijuma. On je funkcija svih različitih fundamentalnih procesa koji dovode do razmene energije u detektoru, uključujući i procese koji ne dovode do jonizacije. Teorijski, Fano faktor je vrlo teško izračunati precizno, jer zahteva detaljno poznavanje svih reakcija koje se mogu odigrati u detektoru, lit.[15].

#### 1.4.4. Efikasnost detektora

Efikasnost detekcije je definisano kao mera verovatnoće da zračenje, koje je emitovano iz izvora i poseduje određenu energiju, bude apsorbovano u aktivnoj zapremini detektora. Pri proučavanju detektora razmatraju su sledeće efikasnosti: apsolutna ili ukupna efikasnost detektora koja se može razdvojiti na dva dela i to na sopstvenu efikasnost i geometrijsku efikasnost. Apsolutna ili ukupna efikasnost detektora, definiše se kao odnos registrovanih događaja i događaja emitovanih iz izvora, i funkcija je geometrije detektora i verovatnoće za interakciju unutar detektora. Sopstvena efikasnost predstavlja odnos registrovanih događaja i broja događaja koji su pogodili detektor. Ona je funkcija vrste i energije zračenja i materijala detektora. Geometrijska efikasnost pokazuje koji deo prostornog ugla zračenja je obuhvaćen detektorom i zavisi od geometrijske konfiguracije izvora i detektora, i ugaone raspodele zračenja, lit.[15].

#### 1.4.5. Vreme reagovanja

Vreme reagovanja je vreme koje je potrebno detektoru da obradi neki događaj, pri čemu unutar ovog intervala detektori mogu biti osetljivi ili neosetljivi za druge događaje. U slučaju osetljivih detektora moguće je gomilanje signala što ga izobličuje i u konačnoj fazi dovodi do gubitka informacija o oba događaja. Ako je detektor neosetljiv, svaki događaj koji se desi u ovom intervalu je izgubljen.

Postoje dva osnovna tipa mrtvog vremena, produženo (paralizujuće) i neproduženo (neparalizujuće). Produženo vreme reagovanja, karakteriše da svaki novi događaj koji stigne u toku trajanja vremena reagovanja starog događaja, dodaje svoje vreme reagovanja od momenta kada je stigao. Ako su događaji česti, vreme reagovanja detektora može da traje veoma dugo i za to vreme element je paralizan. Neproduženo vreme reagovanja odgovara detektoru koji je neosetljiv tokom vremena reagovanja, pa novi događaj ne može produžiti vreme reagovanja. Svaki deo detektorskog sistema ima svoje vreme reagovanja tako da je neophodno uzeti u obzir sve elemente detektorskog sistema. lit.[15].

### 1.5. Razlozi za hlađenje detektora

Kao što je napred rečeno detektori mogu biti hlađeni i nehlađeni. Pomenute performanse se bitno remete toplotnim šumom i tzv. Oževim (Augerovog) procesom. Kriogeno hlađeni detektori bitno prigušuju oba navedena šuma što se posebno odražava na veću osetljivost (eliminisanje toplotnog šuma) kao i veći opseg talasnih dužina IC zračenja. To poboljšava kvalitet i rezoluciju IC slike kod senzora sa ovakvim detektorima kao i manje prigušenje i veći domet.

### 1.6. Principi hlađenja detektora

Rashladni sistem služi za hlađenje fotonskih detektora i njihovo dovođenje na radnu temperaturu. Radne temperature su obično od 4-120K. Da bi se obezbedilo hlađenje potrebno je obezbediti posebnu kriogenu tehnologiju, čiji principi ne podležu zakonima konvekionalne termodinamike. O tome će u ovom radu biti reči u sledećim poglavljima, a posebno će biti



apostrofirani fenomeni ponašanja kriogenih fluida. Sa ovakvim fluidima mogu se konstruisati različiti tipovi rashladnih sistema i to:

- Džul – Tomsonovi, u daljem tekstu JT, minihladnjaci koji za svoj rad koriste izuzetno čist gas (azot, vazduh, argon) visokog pritiska (300 bara i više), a u ciklusu hlađenja Džul – Tomsonov efekat realnog gasa. Ovakav uređaj predmet je istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji, a primenjuje se za hlađenje fotonaponskih detektora. Ovi hladnjaci najčešće obezbeđuju temperature od 70K do 120K. Pored ovih postoji i hladnjaci koji rade nižim temperaturama:

- hladnjaci sa zatvorenim ciklusom. To su najčešće hladnjaci bazirani na Stirlingovom ciklusu i obezbeđuju temperature od 30K do 300K.

- hladnjaci sa direktnim kontaktom preko "hladnog prsta". Ovi hladnjaci rade sa tečnim azotom ili tečnim helijumom i obezbeđuju temperature od 4K do 77K.

- termoelektrični hladnjaci koji mogu biti izvedeni kao jednostepeni i višestepeni hladnjaci. Jednostepeni termoelektrični hladnjaci obezbeđuju temperature od 250K do 300K, dok višestepeni termoelektrični hladnjaci obezbeđuju temperature od 195K do 250K. lit. [013],[14].

Na kraju, detektor koji se upotrebljava u realnim simulacijama sa JT-mini hladnjakom u laboratorijskim uslovima je fotonaponski detektor.

## 2.0. OSNOVI TEORIJE RAZMENE TOPLOTE I MASE KOD IDEALNIH I REALNIH GASOVA I DŽUL-TOMSONOV EFEKAT

### 2.1. Jednačina stanja idealnog i realnog gasa.

Za idealan gas, po definiciji, na svim pritiscima i temperaturama, važi jednačina:

$$p = \rho \cdot R \cdot T, \quad (2.1)$$

gde su:  $p, \rho, R, T$ , apsolutni pritisak, gustina, gasna konstanta gasa, apsolutna temperature.

U slučaju jednačine stanja realnih gasova prethodna jednačina se mora korigovati preko koeficijeta kompresibilnosti  $z$ , tako da je:

$$p = z \cdot \rho \cdot R \cdot T, \quad (2.2)$$

gde koeficijent kompresibilnosti pokazuje odstupanje realnog gasa od idealnog na posmatranom pritisku i temperaturi. Ovo odstupanje je sve veće što je pritisak gasa viši, a temperatura niža. Koeficijent kompresibilnosti  $z$  u osnovi je funkcija pritiska i temperature. Postoje i analitički izrazi za određivanje koeficijenta kompresibilnosti, a najčešće se koristi izraz Berteloa, lit.[105].

Jednačina stanja realnog gasa, dakle sastoji se principijalno, od 4 zavisno promenljive. Svaka od tri zavisno promenljive veličine stanja u jed. (2.1), mogu, teorijski posmatrano, uzrokovati promenu četvrte zavisno promenljive, u jed. (2.2), bilo kojih realnih gasova. Na taj način se veličine stanja  $p, \rho, T$  u realnom gasu menjaju po dva osnova: jedan je idealan, a drugi je modifikovan koeficijentom kompresibilnosti  $z$  kao funkcijom pritiska i temperature direktno, a i same gustine indirektno.

Prilikom proračuna koristi se srednja vrednost parametra  $z$  koja se izračunava po sledećem izrazu:

$$z = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \frac{1}{p_2 - p_1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \int_{p_1}^{p_2} z(p, T) \cdot dpdT. \quad (2.3)$$

pri čemu međuvrednosti pritiska i temperature, između stanja 1 i 2, ne menjaju karakter funkcije  $z$ .

Tokom proračuna pada temperature, što je ključni zadatak ovog doktorata, kontrolom pada pritiska realnog gasa suštinsko pitanje je da se definiše funkcija  $z$ , kako bi efekat poboljšanja gradijenta pada temperature bio korišćen kroz Džul-Tomsonov fenomen.

Sada se može napisati jednačina za idealan gas, korišćenjem specifične zapremine kao veličine stanja,  $v = \frac{1}{\rho}$  u obliku:

$$v = \frac{R \cdot T}{p}, \quad (2.4)$$

Za idealan gas važi:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p}. \quad (2.5)$$

dok za realan gas, a u skladu sa jed. (2.2), može se napisati sledeći izraz:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{v}{T} + \frac{v}{z} \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p. \quad (2.6)$$

## 2.2. Džul Tomsonov efekat

Za tehniku hlađenja jako je značajan intenzitet promene temperature tokom procesa adijabatskog prigušivanja, tzv. *diferencijalni Joule-Thompson-ov efekat* ili *diferencijalni prigušni efekat*

$$\mu_J = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h, \quad (2.7)$$

koji predstavlja promenu temperature po jedinici promene pritiska u datoj fazi procesa prigušivanja za koji je  $h = \text{const}$ .

Zavisnost  $\mu_J$  duž procesa *adijabatskog prigušivanja* može se odrediti posmatrajući formalno predmetnu izentalpu  $h = \text{const}$ . kao *kvazistatičku* promenu stanja, pri čemu je porast entropije određen disipiranim radom, koji se tretira kao *unutrašnja* dovedena *toplota trenja*. Kako je (na osnovu I i II zakona Termodinamike):

$$Tds = dh - vdp, \quad (2.8)$$

Kako je specifična entropija  $s = s(h, p)$ , totalni diferencijal entropije može se napisati:

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial h}\right)_p dh + \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_h dp = \frac{1}{T} dh - \frac{v}{T} dp, \quad (2.9)$$

tako da drugi mešoviti izvodi moraju biti jednaki:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial h \partial p} = \frac{\partial^2 s}{\partial p \partial h}. \quad (2.10)$$

Iz jed. (2.10) se dobija:

$$\left(\frac{\partial \frac{1}{T}}{\partial p}\right)_h = - \left(\frac{\partial \frac{v}{T}}{\partial h}\right)_p. \quad (2.11)$$

S obzirom da je:

$$\left(\frac{\partial \frac{1}{T}}{\partial p}\right)_h = -\frac{1}{T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h; \quad (2.12)$$

$$-\left(\frac{\partial \frac{v}{T}}{\partial h}\right)_p = -\left(\frac{\partial \frac{v}{T}}{\partial T}\right)_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial h}\right)_p = -\frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{T^2} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial h}\right)_p. \quad (2.13)$$

Imajući u vidu da je prema sledećem izrazu  $(\partial T/\partial i)_p = \frac{1}{c_p}$ , na osnovu prethodnog izlaganja, može se napisati sledeći izraz:

$$\mu_J = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \frac{1}{c_p} \left[ T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v \right]. \quad (2.14)$$

ili, zamenom jed. (2.6) za realan gas, dobija se:

$$\mu_J = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \frac{1}{c_p} \cdot T \cdot \frac{v}{z} \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p. \quad (2.15)$$

Džul-Tomsonov koeficijent je invarijanta, ali na svoj način i funkcija dodatne veličine stanja  $z$  za realne gasove, odakle je očigledno da je pri radu sa idealnim gasovima Džul-Tomsonov koeficijent jednak nuli.

Izraz za temperaturu, u skladu sa jednačinom (2.1) idealnog gasa, glasi:

$$T = \frac{p}{\rho \cdot R} \quad (2.16)$$

obebeđuje determinističku definiciju Džul Tomsonovog koeficijenta sledećim postupkom izvođenja. Nakon sredjivanja parcijalnih izvoda po pritisku za idealan gas, dobija se:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_{idealan} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i = \frac{T}{p} - \frac{T}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad \text{pri } h = const \quad (2.17)$$

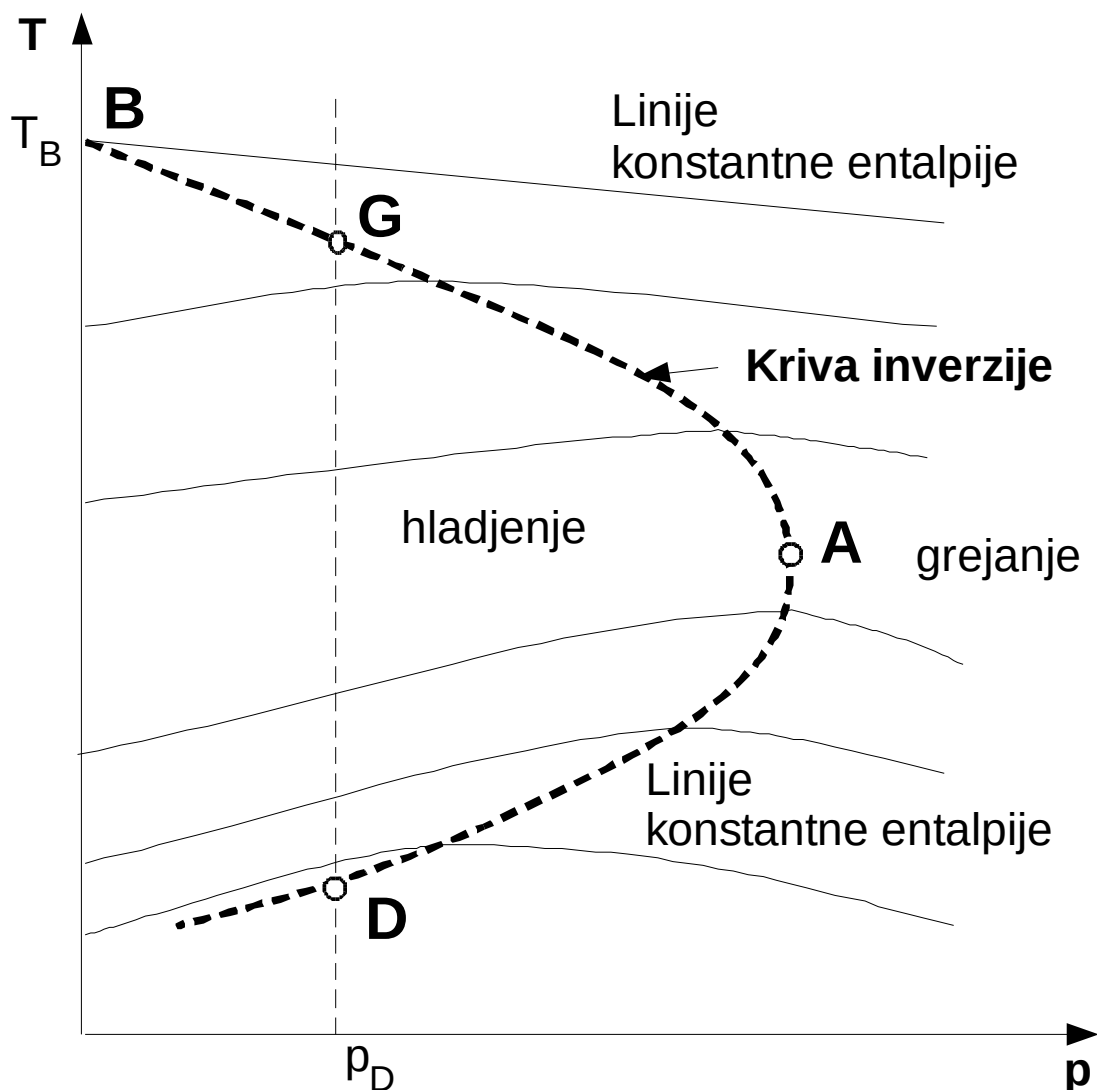
Polazeći od analognog izraza za realan gas,  $T = \frac{p}{z \cdot \rho \cdot R}$ , a u skladu sa (2.2), njen parcijalni izvod po pritisku realnog gasa dobija oblik:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_{realan} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_r = \frac{T}{p} - \frac{T}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial p} - \frac{T}{z} \cdot \frac{\partial z}{\partial p} \quad \text{pri } h = const \quad (2.18)$$

Dakle  $\frac{\partial T}{\partial p}$  predstavlja Džul Tomsonov koeficijent koji je u suštini gradijent temperature po pritisku pri konstantnoj entalpiji. Razlika gradijenta temperature pri idealnom  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i$  i realnom gasu  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_r$  je:

$$\Delta \mu_J = \frac{T}{z} \cdot \frac{\partial z}{\partial p}. \quad (2.19)$$

što predstavlja izraz koji ukazuje na činjenicu da se  $z$  u jed. (2.2) nikako ne može tretirati kao konstantna vrednost nezavisna od pritiska jer bi u tom slučaju izvod u izrazu (2.19) bio jednak nuli, pa bi Džul Tomsonov koeficijent realnog i idealnog gasa bio isti. Prema tome, jed. (2.2) sa konstantnim koeficijentom kompresibilnosti može se smatrati opisnom, a ne funkcionalnom jednačinom s obzirom da se  $z$  menja u svakom stanju realnog gasa. Dakle,  $\Delta\mu_T$  predstavlja osnovu za konstrukciju hladnjaka na bazi realnih gasova, s obzirom da gradijent promene pritiska u tekućoj vrednosti temperature biva umanjen ili uvećan trenutnom vrednošću stepena kompresibilnosti realnog gasa.



Sl. 2.1 Linije entalpije i kriva inverzije za Džul-Tomsonov eksperiment

Na osnovu jed. (2.27) ili jed. (2.38) vidi se da poznavanjem  $p, v, T$  podataka, omogućeno je određivanje Džul-Tomsonovog koeficijenta.

### 2.3. Termodinamički uslovi za obezbeđenje Džul-Tomsonovog efekta

Diferencijalni prigušni efekat zavisi od stanja, tj. od odnosa  $T \cdot (\partial v / \partial T)_p$  prema  $v$ : Za  $T \cdot (\partial v / \partial T)_p > v$  biće  $\mu_J > 0$  (adijabatsko prigušivanje dovodi do snižavanja temperature) i

obrnuto,  $\mu_J < 0$  (adijabatsko prigušivanje dovodi do povećanja temperature); prigušni, Džul-Tomsonov, efekat ne postoji ( $\mu_J = 0$ ) za:

$$T \cdot \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = v. \quad (2.20)$$

Stanja za koja je  $\mu_J = 0$  određuju tzv. *liniju inverzije* koja deli dijagram stanja, Sl.2.1, na deo u kome je  $\mu_J > 0$  (hlađenje fluida) i deo u kome je  $\mu_J < 0$  (grejanje fluida). Takođe, tačke maksimuma na linijama entalpije nazivaju se inverzionim tačkama, a temperatura koja im odgovara inverzionim temperaturom.

Na niskim pritiscima linija inverzije seče izobare na dva mesta: jedno stanje je u oblasti pregrejane pare, a drugo u oblasti tečnosti; sa porastom pritiska ta dva stanja se približavaju da bi se na maksimalnom pritisku inverzije  $p_{\max}$  slila u jedno ( $p_{\max}$  tangira liniju inverzije). Za  $p > p_{\max}$  prigušni efekat može biti samo negativan, dok je za  $p < p_{\max}$  pozitivan samo za deo između tačaka D i G. Temperatura za koju kriva inverzije seče ordinatnu osu naziva se max inverzionom temperaturom. Ako je temperatura fluida viša od maksimalne inverzione temperature nije moguće hlađenje tokom prigušivanja, što je očigledno na Sl.2.1.

Prema tome, vrlo bitna karakteristika realnih fluida je da promena temperature uz pad pritiska, se dešava bez obzira što se proces odigrava bez razmene toplote sa okolinom.

Kod gasova u idealnom stanju, tj. kod gasova koji se ponašaju prema *Clapeyron*-ovoj jednačini stanja idealnog gasa ( $pv = RT$ ) nema prigušnog efekta, s obzirom da iz:

$$\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R}{p}, \quad (2.21)$$

proizilazi da je uslov  $T \cdot \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = v$  uvek ispunjen; zato su izentalpe idealnog gasa u  $T-s$  dijagramu paralelne sa izotermama, tj.  $T = const$  za  $h = const$ .

**Na kraju, vrlo bitna karakteristika Džul Tomsonovog efekta, koja je primenjena na objekat koji se hladi, je: kod kriogenih (realnih) fluida, sa promenom pritiska pri  $T = const$  postoji razlika u entalpiji, tj.  $h \neq const$  što uz odgovarajući maseni protok omogućava postojanje rashladnog kapaciteta.**

## 2.4. Adijabatski proces realnih fluida

Da bi se dobila jednačina adijabatske promene stanja realnog gasa (zakon adijabatskog procesa) polazi se od jednačina, koje omogućavaju, da se bilo koja veličina stanja može prikazati kao funkcija dve osnovne termodinamičke veličine. Najčešće se kao dve osnovne veličine koristi pritisak i temperatura, a može i specifična zapremina. Polazeći od jednačina stanja neke supstance, entalpija i unutrašnja energija, mogu se napisati:

$$h = h(p, T) \text{ i } u = u(v, T). \quad (2.22)$$

Budući da su entalpija, unutrašnja energija, pritisak, temperatura i specifična zapremina veličine stanja, to se može napisati totalni diferencijal entalpije i unutrašnje energije, na sledeći način:

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \cdot dT + \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \cdot dp \quad (2.23)$$

i

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \cdot dT + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T \cdot dv . \quad (2.24)$$

Kako se, korišćenjem jednačine (2.23) i usvajanjem  $h = const.$ , dobija izraz:

$$\left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = -\mu_J \cdot c_p , \quad (2.25)$$

tako se, korišćenjem jednačine (2.24) i usvajanjem  $u = const.$ , dobija izraz:

$$\left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = -\mu_v \cdot c_v , \quad (2.26)$$

pri čemu je,  $\mu_v$ , po definiciji:

$$\mu_v = \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_u , \quad (2.27)$$

može se napisati:

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \cdot dT - \mu_J \cdot c_p \cdot dp , \quad (2.28)$$

i

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \cdot dT - \mu_v \cdot c_v \cdot dv . \quad (2.29)$$

Sada se može napisati da je promena entalpije:

$$dh = c_{psr} \cdot dT = \left( c_{p1} - \mu_J \cdot c_p \cdot \frac{dp}{dT} \right) \cdot dT , \quad (2.30)$$

pri čemu je:

$c_{p1}$  i  $c_p$  - specifični toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku na početnom i krajnjem pritisku.

Promena unutrašnje energije:

$$du = c_{vsr} \cdot dT = \left( c_{v1} - \mu_v \cdot c_v \cdot \frac{dv}{dT} \right) \cdot dT , \quad (2.31)$$

pri čemu je:

$c_{v1}$  i  $c_v$  - specifični toplotni kapacitet pri konstantnoj zapremini na početnoj i krajnjoj zapremini.

Konačni izrazi za specifični toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku i zapremini realnog fluida su:

$$c_{psr} = c_{p1} - \mu_J \cdot c_p \cdot \frac{dp}{dT} , \quad (2.32)$$

$$c_{vsr} = c_{v1} - \mu_v \cdot c_v \cdot \frac{dv}{dT} . \quad (2.33)$$

Napomenuće se da promena temperature u koeficijentima  $\mu_J, \mu_v$  i promena temperature  $dT$  nisu iste promene temperature.

Na osnovu prvog principa termodinamike može se napisati za količinu toplote kvazistatičkog procesa realnog gasa:

$$\delta q = c_{vsr} \cdot dT + p \cdot dv = 0 \text{ ili } \delta q = c_{psr} \cdot dT - v \cdot dp = 0. \quad (2.34)$$

Iz gornjih jednačina dobija se:

$$c_{vsr} \cdot dT = -p \cdot dv \text{ i } c_{psr} \cdot dT = v \cdot dp. \quad (2.35)$$

Deljenjem poslednjih izraza dobija se:

$$\frac{c_{psr}}{c_{vsr}} = \kappa_{sr} = -\frac{v \cdot dp}{p \cdot dv}. \quad (2.36)$$

Preuređenjem i integracijom dobija se:

$$\ln p + \kappa_{sr} \cdot \ln v = \text{const}, \quad (2.37)$$

ili

$$p \cdot v^{\kappa_{sr}} = \text{const}. \quad (2.38)$$

gde je:  $\kappa_{sr}$  - eksponent izentropije realnog gasa.

Iz poslednjeg izraza zaključuje se da u slučaju kada je  $\mu_J = 0, \mu_v = 0$  realan fluid se ponaša kao idealan tako da je i  $\kappa_{sr} = \kappa$ .

## 2.5. Majerova jednačina za idealan i realan gas

Majerova jednačina za idealan gas glasi:

$$c_p = c_v + R, \quad (2.39)$$

gde je:  $c_p, c_v$  - specifični toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku i zapremini. U slučaju realnog fluida, između neka dva stanja 1 i 2, polazi se od opšteg izraza za promenu entalpije:

$$\Delta h = \Delta u + \Delta \frac{P}{\rho}, \quad (2.40)$$

tako da je:

$$h_2 - h_1 = u_2 - u_1 + \frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1}. \quad (2.41)$$

Sada se može napisati za realan gas, a u skladu sa jed.(2.2) i jed. od (2.22) do (2.33):

$$\left( c_{p1} - \mu_J \cdot c_p \cdot \frac{dp}{dT} \right) \cdot (T_2 - T_1) = \left( c_{v1} - \mu_v \cdot c_v \cdot \frac{dv}{dT} \right) \cdot (T_2 - T_1) + R \cdot (z_2 \cdot T_2 - z_1 \cdot T_1), \quad (2.42)$$

tako da je:

$$c_{psr} \cdot (T_2 - T_1) = c_{vsr} \cdot (T_2 - T_1) + R \cdot (z_2 \cdot T_2 - z_1 \cdot T_1). \quad (2.43)$$



Majerova jednačina za realan gas se može napisati:

$$c_{psr} = c_{vsr} + \frac{R}{T_2 - T_1} \cdot (z_2 \cdot T_2 - z_1 \cdot T_1), \quad (2.44)$$

odakle se sređivanjem dobija pojednostavljeni izraz za Majerovu jednačinu:

$$c_{psr} = c_{vsr} + R \cdot \zeta, \quad (2.45)$$

pri čemu je:

$$\zeta = \frac{z_2 \cdot T_2 - z_1 \cdot T_1}{T_2 - T_1}. \quad (2.46)$$

S obzirom da je:

$$\kappa_{sr} = \frac{c_{psr}}{c_{vsr}}, \quad (2.47)$$

tada je:

$$c_{psr} = \frac{\kappa_{sr}}{\kappa_{sr} - 1} \cdot R \cdot \zeta. \quad (2.48)$$

Veza između koeficijenta kompresibilnosti i Džul-Tomsonovog koeficijenta, koja se koristi u tehničkim proračunima, a u skladu sa jed. (2.14), (2.51) i (2.52), data je izrazom:

$$\left( c_{p1} - \mu_J \cdot c_p \cdot \frac{dp}{dT} \right) = \left( c_{v1} - \mu_v \cdot c_v \cdot \frac{dv}{dT} \right) + R \cdot \zeta, \quad (2.49)$$

ili, zapisano u jednostavnijem obliku, a u skladu sa jed. (2.17) i (2.51):

$$\left( c_{p1} - \mu_J \cdot c_p \cdot \frac{dp}{dT} \right) = \frac{\kappa_{sr}}{\kappa_{sr} - 1} \cdot R \cdot \zeta. \quad (2.50)$$

Uspostaviće se veza koeficijenta kompresibilnosti u jednačini stanja realnog gasa  $z$  i srednje korigovane vrednosti koeficijenta kompresibilnosti gasne konstante za realne gasove  $\zeta$ . Ona povezuje srednje specifične toplote pri konstantnom pritisku i zapremini realnog gasa. S obzirom da se jednačina stanja realnog gasa, može napisati i u obliku:

$$\frac{p}{T} = z \cdot \rho \cdot R, \quad (2.51)$$

potražiće se izvod pritiska po temperaturi, jed. (2.51), tako da je:

$$\frac{dp}{dT} = z \cdot \rho \cdot R + \frac{dz}{dT} \cdot T \cdot \rho \cdot R + \frac{d\rho}{dT} \cdot z \cdot T \cdot R. \quad (2.52)$$

Važno je napomenuti, u jed. (2.52), vrednost  $z$  predstavlja ukupni koeficijent kompresibilnosti koji povezuje veličine stanja u jednačini stanja. Međutim, parametar  $\zeta$  je samo deo tog ukupnog uticaja vezan za promenu razlike specifičnih toplota nastalih realnim promenama temperatura kod realnih gasova. To se iskazuje samo kroz Majerovu jednačinu. Ova veličina podrazumeva srednju vrednost uticaja promene specifičnih toplota preko gasne

konstante, koja uzima u obzir ukupne stvarne koeficijente kompresibilnosti za svaku početnu i konačnu temperaturu,  $z_1$  i  $z_2$ , odakle sledi za Majerovu jednačinu realnog gasa, a u skladu sa (2.45) i  $R_{sr} = R \cdot \zeta$ , da je:

$$c_{psr} = c_{vsr} + R_{sr}. \quad (2.53)$$

Preuređivanjem, jed. (2.52), a korišćenjem jed. (2.51), dobija se:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{p}{T} + \frac{dz}{dT} \cdot \frac{p}{z} + \frac{d\rho}{dT} \cdot \frac{p}{\rho}. \quad (2.54)$$

Izjednačavanjem jed. (2.17) i jed. (2.51) dobija se:

$$\frac{\kappa_{sr}}{\kappa_{sr} - 1} \cdot \zeta \cdot R = c_{p1} - c_{p2} \cdot \mu_J \cdot \frac{dp}{dT}. \quad (2.55)$$

Zamenom jed. (2.31) u jed. (2.32) dobija se veza između veličina  $z$  i  $\zeta$ :

$$\frac{\kappa_{sr}}{\kappa_{sr} - 1} \cdot \zeta \cdot R = c_{p1} - c_{p2} \cdot \mu_J \cdot \left( \frac{p}{T} + \frac{dz}{dT} \cdot \frac{p}{z} + \frac{d\rho}{dT} \cdot \frac{p}{\rho} \right). \quad (2.56)$$

tako da se preuređivanjem dobija konačna zavisnost  $z$  i  $\zeta$ :

$$\left( \frac{c_{p1} - \frac{\kappa_{sr}}{\kappa_{sr} - 1} \cdot \zeta \cdot R}{c_{p2} \cdot \mu_J} - \frac{p}{T} - \frac{d\rho}{dT} \cdot \frac{p}{\rho} \right) \cdot \frac{dT}{p} = \frac{dz}{z}. \quad (2.57)$$

Prema tome, može se usvojiti da je,  $z$  karakteristika stanja gasa, a  $\zeta$  karakteristika procesa, koji izvršava gas.

## 2.6. Adijabatsko-izentalpsko isticanje gasa kroz konvergentan mlaznik (jednofazni fluid)

Za povećanje brzine kretanja fluida primenjuju se specijalno profilisani elementi nazvani mlaznicama. Brzina isticanja kroz mlaznik, kada je u pitanju adijabatsko strujanje, primenjujući jednačinu održanja energije, iznosi:

$$q = \left( h_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) - \left( h_1 + \frac{w_1^2}{2} \right), \quad (2.58)$$

a, s obzirom da je  $q = 0$ , dobija se izraz dat u lit.[21]:

$$w_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{n_{sr}}{n_{sr} - 1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n_{sr}-1}{n_{sr}}} \right)}. \quad (2.59)$$

gde je:  $n_{sr}$  - eksponent adijabate (politrope) realnog gasa.

Jasno se vidi da je brzina utoliko veća ukoliko je odnos pritisaka manji. Protok gasa kroz mlaznik iznosi:

$$G = A_{kr} \cdot w_2 \cdot \rho_2 = const. \quad (2.60)$$

Dakle, izraz za maseni protok je:

$$G = A_{kr} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{n_{sr}}{n_{sr} - 1} \cdot p_1 \cdot \rho_1 \cdot \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{n_{sr}}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n_{sr}+1}{n_{sr}}} \right)}. \quad (2.61)$$

Maksimalni protok dobiće se, ako je odnos pritisaka dat izrazom:

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{kr} = \left( \frac{2}{n_{sr} + 1} \right)^{\frac{n_{sr}}{n_{sr} - 1}} \quad (2.62)$$

Međutim, usvojiće se da je odnos pritisaka isti kao i pri izentropi, tako da je:

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{kr} = \left( \frac{2}{\kappa_{sr} + 1} \right)^{\frac{\kappa_{sr}}{\kappa_{sr} - 1}}, \quad (2.63)$$

gde je:

$\kappa_{sr}$  - eksponent izentropije realnog gasa.

U teoriji adijabatskog isticanja se usvaja isti kritični pritisak kao i pri izentropskom isticanju te se za odnos pritisaka usvaja odnos pri izentropskom strujanju, a ne pri adijabatskom strujanju.

Smenom jed. (2.63) u jed. (2.59) za brzinu  $w_2$ , dobija se:

$$w_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{n_{sr}}{n_{sr} - 1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left( 1 - \left( \frac{2}{\kappa_{sr} + 1} \right)^{\frac{\kappa_{sr}}{\kappa_{sr} - 1} \cdot \frac{n_{sr} - 1}{n_{sr}}} \right)} \quad (2.64)$$

i konačno maksimalni protok biće dat sledećim izrazom:

$$G_{max} = A_{kr} \cdot \left( \frac{2}{\kappa_{sr} + 1} \right)^{\frac{\kappa_{sr}}{\kappa_{sr} - 1} \cdot \frac{1}{n_{sr}}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{n_{sr}}{n_{sr} - 1} \cdot p_1 \cdot \rho_1 \cdot \left( 1 - \left( \frac{2}{\kappa_{sr} + 1} \right)^{\frac{\kappa_{sr}}{\kappa_{sr} - 1} \cdot \frac{n_{sr} - 1}{n_{sr}}} \right)}. \quad (2.65)$$

Treba napomenuti da, jed. (2.65), daje odlična slaganja sa praktičnim merenjima protoka realnog gasa. U slučaju idealnog gasa  $\kappa_{sr} = \kappa$  i  $n_{sr} = n$ .

Navešće se, praktičan izraz za izračunavanje protoka kod adijabatskog strujanja, gde je trenje uzeto u obzir preko drugog člana u izrazu koji se nalazi pod korenom:

$$G = A_{kr} \cdot \sqrt{\kappa \cdot p_1 \cdot \rho_1 \cdot \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} - \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}} \cdot \rho_1^2 \cdot \Delta h}, \quad (2.66)$$

gde je:

$\Delta h$  - promena entalpije duž izobare usled trenja (kritične izobare, pri  $p_{kr} = p_2 = const$  pritisku za koji se dobija max protok) pri adijabatskom procesu sa trenjem.

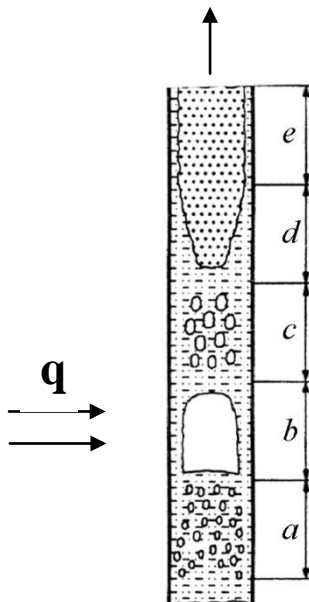
Na kraju, napomenuće se da se izentalpski proces odnosi na proces ekspanzije fluida, pri kojem su entalpija na početku procesa ekspanzije  $h_{početna}$  (pri početnom pritisku) i entalpija na kraju procesa ekspanzije  $h_{konačno}$  (pri konačnom pritisku) iste tj.  $h_{početna} = h_{konačno}$ . Dakle, na osnovu te činjenice se usvaja da proces ekspanzije gasa se izvršava pri  $h = const$ . Međutim, entalpija pri kritičnom pritisku isticanja nije jednaka sa entalpijom na početku procesa ekspanzije. Njihova razlika potiče od razlike kvadrata brzina pri početnom i kritičnom pritisku. Prema tome, eksponent adijabate, za process isticanja se usvaja na osnovu pomenutih napomena.

## 2.7. Dvofazna strujanja

### 2.7.1. Struktura dvofazne struje

Postojanje mešavine dve faze tečnosti i pare, definisano je kao dvofazni fluid. U slučaju kada je mešavina tečne i parne faze ravnotežna, smatra se da su obe faze na temperaturi ključanja. Ravnotežno stanje dve faze odgovara podkritičnim pritiscima. Kada se temperature parne i tečne faze razlikuju smatra se da je mešavina tečnosti i pare neravnotežna. Strujanje dvofaznog fluida u kanalima, odigrava se tako da je deo zapremine kanala ispunjen tečnošću a ostatak parom. Na kritičnom pritisku dvofazna mešavina prelazi u jednofazan fluid, tako da na pritiscima višim od kritičnog, para se posmatra kao jednofazni homogeni medijum. Smanjenjem pritiska ispod kritičnog razlike u fizičkim svojstvima parne i tečne faze se povećavaju, s obzirom da se mešavina tečnosti i pare udaljava od homogenog medijuma. lit.[31].

Prva pojava parne faze dešava se na unutrašnjoj površini cevi, pri čemu se opažaju parni mehurovi koji se kreću zajedno sa strujom. U zagrejanjoj cevi isparivača primećuju se oblasti u kojima je temperatura zida cevi nešto viša od temperature ključanja  $\theta_k(t)$ . Na početku procesa isparavanja, parni mehurovi ostaju u kontaktu sa zidom, a zatim se odvajaju od njega. S obzirom da parni mehurovi dolaze u sloj tečnosti niže temperature, postepeno se kondenzuju, pri čemu srednja temperatura tečnosti može da bude znatno niža od  $\theta_k(t)$ . Parni mehurovi koji se nalaze u tečnosti su relativno malih dimenzija, tako da je zapreminski protočni udeo parne faze u struji relativno mali. Režim strujanja dvofaznog fluida, pri kojem se opažaju parni mehurovi u tečnosti, a koji su relativno mali i koji su manje ili više ravnomerno raspoređeni po preseku cevi naziva se mehurasti S1.2.2.a. Pri mehurastom režimu strujanja dvofaznog fluida na unutrašnjoj površini cevi neće se formirati neprekidna parna opna. lit.[31].



### Sl.2.2. Režimi strujanja dvofazne mešavine (vertikalno strujanje)

a-mehurasti: b-čepasti: c-penasti: d-razdvojeno-anularni: e-disperzni

Prilikom strujanja dvofazne mešavine, sa povećanim sadržajem pare, sa umerenim brzinama struje i pri niskim pritiscima mehurovi formiraju strukturu u obliku čepova, pa se ovaj režim strujanja naziva čepasti Sl.2.2.b. Takođe, mehurovi mogu imati i neregularni oblik i mogu da dostignu dužinu i od 1m. Međutim, čepovi su međusobno odvojeni tečnim pregradama, a pojedini od zida cevi tankim slojem tečnosti. Pri povećanim brzinama strujanja, dolazi do razbijanja parnih čepova u sitne mehuriće, s obzirom da je njihova deformacija veoma intenzivna. S obzirom da sitni mehurići sa tečnošću čine emulziju, ovaj režim strujanja se naziva penasti ili emulzioni Sl.2.2.c. lit.[31].

S obzirom da je gustina dvofazne mešavine višestruko smanjena dolazi do povećanja brzine strujanja. Samim tim je i povećan sadržaj pare u dvofaznoj mešavini, tako da dolazi do izdvajanja parnog jezgra sa dispergovanim kapima oko kojeg struji tečnost u obliku prstena. Ovaj režim strujanja naziva se razdvojeno anularni tok dvofazne mešavine Sl.2.2.d. lit.[31].

Pri razdvojeno anularnom režimu strujanja javljaju se talasi koji se kreću u smeru strujanja. Talasi nastaju kao posledica uzajamnog dejstva parne struje sa razdelnom površinom tečnosti, i prostiru se normalno na osu cevi. Napomenuće se da razdvojeno anularni režim strujanja odgovara širokoj oblasti sadržaja pare. Hrapavost površine izaziva povećanje hidrauličkih otpora strujanju, tako da bi se hidraulički otpor naglo smanjio, pri odgovarajućem sadržaju pare, potrebno je da tečni film uz zid cevi postane tanji sa relativno glatkom površinom. Pri određenom sadržaju pare, kroz cev struji para sa dispergovanim kapima (maglom), a tečni film se kreće duž zida cevi tako da se ovakav režim strujanja zove disperzni Sl.2.2.e. lit.[31].

Raspodela brzina struje po preseku kao i faznih koncentracija je praktično osnosimetrična u slučaju da se prave vertikalne cevi zagrevaju ravnomerno po obimu. Temperaturni i hidrodinamički uslovi rada cevi isparivača u određenim uslovima bitno zavise od: odstupanja od osne simetrije koje se pojavljuje usled neravnomernog zagrevanja cevi po obimu, dejstva sile inercije kod kolena i dejstva sile teže kod nagnutih cevi. lit.[31].

Prilikom strujanja dvofaznog fluida, tečnosti i pare, a pri dovoljno velikim brzinama u horizontalnim cevima režimi strujanja su sa narušenom simetrijom zbog sile teže. Međutim, sami režimi strujanja su praktično isti kao i kod vertikalnih cevi. Pri određenim uslovima, kao što su nedovoljna brzina i veliki intenzitet isparavanja, može se primetiti raslojeni režim u

horizontalnim cevima, pri kome donji deo cevi zauzima tečna faza, a gornji deo parna faza. S obzirom da parna faza, slabo odvodi toplotu, može da dođe do prekomernog zagrevanja gornjeg dela cevi zbog nepostojanja zaštitnog sloja tečnosti. Prilikom strujanja, takođe dolazi i do zapljuskivanja gornjeg dela cevi tečnošću a samim tim i do naglog hlađenja. Cevi isparivača koje su naglo ohlađene, izložene su toplotnim šokovima, što dovodi do zamora materijala kao i do prskanja cevi na zavarenim mestima. Pojavljivanje raslojenog režima u horizontalnim cevima sprečava se povećanjem masene brzine, što znatno povećava hidrauličke otpore. lit.[31].

## 2.7.2. Protočne karakteristike strujanja mešavine tečnosti i pare

Karakteristike strujanja mešavine tečnosti i pare dele se na dve grupe:

- protočne, koje ne uzimaju u obzir termodinamička neravnotežna stanja faza i razlike njihovih srednjih brzina pri strujanju kroz cevi, a koje se određuju na osnovu materijalnog i toplotnog bilansa,
- realne, kod kojih se uzimaju u obzir klizanje i moguće neravnotežno stanje faza.

Iz jednačine kontinuiteta dobija se veličina, koja se koristi pri strujanju dvofazne mešavine, tečnosti i pare, maseni fluks i predstavlja jednu od najvažnijih karakteristika strujanja. Maseni fluks se definiše kao maseni protok kroz jedinicu površine poprečnog preseka kanala, tako da je:

$$\frac{G}{A} = \rho \cdot w. \quad (2.67)$$

Maseni fluks mešavine ostaje nepromenjen pri svim gustinama i udelima faza. Takođe, u slučaju da nema odvođenja ili dovođenja fluida, i kada se posmatra ustaljeno strujanje u kanalu konstantnog poprečnog preseka maseni fluks ostaje konstantan. Kada je potrebno pojednostaviti proračun, pogodnije je raditi sa takozvanim svedenim brzinama faze. Svedenom brzinom faze naziva se srednja brzina posmatrane faze koju bi ona imala ako bi zauzimala ceo poprečni presek cevi. lit.[31].

To su srednja svedena brzina pare na ceo poprečni presek:

$$w'' = \frac{G_p}{A \cdot \rho''} = \frac{G \cdot x}{A \cdot \rho''} = \frac{\rho \cdot w \cdot x}{\rho''}, \quad (2.68)$$

i srednja svedena brzina tečnosti na ceo poprečni presek:

$$w' = \frac{G_t}{A \cdot \rho'} = \frac{G \cdot (1-x)}{A \cdot \rho'} = \frac{\rho \cdot w \cdot (1-x)}{\rho'}. \quad (2.69)$$

Imajući u vidu da je  $G_m = G_0 = G_p + G_t$ , a srednja brzina tečnosti na ulazu u cev:

$$w_0 = \frac{G_0}{A \cdot \rho'}, \quad (2.70)$$

može se izračunati kao:

$$w_0 = w' + w'' \cdot \frac{\rho''}{\rho'}. \quad (2.71)$$

Brzina (srednja) mešavine tečnosti i pare, dobija se iz izraza:

$$w_m \cdot \rho_m = w' \cdot \rho' + w'' \cdot \rho'', \quad (2.72)$$

i predstavlja zbir svedenih srednjih brzina tečnosti i pare na ceo poprečni presek:

$$w_m = w' + w'' , \quad (2.73)$$

odnosno, na osnovu izraza  $w' = w_0 - w'' \cdot \frac{\rho''}{\rho'}$ , dobija se konačan izraz za srednju brzinu mešavine:

$$w_m = w_0 + w'' \cdot \left( 1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right) . \quad (2.74)$$

### 2.7.3. Realne karakteristike strujanja mešavine tečnosti i pare

Zapreminski protočni udeo pare dat je sledećim izrazom:

$$\beta = \frac{D_p}{D_t + D_p} , \quad (2.75)$$

te korišćenjem veze između zapreminskog protoka i masenog protoka, dobija se:

$$\beta = \frac{\frac{G_p}{\rho''}}{\frac{G_p}{\rho''} + \frac{G_t}{\rho'}} . \quad (2.76)$$

Veza između zapreminskog protočnog udela pare i protočnog kvaliteta pare, data je sledećim izrazom:

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{1 - \chi}{\chi} \cdot \frac{\rho''}{\rho'}} , \quad (2.77)$$

gde je:  $\chi$  - protočni kvalitet pare, koji je definisan izrazom:

$$\chi = \frac{G_p}{G_p + G_t} . \quad (2.78)$$

Maseni (statički) kvalitet pare, ili stepen suvoće pare, definisan je izrazom:

$$x_s = \frac{m_p}{m_p + m_t} . \quad (2.79)$$

pri čemu je  $x_s = x$ , a  $x$  je korišćeno u jed. (2.68) i jed. (2.69).

Termodinamički kvalitet, definisan je izrazom:

$$x_t = \frac{h - h'}{h'' - h'} . \quad (2.80)$$

Udeo zapremine pare  $\alpha$  u ukupnoj zapremini mešavine (pare i tečnosti) tj. udeo površine poprečnog preseka koji zauzima para i ukupnog poprečnog preseka koji zauzima mešavina (para i tečnost), definisan je sledećim izrazom:

$$\alpha = \frac{V_p}{V_p + V_t} = \frac{A_p}{A_p + A_t} . \quad (2.81)$$

Veza između zapreminskog udela pare  $\alpha$  i masenog kvaliteta pare  $x_s$ , data je izrazom:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1-x_s}{x_s} \cdot \frac{\rho''}{\rho'}}. \quad (2.82)$$

Veza između zapreminskog udela  $\alpha$  i protočnog kvaliteta  $\chi$ , data je izrazom:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1-\chi}{\chi} \cdot S \cdot \frac{\rho''}{\rho'}}, \quad (2.83)$$

gde je:

$S$  - klizanje faza, i definisano je odnosom srednje brzine strujanja gasne faze i srednje brzine strujanja tečne faze u dvofaznoj mešavini, tako da je:

$$S = \frac{w_p}{w_t}. \quad (2.84)$$

U slučaju kada je  $S=1$  nema klizanja faza.

Postoje eksperimentalni izrazi za izračunavanje vrednosti klizanja faza pare i tečnosti u dvofaznoj mešavini, a njihova primena zavisi od parametara strujanja dvofazne mešavine. Navešće se jedan od njih, jednačina za klizanje faza Zivija, lit.[29]:

$$S = \sqrt[3]{\frac{\rho'}{\rho''}}. \quad (2.85)$$

Takođe, određiće se i uslovi pri kojima su pojedini napred definisani parametri jednaki.

Zapreminski protočni udeo pare jednak je zapreminskom udelu pare, kada je klizanje faza jednako jedinici, tj.  $\alpha = \beta$ .

Maseni kvalitet jednak je termodinamičkom kvalitetu, kad je u pitanju termička (temperaturska) ravnoteža pare i tečnosti, tj.  $x_s = x_t$ . Ukoliko para i tečnost nisu u ravnoteži, a nalaze se na različitim pritiscima, dovođenje u ravnotežu se vrši najpre prigušivanjem (dovođenje na isti pritisak - mehanička ravnoteža), zatim mešanjem (dovođenje na istu temperature – termička ravnoteža), a zatim, ako je potrebno hlađenjem ili zagrevanjem, radi dovođenja u stanje vlažne pare. Pri tome jednačina masenog bilansa je:

$$m_{uk} = m_t + m_p = m' + m''. \quad (2.86)$$

Maseni kvalitet jednak je protočnom kvalitetu kada je klizanje faza jednako jedinici, tj.  $x_s = \chi$ . lit.[27],[28],[29],[30].

#### 2.7.4. Adijabatsko-izentalpsko isticanje

kroz konvergentan mlaznik (jednofazno - dvofazni fluid)

Ova vrsta isticanja, adijabatsko – izentalpsko isticanje kroz konvergentan mlaznik, započinje u jednofaznoj oblasti pregrejane pare, a završava se u dvofaznoj oblasti, tj. mešavini tečne i gasne faze, ako je konačni pritisak ekspanzije manji od kritičnog pritiska dvofazne mešavine (kritičnog pritiska dvojne tačke). Naravno, ako je isticanje desno od kritične tačke dvofazne mešavine ekspanzija se vrši tako što fluid, najpre ekspandira jednofazno, do krive



gde je stepen suvoće jednak jedinici, a onda ekspanzija se nastavlja u dvofaznoj oblasti, dok ako se isticanje odvija levo od kritične tačke, ekspanzija se odvija najpre iz jednofazne gasne faze u jednofaznu tečnu fazu, a potom kada ekspanzija dođe do donje granične krive gde stepen suvoće je jednak nuli, se nastavlja iz jednofazne tečne faze u dvofaznu oblast tj. mešavinu tečne i parne faze. Takođe, smatra se da su entalpije na početku i na kraju procesa ekspanzije iste.

U teorijskom razmatranju procesa širenju gasa, a s obzirom da se do kritičnog preseka ne pojavljuje kondenzacija, teorijski izraz za protok pri isticanju odgovara celokupnom masenom protoku. S obzirom da je uputno pre procesa kondenzacije oceniti koliko će biti kondenzata nakon daljeg širenja ispod kritičnog pritiska to se teorijski izraz za gasni protok može hipotetički razdvojiti na gasni i tečni deo koji će se pojaviti do konačnog širenja po zadatoj krivoj. Dakle, stvarna vrednost ukupnog protoka gasa biće umanjena za efekat udela  $\alpha$  površine poprečnog preseka koji zauzima parna faza u ukupnom poprečnom preseku koji zauzimaju para i tečnost, definisanog preko vlažnosti pare (masenog kvaliteta pare)  $x$ , koja će tek biti dostignuta ispod kritičnog preseka, koji važi za uslove pod kojima se obavlja hlađenje. Prema tome, može se koristiti teorijski izraz za maseni protok gasa umanjen za onaj deo koji će tek biti kondenzovan na nižem pritisku ispred detektora.

Izraz za maseni protok dvofazne mešavine je:

$$G_{uk} = G_p + G_t, \quad (2.87)$$

gde su:

$G_p$  - maseni protok parne faze, i

$G_t$  - maseni protok tečne faze.

Jed. (2.87) napisaoće se u sledećem obliku:

$$G_{uk} = A_p \cdot \rho_p \cdot w_p + A_t \cdot \rho_t \cdot w_t \quad (2.88)$$

S obzirom da je:

$$\alpha = \frac{A_p}{A_{kr}}, \quad (2.89)$$

izraz za ukupni protok mešavine imaće teorijski oblik pri adijabatskom isticanju:

$$G_{uk} = \alpha \cdot A_{kr} \cdot 0.965 \cdot \sqrt{n \cdot p_1 \cdot \rho_1 \cdot \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n+1}{n-1}}} + (1-\alpha) \cdot A_{kr} \cdot 0.814 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{t-ulaz} \cdot (p_{ulaz} - p_{konačno})}, \quad (2.90)$$

gde je:

$n$  - eksponent adijabate.

$\rho_{t-ulaz}$  - gustina tečnosti gde pri ekspanziji počinje dvofazna oblast,

$p_{ulaz}$  - pritisak pri ekspanziji gde počinje dvofazna oblast,

$p_{konačno}$  - konačni pritisak ekspanzije,

$p_1, \rho_1$  - pritisak i gustina na početku ekspanzije (isticanja).

0.814 - koeficijent isticanja tečnosti,

$\mu=1$  - koeficijent isticanja gasa. Ukoliko se, u jed. (2.90),  $n_{sr} = n$  zameni sa  $\kappa_{sr} = \kappa$ , koeficijent isticanja ima vrednost 0.965.

U jed. (2.90) je odnos početnog i kritičnog pritiska isticanja dat izrazom, u kome je umesto eksponenta izentrope upotrebljen eksponent adijabate, pod uslovom da se dobijeni pritisak  $p_{kr}$  adijabatsko, veoma malo razlikuje od  $p_{kr}$  izentropski.

Eksperimentalno dobijeni izraz u kojem je upotrebljena vlažnost pare  $x$ , a sve sa ciljem da bi se vlažnost pare iskoristila u matematičkom modelu, pokazao je odlično slaganje sa eksperimentom, dat je:

$$G_{uk} = 1.07 \cdot A_{kr} \cdot \sqrt{n_1 \cdot p_1 \cdot \rho_1 \cdot \left(\frac{2}{n_1 + 1}\right)^{\frac{n_1 + 1}{n_1 - 1}}} + 1.07 \cdot (1 - x) \cdot A_{kr} \cdot 0.814 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{t-ulaz} \cdot (p_{ulaz} - p_{konačno})} \quad (2.91)$$

gde je:

$n_1$  - eksponent adijabate od početnog do krajnjeg pritiska pri izentalpskoj ekspanziji gasa.

Ostale oznake su kao i u teorijskoj jednačini, jed. (2.90). Jed. (2.91), odgovara masenom protoku pri ekspanziji desno od kritične tačke dvofazne mešavine (dvojna tačka).

Nešto složeniji je eksperimentalni izraz, za izračunavanje maksimalnog protoka pri ekspanziji levo od kritične tačke dvofazne mešavine (dvojne tačke). Njegov primenljivi oblik, dat je sledećom jednačinom:

$$G_{uk} = 1.07 \cdot A_{kr} \cdot \frac{(p_1 - p_0) - (p_2 - p_3)}{p_1 - p_0} \cdot \sqrt{n_1 \cdot p_1 \cdot \rho_1 \cdot \left(\frac{2}{n_1 + 1}\right)^{\frac{n_1 + 1}{n_1 - 1}}} + 1.07 \cdot A_{kr} \cdot \frac{p_2 - p_3}{p_2 - p_0} \cdot 0.814 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_2 \cdot (p_2 - p_0)} + 1.07 \cdot (1 - x) \cdot A_{kr} \cdot 0.814 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_3 \cdot (p_3 - p_0)} \quad (2.92)$$

gde su:

$n_1$  - eksponent adijabate od početnog do krajnjeg pritiska pri izentalpskoj ekspanziji gasa,

$p_1, \rho_1$  - pritisak i gustina na početku ekspanzije (isticanja),

$p_2, \rho_2$  - pritisak i gustina gde počinje čista oblast tečnosti pri ekspanziji fluida,  $p_2 = p_{kr.tačke}$ ,

$p_3, \rho_3$  - pritisak i gustina na donjoj graničnoj krivoj  $x=0$ , pri ekspanziji fluida,

$p_0$  - pritisak na kraju (konačni pritisak) ekspanzije.

Poglavlje 2.0. obrađeno korišćenjem lit.[16]-[36].

### 3.0. RAZMENJIVAČI TOPLOTE: OSNOVNI PRINCIP HLAĐENJA DETEKTORA UPOTREBOM DEWAR-POSUDE I KONSTRUKCIONA ŠEMA DŽUL-TOMSONOVOG MINI-HLADNJAKA

#### 3.1. Osnovni tipovi razmenjivača toplote i njihov značaj

Razmenjivači toplote predstavljaju uređaje čija je osnovna uloga da se između radnih fluida obavi razmena toplote.

Razmenjivači toplote, u suštini, predstavljaju uređaje (aparate), koji su namenjeni za razmenu toplote između grejne i grejane radne sredine. Prema tome, u razmenjivačima toplote se vrši zagrevanje jednog fluida odnosno hlađenje drugog fluida ili promena agregatnog stanja fluida. Fluidi koji se najčešće koriste u razmenjivačima toplote mogu biti: kriogeni i rashladni fluidi, gasovi, različite vrste ulja, rastvori, tečni metali, voda i vodena para. lit. [42], [43], [46].

U mnogim granama tehnike kao što su: prehrambena industrija, energetika, hemijska industrija, metalurgija, naftna industrija, javlja se potreba da se izvrši razmena toplote između različitih nosilaca toplote. Nosioци toplote se posmatraju kao radne sredine, čiji su najčešći predstavnici fluidi, između kojih se razmenjuje toplota, lit. [42], [43], [46].

S obzirom da se toplota jednog fluida može predavati na više fluida i obrnuto, očigledno je da u samim procesima razmene toplote može učestvovati više nosilaca toplote. Toplotni procesi, koji se odvijaju u razmenjivačima toplote mogu biti veoma različiti, a najčešći su: ključanje, kondenzacija, zagrevanje, hlađenje, isparavanje, topljenje i složeni procesi koji predstavljaju kombinaciju prethodno nabrojanih. lit. [42], [43].

Razmenjivači toplote mogu se podeliti u dve velike grupe: prema principu dejstva: *površinski i sa mešanjem* i prema nameni. lit. [42], [43].

Razmenjivači toplote se prema nameni mogu podeliti na: kondenzatore, isparivače, hladnjake i zagrejače, uparivače, kristalizere, zamrzivače i razmrzivače.

Prema načinu rada razmenjivači toplote dele se na:

1. mešne
2. regenerativne
3. rekuperativne
4. sa unutrašnjim izvorom toplote

Kod *mešnih* razmenjivača toplote razmena toplote obavlja se mešanjem i to u direktnom kontaktu dva ili više fluida različitih temperatura.

*Regenerativne* razmenjivače toplote kaarakteriše da se razmena toplote obavlja preko čvrstih površina koje u različitim vremenskim intervalima najpre akumuliraju toplotu od toplijeg fluida, a zatim predaju toplotu hladnijem fluidu. Upoređujući smer toplotnog protoka kod rekuperativnih i regenerativnih razmenjivača toplote, može se zaključiti da je kod rekuperativnih razmenjivača toplote u svakoj tački površine razmene toplote smer toplotnog protoka isti, dok kod regenerativnih razmenjivača se smer toplotnog protoka menja u raznim periodima razmene toplote, lit. [42], [43], [46].

*Rekuperativne* razmenjivače toplote karakteriše da se razmena toplote obavlja kroz čvrstu pregradu (zid), pri čemu se sam proces razmene toplote između dva fluida izvodi istovremeno. Proces prenosa toplote sastoji iz dva poznata procesa i to *konvekcije* sa grejnog fluida na zid i sa zida na grejani fluid i jednog procesa *kondukcije* u zidu razmenjivača.

Kod razmenjivača toplote se prelaz toplote sa jednog operativnog fluida na pregradu obavlja preko površine za razmenu toplote koja je poznatog oblika i dimenzija, tako da se ovaj tip rekuperativnih i regenerativnih razmenjivača toplote naziva površinskim razmenjivačima toplote. Razmena toplote između nosilaca toplote može da se odvija u neprekidnom režimu, ali i na principu periodičnog (prekidnog) dejstva. Rekuperativne razmenjivače toplote karakteriše neprekidni režim, dok regenerativne razmenjivače toplote karakteriše kako princip neprekidnog režima tako i princip rada prekidnog dejstva.

Ukoliko se razmena toplote obavlja između grejnog tela više temperature i radnog fluida u razmenjivaču toplote, reč je o razmenjivačima toplote sa unutrašnjim izvorom. Radni fluid apsorbovanu toplotu iznosi trenutno ili sa kašnjenjem u okolinu. Grejna tela više temperature su na pr. električni grejači. Podela razmenjivača toplote može se izvršiti i prema tipu temperaturskog polja kao i prema načinu prenosa toplote sa jednog na drugi radni fluid, pri čemu je ova podela izvršena na osnovu funkcionalno tehničkih rešenja. lit. [42], [43], [46].

Razmenjivači toplote prema tipu temperaturskog polja mogu biti: šaržni uređaji i protočni uređaji.

Šaržni uređaji su takvi uređaji kod kojih jedan fluid miruje u rezervoarskom prostoru, a drugi fluid kontinualno struji kroz grejno telo razmenjivača, a kompletan proces se odvija u nestacionarnom temperaturskom režimu.

Protočne uređaje karakteriše da kroz njih kontinualno protiču radni fluidi pri konstantnim vrednostima protoka i ulaznih temperature, i za razliku od šaržnih uređaja, rade u stacionarnom temperaturskom režimu.

Na osnovu načina strujanja kroz uređaj, protočni razmenjivači toplote, mogu biti:

- razmenjivači sa istosmernim (paralelnim) strujanjem radnih fluida
- razmenjivači sa suprotnosmernim strujanjem radnih fluida
- razmenjivači sa unakrsnim strujanjem fluida u jednom prolazu
- razmenjivači sa unakrsnim strujanjem radnih fluida u više prolaza.

Strujanje fluida u razmenjivačima toplote može da se odvija kombinacijom prethodnih načina strujanja i tada je reč o razmenjivačima toplote sa složenom šemom strujanja radnih fluida. Step en iskorišćenja razmenjivača toplote, je jedna od bitnih karakteristika razmenjivača toplote, pri čemu presudnu ulogu ima i izbor načina strujanja radnih fluida. Ako se razmenjivači toplote upotrebe pri procesu ključanja ili kondenzaciji jednog nosioca toplote, u tom slučaju se može postići isti step en iskorišćenja za sve tri vrste razmenjivača. Najbolje rezultate u pogledu step ena iskorišćenja pokazuje suprotnosmerni, zatim unakrsni, a najlošije istosmerni. lit. [42], [43].

Šema strujanja radnih fluida utiče i na proračunatu vrednost površine za razmenu toplote. Za iste radne uslove razmenjivači sa suprotnosmernim strujanjem imaju najmanju površinu, a razmenjivači sa istosmernim (paralelnim) strujanjem imaju najveću površinu.

Potrebna površina za razmenu toplote ostalih mogućih šema strujanja se nalazi između ove dve granične vrednosti.

Klasifikacija razmenjivača toplote prema njihovom temperaturskom radnom režimu je izvršena na sledeći način:

- visokotemperaturski razmenjivači, koji se upotrebljavaju pri procesima sagorevanja sa radnim opsegom od 400 [°C] do 2000 [°C].
- srednjetemperaturski razmenjivači, koji se upotrebljavaju u procesima zagrevanja, kondenzacije i isparavanja sa radnim opsegom od 150 [°C] do 400 [°C].
- niskotemperaturski razmenjivači, koji se upotrebljavaju u procesima zagrevanja, hlađenja, kondenzacije, isparavanja, uparavanja i topljenja, kao i pri procesima, koji se odvijaju u sistemima grejanja, hlađenja i klimatizacije sa radnim opsegom od -150 [°C] do 150 [°C].
- Kriogeni razmenjivači, čine grupu razmenjivača toplote u kojima se procesi odvijaju na temperaturama nižim od -150 [°C].

O svim dodatnim podelama razmenjivača toplote i značajnijim pitanjima u vezi sa njima može se naći u lit. [42], [43], [46].

Razmenjivači toplote imaju široku primenu u različitim granama tehnike tako da bez obzira na princip dejstva mogu imati i specifične nazive, koji su određeni kako njihovom tehnološkom namenom tako i konstruktivnim osobenostima. Sa stanovišta termotehnike svi razmenjivači toplote imaju istu namenu, a to je da prenosu toplotu sa jednog nosioca toplote na drugi.

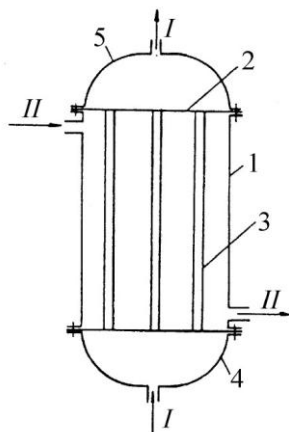
Hod razmenjivača toplote predstavlja put koji pređu nosioci toplote do promene smera strujanja. Prema broju hodova razmenjivači toplote se mogu podeliti na jednorodne, dvorodne, itd. Ako se razmena toplote obavlja između više struja, razmenjivač toplote se naziva višestrujnim, a ako se razmena toplote obavlja između dva nosioca toplote radi se o dvostrujnim razmenjivačima toplote. lit. [37],[42], [43].

Podelu razmenjivača toplote na osnovu načina prenosa toplote karakteriše način na koji se proces prenosa toplote obavlja. Najčešće je u pitanju proces prelaza toplote konvekcijom. Prema ovom kriterijumu, podela je izvršena na sledeći način:

- razmenjivače sa konvekcijom sa obe strane površine za razmenu toplote,
- razmenjivače sa konvekcijom sa jedne, a isparavanjem ili kondenzacijom sa druge strane površine razmene toplote,
- razmenjivače sa isparavanjem ili kondenzovanjem sa obe strane. lit.[37],[38],[42], [43].

Na slici 3.1. prikazan je razmenjivač toplote koji se često upotrebljava, a radne karakteristike su: jednorodni, dvostrujni, rekuperativni razmenjivač toplote. Osnovni elementi pomenutog razmenjivača toplote su: telo razmenjivača, cevna rešetka, cevi, ulazna komora, izlazna komora. lit.[46].

Pre upotrebe, analiziraju se karakteristike radnih fluida, kao i mogućnosti radnih fluida da zadovolje sledeće tehničke i ekonomske kriterijume: da ne dejstvuju na materijal razmenjivača toplote, da poseduju veliku toplotu isparavanja i veliku specifičnu toplotu, kao i da budu jeftini i prisutni u prirodnim resursima.

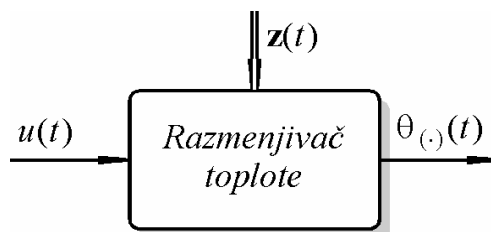


Sl. 3.1. Rekuperativni razmenjivač toplote

Nosioci toplote treba da budu hemijski neagresivni na višim temperaturama. Takođe, iskorišćenost razmenjivača toplote zavisi od debljine sloja naslaga na delovima konstrukcije razmenjivača toplote. Sa povećanjem debljine sloja naslaga smanjenju se koeficijent prelaza toplote. Radni fluidi pri malim pritiscima treba da imaju visoke temperature ključanja, da bi se znatno smanjile, površine potrebne za razmenu određene količine toplote. Eksploatacioni troškovi i troškovi ulaganja u proces proizvodnje u kojima se razmenjivač toplote koristi treba da budu što manji, radi ekonomičnosti primene izabranog razmenjivača toplote. lit.[43], [46].

Sa stanovišta automatskog upravljanja, razmenjivači toplote se razmatraju kao objekti i procesi, pri čemu se najčešće za izlazne veličine proglašavaju temperature odgovarajućih grejnih ili grejanih fluida.

Na slici 3.2. prikazan je dijagram procesa karakterističan za razmenjivače toplote.



Sl. 3.2. Dijagram procesa

Kao poremećajne veličine najčešće se usvajaju temperatura okoline ili temperatura zidova cevi i pregrada, nominalna brzina strujanja fluida i toplotni protoci nosilaca toplote. Međutim, prilikom izbora upravljačkih (regulišućih) veličina procesa u razmenjivačima toplote, vrlo često se uzima kao regulišuća veličina maseni protok, pa se to naziva tzv. "količinsko" regulisanje. Tada se promenom masenog protoka jednog radnog medijuma postižu željeni efekti na regulisanu veličinu - temperaturu osnovnog, referentnog nosioca toplote. Promene protoka se ostvaruju promenom položaja regulišućih organa, najčešće ventila, a u određenim slučajevima i žaluzinama i klapnama. Ponekad je moguće primeniti i druge načine regulisanja temperatura kod razmenjivača toplote kao što je, recimo, "nekoličinsko" regulisanje. Primenom električne struje koja prenosi signal izvršnom organu ili "on-off" tehnikom redoslednog uključivanja ili isključivanja rada izvršnog organa može se takođe vršiti regulacija temperature kod razmenjivača toplote. lit. [37],[38],[42],[43],[46].

Kod rekuperativnih razmenjivača toplote, proces razmene se obavlja preko površina čvrstih zidova, pri čemu količina razmenjene toplote zavisi od površine razmenjivača kao i od

razlike između temperatura jednog i drugog fluida. Proračun rekuperativnih razmenjivača se uglavnom svodi na rešavanje dva problema, i to: poznate su sve potrebne temperature fluida kao i njihovi toplotni kapaciteti, pa je potrebno odrediti veličinu grejne odnosno rashladne površine; poznata je grejna površina, toplotni kapaciteti i temperature oba fluida na ulazu, a potrebno je odrediti razmenjenu količinu toplote i krajnje temperature fluida.

Na sl.3.3. prikazani su, u stacionarnom stanju, uobičajeni dijagrami promena temperatura grejnog i grejanog fluida duž površine razmenjivača toplote za slučaj istosmernog (a) i suprotnosmernog (b) paralelnog toka. Veličina  $G(t) \cdot c_p = W(t)$  naziva se toplotna kapacitivnost fluidnog toka, gde je sa  $G(t)$  označen maseni protok fluida, a sa  $c_p$  označen je odgovarajući specifični toplotni kapacitet fluida. lit.[42], [43].

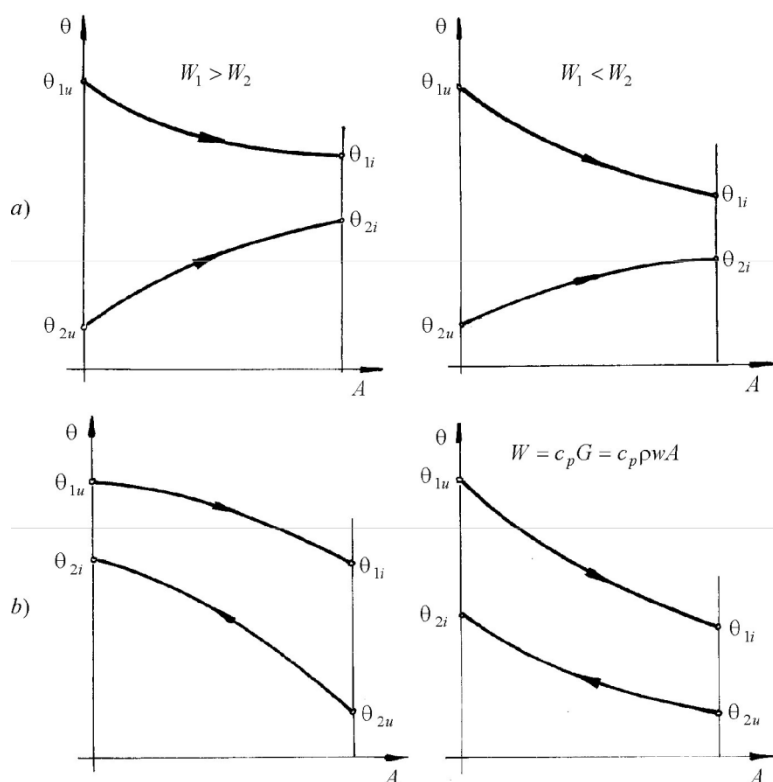
Ako su toplotne kapacitivnosti fluida i koeficijent prolaza toplote konstantne veličine, prilikom proračuna razmenjene količine toplote može se koristiti tzv. *srednja logaritamska razlika temperature* koja ima sledeći oblik:

$$\Delta\theta_{SRln}(t) = \frac{\Delta\theta_u(t) - \Delta\theta_i(t)}{\ln\left(\frac{\Delta\theta_u(t)}{\Delta\theta_i(t)}\right)}, \quad (3.1)$$

gde je:

$\Delta\theta_u(t)$  - promena ulazne temperature fluida, a

$\Delta\theta_i(t)$  - promena izlazne temperature fluida.



Sl. 3.3. Dijagram toka temperature grejnog i grejanog fluida

Razmenjena količina toplote se u tom slučaju izračunava na sledeći način:

$$Q(t) = k \cdot A \cdot \Delta\theta_{SRln}(t). \quad (3.2)$$

Koeficijent prolaza toplote, po teoriji, zavisi od temperatura na kojima se fluidi nalaze, tako da se njegov proračun, po preporuci, izvodi za srednju temperaturu fluida, pri čemu treba posvetiti posebnu pažnju o koeficijentima prelaza toplote za topliji i hladniji fluid. Ovakav postupak je u potpunosti opravdan u većini slučajeva. Međutim, ako su promene toplotne kapacitnosti fluidnog toka i koeficijenta prolaza toplote velike uvedene pretpostavke nisu opravdane. lit.[42], [43].

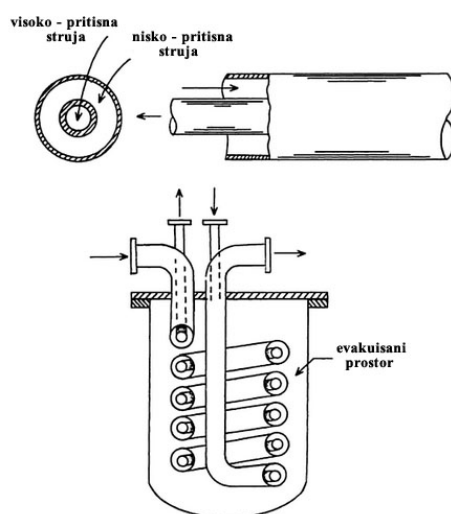
### 3.2. Kriogeni razmenjivači toplote

Razmenjivač toplote je glavna komponenta mnogih kriogenih sistema, kao što su utečnjivači i kriogeni hladnjaci. Vrlo često se dešava da iako razmenjivač toplote nije visoko efikasan, manje nego 50%, sistem će raditi, što je slučaj sa konvencionalnim sistemima kao što je regenerativni gas turbinskih elektrana. Međutim, kriogeni utečnjivač neće proizvoditi tečnost iako je efikasnost razmenjivača toplote manja nego približno 85%. Neke vrste toplotnih razmenjivača, koji se najčešće upotrebljavaju za kriogene usluge, će biti razmatrani. Ovi razmenjivači toplote uključuju Giauque-Hampson razmenjivače, pločasto orebreni razmenjivače i perforirane (izbušene) pločaste razmenjivače. Uzdužno provođenje toplote i promenljiv specifični toplotni kapacitet postaju veoma značajni za kriogene razmenjivače toplote sa visokim performansama.

Rekuperativni ili ne akumulirajući kriogeni razmenjivači toplote najčešće mogu biti klasifikovani kao cevasti razmenjivači, pločasto orebreni razmenjivači i perforirano pločasti razmenjivači. Osnovne karakteristike svake vrste će biti napomenute. Takođe, na kraju će biti reči i o prednostima i nedostacima regenerativnih kriogenih razmenjivača toplote, ali bez detaljnog upuštanja u razmatranje njihovih opisa i primena u kriogenoj tehnici.

#### 3.2.1. Cevasti razmenjivači toplote

Najprostiji cevasti razmenjivač toplote je koncentrični cevni ili dvostruko cevni razmenjivač toplote, sl.3.4.

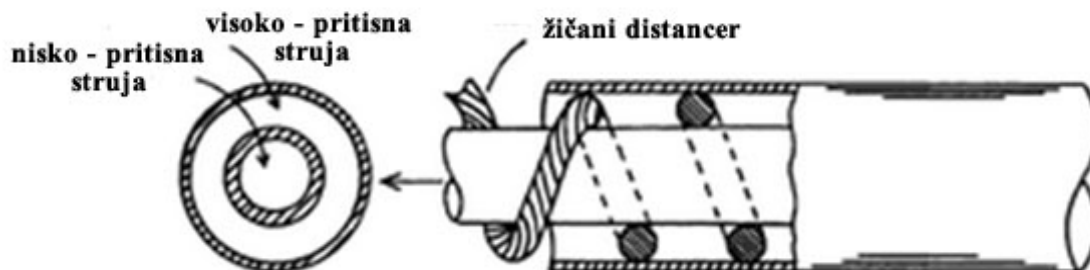


Sl. 3.4. Koncentrični cevni razmenjivač toplote



Razmenjivač toplote je bio preporučeno od Lindea, koji ga je upotrebljavao u njegovom originalnog utečnjivaču vazduha. Takođe, razmenjivač toplote se sastoji od male unutrašnje cevi u kojoj visoko pritisna struja protiče, koaksijalno sa većom cevi, i prstenastog (anularnog) prostora u kojem protiče nisko pritisna struja. Jedinica je namotana u helikoidnu spiralu radi očuvanja prostora. Namotaji su često postavljeni unutar neke ispražnjene posude da bi se smanjio prolaz toplote iz okoline.

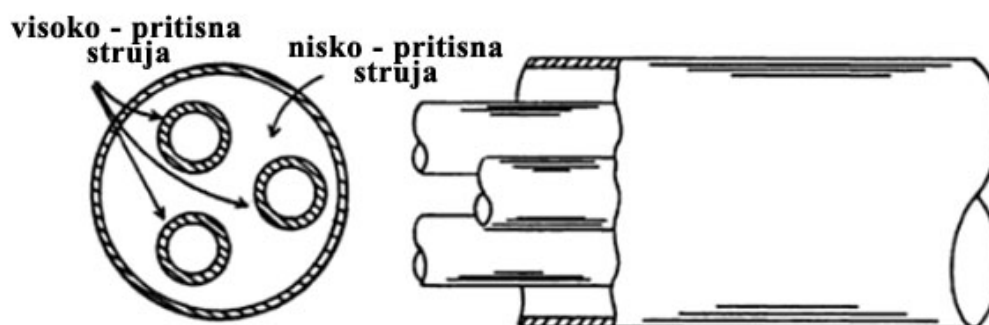
Žičani ili plastični distancer je spiralno namotan na unutrašnju cev koncentričnog cevnog razmenjivača toplote, prikazan na sl.3.5.



Sl.3.5. Koncentrični cevni razmenjivač toplote sa žičanim distancerom

Upotreba distancera omogućava unutrašnjoj cevi da bude fiksirana unutar spoljašnje cevi, tako da izaziva, da fluid u anularnom prostoru, struji dužom helikoidnom putanjom. Primenom ove konfiguracije povećava se brzine fluida, a samom tim i neko povećanje koeficijenta prelaza toplote u poređenju sa osnovnim koncentričnim cevnom razmeštajem (uređenjem). Takođe, upotrebom spiralnog distancera proističe neko povećanje pada pritiska fluida. Ovaj tip razmenjivača toplote se radi očuvanja prostora namotava u neku helikoidnu spiralu.

Kada je u kriogenim sistemima, potrebno da postoji razmena toplote između tri ili više struja (toka) primenjuje se višecevni razmenjivač, prikazan na sl.3.6.

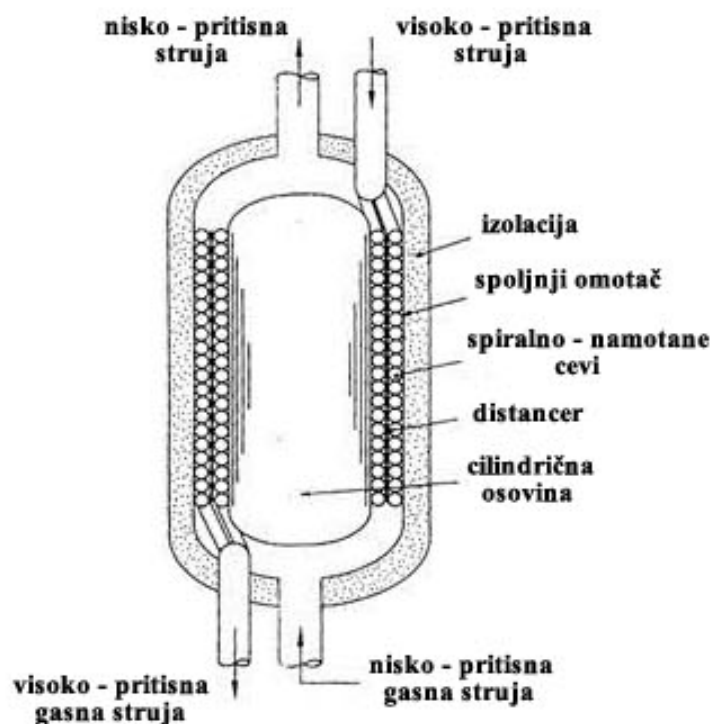


Sl.3.6. Višecevni razmenjivač toplote

Visoko pritisna struja struji u jednoj od malih cevi, srednje pritisna struja struji u druge dve male cevi, a nisko pritisna struja struji u prostoru između malih cevi i velike cevi. Distanceri, spiralni namotaji, radijalno orebrenje su elementi koji su bili upotrebljeni da oslone male cevi unutar velike cevi.

### 3.2.2. Giauque Hampson – razmatrani kriogeni razmanjivač toplote

Klasičan razmenjivač toplote, koji se koristi u velikim razmerama, gde se kao kriogeni fluid koristi vazduh, kao i u sistemima za utečnjavanje prirodnog gasa, je Giauque Hampson razmenjivač toplote, prikazan je na sl.3.7.



Sl.3.7. Giauque Hampson razmenjivač toplote

Razmenjivač toplote se sastoji od, cilindričnog jezgra ili osovine, koja obezbeđuje mehaničku stabilnost i podršku tokom proizvodnje i rada razmenjivača toplote. Oko osovine su spiralno namotane cevi malog prečnika u nekoliko slojeva, sa korakom koji najčešće odgovara spoljašnjem prečniku cevi. Slojevi cevi su odvojeni pomoću trake za razmak, a namotani su u suprotnom smeru. Pričvršćivanje cevi se vrši za zaglavlja, na oba kraja razmenjivača toplote, koja omogućavaju toku da bude doveden unutar ili izvan pojedinačne cevi razmenjivača. Prečnik na kojem se poravnanje manjih cevi dešava tokom navijanja oko osovine, definiše minimalni prečnik jezgra cilindra. Spoljašnji omotač, koji prileže na spoljašnju spiralu, omogućava da celokupna jedinica bude toplotno izolovana.

Giauque Hampson razmenjivače toplote karakteriše da nisko pritiska struja struji u poprečnom toku preko malih orebrenih cevi, u prstenastom prostoru između osovine i spoljašnjeg omotača, a visoko pritiska struja struji unutar malih cevi. U slučaju da se želi smanjenje pada pritiska usled trenja za visokopritisni tok vrši se namotavanje nekoliko slojeva cevi koji služe da obezbede višestruke paralelne putanje.

Razmenjivači toplote, koji su dobili naziv po Giauque Hampsonu, se koriste i za strujanja sa tri ili više toka struja, gde visoko pritiski i srednje pritiski tok, struji unutar malih

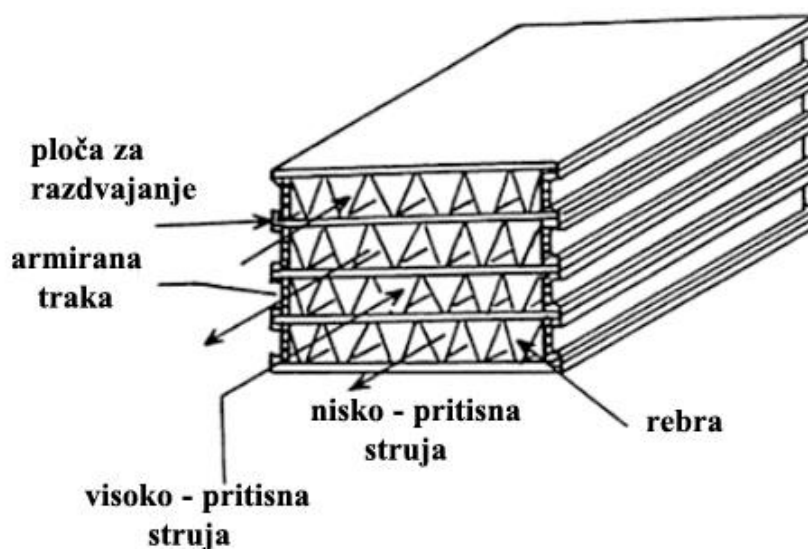
cevi. Dužina svakog prolazanja struje je obično ista od sloja do sloja, na osnovu čega se održava ravnomerni protok za struje koje protiču unutar malih cevi. Ovaj efekat se postiže preko varirajućeg helikoidnog koraka kod svakog uzastopnog (narednog) sloja.

Vrlo bitna karakteristika Giaque Hampson razmenjivača toplote je i obezbeđenje jednoličnog radijalnog razmaka malih cevi, jer u suprotnom, nisko pritisni tok će težiti da protiče putanjom preko najšireg razmaka ili najmanjeg otpora trenja. Prema tome, tok neće biti ravnomerno raspoređen preko poprečnog preseka razmenjivača toplote. Ovaj problem se rešava upotrebom izbušene mesingane trake za distancer, koju je predložio Giaque. Da bi se cev namotala između distancera i malih orebrenih cevi postavlja se tanka traka celuloze acetata, pri čemu se acetat rastvara acetonom, pošto se cevi namotaju, radi izvršenja izvodljivog nadgledanog rastojanja cevi.

### 3.2.3. Pločasto orebreni razmenjivači toplote

Pločasto orebreni razmenjivači toplote, prikazan na sl.3.8., se sastoje od talasasto (oblik etalona) izobličjenih metalnih listova koji su naizmenično naređani u slojevima. Talasasto metalni listovi su odvojeni pljosnatim metalnim razdvajajućim listovima (pločom).

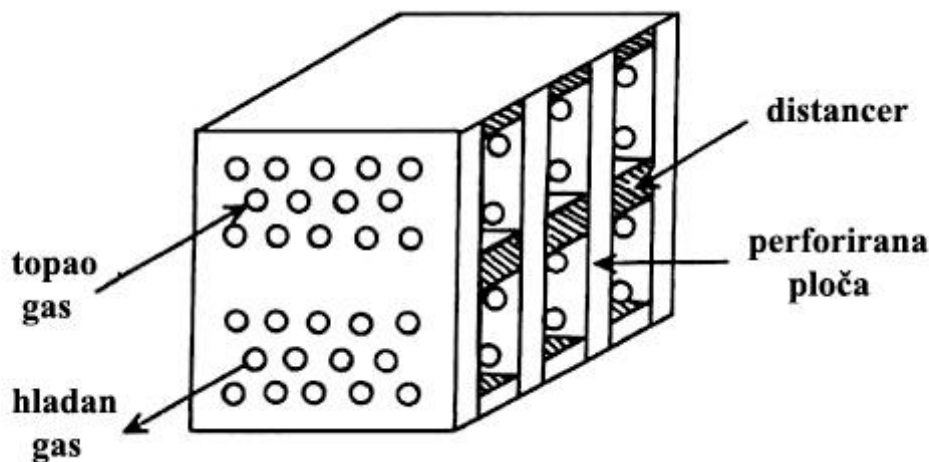
Na svakom kraju naređanog jezgra su zavarena ili zalemljena zaglavljia koja služe kao sabirnici ili razdelnici protoka orebrenih prolaza protoka. Rebra ili žljebovi mogu biti izvedeni na različite načine a najčešći su ravna rebra, talasasta rebra, rebra u obliku riblje kosti, testerasta rebra. Od načina na koji su naređani raznovrsni aranžmani rebara i žljebova zavisi i konfiguracija protoka pločasto orebrenog razmenjivača toplote, a koja može biti kao suprotan tok, poprečan tok i više prolazni razmenjivači toplote. Konfiguracija sa suprotnim tokom je najidealnija u kriogenim sistemima, jer za datu površinu prolaza toplote, daje najbolje toplotne performanse.



Sl.3.8. Pločasto orebreni razmenjivači toplote

### 3.2.4. Perforirani (izbušeni) pločasti razmenjivači

Na sl.3.9. šematski je prikazan perforirani (izbušeni) pločasti razmenjivač toplote.



Sl.3.9. Perforirani pločasti razmenjivač toplote

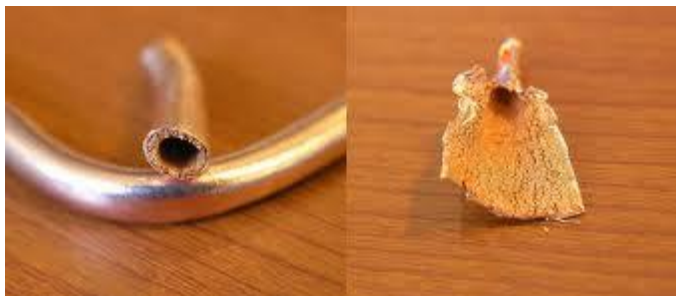
Perforirani pločasti razmenjivači, kao što im i sam naziv kaže su razmenjivači toplote, koji se sastoje od niza paralelnih perforiranih ploča. Perforirane ploče su izrađene najčešće od aluminijuma ili bakra tj. od metala sa osnovnom karakteristikom visoke toplotne provodljivosti. One su odvojene pomoću distancera ili zaptivača od kojih se zahteva da imaju nisku toplotnu provodljivost i da spreče curenje između dve struje, tako da su vezani (zaptiveni) do perforiranih ploča. Da bi se ublažio problem uzdužnog provođenja raniji modeli perforiranih pločastih razmenjivača su koristili plastične materijale za distancere. Modeli novije generacije koriste distancere od nerđajućeg čelika da ostvare bolju mehaničku pouzdanost. Kod perforiranih pločastih razmenjivača toplote najčešće se koristi konfiguracija suprotnosmerni tok. Perforacije rupe koje se prave unutar ploče su prečnika raspona od 0.4mm do 1.5mm tako da obezbeđuju veliki koeficijent prelaza toplote. Toplotni i hidrodinamički granični slojevi ne postaju potpuno razvijeni unutar perforiranog otvora, jer je odnos debljine ploče (dužina otvora u ploči) i prečnika otvora reda 0.75, što rezultira u visokom koeficijentu prelaza toplote i odgovarajuće visokom faktoru trenja.

### 3.2.5. Sinterovani metalnim prahom razmenjivači toplote

U rashladnim sistemima vrlo često je ograničavajući faktor granica toplotne otpornosti, tako da za rešavanje tog problema moraju se koristiti razmenjivači toplote sa velikom površinom, obično sinterovani metalnim prahom. Uvođenje razmenjivača toplote od sinterovanih metala je od suštinske važnosti prilikom hlađenja nekih rastvora. Konstanta elastičnosti sinterovanog metalnog praha je samo nekoliko procenata zapremnske konstante elastičnosti.

Razmenjivači toplote sinterovani metalnim prahom koji rade pri veoma niskim temperaturama se proizvode presovanjem praha ili pahuljica, uglavnom srebra, bakra, platine,

a zatim grejanjem toga ispod  $H_2$ , plemenitog gasa ili u vakuumu. Pri sobnoj temperaturi površinska difuzija prouzrokuje formiranje grla, vezu između čestica pri vođenju metalnog suđera. Najznačajniji parametri sinterovanih razmenjivača toplote su toplotno provođenje, površina i lepljenje u njegovoj posudi. Da bi zadovoljili uslove eksploatacije, moraju se kvalitetno proizvesti metalno sinterovani suđeri, tj. mora se naći kompromis između velike površine (niske temperature sinterovanja) i dobre veze između čestica i posude, kao i visokog provođenja toplote sintera (visoke temperature sinterovanja). To se postiže kombinacijom presovanja i grejanja. Jedan tipičan presek cevi razmenjivača toplote sinterovan metalnim prahom prikazan je na sl.3.10.



Sl.3.10. Presek cevi razmenjivača toplote sinterovan metalnim prahom

### 3.2.6. Kriogeni (rekuperativni) razmenjivači toplote – konstruktivni problemi

Pri konstruisanju razmenjivača toplote, za kriogene namene, pojavljaju se problemi kojima se mora posvetiti posebna pažnja, jer postaju veoma značajni:

1. karakteristike fluida se značajno menjaju sa promenom temperature – variranje specifične toplote fluida je naročito značajno;
2. duž površine razdvajanja (pregrade) između dve struje dešava se uzdužno provođenje toplote– za kratke razmenjivače toplote, koji moraju imati visok stepen korisnosti, ovaj uticaj je posebno značajan;
3. smetnje pri raspodeli protoka – kod razmenjivača toplote visokog stepena korisnosti je najizraženije pogoršanje performansi usled raspodele protoka.

### 3.2.7. Kriogeni (regenerativni) razmenjivači toplote – prednosti i nedostaci

Najznačajnije prednosti regeneratora nad klasičnim rekuperativnim razmenjivačima toplote su:

1. kod regeneratora, površina koja se može ostvariti, za prenos toplote po jedinici zapremine je mnogo veća;
2. izrada regeneratora je znatno prostija nego rekuperatora. Prilikom izrade najjednostavnijeg oblika regeneratora, on se može sastojati, od cevi ili cevi koje su napunjene nekim materijalom, recimo olovnim šutom. Regeneratori za isti iznos prolaza toplote teže manjoj ceni nego rekuperatori.

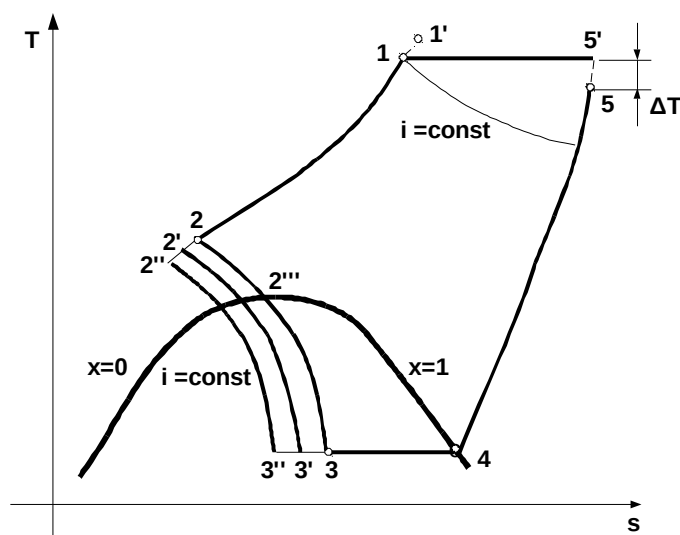
3. u uobičajenim rekuperativnim razmenjivačima toplote problemi sa naslagama nečistoče su znatno ozbiljniji nego u regeneratu. Kako je indentičan prolaz protoka, zbog naizmeničnog smera strujanja tople i hladne struje, regeneratori mogu da budu samočišćeći.

Najznačajniji nedostaci regeneratora, upoređeni sa rekuperativnim razmenjivačima toplote su:

1. tokom prebacivanja procesa uvek postoji neko mešanje toplih i hladnih struja. Ako je nešto postojalo u jednom trenutku ili mestu i nastavlja u drugom, ne može biti važno ako su dve struje od istog fluida, međutim, prekomerno mešanje načini degradaciju toplotnih performansi regeneratora.
2. pri dinamičkom zaptivanju curenje može postati primetno kod rotacionih regeneratora, pri čemu je ovaj problem naročito izražen kada su dve struje pri značajno različitim pritiscima.

### 3.3. Principijalna šema razmatranog mini sistema za hlađenje

Sistemi za hlađenje osetljivog elementa – detektora rade najčešće po sledećoj termodinamičkoj šemi, datoj na slici 3.11.



S1.3.11. Termodinamička šema rada JT – hladnjaka

Način rada sastoji se iz sledećih segmenata termodinamičkog ciklusa:

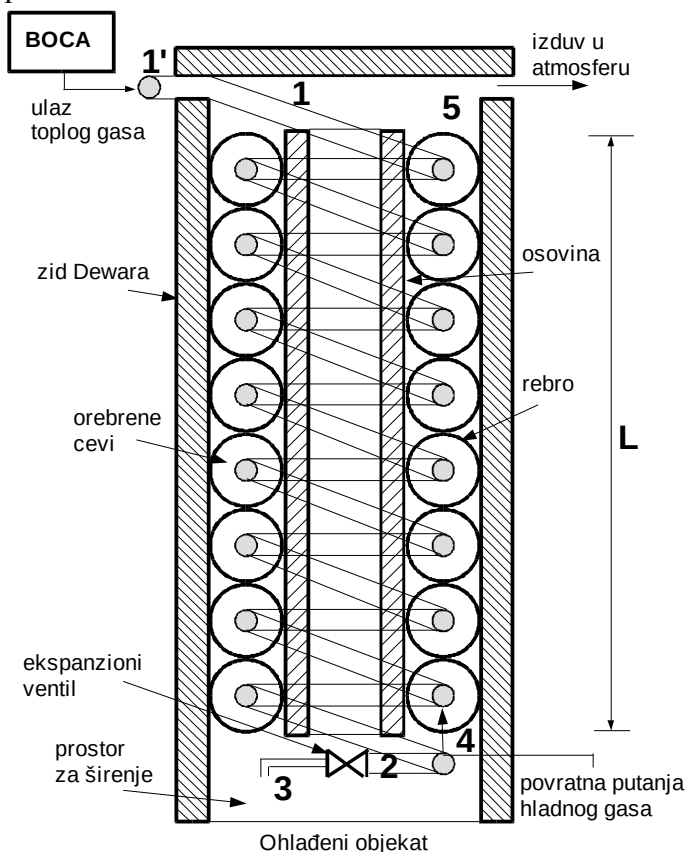
- 1' - 1 ekspanzija fluida (adijabatski proces)
- 1 - 2 odvođenje toplote - hlađenje fluida (politropski proces)
- 2 - 3 ekspanzija fluida (izentalpski proces)
- 3 - 4 izobarski proces (dovođenje toplote)
- 4 - 5 dovođenje toplote - zagrevanje fluida (politropski proces)

Na osnovu segmenata, koji su navedeni, elementi sistema koji izvršavaju sledeće procese su:

boca, razmenjivač toplote, mlaznica, komora za ekspanziju i prijem toplote od osetljivog elementa – detektora.

Na sledećoj slici 3.12., prikazan je sklop hladnjaka integrisan u Dewarovu posudu. Proces rada sistema započinje od fiksnog izvora - boca, koji je ograničenog kapaciteta radnog fluida. Takav sistem se koristi u realnim uslovima. U slučaju laboratorijskih uslova umesto fiksnog izvora koristi se kontinualni izvor koji je takođe ograničenog kapaciteta, tj. upotrebljava se kompresor. Boca kao izvor radnog fluida, potrebno je da zadovoljava postavljene uslove u pogledu veličine - zapremine, zahtevanog radnog pritiska i početne radne temperature. Realan gas, na putu od boce do ulaza u razmenjivač toplote, ne vrši nikakvu razmenu toplote sa okolinom. U laboratorijskim uslovima ako je potrebno vrši se izolacija cevi, dok u realnim ta dužina cevi je mala, te se smatra da nema razmene toplote sa okolinom tj. proces je adijabatski. Proračun pada pritiska usled lokalnih otpora, suženja na izlazu iz boce i regulacionog ventila, i trenja koje je zavisno od preseka cevi i masenog protoka, potrebno je uraditi. Poprečni presek cevi od boce do ulaza u razmenjivač toplote se bira tako da gubici usled pada pritiska budu minimalni.

Razmenjivač toplote, u koji fluid dolazi sa stanjem 1, se hladi tj. vrši se odvođenje toplote do stanja 2, a to je stanje pred ulazak u mlaznicu. Ovaj deo se naziva visokopritisni deo razmenjivača toplote.



Sl.3.12. Sklop hladnjaka integrisanog u Dewarovu posudu

Proces koji se dešava od stanja 1 – 2 je politropski. U zavisnosti od protoka, takođe se vrši izbor poprečnog preseka cevi, da bi pad pritiska bio minimalan, tj. da bi fluid sa maksimalnim mogućim pritiskom došao do stanja 2 ispred mlaznice.

Na stanje 2 može se uticati na različite načine: promenom protoka, promenom pritiska ili promenom konfiguracije razmenjivača toplote. Pošto je za dati hladnjak konfiguracija konstantna, promenom protoka može se tačka 2 na termodinamičkoj šemi pomeriti u stanje 2',2" itd. Pomenuta stanja odgovaraju procesu kada je protok smanjen. Kada se protok povećava, tada se izlazna tačka visokopritisne strane nalazi desno od posmatrane tačke 2. Promena pritiska ima takođe veliki značaj jer smanjenjem pritiska pri konstantnom protoku izlazna tačka visokopritisne strane razmenjivača toplote, na kraju procesa razmene toplote, se pomera desno u odnosu na posmatranu tačku 2.

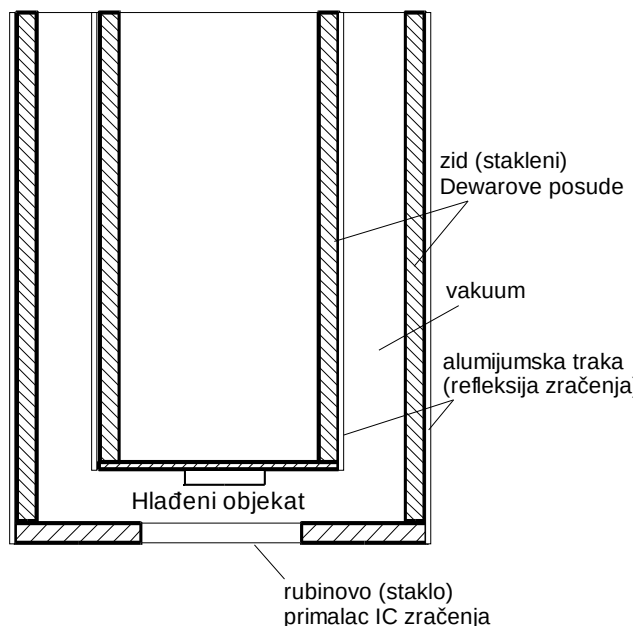
Fluid sa stanjem 2 ekspandira adijabatsko-izentalpski do stanja 3. Ekspanzija se vrši u komori tj. prostoru za širenje pokazanom na sl. 2.14. Stanje 3 se nalazi u oblasti dvofazne mešavine, sa odgovarajućim stepenom suvoće pare  $x$ . Parametar  $x$  definiše direktno masu tečne faze, a indirektno maseni protok tečne faze. To je najvažniji parametar sistema za hlađenje.

Od stanja 3 - 4 je izobarski proces dovođenja toplote, koji se, takođe kao i ekspanzija, odigrava u komori. Taj proces karakteriše odvođenje toplote sa osetljivog elementa tj. detektora. Usled odvođenja toplote sa osetljivog elementa, tj. dovođenja toplote gasu, vrši se njegovo isparavanje, koje je u stacionarnim uslovima, određeno kao potpuno isparavanje tečne faze. Proces isparavanja može biti sa odgovarajućom brzinom fluida-prinudno isparavanje, a može biti i prirodno isparavanje. U komori se, takođe, mogu dešavati vihorna, vrtložna strujanja koja potpomažu proces isparavanja. Pritisak isparavanja, definisan je padom pritiska od stanja 4-5.

Od stanja 4-5 je proces politropski sa dovođenjem toplote. Ovaj deo se naziva niskopritisni deo razmenjivača toplote. U ovom delu fluid struji između rebara, povećavajući brzinu strujanja. Stanje 5 vrlo često pretstavlja izlaz u atmosferu. Na sl. 2.13. se može zapaziti stanje 5' definisano razlikom temperatura  $\Delta T$ . Ona pretstavlja razliku između početne (ulazne) temperature visokopritisnog dela razmenjivača toplote i konačne (izlazne) temperature niskopritisnog dela razmenjivača toplote. Prema tome, razlika temperature  $\Delta T$  pokazuje stepen iskorišćenja razmenjivača toplote.

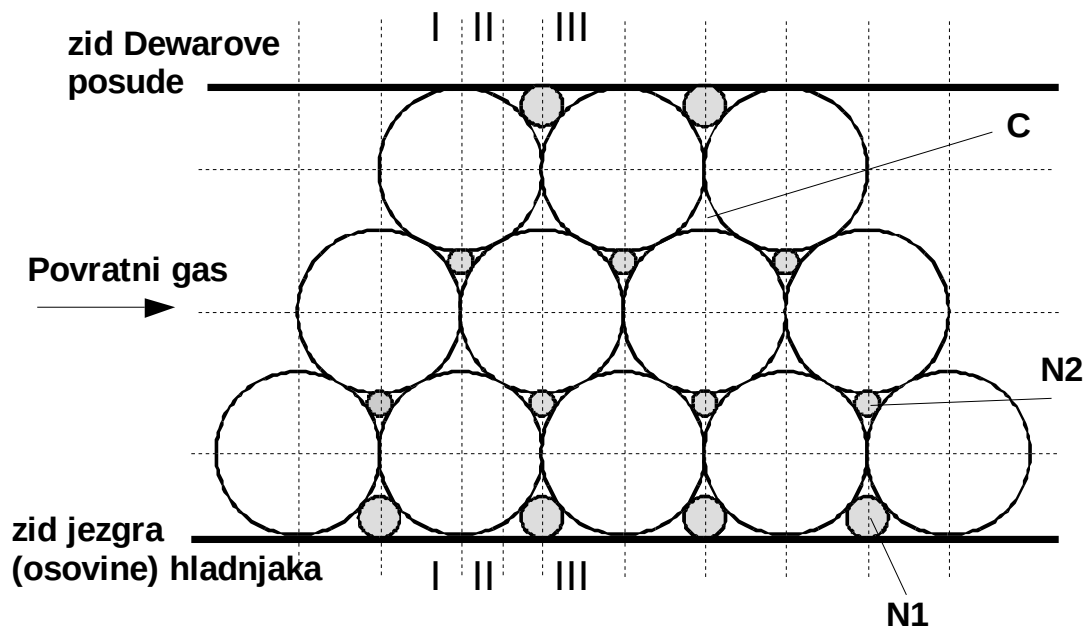
Na slici 3.13. prikazana je Dewarova posuda.





Sl.3.13. Dewarova posuda

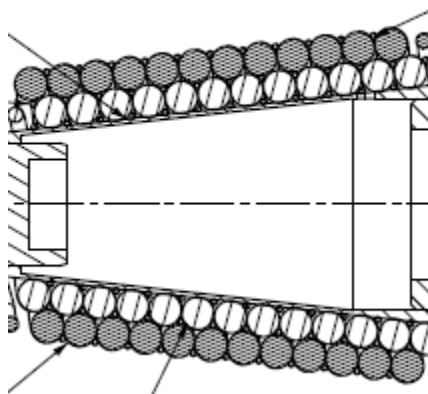
Ona je veoma značajan element sistema za hlađenje. Može biti izrađena od stakla ili od nerđajućeg čelika (monel), tj. od materijala sa malim koeficijentom provođenja toplote. Između zidova dewarove posude nalazi se vakuum, da bi se sprečilo provođenje toplote kondukcijom. Sa obe spoljašnje strane zida dewara postavlja se tanak sloj aluminijuma, radi sprečavanja apsorpcije zračenja, tj. zagrevanja usled zračenja. Sa donje strane dewara postavlja se rubinovo stakla koje predstavlja prijemnika IC zračenja, tj. predstavlja IC propustan prozor.



Sl.3.14. Uzdužni presek trorednog ravnog hladnjaka

Na slici 3.14. prikazan je uzdužni presek trorednog ravnog hladnjaka tj. smer kretanja povratnog radnog fluida. Razmenjivač toplote je navijen na osovinu hladnjaka. Broj navojaka

odgovara dužini razmenjivača toplote. Prostor između susednih navojaka, kao i između susednih redova razmenjivača toplote, pokriva se sa zaptivnom kružnom trakom (nit), koja je označena na sl.3.14. N1 i N2. Prostor koji pokrivaju nije isti, te i poprečni preseki zaptivnih traka nisu isti, N1 veći od N2. Prostor, označen sa C, na slici 3.14., je isti koji zauzima i nit N1, ali nije ispunjen iz konstruktivnih razloga. Uloga zaptivnih traka je da obezbede strujanje radnog fluida preko rebara razmenjivača toplote. Prilikom strujanja fluida postoje tri karakteristična poprečna preseka I,II,III, koji su prikazani na slici 3.14., ali je najznačajniji onaj sa najmanjom slobodnom površinom, a to je poprečni presek I-I.



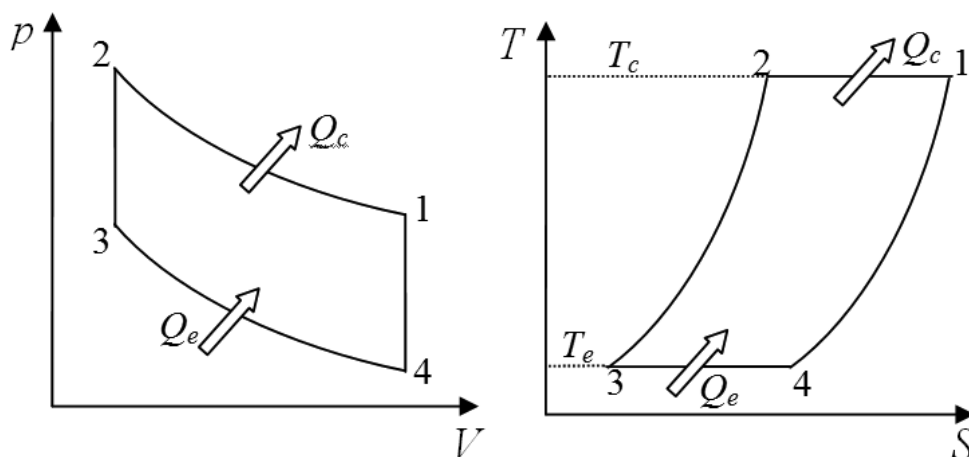
Sl.3.15. Uzdužni presek dvorednog koničnog hladnjaka

Na slici 3.15. prikazan je uzdužni presek dvorednog koničnog hladnjaka, kao mogućnost postojanja i drugačijeg uzdužnog preseka od ravnog. Koničnost obezbeđuje veći broj navojaka.

### 3.4. Različite mogućnosti sistema za hlađenje

Pored sistema za hlađenje JT mini-hladnjacima, postoje i sistemi koji se hlade Stirlingovim hladnjacima. Ovi hladnjaci su prilagođeni za operativni vek od preko 10000 sati, a postoje hladnjaci koji rade i do 30000 radnih sati, što je znatno duže nego kod JT mini-hladnjaka. Serija ovih hladnjaka je projektovana za kriogena hlađenja, pomoću gasa helijuma, sa električnim izvorom napajanja, što obezbeđuje kontinualan rad. Upotrebljavaju se u sistemima za noćna osmatranja, sistemima raketnog navođenja, kosmičkim tehnologijama i dr.

Na slici 3.16. prikazan je idealan Stirlingov (rashladni) ciklus u p-V i T-s dijagramu, koji je osnova rada Stirlingovih hladnjaka.



Sl.3.16. Idealan Stirlingov ciklus: p-V dijagram i T-s dijagram

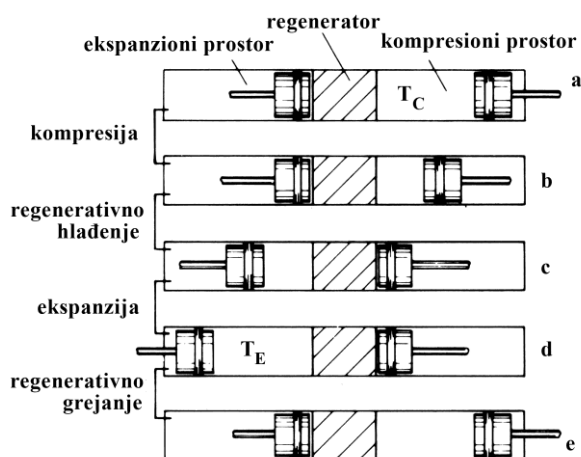
Proces se sastoji iz sledećih delova-segmenata:

- 1-2** izotermska kompresija (odvođenje toplote od gasa i predaja spoljašnjem ponoru – okruženju);
- 2-3** prelaz toplote pri konstantnoj zapremini (interni prelaz toplote od gasa na regenerator);
- 3-4** izotermska ekspanzija (dovođenje toplote od spoljašnjeg izvora – osetljivi element);
- 4-1** prelaz toplote pri konstantnoj zapremini (interni prelaz toplote od regeneratora na gas).

Prema tome, u ostvarivnju Stirlingovog ciklusa koristi se kompresor, regenerator i ekspander (komora za širenje gasa).

Performance i rashladni kapacitet hladnjaka sa Stirlingovim ciklusom zavise od različitih parametara uključujući odnos mrtvih zapremina, odnos radnih zapremina (prostora za kompresiju i ekspanziju), faznog ugla elektromotora i odnosa temperature (odnos izootermских temperatura).

Na slici 3.17. prikazan je položaj klipa u završnim tačkama delova idealnog ciklusa, a u daljem tekstu i objasniti osnovni princip rada, koji je osnova za konstruisanje Stirling kriogenih hladnjaka.



Sl.3.17. Položaj klipa u završnim tačkama delova ciklusa

Da bi se objasnio princip rada, analiziraće se cilindar koji sadrži dva suprotstavljena klipa, sa regeneratom između klipova. Regenerator (matrica fino podeljenog metala-metalna mreža), može biti zamišljen kao termodinamički sunder koji alternativno oslobađa ili apsorbuje toplotu. Zapremina između regeneratora i klipa koja održava visoku temperaturu  $T_C$  je kompresioni prostor, prikazan na sl.3.17.a, a zapremina između regeneratora i klipa koja održava nisku temperature  $T_E$  je ekspanzioni prostor, prikazan na sl.3.17.d. Pretpostavlja se da prilikom kretanja klipa nema trenja ili gubitaka usled curenja radnog fluida.

Na početku, pretpostavljeno je da je klip u kompresionom prostoru pri spoljašnjoj mrtvoj tački, a klip u ekspanzionom prostoru pri unutrašnjoj mrtvoj tački. Sav radni fluid je tada u zagrejanom kompresionom prostoru. Zapremina je maksimalna, temperatura takođe, a pritisak pri početnoj vrednosti, tačka 1, slika 3.16. Tokom procesa kompresije, kompresioni klip se kreće prema unutrašnjoj mrtvoj tački, a klip u ekspanzionom prostoru ostaje nepokretan, sl.3.17.b. Radni fluid se komprimuje u kompresionom prostoru, a pritisak se povećava. Temperatura se održava konstantnom, zato što toplota  $Q_C$  je odvedena iz kompresionog prostora cilindra i predata okruženju. U procesu 2-3 oba klipa se kreću istovremeno, kompresioni klip prema regeneratoru, a ekspanzioni klip se udaljava od regeneratora, tako da zapremina između njih ostaje konstantna. Međutim, radni fluid se prenosi, kroz matricu regeneratora, od kompresionog prostora do ekspanzione jedinice. U tom prolazu kroz regenerator, radni fluid je ohlađen od temperature  $T_C$  do  $T_E$ , slika 3.17.c. Temperatura opada pri konstantnoj zapremini, a samim tim opada i pritisak. U ekspanzionom procesu 3-4 ekspanzioni klip nastavlja da se kreće, udaljavajući se od regeneratora, prema spoljašnjoj mrtvoj tački, a kompresioni klip ostaje nepokretan, pri unutrašnjoj mrtvoj tački, blizu regeneratora, slika 3.17.d. U procesu ekspanzije, pritisak opada, a zapremina raste. Temperatura ostaje konstantna zahvaljujući toploti  $Q_E$  koja je dovedena sistemu od spoljašnjeg izvora. Konačni proces u ciklusu je proces 4-1, tokom kojeg se oba klipa kreću istovremeno, premeštajući radni fluid iz ekspanzionog prostora u kompresionu jedinicu, slika 3.17.e. U prolazu kroz matricu regeneratora, radni fluid dobija toplotu i pojavljuju se  $T_C$  unutar kompresionog prostora. Razlika između idealnog i realnog Stirling rashladnog ciklusa je: neefikasnost regeneratora, pad pritiska kroz regenerator, neizotemska kompresija i ekspanzija, konstantna temperatura klipa i zidova cilindra, itd.

Postoje dva tipa Stirling kriogenih hladnjaka: integralni Stirling kriogeni hladnjak i razdvojeni Stirling kriogeni hladnjak. Princip rada je isti, a razlika je u cilindričnoj osovini (hladnom prstu)-modulu za širenje, koji je u prvom slučaju integrisan sa kompresorskim modulom, a u drugom razdvojen od kompresorskog modula, pri čemu su oba tipa prikazana na slikama 3.18. i 3.19.



Sl.3.18. Integralni Stirling kriogeni hladnjak, lit.[59]



Sl.3.19. Razdvojeni Stirling kriogeni hladnjak, lit.[59].

Na kraju pomenuće se neke osnovne prednosti Stirling kriogenih hladnjaka: termodinamička efikasnost Stirling kriogenih hladnjaka je dosledno veća nego JT hladnjaka, kompresor za Stirling kriogeni hladnjak je tipično jednostavniji nego oni upotrebljeni za JT hladnjake, Stirling kriogeni hladnjak je tipično više kompaktni, ali osnovni nedostatak je cena i potreban prostor za ugradnju.

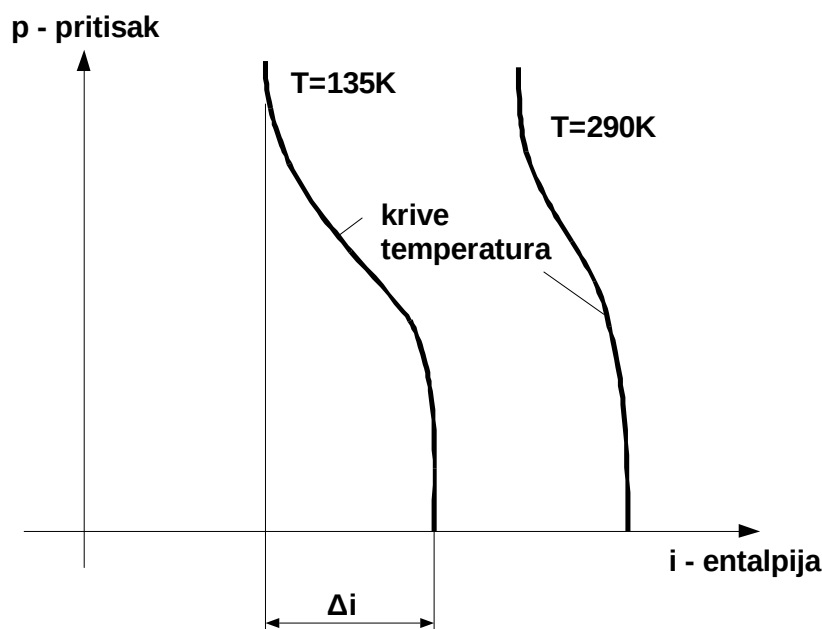
Za simulaciju i optimizaciju pojedinih delova Stirling rashladnog ciklusa, upotrebljava se softverski paket, kome je korisničko ime "SAGE". Odeljak 3.2. obrađem korišćenjem lit.[59]-[78].

## 4.0. TERMODINAMIČKE I GASOODINAMIČKE KARAKTERISTIKE KRIOGENIH SISTEMA

### 4.1. Osnovna termodinamička svojstva kriogenih fluida

Osnovna termodinamička svojstva kriogenih fluida, po čemu se razlikuju od idealnih gasova su promena entalpije pri konstantnoj temperaturi, a kod nekih i promena temperature pri konstantnom pritisku u dvofaznoj oblasti.

Na slici 4.1. prikazana je promena entalpije pri konstantnim temperaturama, koje su izražene u Kelvinima.



Sl.4.1. Promena entalpije pri konstantnoj temperature

Prethodna slika pokazuje da je promena entalpije pri konstantnoj temperaturi veća, što je temperatura niža. Takođe, promena entalpije pri konstantnoj temperaturi se povećava sa povećanjem pritiska. Pri relativno nižim pritiscima, i umereno povišenim temperaturama za kriogene fluide, oni se ponašaju kao idealni gasovi. Kod kriogenih fluida napred navedena svojstva se dešavaju pri različitim pritiscima i temperaturama. Na primer, argon ima veću promenu entalpije pri konstantnoj temperaturi od azota i vazduha.

Promena temperature pri konstantnom pritisku u dvofaznoj oblasti, recimo je karakteristika kriogenog fluida vazduha. Korišćenjem prvog principa termodinamike, jed. (2.21), može se napisati za kvazistatični proces i na sledeći način:

$$\delta q = du + p \cdot dv, \quad (4.1)$$

S obzirom da je  $dp = 0$  u dvofaznoj oblasti, jed. (2.21), se svodi na:

$$\delta q = dh. \quad (4.2)$$

Kako je  $\delta q = T \cdot ds$  dobija se:

$$T \cdot ds = dh. \quad (4.3)$$

Da bi se poslednji izraz integralio, potrebno je poznavati zavisnost  $T(s)$ . U praktičnim primenama, s obzirom da ta zavisnost nije data u tablicama te se i ne koristi, već je u tablicama data promena entropije od donje do gornje granične krive, na osnovu čega se određuje  $T_{sr}$ . Drugi način je da se na osnovu logaritamske srednje temperature, za stanje temperature na donjoj i gornjoj graničnoj krivoj, određuje promena entropije. Naravno, upotrebom ili  $T'$  ili  $T''$ , umesto  $T$ , sa poznatom promenom entropije, jed. (4.3), čini se odgovarajuća greška, koja nije veća od 5%, te se u nekim primenama može zanemariti. Razlika između temperatura  $T''$  i  $T'$  se smanjuje, sa porastom pritiska, te u dvojnjoj kritičnoj tački su jednake.

Na osnovu jed. (2.21) i jed. (4.1), a u skladu sa lit.[21], Klauzijus Klapejronova jednačina data je sledećim izrazom:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{s'' - s'}{v'' - v'}. \quad (4.4)$$

Poslednja jed. (4.4) važi za male promene veličine stanja pritiska ili temperature dvofazne mešavine, tj. za one promene pritiska dvofazne mešavine, pri kojima je promena  $s'' - s'$  i  $v'' - v'$  približno konstantna.

S obzirom da specifični toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku u dvofaznoj oblasti teži beskonačnosti kod fluida gde nema promene temperature u dvofaznoj oblasti, kod vazduha to nije slučaj. S obzirom da je po definiciji:

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p, \quad (4.5)$$

a, promena entalpije u dvofaznoj oblasti  $h = h' + r \cdot x$ , dobija se izraz za specifični toplotni kapacitet dvofazne mešavine:

$$c_{pm} = \left( \frac{\partial}{\partial T} (h' + r \cdot x) \right)_p = \left( \frac{\partial h'}{\partial T} \right)_p + \left( \frac{\partial h''}{\partial T} \right)_p \cdot x - \left( \frac{\partial h'}{\partial T} \right)_p \cdot x + r \cdot \left( \frac{\partial x}{\partial T} \right)_p, \quad (4.6)$$

i preuređivanjem poslednjeg izraza, može se zapisati:

$$c_{pm} = r \cdot \left( \frac{\partial x}{\partial T} \right)_p + (1 - x) \cdot c_{pt} + c_{pp} \cdot x. \quad (4.7)$$

## 4.2. Termodinamičke karakteristike uslova rada Džul-Tomsonovog minihladnjaka

Prilikom rada hladnjaka razlikuju se dva procesa, prelazni proces, koje se naziva cooldown i radni proces, koji se naziva trajanje hlađenja osetljivog elementa.

Proces, cooldown, je proces hlađenja sistema od početne temperature, najčešće okoline, do temperature radnog procesa, tj. procesa trajanja hlađenja.

Proces, trajanje hlađenja, je proces pri kome se održava zahtevana temperatura u određenim granicama, najčešće  $\pm 1 \div 1.5\%$ , od zahtevane temperature.

U daljem izlaganju će se analizirati dosadašnji rezultati (rešenja) po pitanju i jednog i drugog procesa, tj. cooldown-a i trajanje hlađenja.

## 4.3. Pregled do sada postignutih rezultata na polju izučavanja dinamike kriogenih razmenjivača toplote

U radu [79] je obrađen proces cooldown sa azotom i argonom kao radnim fluidom pri različitim početnim pritiscima, i izvršeno njihovo upoređivanje. Takođe je razmatrano vreme za koje se izvrši taj proces u zavisnosti od početnog pritiska, rashladni kapacitet u zavisnosti od temperature na hladnom kraju, promena masenog protoka i temperature u zavisnosti od vremena i izvršeno upoređivanje i za azot i za argon, kao i promena izlaznog pritiska u zavisnosti od masenog protoka.

U radu [80] je obrađen numerički prilaz, cooldown procesa, proračun performansi dvorednog razmenjivača toplote karakterističnog JT mini hladnjaka sa uticajem masenog protoka na stepen korisnosti razmenjivača toplote sa radnim fluidom azotom, i upoređen sa argonom. Takođe je obrađen zavisnost rashladnog kapaciteta od masenog protoka i upoređen sa argonom. Pokazan je profil pritiska i temperature, visokopritisne i niskopritisne strane, duž longitudinalnog smera razmenjivača toplote, , azota i argona i urađeno njihovo upoređivanje.

U radu [81] je pripremljena prefinjena geometrija neregulisanog JT mini hladnjaka, tipa Hampson, koja je analizirana i pripojena simulaciji, tako da je za model korisno pripremljen alat. Model je imao kratko vreme, cooldown procesa. Takođe u radu su dati izrazi za proračun karakterističnih parametara cooldown procesa. Rezultati su pokazali dobro slaganje numeričkog modela sa eksperimentalnim podacima.

Maytal u radu [82], je analizirao performanse idealnog strujanja regulisanog JT mini hladnjaka, tipa Hampson. Radni fluid je azot i argon. Predviđanja nisu bila realistična, zato što prenos toplote i mase između kriogenog fluida, zida cevi, Dewara i jezgra nisu bili razmatrani.

U radu [83], su simulirane prelazne karakteristike samo-regulišućeg JT mini hladnjaka, tipa Hampson. Međutim, ovaj članak je koncentrisan pre svega na razvoj samo-regulišućeg, JT mini hladnjaka-tipa Hampson, sa mehom kao upravljačkim mehanizmom.



U radu [84], je analizirana i procenjena efikasnost razmenjivača toplote JT mini hladnjaka, kao i performanse rekuperativnog razmenjivača toplote JT mini hladnjaka. Procena se zasniva na teoretičnom modelu suprotnosmernog razmenjivača toplote. Efekat pritiska i temperature-zavisne osbine i longitudinalno toplotno provođenje su razmatrani. Rezultati numeričke simulacije su potvrđeni sa odgovarajućim eksperimentalnim podacima.

U radu [85], su analizirana i prezentovana dva jedinstvena gledišta. Prvo, simulacija donosi podeljen pristup, a to je pripremljeno sa dinamičkim ažuriranjem termo-fizičkih osobina radnog fluida, argona, kada su vladajuće diferencijalne jednačine rešene istovremeno. Drugo, efekti propuštanja provođenja toplote u longitudinalnom pravcu razmenjivača su uključeni pored onih od okoline.

U radu [86] je analizirana upotreba mešavine kriogenih fluida za hlađenje elektronske komponente super provodnog detektora. Pokazano je da JT minihladnjak koji je koristio mešavinu kriogenih fluida ispunjava zahtevane uslove rada.

U radu [87] je takođe izvršena analiza, mogućnosti primene JT minihladnjaka, koji bi hladio niskotemperaturne detektore i elektroniku.

U radu [88] su upotrebljena dva tipa minijaturnih suprotnosmernih razmenjivača toplote. Prvi je klasični Hampsonov razmenjivač toplote, a drugi je modifikovani razmenjivač toplote sa izbušenom pločom, koji je bio razvijen od autora. U modifikovanom izbušenom razmenjivaču toplote, tanke nerđajuće cevi su upotrebljene kao pregrade koje su bile tradicionalno formirane difuzionim zavarivanjem. Izvršeno je upoređivanje ova dva razmenjivača toplote tokom rada JT minihladnjaka.

U radu [89] je analizirana zavisnost pritiska-maseni protok za dva JT minihladnjaka sa fiksnim otvorom. Jedan hladnjak je bio integrisan u Dewarovu posudu, dok drugi nije, pri čemu je onaj prvi imao veći protok od drugog. Eksperiment je sadržao ispitivanje na sobnoj temperaturi sa upotrebom azota i argona kao radnih fluida i upoređivanje dobijenih rezultata. Takođe, analizirana je i zavisnost pritiska i masenog protoka za četiri različita otvora mlaznice JT minihladnjaka.

U radu [90] je analiziran brz proces, cooldown, koji se obično sprovodi upotrebom JT krio hladnjaka, a koji omogućavaju jeftine i male sisteme. Dakle, analiziran je proces cooldown i njegovo vreme trajanja, od nekoliko sekundi, do postizanja temperature od 88K, koristeći argon kao glavni rashladni fluid, kao i nekoliko minuta trajanja procesa hlađenja. Čini se da u određenim uslovima, sa jednostavnim fiksnim otvorom mlaznice krio hladnjaka, mogu dostići performanse krio hladnjaka sa prehlađenim stanjem. Stoga prema zahtevima sistema, smanjenjem troškova, pouzdanost i proizvodna razmatranja upotrebom argona kao pojedinačnog rashladnog fluida, mogu biti bolja pri prehlađivanju sa drugim rashladnim fluidima, recimo kriptonom. Istraživanje je urađeno pomoću detaljnih numeričkih simulacija pri čemu su rezultati uspešno verifikovani sa eksperimentalnim podacima.

U radu [91] je razmatrana jedna od glavnih prednosti JT krio hladnjaka nad drugim krio hladnjacima, a to je sposobnost da se dobije vrlo brz cooldown, u rasponu od samo nekoliko sekundi. Rashladni fluid je odabran prema željenoj temperaturi hlađenja, i brz cooldown se dobija omogućavanjem velikog protoka tokom ovog prelaznog procesa. Primarno izvedeno hlađenje, može biti dodato da bi ohladilo glavni fluid i smanjilo vreme trajanja procesa cooldown, ali to ima cenu, upotreba posuda sa dva pritiska, kao i primena složenijih, većih kriohladnjaka. Brz proces, cooldown, je obično zahtevan, kada ukupno vreme hlađenja je relativno kratko, nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Onda, primena kriohladnjaka sa fiksnim otvorom je poželjna, spram gledišta (aspekta) proizvodnje i pouzdanosti. Međutim, protok kod kriohladnjaka sa fiksnim otvorom je određen pritiskom u izvoru rashlađivača. Tada, opadanje pritiska u izvoru rashlađivača, u toku rada, smanjuje protok, pritisak u isparivaču varira, a temperatura hlađenja se takođe menja. Da bi se smanjio protok odmah posle procesa cooldown, tj. za depresijaciju varijacije temperature hlađenja tokom stacionarnog rada, regulacioni sistem je neophodan. Dakle, u ovom radu je opisan razvoj novog kontrolora protoka, neizbežan patent, za brz proces cooldown kriohladnjaka, a time je olakšano praktično razmatranje. Novi kontroler protoka je konstruisan za minijaturne kriohladnjake, ima visoku pouzdanost, održavanje je prijateljsko, a obezbeđuje brzo smanjenje protoka posle procesa cooldown.

U radovima [92] i [93] predloženo je nekoliko koncepta upravljanja protokom baziranih na bimetalima.

U radu [94] je razmatrana budućnost brzog procesa, cooldown, kriogenih IC sistema koja leži u lakim, kompaktnim i jeftinim konstrukcijama, s obzirom da koriste savremene konfiguracije, materijale i procese masovne proizvodnje. Minijaturni Džul-Tomsonovi kriohladnjaci su idealno prilagođeni za aplikacije hlađenja koje zahtevaju duge periode skladištenja (10-15godina), brzo vreme procesa cooldown ( $< 30$  s), a kratku operativnu misiju ( $< 3$  min). Većinom, primena je za hlađenje navođenih senzora na raketama, projektilima, ili "pametnih" bombi gde okruženje: stanje temperature, ubrzanje, udar i vibracije su neprijatne, gde zapremina i težina moraju biti minimizovane, a gde niska cena je zahtevana za velike količine. Dakle, ovaj rad prezentuje osnove konstrukcije za brz proces cooldown, Dewara i Džul Tomsonovog kriohladnjaka sa LCD IDA (Low Cost Sensor Integrated Dewar Assembly) kao proučavani slučaj. Specifične teme uključuju: kompromise performansi mnogih termodinamičkih parametara, pristup sistemima procesa projektovanja, i skorašnjih testnih rezultata.

U radu [95] su razmatrane karakteristike, procesa cooldown, miniaturnog Džul Tomsonovog hladnjaka sa izvorom rashlađivača pod pritiskom, i to sa različitim početnim pritiscima gasa azota, pri čemu su bili eksperimentalno ispitivani. Pritisak snabdevanja i izlazni pritisak, temperature na površini kriostata, maseni protok su izmereni istovremeno da bi se analizirale karakteristike Džul Tomsonovog hladnjaka procesa cooldown sa izvorom rashlađivača pod pritiskom ili rezervoarom. Rezultati pokazuju efekte pritiska snabdevanja na temperaturu hladnog kraja Džul Tomsonovog hladnjaka. Upliv pritiska snabdevanja i temperature na maseni protok tokom perioda cooldown je detaljno diskutovano.

U radu [96] je razmatran rashladni kapacitet procesa cooldown Džul Tomsonovog hladnjaka koji zavisi od masenog protoka rashlađivača i njegove promene entalpije. Očigledno je da maseni protok kroz Džul Tomsonov hladnjak zavisi od pritiska snabdevanja, on raste kad raste pritisak snabdevanja. Osim toga, maseni protok raste dok temperatura hladnog kraja opada, kad pritisak snabdevanja se ne menja tokom procesa cooldown. U ovom proučavanju, karakteristike procesa cooldown, minijaturnog Džul Tomsonovog hladnjaka (fiksni otvor/minihladnjak sa dvostrukim strujanjem-protokom), sa različitim pritiscima gasa azota i argona, su eksperimentalno ispitivani. Za analizu karakteristika hladnjaka, procesa cooldown, pritiska snabdevanja i izlaznog pritiska, temperature na površini kriostata, i masenog protoka merenja su urađena istovremeno. Rezultati pokazuju efekte pritiska snabdevanja na performanse Džul Tomsonovog hladnjaka. Upliv pritiska snabdevanja i temperature na maseni protok tokom perioda cooldown je detaljno diskutovano.

U radu [97] su razmatrane mešavine kriogenih fluida koje se konvencionalno upotrebljavaju za zatvorene cikluse Džul Tomsonovog režima kriohlađenja. Ovde, potencijal mešavina kriogenih fluida se koristi za smanjenje operativnog pritiska. Brojna eksperimentalna i teorijska proučavanja zatvorenih ciklusa su izveštavana. Međutim, prioritetni sastavi mešavina za zatvorene cikluse pri niskim pritiscima nisu isti kao upotrebljeni za povišene pritiske otvorenih ciklusa. Povišeni pritisak punjenja je suštinski za režime kriohlađenja sa otvorenim ciklusom tako da to omogućuje da se čuva više kriogenih fluida u izvoru rashlađivača i produži misiju. Međutim, prijavljena iskustva sa otvorenim ciklusom, mešavine kriogenih fluida, su sasvim neobična. Tradicionalno, otvoreni ciklusi Džul Tomsonovih kriohladnjaka koriste čiste kriogene fluide, azot i argon za 80K i 90K opsega, sledstveno. Presentovano proučavanje je neka eksperimentalna demonstracija mešavine kriogenih fluida sistema sa otvorenim ciklusom za iste temperaturne opsege, pripremljene pri povišenim pritiscima. Ove mešavine kombinuju prednosti azota i argona: dostižu se niže temperature azota ali još uvek se brzo hladi kao argonom. Ispitivana mešavina uključuje više nego 80% azota (po zapremini) i ugljovodonika.

U radu [98] je razmatran tipičan režim Džul Tomsonovog kriohlađenja i korišćenje fiksnog otvora kroz koji posuda pod pritiskom se prazni. Presentovana analiza je bazirana na idealnom gasu, zapreminskom ponašanju sabijenog kriogenog fluida, linearizaciji pritiska u zavisnosti od kriogenog fluida, integralnog izotermnog Džul Tomsonovog efekta. Trenutni pritisak u izvoru rashlađivača i period rada su izvedeni za dva ekstremna režima pražnjenja, izotermki i adijabatski i neko politropsko pražnjenje između. Argon i azot su diskutovani rashlađivači. Model predviđa najduže ostvariva vremena rada a povezano sa optimalnim otvorima kao funkcije aktualnog toplotnog opterećenja i intenziteta Džul Tomsonovog efekta. Proces trajanje hlađenja degradira oštrije smanjenje optimalne veličine otvora nego proširenje. Istezanje otvora faktorom 5 ima prost degradacioni efekt kao skupljanje na pola svoje veličine, u oba slučaja prepolovi optimalno najduži period pražnjenja. U pogledu prekinutog pritiska (pritiska prestanka rada), optimalni otvor je onaj koji raskine (završi) vreme rada pri oko 60% od početnog pritiska u izvoru rashlađivača.

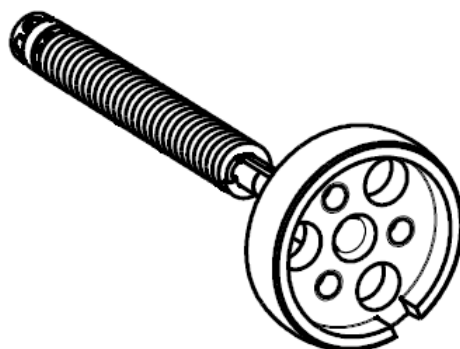
## 5.0. ODABRANI TERMODINAMIČKI I CIKLUSNI MODEL DŽUL-TOMSONOVOG MINI-HLADNJAKA SA FIKSNIM IZVOROM NAPAJANJA I OGRANIČENIM MASENIM KAPACITETOM RASHLADNOG FLUIDA

### 5.1 Tipovi rada Džul Tomsonovog mini hladnjaka

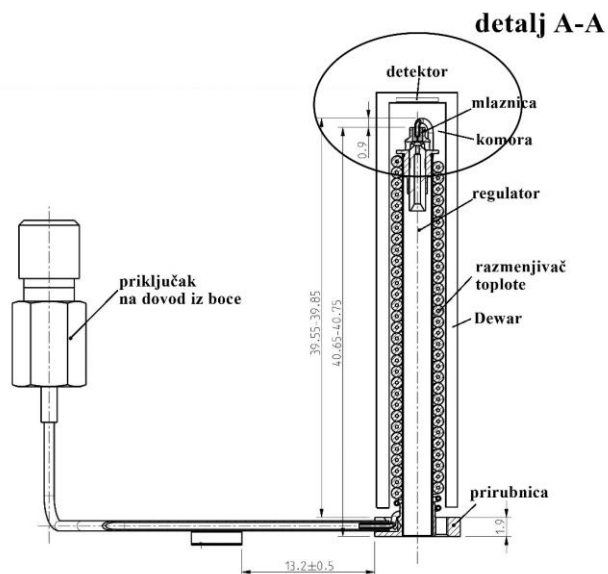
U praktičnim primenama, do skoro su se koristili tri tipa minihladnjaka: minihladnjak sa otvorenim ciklusom bez upravljanja, minihladnjak sa dvostrukim ciklusom, minihladnjak sa kontinualno upravljanim ciklusom, a od skoro i minihladnjaak sa diskretno (impulsno) upravljanim ciklusom. Prema tome, prikazani su izgled i poprečni presek za sva četiri tipa hladnjaka i u daljem izlaganju izvršeno njihovo osnovno objašnjenje i upoređivanje.

#### 5.1.1. Minihladnjak sa otvorenim ciklusom bez upravljanja (neregulisani miinihladnjak)

Minihladnjak sa otvorenim ciklusom bez upravljanja se karakteriše da nema sistem za regulaciju, i da po izvršenju procesa cooldown automatski nastavlja rad u sledećem procesu trajanje hlađenja. Radi toga, završetak procesa cooldown se smatra tačka pri kojoj se lomi kriva temperature detektora to jest gde oštar pad temperature, prelazi u znatno blaži. Karakteristično za ovaj hladnjak je da protok i posle procesa cooldown nastavlja da raste, što ima za posledicu da efikasnost razmenjiivača toplote pada. Međutim, taj protok ne može neograničeno da raste, već geometrija (konfiguracija) hladnjaka definiše maksimalni protok pri odgovarajućem pritisku. Proces trajanje hlađenja se zatim odigrava kontinualno, s tim da se temperatura pri kojoj radi detektor održava konstantnom pri konstantnom pritisku na ulazu u hladnjak. Ukoliko pritisak pada, pada i temperatura pri kojoj radi detektor. Temperatura pri kojoj radi detektor ima značajno veći opseg tolerancije nego kod ostalih tipova minihladnjaka. Vreme trajanja procesa, trajanje hlađenja, zavisi od protoka i veličine izvora rashlađivača (boce) iz koje se hladnjak snabdeva kriogenim fluidom. Na Sl.5.1. prikazan je izgled nekog konstruisanog minihladnjaka sa otvorenim ciklusom bez upravljanja, a na Sl.5.2. uzdužni presek nekog konstruisanog hladnjaka sa otvorenim ciklusom bez upravljanja.

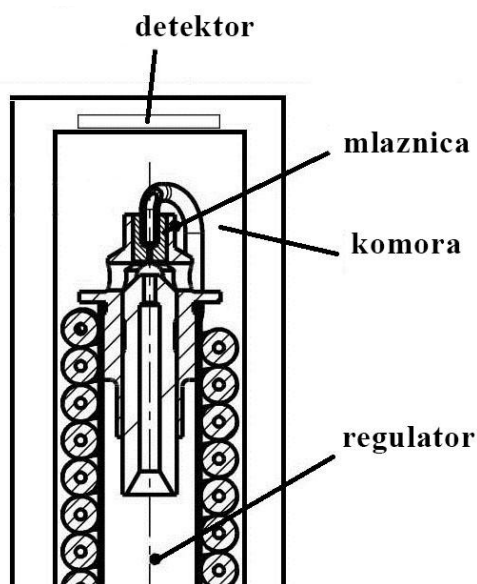


Sl.5.1. Izgled minihladnjaka sa otvorenim ciklusom bez upravljanja, lit.[59].



Sl.5.2. Uzdužni presek minihladnjaka sa otvorenim ciklusom bez upravljanja, lit.[59].

Na Sl.5.3. prikazan je detalj A-A sa Sl.5.2. koji predstavlja uvećani prikaz mlaznice u sklopu minihladnjaka sa otvorenim ciklusom bez upravljanja.



Sl.5.3. Prikaz mlaznice

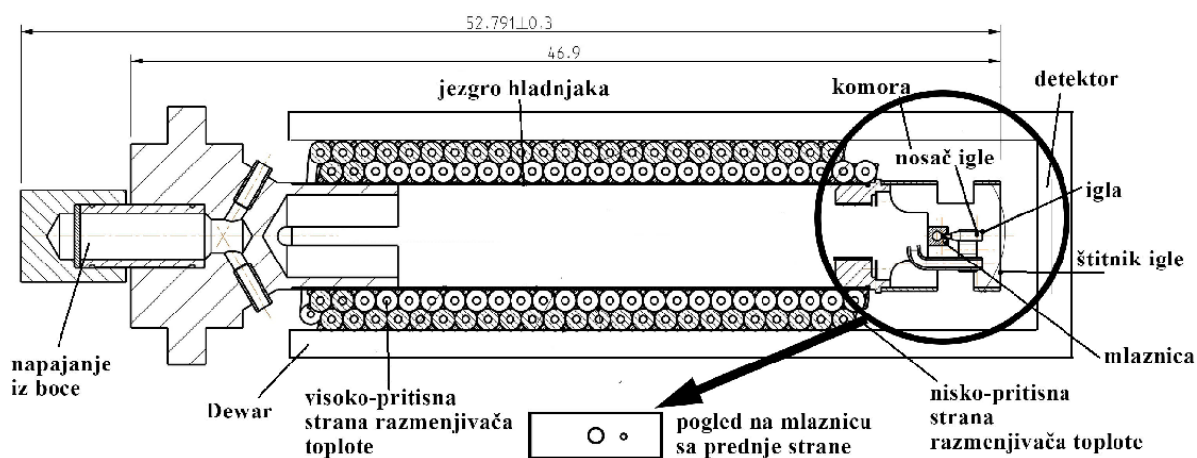
### 5.1.2. Minihladnjak sa dvostrukim ciklusom (dvostrukim strujanjem)

Minihladnjak sa dvostrukim ciklusom se karakteriše da ima ili sistem za regulaciju, ili sistem koji je zasnovan na bimetalu ili termostatu. Po izvršenju procesa cooldown automatski nastavlja rad u sledećem procesu trajanje hlađenja, pri čemu se završetak procesa cooldown smatra tačka pri kojoj se lomi kriva temperature detektora to jest gde oštar pad temperature,

prelazi u znatno blaži. Karakteristično za ovaj hladnjak je da protok posle procesa cooldown značajno pada, što ima za posledicu da efikasnost razmenjivača toplote raste. Sam proces cooldown se izvrši za nešto kraće vreme, nego kod minihladnjaka sa otvorenim ciklusom bez upravljanja. Proces trajanje hlađenja se zatim odigrava kontinualno, s tim da se temperatura pri kojoj radi detektor održava konstantnom pri konstantnom pritisku na ulazu u hladnjak. Ukoliko pritisak pada, pada i temperatura pri kojoj radi detektor, ali je ta promena temperature mala jer su promene protoka sa promenom pritiska male. Temperatura pri kojoj radi detektor ima značajno manji opseg tolerancije nego kod minihladnjaka sa otvorenim ciklusom bez upravljanja. Vreme trajanja procesa trajanje hlađenja zavisi od protoka i veličine boce iz koje se hladnjak snabdeva kriogenim fluidom, ali je značajno veći nego kod minihladnjaka sa otvorenim ciklusom bez upravljanja. Hladnjak može da bude izveden sa jednom ili sa dve mlaznice. Ako je sa jednom mlaznicom, mlaznica ima dva otvora. Na Sl.5.4. prikazan je izgled minihladnjaka sa dvostrukim ciklusom, a na Sl.5.5. uzdužni presek tog minihladnjaka sa dvostrukim ciklusom i dve mlaznice. Isti hladnjak je konstruisan i sa jednom mlaznicom.



Sl.5.4. Izgled minihladnjaka sa dvostrukim ciklusom, lit.[59].



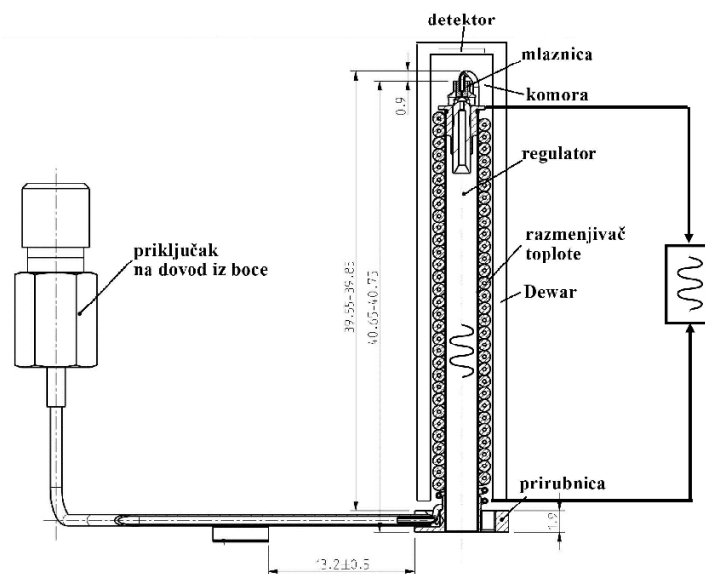
Sl.5.5. Uzdužni presek minihladnjaka sa dvostrukim ciklusom, lit.[59].

### 5.1.3. Minihladnjak sa kontinualno upravljanim ciklusom

Minihladnjak sa kontinualno upravljanim ciklusom (samo-regulišući hladnjak) se karakteriše da ima sistem za regulaciju, koja je zasnovan na mehu. Po izvršenju procesa cooldown, sistem za regulaciju hladnjaka ima vreme reagovanja, dok ne započne proces trajanje hlađenja sa regulacijom. Karakteristično za ovaj hladnjak je da protok posle procesa cooldown značajno pada, što ima za posledicu da efikasnost razmenjivača toplote raste. Proces trajanje hlađenja se zatim odigrava kontinualno, s tim da se temperatura pri kojoj radi detektor održava u zahtevanim granicama, za šta je zaslužan regulacioni mehanizam. Temperatura pri kojoj radi detektor ima značajno manji opseg tolerancije nego kod minihladnjaka sa otvorenim ciklusom bez upravljanja. Vreme trajanja procesa, trajanje hlađenja, zavisi od prosečnog protoka tokom regulacije i veličine boce iz koje se hladnjak snabdeva kriogenim fluidom, ali je značajno veći nego kod prethodno navedenih minihladnjaka. Na Sl.5.6. prikazan je izgled nekog minihladnjaka sa kontinualno upravljanim ciklusom, a uzdužni presek se razlikuje od preseka na Sl.5.2. jer je u hladnjak integrisan regulator, prikazan na Sl.5.7.



Sl.5.6. Izgled pasivno regulisanog (samo-regulišućeg) minihladnjaka, lit.[59].



Sl.5.7. Uzdužni presek minihladnjaka sa kontinualno upravljanim ciklusom, lit.[59].

Dati uzdužni presek, na Sl.5.7., minihladnjaka sa kontinualno upravljanim ciklusom, ne odgovara izgledu pasivno regulisanog (samo-regulišućeg) minihladnjaka, prikazanog na Sl.5.6.

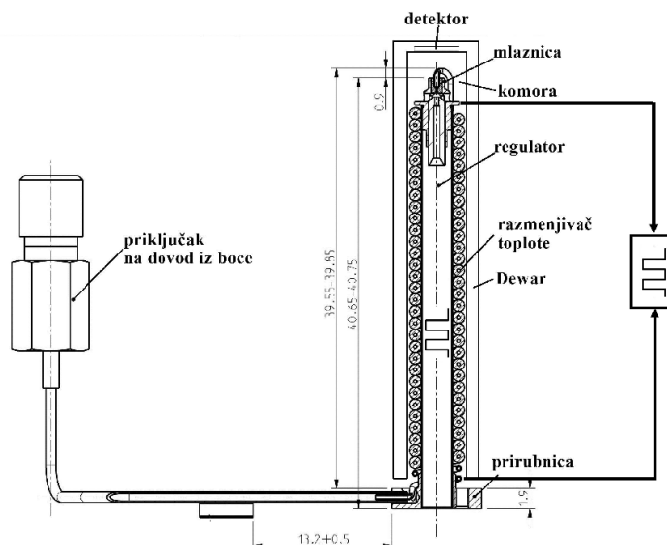
#### 5.1.4. Minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom (aktivno regulisan)

Minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom se karakteriše da ima sistem za regulaciju, koja je zasnovana na impulsnoj (PID+širinska modulacija) regulaciji. Po izvršenju procesa cooldown, sistem za regulaciju hladnjaka nema vreme reagovanja, već proces trajanje hlađenja započinje takoreći odmah. Karakteristično za ovaj hladnjak je da protok posle procesa cooldown značajno pada, što ima za posledicu da efikasnost razmenjivača toplote raste. Proces trajanje hlađenja se zatim odigrava kontinualno, s tim da se temperatura pri kojoj radi detektor održava u zahtevanim granicama, za šta je zaslužan regulacioni mehanizam. Temperatura pri kojoj radi detektor ima značajno manji opseg tolerancije nego kod minihladnjaka sa otvorenim ciklusom bez upravljanja, ali veći nego sa kontinualno upravljanim ciklusom. Vreme trajanja procesa trajanje hlađenja zavisi od prosečnog protoka tokom regulacije i veličine boce iz koje se hladnjak snabdeva kriogenim fluidom. Na Sl.5.8. prikazan je izgled minihladnjaka sa diskretno upravljanim ciklusom, a uzdužni presek tog minihladnjaka, se razlikuje od preseka na Sl.5.2. jer je u hladnjak integrisan regulator, prikazan na Sl.5.9.



Sl.5.8. Izgled diskretno (aktivno) regulisanog minihladnjaka, lit.[59].





Sl.5.9. Uzdužni presek minihladnjaka sa diskretno upravljanim ciklusom, lit.[59].

Zajednički elementi uzdužnih preseka svih gore pobrojanih minihladnjaka su: detektor, mlaznica, komora, razmenjivač toplote, Dewar, regulator, prirubnica, priključak na dovod iz boce. Uloga detektora je da primi IC zračenje i pretvori u odgovarajući električni signal. Mlaznica je element čija je uloga da omogući ekspanziju radnog fluida, a samim tim hlađenje gasa, gde veliku ulogu pri ekspanziji ima Džul-Tomsonov koeficijent. Komora je glavni element gde se dovodi ohlađeni gas, na osnovu čega se vrši razmena toplote sa detektorom, tj. omogućava hlađenje osetljivog elementa detektora. Razmenjivač toplote snižava temperaturu do one tačke pri kojoj se može izvršiti ekspanzija u dvofaznu oblast. Dewar je element koji omogućava povratni tok razmenjivača toplote, a takođe i sprečava priliv toplote, iz spoljašnje sredine, usled kondukcije i radijacije u sistem. Regulator, održava temperaturu i produžava proces trajanje hlađenja detektora. Prirubnica, čija je osnovna uloga da poveže dovodnu cev iz boce sa cevi razmenjivača toplote i omogući izlaz radnog fluida iz minihladnjaka, ukoliko minihladnjak naleže na zid Dewara. Priključak na dovod iz boce se koristi da se spoji sa dovodnom cevi iz boce, a samim tim i obezbedi dovod radnog kriogenog fluida u minihladnjak.

## 6.0. ODABRANI DŽUL-TOMSONOV MINIHLADNJAK ZA HLAĐENJE IC DETEKTORA NA ZADATOM VREMENSKOM INTERVALU

### 6.1. Prelaženje toplote sa i bez fazne transformacije

Razmena toplote kao osnova razrade matematičkom modela za funkcionisanje sistema obrađenog u ovom doktoratu uslovljena je takozvanim istovremenim delovanjem konvekcije i kondukcije i predstavljena je uglavnom modelima konvektivnog prenosa toplote.

U zavisnosti od uzroka koji izazivaju strujanje fluida, razlikuju se dva tipa konvektivne razmene toplote: slobodna i prinudna konvekcija. Razmena toplote između površine čvrstog tela i fluida koji se kreće usled mešanja izazvanog razlikom gustina hladnih i zagrejanih čestica fluida uglavnom spada u slobodnu ili prirodnu konvekciju. Razmena toplote između površine čvrstog tela i fluida koji se kreće pod dejstvom spoljašnjih sila naziva se prinudna konvekcija. Prilikom strujanja fluida mogu se javiti dva različita režima, laminarni ili turbulentni režim strujanja. U ovom doktoratu biće tretirani posebni slučajevi prinudne odvođenja toplote (konvekcije - hlađenje) i to pri laminarnom režimu strujanja.

U daljem radu biće razmotreni karakteristični slučajevi razmene toplote i mase, kao i karakteristični uslovi gaso termodinamičkih procesa koji prate strujne režime sa odgovarajućim termodinamičkim transformacijama.

#### 6.1.1. Prelaz toplote bez fazne transformacije

Pri strujanju jednofaznog fluida (u oblasti pregrejane pare), u literaturi se za kriogene procese mogu naći izrazi, koji određuju konvektivni koeficijent prelaza toplote. Timmershaus i Flynn, lit.[69], su predložili empirijske jednačine da procene koeficijent konvektivnog toplotnog prenosa za kriogeni proces u spiralnom cevovodu i to izrazom,:

$$\alpha = 0.023 \cdot c_p \cdot G_m \cdot \text{Re}^{-0.2} \cdot \text{Pr}^{-0.66} \cdot \left( 1 + 3.5 \cdot \frac{D_m}{D_{hel}} \right), \quad (6.1)$$

gde su:

$G_m$  [kg / m<sup>2</sup> · s] - masena brzina (maseni fluks),

$D_m$  [mm] - prečnik (unutrašnji) cevi,

$D_{hel}$  [mm] - prečnik spirale.

za turbulentno strujanje u uslovima visokog pritiska, kao i:

$$\alpha = 0.26 \cdot c_p \cdot G_m \cdot \text{Re}^{-0.4} \cdot \text{Pr}^{-0.66} \quad 2000 < \text{Re} < 32000 \quad (6.2)$$

za uslove niskog pritiska. U slučaju kada je u pitanju laminarni tok mogu se koristiti jednačine date u lit.[24],[26]. U ovom doktoratu, s obzirom da se razmatra režim koji odgovara procesu trajanja hlađenja i to pri visokim pritiscima, malim masenim protocima primenjenu su jednačine za laminarno strujanje rashlađivača.

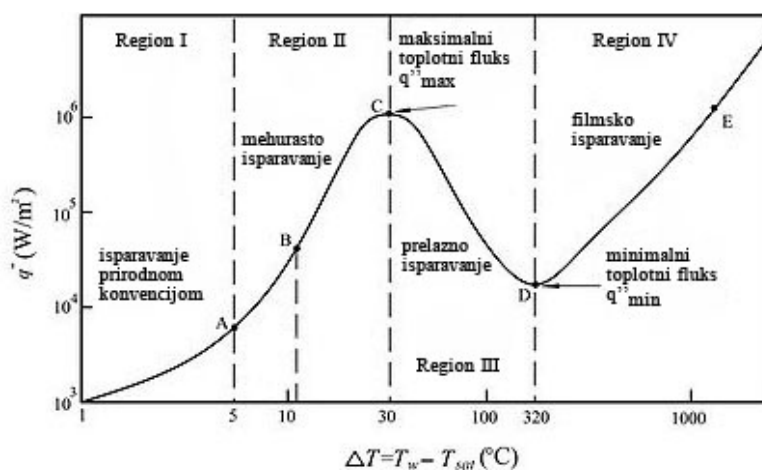
Pri određivanju Rejnoldsovog broja se uzima odgovarajući hidraulični prečnik dok se pri strujanju preko rashladnih prepreka određuje ekvivalentni ili perimetarski presek kao referentna protočna površina masenog fluksa.

Navedeni izrazi biće korišćeni u odgovarajućim segmentima sistema prilikom proračuna koeficijenta prenosa toplote.

### 6.1.2. Prelaz toplote sa faznom transformacijom (prenos toplote isparavanjem)

Kada se proces odigrava u toku konvektivnog prelaza toplote a praćen je isparavanjem dakle promenom faze tada se takav prelaz toplote zove prelaz toplote sa faznom transformacijom. Ovaj način pretstavlja suštinu procesa koji se odigrava kao željena funkcija na detektoru i za koju je sistem projektovan i podešen radi izvršenja zadatka hlađenja. Termodinamički uslovi pothlađivanja i isparavanja rezultat su optimizacije ciklusa i komponenata sistema koje učestvuju u njemu, pa je stoga važno uočiti da postoje dve glavne kategorije isparavanja, i to:

- isparavanje u velikoj zapremini koje je karakteristično za početni proces rada sistema, poznat kao cooldown. Ovaj slučaj karakterističan je za zagrejanu površinu potpuno uronjenu u zapreminu tečnosti koja može da isparava zavisno od razlike temperatura, uronjene površine i fluida, na četiri načina. Svakom od načina odgovara određeni temperaturski region, prikazan na slici 6.1., koje karakteriše: isparavanje slobodnom konvekcijom, mehurasto ključanje, prelazno ključanje ili nestabilno filmsko ključanje i čisto – stabilno filmsko ključanje. Sva četiri slučaja odgovaraju uslovima prirodne konvekcije.



Slika 6.1.1. Isparavanje u velikoj zapremini

- za uslove isparavanja prinudnom konvekcijom potrebno je da se zagrejana površina nalazi unutar strujnog polja fluida ili da fluid prinudno struji preko nje, pa samim tim način isparavanja dobija karakter koji diktira laminarni ili turbulentni granični sloj. Navedenih pet slučajeva isparavanja predstavljaju suštinu izvršnog procesa hlađenja i kao takvi od velikog su značaja u razradi ovog istraživanja.

Tako na primer **mehurasto isparavanje u velikoj zapremini** je diktirano konstruktivnim uslovima međusobnog položaja rashladne površine i rashlađivača što je karakteristično za JT minihladnjake posebno u tzv. cooldown režimu. Prema Rohsenow et al., modelu za mehurasto isparavanje važi odnos entalpija u obliku:

$$\frac{c_{pt} \cdot (T_f - T_{sat})}{h_{fg} \cdot (Pr_t)^{m+1}} = C_{sf} \cdot \left( \frac{Q_m}{\mu_t \cdot h_{fg}} \cdot \left( \frac{\sigma}{g \cdot (\rho_t - \rho_p)} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^n \quad (6.3)$$

gde su:

$Q_m$  - toplotni fluks (toplotni protok po jedinici površine),

$h_{fg}$  - latentna toplota isparavanja,

$C_{sf}$  - koeficijent, koji zavisi od vrste fluida, površine i kvaliteta obrade površine po kojoj struji fluid, tj.  $C_{sf} = 0.013$  - kriogene fluide izuzev helijuma,,  $C_{sf} = 0.169$  - helijum.

Koeficijenti u prethodnoj jednačini su  $n = 0.33$  i  $m = 0.7$  za sve fluide.

Takođe je analizirana i korelacija data od Kutateladzea (Brentari i Smith 1965; Kutateladze 1952), u obliku:

$$\frac{c_{pt} \cdot (T_f - T_{sat})}{h_{fg} \cdot (Pr_t)^{0.65}} = 0.0007 \cdot \left( \frac{Q_m}{\mu_t \cdot h_{fg}} \cdot \left( \frac{\sigma}{g \cdot (\rho_t - \rho_p)} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{0.3} \cdot \left( \frac{\rho_p}{\rho_t} \cdot K_p \right)^{0.7} \quad (6.4)$$

gde su:

$Ja = \frac{c_{pt} \cdot (T_f - T_{sat})}{h_{fg}}$  - Jakobov broj, koji je definisan kao odnos osetljive latentne energije

apsorbovane tokom promene faze tečnost - gas, a

$K_p = \frac{P_{sat}}{\sqrt{\sigma \cdot g \cdot (\rho_t - \rho_p)}}$  - konstanta Kutateladzea.

Iako je korelacija (6.3) davala zadovoljavajuće rezultate za očekivano mehurasto isparavanje u cooldown režimu, u ovom istraživanju tačnije rezultate je pokazala jednačina (6.4) preračunato preko režima odvođenja toplote mereno promenom temperature.

Takođe postoje i druge korelacije, kao na primer u lit.[62],[65], koji su razrađivali specijalne slučajeve mehurastog isparavanja konvekcijom variranjem oblika i hrapavosti površine ali nisu od značaja za ovo istraživanje.

Relaciju za toplotni fluks pri mehurastom isparavanju je razvio Kutateladze na osnovu dimenzione analize i eksperimentalnih podataka, a koju su usavršili Lienhard, Dhir, i Riherd (1973) data je u sledećem obliku. Ova relacija služila je za proveru maksimalnog kritičnog toplotnog fluksa isparavanja na detektoru u pomenutom cooldown režimu:

$$Q_m = 0.149 \cdot \rho_p \cdot h_{fg} \cdot \left( \frac{g \cdot (\rho_t - \rho_p) \cdot \sigma}{\rho_p^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6.5)$$

To praktično znači da bi dalje povećanje protoka rashlađivača bilo obesmišljeno jer je nepotrebno i ne može se koristiti u daljem hlađenju. Ovakav stav važi za tzv. Bondove brojeve  $\sqrt{Bo} > 2.7$ , pri čemu je Bondov broj definisan kao:

$$Bo = \frac{g \cdot (\rho_t - \rho_p) \cdot L^2}{\sigma} \quad (6.6)$$

Istraživanja su pokazala saglasnost Bondovih brojeva sa zadatim kriterijumom za primenu izraza (5.6) i za rashlađivače tipa azot, vazduh i argon i kretali su se u oblasti toj i toj  $\sqrt{Bo} > 2.7$

Bondov broj predstavlja odnos napona usled Arhimedove sile i površinskog napona. Karakteristična dimenzija,  $L$ , je širina grejne površine.

**Filmsko isparavanje** je neefikasan način prelaza toplote i događa se isključivo na početku procesa cooldown režima za koji je dominantan prethodno opisan proces. Karakteristike ovog procesa i odgovarajući izrazi koji ga prate, dati su u lit.[65], a neki od njih dat je u prilogu VI, a nisu od značaja za ovo istraživanje.

Dakle, od sva četiri pomenuta režima na Sl.6.1. u ovom istraživanju korišćen je jedino mehurasti režim isparavanja i za njega razrađena provera u cooldown režimu.

Od prinudnih režima razmene toplote najznačajniji su: isparavanje udarnim mlazom normalno na površinu pod uglom ili paralelno sa njom. U tom slučaju definisan je toplotni fluks modelom Brian izraz

$$Q_m = 181.1463 \cdot (\Delta T)^{1.218} \quad (6.7)$$

gde je:

$\Delta T$  - temperaturska razlika između površine i merene zapremine fluida.

i modelom Chena koji daje samo koeficijent konvektivnog prenosa toplote u obliku:

$$\alpha = F \cdot \alpha_l + S \cdot \alpha_b \quad (6.8)$$

gde su:

$\alpha_l$  i  $\alpha_b$  - koeficijenti prelaza toplote za jednofaznu konvekciju tečnosti i mehurasto isparavanje.

$F$  i  $S$  - su dinamički faktori.

Detaljan model ovakve razmene, dat je u prilogu VI, ali u ovom istraživanju se ne koristi zbog velike temperaturske razlike između detektora i fluida. To ukazuje na činjenicu da je u svim režimima procesa trajanje hlađenja (run –time) koeficijent prelaza toplote  $\alpha$  obezbeđen strujnim uslovima puno veći od potrebnog termodinamičkog za zadate vrednosti razlike temperatura. Dakle, konvektivni rashladni kapacitet je puno veći od željenog, a konduktivni koji je obezbeđen ovakvim strujnim uslovima zadovoljava rashladne potrebe detektora.

## 6.2. Korišćeni zakoni konzervacije u primeni na razmenjivače toplote

### 6.2.1. Opšte strujanje u cevima razmenjivača toplote

Bilansne jednačine koje određuju strujanje fluida kod strujno termičkih procesa u cevima razmenjivača toplote: jednačina kontinuiteta, jednačina o održanju količine kretanja, jednačina održanja energije mogu da se nađu u lit.[50], i to za opšti slučaj strujanja fluida u kanalu sa promenljivim poprečnim presekom.

Pod pretpostavkom da nema unutrašnjeg izvora ili ponora mase u razmenjivaču toplote kao ni promene poprečnog preseka ni promene mase u elementarnoj zapremini,  $dV = A \cdot d\xi$ , može se napisati jednačina kontinuiteta, prema lit.[50], u obliku:

$$\frac{\partial m(t, \xi)}{\partial t} = G(t, \xi) - \left( G(t, \xi) + \frac{\partial G(t, \xi)}{\partial \xi} \cdot d\xi \right) = - \frac{\partial G(t, \xi)}{\partial \xi} \cdot d\xi \quad (6.9)$$

Za strujanje stišljivog fluida, a uz odgovarajuće transformacije date u prilogu V, jed. 6.9, dobija oblik:

$$\frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial \xi} = 0 \quad (6.10)$$

Ova jednačina je izvorna jednačina kontinuiteta za jednodimenzijnsko strujanje fluida (rashlađivača). Ovaj oblik, prema lit.[50], koristi se za raspodeljene parametre fluida. Za koncentrisane parametre (usredsređene prema lit.[50]), a svedene na maseni protok i elementarnu zapreminu važi:

$$V \cdot \frac{\partial \rho(t)}{\partial t} = G_{ul}(t) - G_{izl}(t). \quad (6.11)$$

Promena količine kretanja fluida u nestacionarnom obliku prema lit.[50], data je sledećim izrazom:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial(m(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial t} &= G(t, \xi) \cdot w(t, \xi) + A \cdot p(t, \xi) \\
&- \left( G(t, \xi) \cdot w(t, \xi) + \left( \frac{\partial(G(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial \xi} \right) \cdot d\xi \right) \\
&- A \cdot \left( p(t, \xi) + \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \cdot d\xi \right) - A \cdot \left( \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{r} + \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr} \right) \cdot d\xi
\end{aligned} \tag{6.12}$$

Razvijanjem prethodnog izraza, prema lit.[50], uz korišćenje dobro poznatih zavisnosti, kao i jednačine kontinuiteta (6.12), dobija se:

$$\frac{\partial(\rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho(t, \xi) \cdot w^2(t, \xi))}{\partial \xi} = - \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} - \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{r} - \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr} \tag{6.13}$$

Leva strana jednačina se sastoji iz dva člana, od kojih prvi predstavlja nestacionarni član, a drugi inercioni član jednačine količine kretanja. U slučaju stacionarnog strujanja nestacionarni član je jednak nuli. Desna strana jed. (6.13) zajedno sa inercionim članom, se koristi u navedenom obliku pri nestišljivom strujanju fluida, dok za stišljiva strujanja fluida ima takođe te iste članove ali izvedene u konačnom obliku, datom u poglavlju 6.2.4. i to za uslove izotermnog strujanja.

Za uočenu kontrolnu zapreminu, a pri jednodimenzijском strujanju fluida, jednačina energije glasi, lit.[50],:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \left( m(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) \right)}{\partial t} &= G(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) \\
&- \left[ G(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) + \frac{\partial \left( G(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) \right)}{\partial \xi} \cdot d\xi \right] \\
&+ \alpha \cdot O \cdot (\theta_z(t, \xi) - \theta(t, \xi)) \cdot d\xi - A \cdot \frac{\partial(p(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial \xi} \cdot d\xi
\end{aligned} \tag{6.14}$$

U poslednjoj jednačini prva dva sabirka predstavljaju (izražavaju) toplotnu energiju koja se konvekcijom unosi i iznosi iz uočene kontrolne zapremine. Treći sabirak odgovara količini toplotne energije koju radni medijum, preko zida cevi, razmenjuje sa spoljnom okolinom ili drugim radnim fluidom. Poslednji sabirak, jed. (6.14) predstavlja rad sila pritiska. U ovom istraživanju ovaj član je jednak nuli, zatim zamenom poznate relacije za entalpiju u obliku,

$$h(t, \xi) = u(t, \xi) + \frac{p(t, \xi)}{\rho(t, \xi)}. \quad (6.15)$$

kao i deljenjem sa  $A \cdot d\xi$ , uz uslov zanemarivanja člana  $m(t, \xi) \cdot \frac{w^2(t, \xi)}{2}$ , kao i ostalih članova koji predstavljaju kinetičku energiju koje su male veličine u odnosu na ukupno razmenjenu toplotu, sledi izraz (6.14) u konačnom obliku:

$$\frac{\partial(\rho(t, \xi) \cdot h(t, \xi))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi) \cdot h(t, \xi))}{\partial \xi} = \alpha \cdot \frac{O}{A} \cdot (\theta_z(t, \xi) - \theta(t, \xi)) + \frac{\partial(p(t, \xi))}{\partial t}. \quad (6.16)$$

### 6.2.2. Razmena toplote u toku strujanja nevaskoznog gasa

Razmena toplote sa okolinom obično je diktirana nekim energetskim procesom u kom se gas nalazi, kao što je proces strujanja u razmenjivačima toplote. Ako je količina toplote koja se razmeni sa okolinom znatna, može da dođe do promena unutrašnje energije, odnosno temperature radnog fluida. Promena temperature sa svoje strane može uticati na strujanje gasa preko promena viskoznosti i gustine. Ukoliko se uticaj trenja, prilikom strujanja fluida u cevi može zanemariti, to znači da je strujanje fluida nevaskozno. U literaturi je ovo strujanje još poznato i kao **Rejljevo** (Rayleigh) **strujanje**. lit.[102],[109].

Neka se pri stacionarnom strujanju gasa kroz cev između dva proizvoljna preseka razmeni sa okolinom količina toplote  $q$  po jedinici mase gasa. Ukoliko je cev pravolinijska i konstantnog poprečnog preseka jednačina energije, jed. (6.38), će u tom slučaju imati partikularni oblik, sveden na totalne temperature dva stanja gasa 01 i 02 u toku nstrujanja, u obliku:

$$q = c_p \cdot (T_{02} - T_{01}). \quad (6.17)$$

Dakle, promena totalne temperature usled odvođenja toplote  $q < 0$ , glasi:

$$T_{02} = T_{01} + \frac{q}{c_p}. \quad (6.18)$$

gde je  $T_{02} < T_{01}$ . Takođe, jednačina kontinuiteta za dva konstantna poprečna preseka, a u skladu sa jed.(6.9) pri stacionarnom strujanju, ima oblik:

$$\rho_1 \cdot w_1 = \rho_2 \cdot w_2, \quad (6.19)$$

S obzirom na uvedene pretpostavke i zanemareno trenje što će biti potvrđeno merenjima gubitaka zaustavnog pritiska, jednačina količine kretanja koristiće se u obliku:

$$p_1 + \rho_1 \cdot w_1^2 = p_2 + \rho_2 \cdot w_2^2. \quad (6.20)$$

Ovim sistemom jednačina (6.17),(6.18),(6.19),(6.20), biće rešavano neizentropsko, nevaskozno strujanje gasa u daljem radu. lit.[103].



### 6.2.3. Uticaj trenja pri strujanju fluida u cevima sa konstantnim poprečnim presekom

Jednačina kontinuiteta u diferencijalnom obliku, kompatibilno sa jed.(6.10), a prema lit.[101], za stacionarne uslove glasi:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dw}{w} + \frac{dA}{A} = 0. \quad (6.21)$$

Ukoliko se posmatra uticaj trenja pri strujanju gasova u pravolinijskoj cevi konstantnog preseka i oblika, u razmenjivaču toplote, jednačina količine kretanja jednodimenzijskih strujanja, prema lit.[101], u diferencijalnom obliku glasi:

$$\frac{dp}{\rho} + w \cdot dw + \frac{\tau_w \cdot O \cdot d\xi}{\rho \cdot A} = 0. \quad (6.22)$$

U slučaju strujanja stišljivih fluida sa lokalnim gubicima, usled promene poprečnog preseka, koristi se drugačija jednačina količine kretanja u vektorskom obliku, lit.[101]:

$$\vec{R} = (p_1 + \rho_1 \cdot w_1^2) \cdot A_1 \cdot \vec{n}_1 - (p_2 + \rho_2 \cdot w_2^2) \cdot A_2 \cdot \vec{n}_2 + \vec{G} + \vec{F}_m. \quad (6.23)$$

Jednačina stanja za idealan gas u diferencijalnom obliku glasi, lit.[101]:

$$\frac{dp}{p} - \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dT}{T} = 0, \quad (6.24)$$

a jednačina energije u diferencijalnom obliku, data je izrazom:

$$c_p \cdot \frac{dT}{T} - R \cdot \frac{dp}{p} = c_n \cdot \frac{dT}{T} + \frac{\kappa \cdot \lambda}{2 \cdot D} \cdot Ma^2 \cdot d\xi. \quad (6.25)$$

Član koji potiče od trenja dobijen je uvođenjem koeficijenta trenja, brzine zvuka i Mahovog broja za cev kružnog poprečnog preseka prečnika  $D$ , lit.[101], na bazi izraza:

$$\frac{\tau_w \cdot O \cdot d\xi}{p \cdot A} = \frac{\kappa \cdot \lambda}{2 \cdot D} \cdot Ma^2 \cdot d\xi, \quad (6.26)$$

jer je:

$$\tau_w = \frac{1}{8} \lambda \cdot \rho \cdot w^2. \quad (6.26a)$$

a  $\lambda$  se uzima kao srednja integralna vrednost koeficijenta trenja  $\lambda = \lambda_{sr}$ , prema lit.[101].

Takođe, jed. (6.21) - jed. (6.26a), mogu se upotrebiti i za realan gas ako se usvoji  $z = z_{sr} = const$ ,  $\kappa = \kappa_{sr} = const$ , a eksponent politrope idealnog gasa zameni sa eksponentom politrope realnog gasa i takođe smatra konstantnim,  $n = n_{sr} = const$ , što je korišćeno u ovom radu. Prilikom izvođenja u jednačini energije nije uzet u obzir koeficijentat kompresibilnosti,  $\zeta$  jed. (2.46), uz

član,  $R \cdot \frac{dp}{p}$ , tako da se pri upotrebi navedenih izraza čini manja greška za niže pritiske realnog fluida, jer se tad fluid ponaša kao idealan, a sa povećanjem pritiska, greška nešto raste.

Inače, opšta jednačina za pad pritiska stišljivog fluida pri politropskom strujanju, data je sledećim jednačinama:

$$\frac{n}{n+1} \cdot (p_2 \cdot \rho_2 - p_1 \cdot \rho_1) + \left(\frac{G}{A}\right)^2 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} + \frac{\lambda}{2 \cdot D} \cdot \left(\frac{G}{A}\right)^2 \cdot l = 0 \quad (6.27)$$

ili:

$$p_1^{\frac{n+1}{n}} - p_2^{\frac{n+1}{n}} = \left(\frac{G}{A}\right)^2 \cdot \frac{p_1^{\frac{1}{n}}}{\rho_1} \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot D} \cdot l \cdot \frac{n+1}{n} + \frac{2 \cdot \kappa}{n} \cdot \ln \frac{Ma_2}{Ma_1} \cdot Ma_1^2 \cdot p_1 \cdot p_1^{\frac{1}{n}} \quad (6.27a)$$

U slučaju izentropskog strujanja, koje predstavlja neviskozno strujanje  $\lambda = 0$ , jed. (6.22) se svodi na oblik:

$$\frac{dp}{p} - \kappa \cdot Ma^2 \cdot \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad (6.28)$$

Rešavanjem sistema jednačina, jed. (6.24), jed. (6.25) i jed. (6.28), dobija se izraz:

$$(Ma^2 - 1) \cdot \frac{dp}{p} = 0, \quad (6.28a)$$

tako da kvadrat Mahovog broja mora biti konstantan i jednak jedinici, tj.  $Ma^2 = 1$ . Međutim, da bi uopšte Mahov broj između neka dva stanja 1 i 2 bio jednak, potrebno je da bude zadovoljena jednačina  $p_1 \cdot \rho_1 = p_2 \cdot \rho_2$ . Takođe, drugo rešenje jed. (6.28) je  $p = const$ . Dakle, pokazano je da pri izentropskom strujanju promena brzine, gustine, pritiska i temperature u pravolinijskoj cevi konstantnog poprečnoog preseka jednaka nuli.

#### 6.2.4. Izotermno strujanje sa trenjem

Ako cev nije toplotno izolovana, i ako je napravljena od materijala koji je dobar provodnik toplote, doći će prilikom strujanja gasa do veoma intenzivne razmene toplote sa okolinom, tako da će srednja temperatura gasa u pojedinim presecima cevi biti jednaka temperaturi okoline. Ako se temperatura okoline ne menja duž cevi, neće se menjati ni temperatura gasa, odnosno strujanje će biti izotermno. Takođe treba napomenuti da se u ovom slučaju Rejnoldsov broj ne menja duž cevi, što omogućava siguran izbor početne vrednosti koeficijenta trenja. Pri izotermnom strujanju kod idealnih gasova je konstantna entalpija, dok kod realnih gasova nije to slučaj. Dakle, sada se iz jed.(6.20) – jed. (6.27), može dobiti:

$$\frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dw}{w} = -\frac{\kappa \cdot Ma^2}{1 - \kappa \cdot Ma^2} \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot D} \cdot d\xi. \quad (6.29)$$

Na osnovu jed. (6.29), lit.[101],[103], da su relativne promene gustine, brzine (Mahovog broja) i pritiska u odnosu na svoje neporemećene vrednosti međusobno jednake sledi opšta jednačina o padu pritiska po jediničnoj dužini strujanja usled trenja u cevovodu u obliku:

$$\frac{dp}{d\xi} = -\frac{\kappa \cdot Ma^2}{1 - \kappa \cdot Ma^2} \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot D} \cdot p. \quad (6.29 a)$$

Integraljenjem i svođenjem na maseni protok uz hipotezu da je  $Ma_1 \cdot p_1 = Ma_2 \cdot p_2$  i zanemarivanjem  $\frac{\kappa}{n} \cdot \frac{n+1}{4} \cdot \ln \frac{p_1^2 \cdot Ma_1^4}{p_2^2 \cdot Ma_2^4}$  može se dobiti izraz za pad pritiska za idealne gasove u pravolinijskoj cevi pri podzvučnom izotermnom strujanju, lit.[103]:

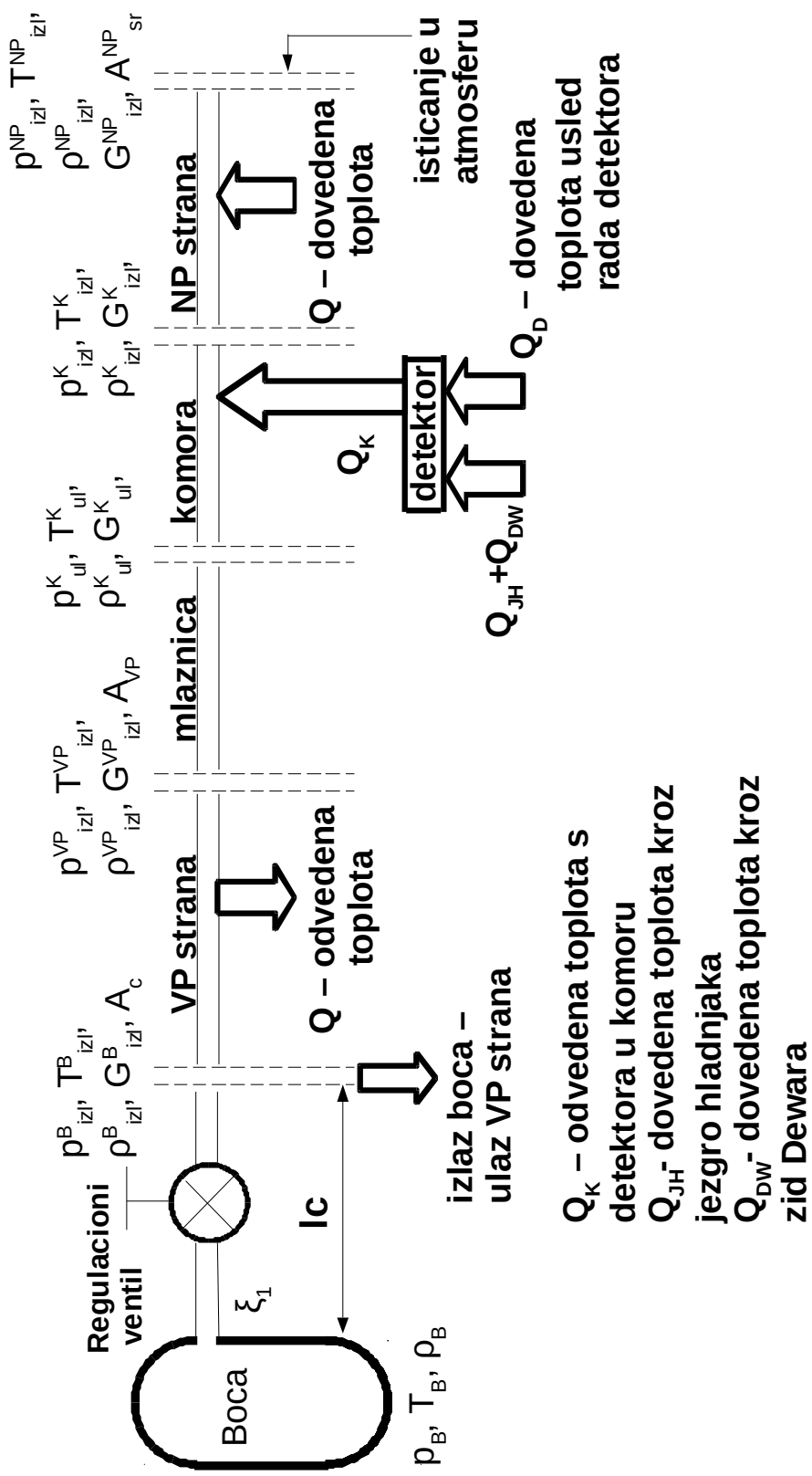
$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{16 \cdot \lambda_s \cdot l \cdot R \cdot T}{\pi^2 \cdot D^5} \cdot G^2. \quad (6.30)$$

Za realne gasova pri malim pritiscima i visokim temperaturama mogu se smatrati idealnim te se mogu primeniti gornji izrazi, s tim što u poslednji izraz treba dodati uz gasnu konstantu srednju vrednost koeficijenta kompresibilnosti, te se dobija sledeći izraz:

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{16 \cdot \lambda_s \cdot l \cdot z_{sr} \cdot R \cdot T}{\pi^2 \cdot D^5} \cdot G^2. \quad (6.31)$$

Pomenuti izrazi, jed.(6.17)- jed.(6.31), koriste se da se pomoću njih odrede kako nepoznati termodinamički parametri tako i nepoznati strujni parametri. Primena pojedinih jednačina zavisi i od procesa koji se ostvaruje u pojedinim delovima sistema, kao i od procesa rada samog sistema. Dakle, određivanjem neophodnih parametara omogućava se formiranje modela procesa.

Na sl.6.2. prikazana je termodinamička segmentna šema razmatranog objekta upravljanja. Svaki segment predstavlja, neki od procesa koji se istovremeno dešavaju tokom rada sistema. Procesi su prikazani tokom pravca i smera kretanja kriogenog rashlađivača kroz sistem. Svaki sledeći termodinamički proces dat je od ulaza kroz odgovarajući segment do izlaza. Za analizu ulaznih i izlaznih stanja segmenata, koristiće se jednačine izvedene u poglavlju II i VI, a date u odeljku 6.4.. Postupak je dat vremenskim funkcijama odgovarajućih parametara što obezbeđuje tretman sistema po segmentima radi formiranja šeme upravljanja objektom.

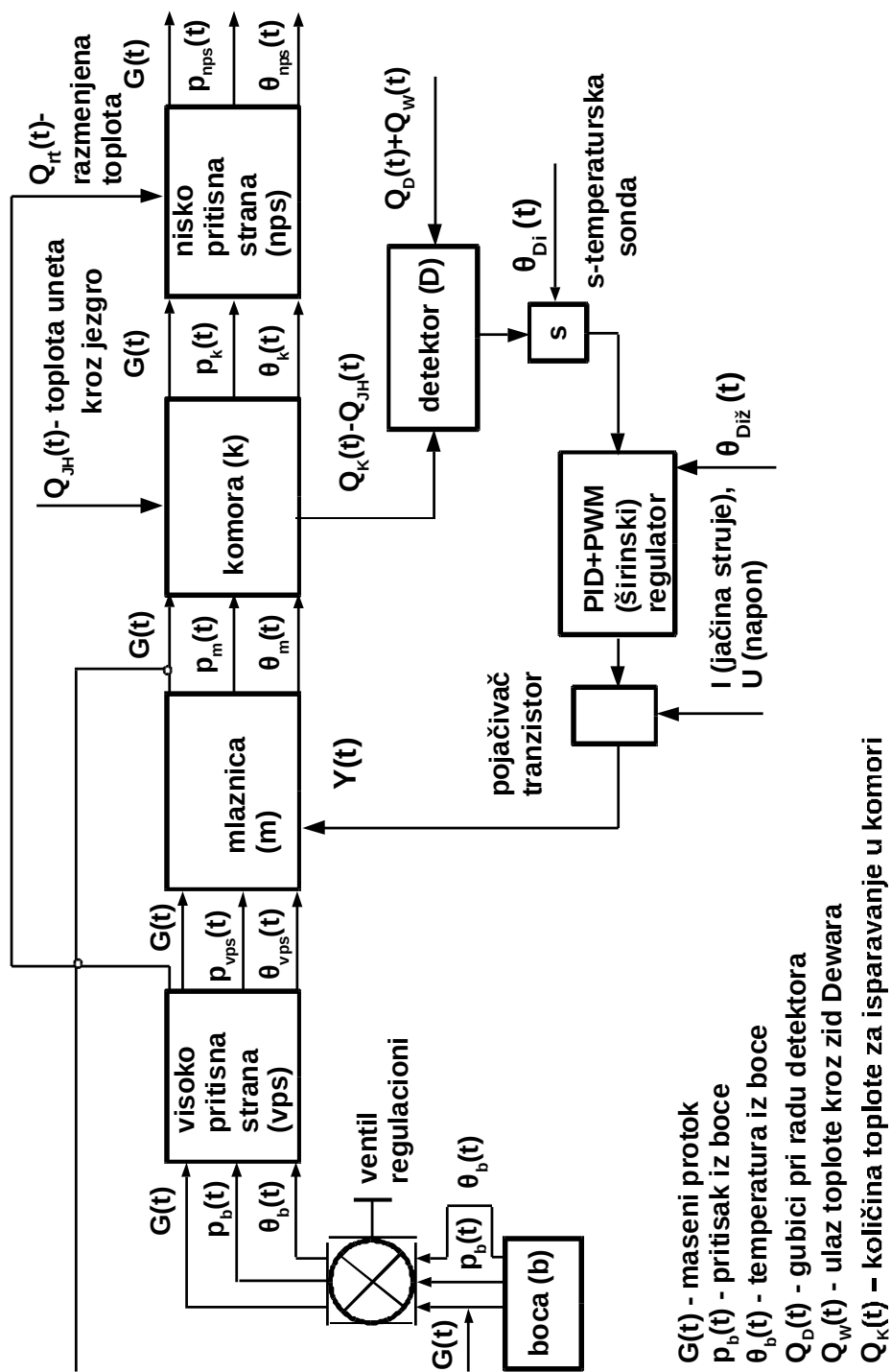


$Q_k$  – odvedena toplota s detektora u komoru  
 $Q_{JH}$  – dovedena toplota kroz jezgro hladnjaka  
 $Q_{DW}$  – dovedena toplota kroz zid Dewara

Sl.6.2. Termodinamička segmentna šema objekta automatskog upravljanja

### 6.3. Strukturni dijagram sistema za hlađenje

Na slici 6.2.1. prikazan je strukturni dijagram, zatvorenog sistema automatskog upravljanja, celokupnog rada sistema, sa indirektnom kompenzacijom poremećaja.



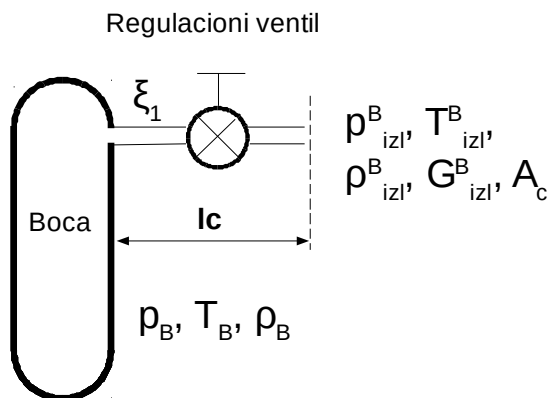
Sl. 6.2.1. Strukturni dijagram

## 6.4. Dinamika segmenata (sastavnih delova) sistema hlađenja sa kriogenim razmenjivačem

### 6.4.1. Model ponašanja izvora kriogenog rashlađivača

Izvor kriogenog rashlađivača (boca) je deo sistema za hlađenje koji služi kao izvor kako kriogenog fluida tako i mešavine kriogenih fluida, tj. boca je rezervoar kriogenog fluida. U njoj se skladišti fluid pod određenim pritiskom, koji može da bude i do 700 bar. Izvor rashlađivača omogućava da fluid, koji ističe iz njega, obavi termodinamički ciklus, na osnovu koga se vrši hlađenje osetljivog elementa – detektora. Ohlađeni detektor, na zadatu temperaturu, je jedino pod tim uslovima spreman da izvrši svoju upotrebnu funkciju, detekciju IC zračenja, kao što je već rečeno u Poglavlju I.

Na slici 6.3. prikazani su parametri fluida u rezervoaru (izvoru rashlađivača) i parametri na izlazu iz izvora rashlađivača i na osnovu njih postaviti: diferencijalna jednačina kontinuiteta i analitičke jednačine za rešavanje stanja kriogenog fluida na izlazu iz boce.



Sl.6.3. Izvor rashlađivača sa svojim unutrašnjim i izlaznim parametrima

Da bi usvojili model procesa, moraju se uvesti odgovarajuće pretpostavke, kako u ovom elementu sistema, tako i, ako je potrebno i u drugim elementima sistema.

*Pretpostavka 6.1:* Proces koji se vrši od boce do izlaznog preseka boce je adijabatski proces.

*Pretpostavka 6.2:* Regulacioni ventil je maksimalno otvoren tako da ne utiče na dešavanja u cevovodu, tj. ne stvara lokalni otpor.

*Pretpostavka 6.3:* Rastojanje od početnog suženog preseka boce do izlaznog preseka boce je malo, tako da se otpor trenja može zanemariti.

*Pretpostavka 6.4:* Rastojanje  $l_c$  predstavlja rastojanje na kom se uspostavio lokalni otpor usled suženja poprečnog preseka i iznosi  $l_c = 4 \div 5 \cdot d_c$ , gde je  $d_c$  - prečnik izlaznog cevovoda.

*Pretpostavka 6.5:* Strujanje radnog fluida je jednodimenzijnsko.

*Pretpostavka 6.6:* Usvojiće se da izlazna cev iz boce nije uvučena u bocu. Odnos površina poprečnog preseka boce i suženog preseka je dovoljno veliki da se korekcionni koeficijent

$k$  totalnog pritiska na izlaznu površinu boce, može usvojiti  $k=1$ . Ovde je iskorišćen eksperimentalni podatak Benedikta, lit.[106]. Takođe, ovde su zanemareni strujni uslovi u boci, koji takođe mogu uticati na izračunavanje koeficijenta  $k$ .

*Pretpostavka 6.7:* Za male promene pritiska, pri većim pritiscima, usvojiće se da je Džul – Tomsonov koeficijent, jed. (2.7), jednak nuli. Posledica toga je da jednačina energije (2.34), nema dodatni član za promenu entalpije kod realnih fluida  $\mu_j \cdot c_p \cdot dp$ , jed. (2.32). Takođe, jednačina energije napisana preko unutrašnje energije, jed. (2.33), nema dodatni član  $\mu_v \cdot c_v \cdot dv$  pri čemu je promena temperature u funkciji specifične zapremine pri konstantnoj unutrašnjoj energiji data u obliku koeficijenta  $\mu_v = \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_u$ . Jednačina adijabate realnih fluida,  $p \cdot v^{\kappa_{sr}} = const$ , koja će biti korišćena za promenu stanja od procesa  $^B$  do  $^{B}_{izl}$ , može se svesti na isti oblik kao i za idealan fluid, lit.[19], jer je  $\kappa = \kappa_{sr}$  tj.  $\kappa_{sr}$  predstavlja odnos specifičnih toplota pri konstantnom pritisku i zapremini.

Konačne analitičke jednačine su:

- jednačina za izračunavanje koeficijenta kompresibilnosti u boci a na osnovu poznatih veličina stanja rashlađivača (kriogenog fluida), korišćenjem jed. (2.2), je:

$$z^B = \frac{p^B}{\rho^B \cdot R \cdot T^B}, \quad (6.32)$$

Za iznalaženje vrednosti izlaznih parametara boce biće korišćen sledeći sistem jednačina:

$$\begin{aligned} p_{izl}^B &= \rho_{izl}^B \cdot z_{izl}^B \cdot R \cdot T_{izl}^B \\ p_{izl}^B &= p^B \cdot \left( \frac{\rho_{izl}^B}{\rho^B} \right)^{n_B} \\ c_{psr} &= \frac{\kappa_{sr}}{\kappa_{sr} - 1} \cdot R \cdot \frac{\left( z_{izl}^B \cdot T_{izl}^B - z^B \cdot T^B \right)}{\left( T_{izl}^B - T^B \right)} \\ G_{izl}^B &= A_c \cdot \rho_{izl}^B \cdot w_{izl}^B \\ p^B &= p_{izl}^B + \frac{4}{3} \cdot \rho_{izl}^B \cdot w_{izl}^{B2} \\ c_{psr} \cdot \left( T_{izl}^B - T^B \right) + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot w_{izl}^{B2} &= 0 \end{aligned} \quad (6.32a)$$

koji su dobijeni zamenom ulaznih i izlaznih vrednosti i to u izraze dobijene u Poglavljima II i VI i to, jed.(2.2), jed.(2.15), jed.(2.17), jed.(2.57), i korišćenjem konačnog oblika bilansne jednačine količine kretanja, jed.(6.14), i konačnog oblika bilansne jednačine energije, jed.(6.16).

U jednačinu održanja energije je uvršćen Koriolisov koeficijent  $\alpha=2$  - koeficijent neravnomernosti kinetičke energije za laminarno strujanje, a u jednačinu količine kretanja Businesskov koeficijent  $\beta = \frac{4}{3}$  - koeficijent neravnomernosti količine kretanja za laminarno strujanje.

Za potrebe analize vremenskog ponašanja razmatraće se osnovne bilansne jednačine, primenjene na nestacionarne uslove rada. jed. (6.10), jed. (6.13), jed. (6.16).

Na osnovu jed. (2.65), može se izračunati maseni protok realnog gasa na izlazu iz izvora rashlađivača, korišćenjem izraza  $\kappa_{sr} = n$  ili  $\kappa_{sr} \neq n$  tj. eksponent adijabate jednak eksponentu izentropie ili različit od eksponenta izentropie. Maseni protoci proračunati na ova dva načina razlikuju se za 10%. S obzirom da je zgodnije koristiti prvi model  $\kappa_{sr} = n$  ukupna korekcija za ovakav model iznosi u skladu sa eksperimentalnim rezultatima oko 12,9%. Zbog toga je u izrazu za maseni protok, jed. (2.65), usvojen korektivni faktor od 0.871. Vrednosti teorijskog koeficijenta korekcije 0.89 ova dva modela proračuna dobijeni su na bazi odnosa kritičnih vrednosti u funkciji promene entalpije realnog gasa, na izlazu iz razmenjivača toplote i njegovih proračunskih vrednosti datih u tabeli 6.3. Pomenute vrednosti u tabeli 6.3. dobijene su proračunom razmene toplote po modelu datom u Prilogu I, čime je uzet u obzir uticaj razmene toplote na korekciju ulazno izlaznog protoka. "Porcija", određena količina, gasa koja menja veličine stanja prouzrokuje promenu zaustavne temperature koja opada, i zaustavne gustine koja raste u razmenjivaču toplote. U daljem tekstu usvojene su sledeće pretpostavke:

*Pretpostavka 6.8:* Strujanje u cevi od izvora rashlađivača do razmenjivača toplote je izentropsko. Prema tome, nema trenja a ni razmene toplote sa okolinom. Veličine stanja gasa ostaju nepromenjene.

*Pretpostavka 6.9:* Strujanje u razmenjivaču toplote do ulaza u mlaznicu je Rejljevo strujanje sa malim Mahovim brojevima što odgovara niskoj podzvučnoj struji.

Džul Tomsonov koeficijent, koji određuje eksponent adijabate u funkciji promene temperature i pritiska, se promenio, smanjio jer su drugačiji uslovi adijabatskog isticanja realnog gasa u mlazniku. Koeficijent  $k_{11}$  je koeficijent svodenja parametara protoka, Prilog I, na izlazu iz razmenjivača toplote u odnosu na izlazni presek iz izvora rashlađivača, ali u modelu  $\kappa_{sr} = n$ . Ovo je neophodno zbog povećanja gustine, eksponenta adijabate koji je posledica promene Džul Tomsonovog koeficijenta realnog gasa, jed. (2.7), i odgovara masenom protoku uzetog u obzir preko pomenutog koeficijenta. Sve ovo uticalo je na karakter Rejljevog strujanja koje se bitno razlikuje od strujanja idealnog gasa u ovom slučaju.

Za vrednost  $\kappa_{sr} = n = \kappa_{12}$  koeficijent  $k_{12}(\kappa_{12})$  je funkcija od eksponenta adijabate  $\kappa_{12}$ , lit.[21], pri isticanju rashlađivača iz izvora rashlađivača, na osnovu jed.(2.65), datom u prilogu I.



Osnovna bilansna jednačina, jednačina kontinuiteta za neravnotežna stanja procesa (6.10), lit.[50], a u skladu sa izvođenjem datim u Prilogu I, može se napisati u obliku:

$$V_C \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^B(t)}{\partial t} = -k_{11} \cdot 0.871 \cdot A_{KR}(Y(t)) \sqrt{p_{izl}^B(t) \cdot \rho_{izl}^B(t)} \cdot k_{12}(\kappa_{12}) \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}} \quad (6.33)$$

Jed. (6.33) predstavlja izvedeni oblik promene masenog protoka u funkciji odgovarajućeg pomeranja izvršnog organa  $Y(t)$ . U tom smislu pomeranjem igle u mlazniku kontroliše se funkcija protoka u vremenu (6.33), i upravlja sistemom. Ova jednačina ima poseban oblik ukoliko regulišući element ne postoji, pa je  $Y(t) = Y = const$ , što će takođe biti korišćeno u ovom istraživanju kao jedan od korišćenih konstruktivnih slučajeva. U tom smislu, jed.(6.33), predstavlja samu suštinu upravljanja Džul Tomsonovim krio hladnjakom. Sistem koji se posmatra, upravlja se pritiskom i protokom pomoću termodinamičke veličine gustine i promenom poprečnog preseka. U tom smislu dvofazni procesi iskazani u promeni protoka reflektovani kroz stepen suvoće i ostale termodinamičke parametre, linearizovani u Prilogu I, za uslove ponašanja malih promena pritisaka u vremenu kao funkcije upravljanja kritičnim poprečnim presekom u sistemu i gustina rashladnog fluida iskazanog po segmentima. Za dve promene stanja na ulazu i izlazu iz boce pri vremenskom upravljanju poprečnim presekom  $\overline{\Delta Y}(t)$  važiće sledeća funkcija odziva ovih poremećaja svih termodinamičkih veličina stanja odnosno izlaznih veličina stanja upravljanja, data jednačinom:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta Y}(t) = & \frac{1}{51.05473} \cdot \left( -\frac{\partial \overline{\Delta p_{izl}^B}(t)}{\partial t} - 17.1637 \cdot \overline{\Delta p^B}(t) + 25.55368 \cdot \overline{\Delta \rho^B}(t) \right) \\ & + \frac{1}{51.05473} \cdot \left( -59.49359 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) - 25.55368 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) \right) \end{aligned} \quad (6.34)$$

gde  $\overline{\Delta(\bullet)}$  označava relativno odstupanje veličine stanja ili procesa.

Koeficijenti u jed. (6.34). su dobijeni kao posledica usvajanja termodinamičkog isticanja datog jed. (6.33), a određenih razvijanjem nelinearnih funkcija u Tajlerov red, Prilog I, u okolini početnog stanja usvojenog kao ekstremno nominalno stanje, a zanemarivanjem članova reda višeg od prvog, dobijena je konačna linearizovana jednačina kontinuiteta, jed. (6.34).

Ova jednačina se odnosi na poremećaje izlaznih parametara iz boce izazvanih promenom relativne regulišuće veličine,  $\overline{\Delta Y}(t)$ , u slučaju ekstremnog nominalnog stanja. Pri isticanju iz boce gradijent pritiska po vremenu je znatno veći pri visokim pritiscima, a samim tim i stabilnost sistema osetljivija, tako da je na bazi te činjenice u ovoj doktorskoj disertaciji, izabran, analiziran i modeliran usvojeni ekstremni nominalni režim. U slučaju poremećaja bilo kog parametra, u takvom režimu, jed. (6.34), kako u boci tako i na izlazu iz boce, Sl.6.3., mora da reaguje i relativna regulišuća veličina. To je dakle, pri radu sistema sa ekstremnim nominalnim stanjem najnepovoljniji slučaj sa aspekta stabilnosti sistema.

U tabeli 6.1, dati su osnovni parametri koji karakterišu stanje u izvoru rashlađivača i stanje na izlazu iz izvora rashlađivača:

Izvor rashlađivača (vazduh)		Izlaz iz izvora rashlađivača	
pritisak	350[bar]	pritisak	349.99995[bar]
temperatura	296[K]	temperatura	295.999992[K]
gustina	358.000194[ $kg/m^3$ ]	gustina	358.00016[ $kg/m^3$ ]
koeficijent kompresibilnosti	1.15083	koeficijent kompresibilnosti	1.15083
gasna konstanta vazduha	287[J/kg·K]	eksponent adijabate	1.4885
		brzina	0.10325[m/s]

Tabela 6.1. Parametri stanja izvor rashlađivača i izlaz iz izvora rashlađivača

Jednačina količine kretanja u diferencijalnom obliku data je jed. (6.13). U ovoj jednačini koja je primenjena na izlaz iz boce, iskorišćena je jednačina adijabate, jed. (2.38), i lokalni otpor pri stišljivom strujanju usled male razlike gustina predstavljen kao gubitak dela kinetičke energije  $\xi_2 \cdot \frac{w_2^2}{2}$ . Takođ uzet je u obzir i koeficijent neravnomernosti kinetičke energije  $\alpha = 2$ , lit.[100], pa se posle fiktivne integracije dobija se:

$$\frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2} - \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} + 2 \cdot \frac{w_2^2}{2} + \xi_2 \cdot \frac{w_2^2}{2} = 0. \quad (6.35)$$

Iz jed. (6.35) ukupna mehanička energija u izvoru rashlađivača ima gubitke na izlazu iz boce proporcionalno koeficijentu lokalnog otpora suženju preseka  $\xi_2 = 0.667$ . Ovaj koeficijent se dobija rešavanjem jed. (6.63) na bazi podataka  $p_1, \rho_1, p_2, \rho_2, w_2$  dobijenih iz sistema jednačina, navedi jednačine, a na bazi tabele 6.1. Time su izvorne jednačine prilagođene stvarnim eksperimentalnim podacima, primera rađenom u ovom doktoratu.

Na osnovu jed.(6.13) i jed.(6.35), osnovna jednačina količine kretanja za nestacionarne uslove rada, koja važi za primer isticanja iz boce u ovom radu, može se napisati:

$$V_c \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^B(t) \cdot w_{izl}^B(t)}{\partial t} = \left( \frac{n_B}{n_B-1} \cdot \frac{p^B(t)}{\rho^B(t)} - \frac{n_B}{n_B-1} \cdot \frac{p_{izl}^B(t)}{\rho_{izl}^B(t)} - (\alpha + \xi_2) \cdot \frac{w_{izl}^{B2}(t)}{2} \right) \cdot A_c \cdot \rho_{izl}^B(t). \quad (6.36)$$

Na osnovu jed. (6.36) dobija se izraz za relativnu promenu regulišuće veličine  $\overline{\Delta Y}(t)$  u funkciji relativne promene izlazne brzine iz boce, relativne promene pritiska u boci, relativne promene gustine u boci, relativne promene izlaznog pritiska iz boce i relativne promene izlazne gustine visokopritisnog dela razmenjivača toplote. Normalizacija je vršena svođenjem stvarne

promene na ekstremno nominalno stanje svake od navedenih promenljivih veličina, razvijenim u Tejlorov red u okolini nominalnog ekstremnog stanja, a datim u Prilogu I.

$$\begin{aligned} \overline{\Delta Y}(t) = & \frac{1}{34.29924} \cdot \left( \frac{\partial \overline{\Delta w_{izl}^B}(t)}{\partial t} - 3.16538 \cdot 10^8 \cdot \overline{\Delta p^B}(t) + 17.1673 \cdot \overline{\Delta \rho^B}(t) \right) \\ & \frac{1}{34.29924} \cdot \left( 3.16537 \cdot 10^8 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) + 57.1802 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^B}(t) - 17.1673 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) \right) \end{aligned} \quad (6.37)$$

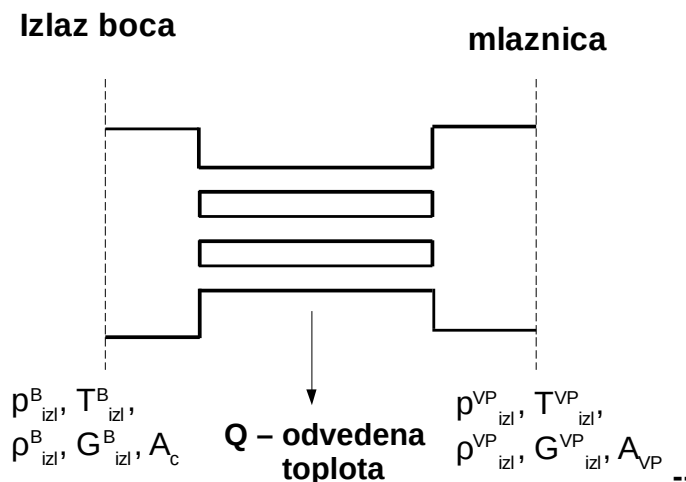
Razvijanjem relativne regulišuće veličine  $\overline{\Delta Y}(t)$  u okolini nekih drugih nominalnih stanja koeficijenti, u izrazu 6.37., bi bili drugačiji što ukazuje na činjenicu da validnost ove funkcije u vremenu važi samo u vremenskom intervalu trajanja ekstremnog nominalnog stanja sa odgovarajućom greškom. Realizacija koeficijenata za različite intervale vremena u različitim okolinama nominalnih stanja promenljivih u vremenu tražila bi rešenja koeficijenata u funkciji od vremena pa bi stvarna funkcija promene dobila pun vremeenski karakter za ceo režim isticanja. S obzirom da je usvojen ekstremni nominalni režim kao kritičan za stabilnost sistema to je dalji razvoj ove jednačine u drugim nominalnim okolinama nepotreban.

#### 6.4.2. Model ponašanja visoko – pritisna strana

U ovom delu biće izvedene jednačine ponašanja relativne promene regulišuće veličine u funkciji od relativnih promena ulazno izlaznih parametara razmenjivača toplote po istom postupku kao i u prethodnom poglavlju za bocu. Ovo se radi sa ciljem da se sistem jednačina ispita po istim veličinama za sve segmente sistema kojima upravlja regulišuća veličina preko regulatora.

Od izlaza iz boce do ulaza u visoko – pritisni deo sistema tj. razmenjivača toplote rastojanje je veoma malo.

*Pretpostavka 6.10:* Pad pritiska usled lokalnog otpora cev – razdelnik i razdelnik – cev je zanemarljiv, tj. nema ekspanzije gasa usled promene poprečnog preseka  $p_{izl}^B = p_{ul}^{VP}$ .



Sl.6.4. Visoko – pritisna strana ulaz – izlaz

*Pretpostavka 6.11:* Pad pritiska usled lokalnog otpora cev – zbirna cev je zanemarljiv, tj. nema ekspanzije gasa usled promene poprečnog preseka  $p_{izl}^{VP} = p_{ul}^{ML}$ .

S obzirom da je u svakoj cevi strujanje stišljivog fluida, koeficijent trenja  $\lambda(Re, Ma)$  je u opštem slučaju funkcija Rejnoldsovog i Mahovog broja (laminarno strujanje), Voronin lit.[107]. Međutim, za Mahove brojeve manje od 0,6 može se zanemariti uticaj Mahovog broja na koeficijent trenja, jer greška koja se čini je mala. Dakle, s obzirom da je strujanje laminarno sa malim Mahovim brojevima može se usvojiti izraz za koeficijent trenja  $\lambda = \frac{64}{Re}$ . lit.[105].

*Pretpostavka 6.12:* Temperatura na izlazu iz visoko – pritisnog dela je ista. U principu, s obzirom da su cevi različitih dužina, a samim tim i površina za razmenu toplote je različita, temperature na izlazu su različite. Brzina fluida u svakoj od cevi je različita. Razlika u temperaturi je relativno mala te je i pretpostavka opravdana.

Na osnovu poslednje pretpostavke može se usvojiti da su koeficijenti kompresibilnosti isti, koji su u suštini funkcija pritiska i temperature. Prema tome, i gustine fluida na izlazu iz visoko – pritisnog dela su iste.

S obzirom da je, po definiciji, Rejnoldsov broj:

$$Re(T) = \frac{G \cdot d}{A \cdot \mu(T)}, \quad (6.38)$$

a,  $\mu$ - dinamička viskoznost, koja je u funkciji temperature. S obzirom da je promena temperature u cevima ista, može se usvojiti i da je i srednja logaritamska temperatura u svakoj od cevi ista. Dakle, dinamička viskoznost koja odgovara srednjoj logaritamskoj temperaturi u svakoj od cevi je ista. Prema tome, odnos koeficijenata trenja se može napisati:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{G_2}{G_1} \text{ i } \frac{\lambda_2}{\lambda_3} = \frac{G_3}{G_2}. \quad (6.39)$$

Ukoliko se usvoji jednačina za srednju gustinu  $\rho_{sr} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$ , pad pritiska usled trenja za stišljiv fluid može se napisati:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho_{sr} \frac{w_{sr}^2}{2}. \quad (6.40)$$

S obzirom da padovi pritiska moraju biti jednaki, to se konačno dobija:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{G_2}{G_1} \text{ i } \frac{l_2}{l_3} = \frac{G_3}{G_2}. \quad (6.41)$$

Osnovna bilansna jednačina - jednačina kontinuiteta za nestacionarne uslove rada, a na osnovu jed.(6.10), jed. (6.33) i priloga II, može se napisati u razvijenom obliku:

$$V_{VP} \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{VP}(t)}{\partial t} = k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \sqrt{\frac{p_{izl}^{B \frac{n_B+1}{n_B}}(t) \cdot \rho^B(t)}{p^{B \frac{1}{n_B}}(t)} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}} - A_{VP} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot w_{2izl}^{VP}(t) \cdot 3.138 \quad (6.42)$$

Koeficijent 3.138 u jed.(6.42) predstavlja odnos ukupnog masenog protoka i masenog protoka kroz orebrenu cev drugog sloja razmenjivača toplote minihladnjaka, a dobijen na osnovu jed.(6.41), i podataka o geometrijskim veličinama razmenjivača datim na primeru u tabeli 6.2.

prečnik cevi (unutrašnji)	0.4mm
prečnik cevi (spoljašnji)	0.6mm
korak rebara orebrene cevi	0.25mm
debljina rebra orebrene cevi	0.12mm
visina rebra orebrene cevi	0.3mm
prečnik rebra orebrene cevi	1.2mm
broj navijenih rebara (I sloj)	2132
broj navijenih rebara (II sloj)	2816
broj navijenih rebara (III sloj)	3448

Tabela 6.2. Geometrijske veličine razmenjivača toplote

Izraz u maloj zagradi, jed.(6.42), predstavlja promenu površine kritičnog poprečnog preseka u zavisnosti od osnovne (trenutne) vrednosti regulišuće veličine  $Y(t)$  (pomeranje igle izvršnog organa), pri čemu su izrazi za konstruktivne konstante  $k_{13}$  i  $k_{14}$  date u prilogu I, i predstavljaju korekciju linearnog pomeranja igle svedenu na površinu poprečnog preseka i veoma su značajne za ponašanje jednačine (6.42) jer svode veličinu pomeranja igle na veličinu poprečnog preseka protoka mlaznice. Njihovim parametarskim funkcionalnim odnosom karakteriše se oblik igle koji određuje prstenasti poprečni presek masenog protoka u svakom trenutku u toku adekvatnog trenutka tokom procesa regulacije.

Konačna linearizovana jednačina za relativnu promenu regulišuće veličine  $\overline{\Delta Y}(t)$  a na osnovu jednačine kontinuiteta 6.42, u skladu sa prilogom II, takođe svedena na ekstremno nominalno stanje, ima oblik:

$$\overline{\Delta Y}(t) = \frac{1}{0.08651} \cdot \left( \frac{\partial \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t)}{\partial t} + 0.02909 \cdot \overline{\Delta p^B}(t) - 0.0433 \cdot \overline{\Delta \rho^B}(t) \right) \cdot \frac{1}{0.08651} \cdot \left( 0.04341 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.08671 \cdot \overline{\Delta w_{2izl}^{VP}}(t) - 0.07239 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) \right) \quad (6.43)$$

Ova jednačina važi za konkretne brojne vrednosti date primerom u tabeli 6.3. izvedene pod prethodno datim uslovima strujanja u definisanom obliku strujnog procesa uvedenom u parametarsku jednačinu (6.42).

*Pretpostavka 6.13:* Usvaja se neviskozno strujanja gasa u visoko - pritismom delu razmenjivača toplote. Brzine su male, pad pritiska je mali, i u odnosu na ukupni pritisak je mala vrednost, i nema značajnog uticaja na druge parametre, tako da je usvojena pretpostavka opravdana.

Jednačina količine kretanja kao osnovna jednačina količine kretanja za nestacionarne uslove rada, jed.(6.13), korišćenjem jed.(2.2) i jed.(2.57) data je u sledećem obliku:

$$l_{VP2} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \frac{\partial w_{2izl}^{VP}(t)}{\partial t} + l_{VP2} \cdot w_{2izl}^{VP}(t) \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{VP}(t)}{\partial t} = p_{izl}^B(t) - \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot z_1 \cdot R \cdot T_{izl}^{VP}(t) + \beta \cdot \rho_B(t) \cdot \left( \frac{p_{izl}^B(t)}{p_B(t)} \right)^{\frac{1}{n_B}} \cdot \frac{A_C^2}{A_{VP}^2 \cdot 3.138^2} \cdot w_{izl}^{B2}(t) - \beta \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot w_{2izl}^{VP2}(t) \quad (6.44)$$

Konačna linearizovana jednačina količine kretanja, a u skladu sa prilogom II, ima oblik:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta Y}(t) = & \frac{1}{0.02757} \cdot \left( -\frac{\partial \overline{\Delta w_{2izl}^{VP}}(t)}{\partial t} - 0.13082 \cdot \overline{\Delta p^B}(t) + 0.19472 \cdot \overline{\Delta \rho^B}(t) \right) \\ & \frac{1}{0.02757} \cdot \left( -0.19204 \cdot \overline{\Delta w_{2izl}^{VP}}(t) + 1.26426 \cdot 10^6 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) - 1.26426 \cdot 10^6 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) \right) \cdot \\ & \frac{1}{0.02757} \cdot \left( +0.41704 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^B}(t) - 4.59 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 8.33724 \cdot 10^5 \cdot \overline{\Delta x}(t) \right) \end{aligned} \quad (6.45)$$

Entalpija na izlazu visoko – pritisne strane može se izračunati na sledeći način:

$$h_{izl}^{VP} = h_{00}^{NP} + c_{p3} \cdot \theta_0^{NP} - r \cdot (1 - x), \quad (6.46)$$

gde je:

$h_{00}^{NP}$  - entalpija na niskopritisnoj strani pri pritisku  $p = 1[bar]$  i  $\theta = 0[^\circ C]$ , a

$r$  - latentna toplota isparavanja rashlađivača pri pritisku  $p = 1[bar]$ , i

$x$  - stepen suvoće pare.

Kako se gas pri niskim pritisima i visokim temperaturama ponaša kao idealan, entalpija  $i_{00}^{NP}$  može se odrediti i kao entalpija idealnog gasa,  $i_{00}^{NP} = c_p \cdot T$ , pri čemu je  $c_p$  - specifična toplota idealnog gasa, a  $T$  - temperatura u  $[K]$ . U ovoj doktorskoj disertaciji korišćena je entalpija  $i_{00}^{NP}$ , koja je preračunata na osnovu izlazne entalpije iz nisko pritisne strane i srednje specifične toplote pri konstantno pritisku  $c_{p3}$ . Razlika između ovako proračunate entalpije i entalpije idealnog gasa je manja od 1%.

Entalpija na izlazu visoko – pritisne strane piše se na sledeći način:

$$h_{ul}^{VP} = h_{0-350bar}^{VP} + c_{p1} \cdot (\theta_{izl}^B - \theta_0), \quad (6.47)$$

gde je:

$h_{0-350bar}^{VP}$  - entalpija na visokopritisnoj strani pri pritisku  $p = 350[bar]$  i  $\theta = 0[^\circ C]$ . Ova entalpija je izračunata na osnovu jed.(2.49) pri konstantnoj temperaturi  $\theta = 0[^\circ C]$  i upotrebom Džul Tomsonovog koeficijenta.

*Pretpostavka 6.14:* Član  $V_{vp} \cdot \frac{\partial p_{izl}^{VP}}{\partial t}(t)$  u jednačini energije, je zanemaren, jer je usvojeno da je promena pritiska mala za male promene, tako da se može pomenuti član zanemariti u jednačini energije.

Osnovna bilansna jednačina - jednačina održanja energije za neravnotežna stanja procesa, korišćenjem jed.(6.16), može se napisati u početnom obliku:

$$V_{VP} \cdot h_{izl}^{VP}(t) \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{VP}(t)}{\partial t} + V_{VP} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \frac{\partial h_{izl}^{VP}(t)}{\partial t} = G_{ul}^{VP}(t) \cdot h_{ul}^{VP}(t) - G_{izl}^{VP}(t) \cdot h_{izl}^{VP}(t) - Q_{ODV}^{VP}(t) \quad (6.48)$$

ili u razvijenom obliku, korišćenjem, jed. (6.46) i jed. (6.47), a u skladu sa prilogom II:

$$\left( \frac{\partial i_0^{NP}(t)}{\partial t} + r \cdot \frac{\partial x(t)}{\partial t} \right) = \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t)} \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{p_{izl}^{B \frac{n_B+1}{n_B}}(t) \cdot \frac{\rho_B(t)}{p_B^{n_B}(t)} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}(t)}}}$$

$$\cdot \left( c_{p1} \cdot \left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - 273K \right) - c_{p3} \theta_0^{NP}(t) - r \cdot x(t) + h_{01} \right) \quad (6.49)$$

$$- \frac{k_{113}}{V_{VP} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t)} \cdot \rho_{izl}^{NPm}(t) \cdot w_{izl}^{NPm}(t) \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t) \right) - (\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t)) \right)$$

Konačna linearizovana jednačina održanja energije, a u skladu sa prilogom I, ima oblik:

$$\overline{\Delta Y}(t) = \frac{1}{0.24642} \cdot \left( -\frac{\partial \overline{\Delta x}(t)}{\partial t} - 0.27748 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.41964 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.59467 \cdot \overline{\Delta x}(t) \right)$$

$$\frac{1}{0.24642} \cdot \left( +0.45437 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 20.6159 \cdot \overline{\Delta \theta^B}(t) - 0.0746 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) \right) \quad (6.50)$$

$$\frac{1}{0.24642} \cdot \left( -7.24462 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) + 22.4209 \cdot \overline{\Delta \rho^B}(t) - 15.0615 \cdot \overline{\Delta p^B}(t) \right)$$

$$\frac{1}{0.24642} \cdot \left( -0.09204 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) - 0.09204 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) + 1.73695 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) \right)$$

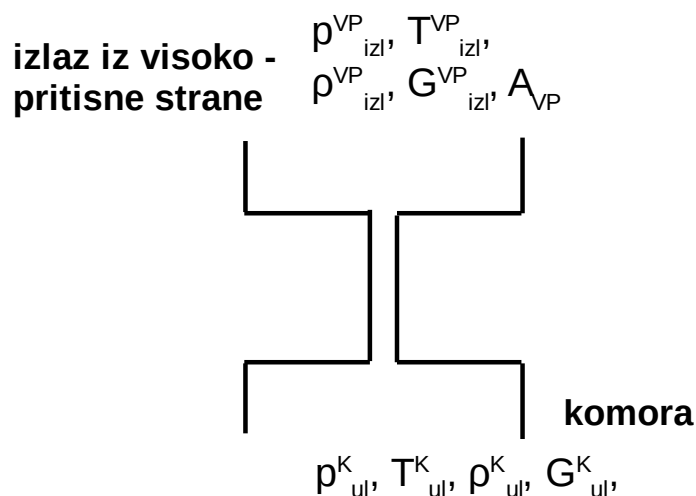
U sledećoj, tabeli 6.3., biće dati osnovni parametri koji karakterišu stanje na izlazu iz visoko – pritisne strane razmenjivača toplote.

Izlaz visoko – pritisna strana (vazduh)	
pritisak	349.99976[bar]
temperatura	157.9[K]
gustina	678[kg/m <sup>3</sup> ]
koeficijent kompresibilnosti	1.139
entalpija	36.6
brzina	0.1096[m/s]

Tabela 6.3. Parametri stanja na izlazu iz visoko – pritisne strane razmenjivača toplote



## 6.4.3. Model ponašanja mlaznica



## Sl.6.5. Mlaznica ulaz – izlaz (konačan pritisak ekspanzije)

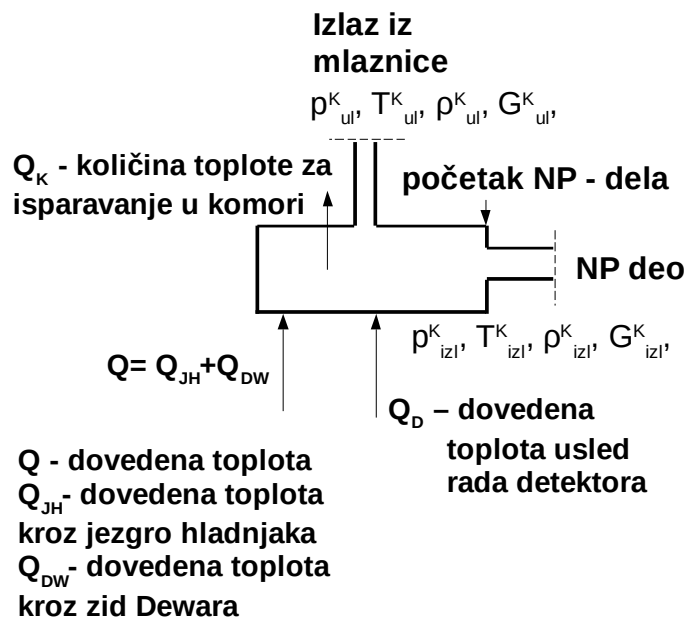
Parametri mlaznice na ulazu odgovaraju parametrima izlaznog dela visoko – pritisne strane. Ekspanzija u mlaznici se vrši tako da su entalpije na početku procesa ekspanzije i na kraju procesa ekspanzije iste tj.  $i_{izl}^{VP} = i_{ul}^K$ . Konačni pritisak ekspanzije odgovara pritisku okoline uvećanom za gubitke pritiska na nisko - pritisnom delu razmenjivača toplote tj.  $p_0^{NP} = p_0 + \Delta p^{NP}$ . U ovoj doktorskoj disertaciji biće korišćen izraz za meseni protok na izlazu iz mlaznice, dat jed. (2.96).

U tabeli 6.4., dati su osnovni parametri koji karakterišu stanje na kraju procesa ekspanzije (pri konačnom pritisku ekspanzije):

Izlaz (konačan pritisak ekspanzije)	
pritisak	1.011[bar]
temperatura	81.7[K]
entalpija	36.6[kJ / kg]
stepen suvoće pare	0.7956

Tabela 6.4. Parametri stanja na izlazu (konačnom pritisku ekspanzije)

## 6.4.4. Model ponašanja komora



Sl.6.6. Komora ulaz - izlaz

Vežu između gustine u preseku koji se nalazi na rastojanju  $x_1$  od početka niskopritisnog dela razmenjivača toplote i gustine na izlazu iz komore, uspostaviće se na sledeći način. Jednačina stanja, jed. (2.2), na rastojanju  $x_1$  od početka niskopritisnog dela razmenjivača toplote:

$$\rho_{izl}^K = \frac{p_{izl}^K}{z_{izl}^K \cdot R \cdot T_{izl}^K}, \quad (6.51)$$

a, jednačina stanja na izlazu iz komore:

$$\rho_0^{NP} = \frac{p_0^{NP}}{z_0^{NP} \cdot R \cdot T_0^{NP}}. \quad (6.52)$$

Iz ove dve jednačine dobija se:

$$\frac{p_{izl}^K}{z_{izl}^K \cdot \rho_{izl}^K \cdot T_{izl}^K} = \frac{p_0^{NP}}{z_0^{NP} \cdot \rho_0^{NP} \cdot T_0^{NP}}, \quad (6.53)$$

odakle sledi i veza između pomenutih gustina:

$$\rho_{izl}^K = \rho_0^{NP} \cdot \frac{p_{izl}^K}{p_0^{NP}} \cdot \frac{z_0^{NP}}{z_{izl}^K} \cdot \frac{T_0^{NP}}{T_{izl}^K}. \quad (6.54)$$

S obzirom da se promena temperature u razmenjivačima toplote, za opšte vrednosti rastojanja  $x_1$ , može napisati u jednostavnijem obliku:

$$T_{izl}^K = T_0^{NP} \cdot e^{\gamma \cdot x_1}, \quad (6.55)$$

gde je:  $\gamma = \frac{k_{raz} \cdot A_{raz}}{G \cdot c_p^{NP}}$ , a promena stanja od izlaza iz komore do rastojanja  $x_1$  niskopritisnog dela razmenjivača toplote je politropska, te važi jednačina:

$$\frac{p_{izl}^K}{p_0^{NP}} = \left( \frac{\rho_{izl}^K}{\rho_0^{NP}} \right)^{n_{NP}}. \quad (6.56)$$

Konačna veza između pomenutih gustina, data je sledećim izrazom:

$$\rho_{izl}^K = \rho_0^{NP} \cdot \left( \frac{\rho_{izl}^K}{\rho_0^{NP}} \right)^{n_{NP}} \cdot \frac{z_0^{NP}}{z_{izl}^K} \cdot \frac{1}{e^{\gamma \cdot x_1}}. \quad (6.57)$$

Sređivanjem poslednje jednačine, može se napisati:

$$\rho_{izl}^{K \cdot 1-n_{NP}} = \rho_0^{NP \cdot 1-n_{NP}} \cdot \frac{z_0^{NP}}{z_{izl}^K} \cdot \frac{1}{e^{\gamma \cdot x_1}}. \quad (6.58)$$

Ako se usvoji da je:

$$k_{NP} = \frac{z_0^{NP}}{z_{izl}^K} \cdot \frac{1}{e^{\gamma \cdot x_1}}, \quad (6.59)$$

izraz za vezu između pomenutih gustina je:

$$\rho_{izl}^K = \rho_0^{NP} \cdot k_{NP}^{\frac{1}{1-n_{NP}}}. \quad (6.60)$$

Za male promene može se usvojiti da je  $k_{NP} = const$ .

Ako se poslednja jednačina diferencira, dobija se:

$$d\rho_{izl}^K(t) = d\rho_0^{NP}(t) \cdot k_{NP}^{\frac{1}{1-n_{NP}}}, \quad (6.61)$$

pri čemu za male promene važi  $d = \Delta$ , tako da se može napisati:

$$\Delta\rho_{izl}^K(t) = \Delta\rho_0^{NP}(t) \cdot k_{NP}^{\frac{1}{1-n_{NP}}}. \quad (6.61a)$$

Veza između relativne promene gustine na rastojanju  $x_1$  od početka niskopritisnog dela razmenjivača toplote i relativne promene gustine na izlazu iz komore, data je izrazom:

$$\overline{\Delta\rho_{izl}^K}(t) \cdot \rho_{izl,N}^K = \overline{\Delta\rho_0^{NP}}(t) \cdot \rho_{0,N}^{NP} \cdot k_{NP}^{\frac{1}{1-n_{NP}}}, \quad (6.62)$$

te korišćenjem jed.(6.60), dobija se:

$$\overline{\Delta\rho_{izl}^K}(t) = \overline{\Delta\rho_0^{NP}}(t). \quad (6.63)$$

Prvi zakon termodinamike, a u skladu sa jed.(4.1), napisan za dvofaznu oblast glasi:

$$T \cdot \Delta s = \Delta u + p \cdot \Delta v. \quad (6.64)$$

Ako poslednji izraz podelimo sa  $\Delta s$  dobija se:

$$T = \frac{\Delta u}{\Delta s} + p \cdot \frac{\Delta v}{\Delta s}, \quad (6.65)$$

pri čemu se može napisati:

$$k_1 = \frac{\Delta u}{\Delta s} \text{ i } k_2 = \frac{\Delta v}{\Delta s}. \quad (6.66)$$

Koeficijenti  $k_1$  i  $k_2$  za male promene predstavljaju konstante (Klauzijus – Klapejronova jednačina).

Prema tome, zavisnost pritiska i temperature, data je sledećom jednačinom:

$$T = k_1 + k_2 \cdot p. \quad (6.67)$$

Jednačina stanja gasa na gornjoj graničnoj krivoj  $x=1$ , data je izrazom:

$$\rho'' = \frac{p}{R \cdot z \cdot (k_1 + k_2 \cdot p)}. \quad (6.68)$$

Diferenciranjem jed. (6.68), i uz uslov da za male promene važi  $d = \Delta$ , može se napisati:

$$\Delta \rho'' = k_1 \cdot \frac{R \cdot z \cdot \rho''^2}{p^2} \cdot \Delta p. \quad (6.69)$$

Promena specifične zapremine, može se napisati:

$$v'' - v' = k_0^{NP} \text{ i } \frac{1}{\rho''} - \frac{1}{\rho'} = k_0^{NP} \quad (6.70)$$

Na osnovu Klauzijus – Klapejronove jednačine, jed.(4.4), može se za male promene usvojiti da je  $k_0^{NP} = const$ .

S obzirom da je, specifična zapremina (gustina) dvofazne mešavine, data sledećim izrazima:

$$v = (1-x) \cdot v' + x \cdot v'', \text{ a } \frac{1}{\rho} = (1-x) \cdot \frac{1}{\rho'} + x \cdot \frac{1}{\rho''} \quad (6.71)$$

može se napisati:

$$\rho = \frac{\rho'' \cdot \rho'}{(1-x) \cdot \rho'' + x \cdot \rho'}. \quad (6.72)$$

Eliminacijom  $\rho'$  iz jed. (6.72), dobija se:

$$\rho = \frac{\rho''}{1 - k_0^{NP} \cdot \rho'' \cdot (1-x)}. \quad (6.73)$$

Zamenom izraza za  $\rho$ , jed. (6.68), u jed. (6.73), i preuređivanjem, dobija se zavisnost gustine  $\rho$  od pritiska i stepena suvoće pare:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot z \cdot (k_1 + k_2 \cdot p) - k_0^{NP} \cdot p \cdot (1-x)}. \quad (6.74)$$

Na osnovu jed.(6.74), lako se nalazi relatina promena gustine, u zasnosti od relativne promene pritiska zasićenja i relativne promene stepena suvoće pare.

Osnovna bilansna jednačina - jednčina kontinuiteta za neravnotežna stanja procesa, jed. (6.10), a korišćenjem jed. (2.91), može se napisati:

$$\begin{aligned} V_K \cdot \frac{\partial \rho_{ul}^{NP}(t)}{\partial t} = & 1.07 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{\kappa_{13} \cdot p_{izl}^{VP}(t) \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa_{13} + 1}\right)^{\frac{\kappa_{13} + 1}{\kappa_{13} - 1}}} \\ & + 1.07 \cdot 0.814 \cdot (1-x(t)) \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{ul}^L(t) \cdot (p_{ul}^M(t) - p_{OK})} - G_{ul}^{NP}(t) \cdot x_2(t) \end{aligned} \quad (6.75)$$

Linearizovana jednačina kontinuiteta, korišćenjem jed. (6.63) i jed. (6.74), a u skladu sa prilogom III, ima oblik:

$$\begin{aligned} 0.891 \cdot \frac{\partial \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)}{\partial t} - 0.995 \cdot \frac{\partial \overline{\Delta x_2}(t)}{\partial t} = & 7.691 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 7.13561 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 7.12684 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\ & + 0.16041 \cdot \overline{\Delta x}(t) + 0.29244 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) + 0.28933 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) - 0.03838 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \end{aligned} \quad (6.76)$$

Konačna linearizovana jednačina kontinuiteta, rešavanjem sistema jednačina (6.76) i (6.80), a u skladu sa prilogom III, ima oblik:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta Y}(t) = & \frac{1}{6.55902} \cdot \left( \frac{\partial \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)}{\partial t} - 6.08538 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 7.63802 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 6.8638 \cdot \overline{\Delta x}(t) \right) \\ & \frac{1}{6.55902} \cdot \left( +8.25147 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) - 0.18006 \cdot \overline{\Delta \theta^B}(t) - 1.35437 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) \right) \end{aligned} \quad (6.77)$$

*Pretpostavka 6.15:* Nema klizanja faza, tj.  $S = 1$ . Prema tome maseni kvalitet pare jednak je protočnom kvalitetu pare.

Osnovna bilansna jednačina - jednčina održanja energije za neravnotežna stanja procesa, korišćenjem jed. (6.16), može se napisati u početnom obliku::

$$\begin{aligned} V_K \cdot \rho_{izl}^K(t) \cdot \frac{\partial h_{izl}^K(t)}{\partial t} + V_K \cdot h_{izl}^K(t) \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^K(t)}{\partial t} = & G_{ul}^K(t) \cdot h_{ul}^K(t) - G_{izl}^K(t) \cdot x_2(t) \cdot h_{izl}^K(t) + Q_{DOV}^{A-1} \\ & + \frac{\lambda_{DW}}{\delta_{DW}} \cdot A_{DW} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + \frac{\lambda_{JH}}{\delta_{JH}} \cdot A_{JH} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + I^2 \cdot R_0 + I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha \cdot (\theta_D(t) - \theta_B(t)) \end{aligned} \quad (6.78)$$

ili u razvijenom obliku, korišćenjem, jed. (2.96), a u skladu sa Prilogom III:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial i_0^{NP}(t)}{\partial t} + r \cdot \frac{\partial x_2(t)}{\partial t} = & \frac{r \cdot (x(t) - x_2(t))}{V_K \cdot \rho_{izl}^K(t)} \cdot \left( 1.07 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot \theta_{izl}^{VP}(t)} \right. \\
& \left. + 0.871 \cdot (1 - x(t)) \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul}^G(t)}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul}^G(t)} \cdot (p_{ul}^M(t) - p_{OK})} \right) \cdot (6.79) \\
& + \frac{\lambda_{DW} \cdot A_{DW}}{\delta_{DW} \cdot V_K \cdot \rho_{izl}^K(t)} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + \frac{\lambda_{JH} \cdot A_{JH}}{\delta_{JH} \cdot V_K \cdot \rho_{izl}^K(t)} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) \\
& + \frac{I^2 \cdot R_0}{V_K \cdot \rho_{izl}^K(t)} + \frac{I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha}{V_K \cdot \rho_{izl}^K(t)} \cdot (\theta_D(t) - \theta_B(t))
\end{aligned}$$

Linearizovana jednačina održanja energije, a u skladu sa prilogom III. ima oblik:

$$\begin{aligned}
0.0438 \cdot \frac{\partial \Delta p_0^{NP}(t)}{\partial t} + \frac{\partial \Delta x_2(t)}{\partial t} = & 0.00903 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}(t)} + 6.09248 \cdot \overline{\Delta x(t)} - 1.57204 \cdot \overline{\Delta Y(t)} \\
& - 1.45852 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}(t)} - 0.02648 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}(t)} - 7.69893 \cdot \overline{\Delta x_2(t)} \quad (6.80) \\
& - 0.05978 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G(t)} - 0.05914 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M(t)} + 0.16904 \cdot \overline{\Delta \theta_B(t)} + 1.27148 \cdot \overline{\Delta \theta_D(t)}
\end{aligned}$$

Konačna linearizovana jednačina održanja energije, rešavanjem sistema jednačina (6.76) i (6.80), ima oblik:

$$\begin{aligned}
\overline{\Delta Y(t)} = & \frac{1}{1.85913} \cdot \left( -\frac{\partial \overline{\Delta x_2(t)}}{\partial t} - 1.72497 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}(t)} + 0.31323 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}(t)} + 5.74349 \cdot \overline{\Delta x(t)} \right) \cdot (6.81) \\
& \frac{1}{1.85913} \cdot (-7.34677 \cdot \overline{\Delta x_2(t)} + 0.16116 \cdot \overline{\Delta \theta_B(t)} + 1.21220 \cdot \overline{\Delta \theta_D(t)})
\end{aligned}$$

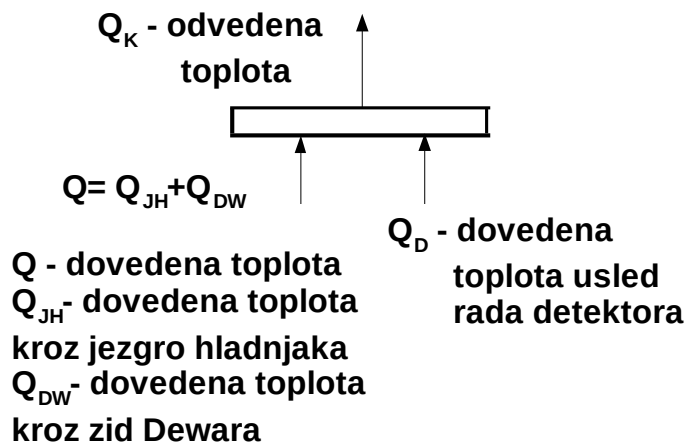
U tabeli 6.5., dati su osnovni parametri koji karakterišu nominalno stacionarno stanje na izlazu iz komore.

Izlaz komora (oznaka $^{NP}_0$ )		Izlaz komora (oznaka $^K_{izl}$ )	
pritisak	1.011[bar]	pritisak	1.0109995[bar]
temperatura	81.7[K]	temperatura	81.7047[K]
gustina	4.48[kg/m <sup>3</sup> ]	gustina	4.47973[kg/m <sup>3</sup> ]
koeficijent kompresibilnosti	0.96243	koeficijent kompresibilnosti	0.9624327
entalpija	78.6[kJ/kg]	lokalni otpor	0.85
eksponent adijabate	0.008253	eksponent adijabate	0.008253

Tabela 6.5. Parametri stanje na izlazu iz komore

## 6.4.5. Model ponašanja detektor:

Na Sl.6.7. data je simbolično funkcionalna šema:



Sl.6.7. Detektor ulaz - izlaz

Osnovna bilansna jednačina - jednačina održanja energije za nestacionarne uslove rada detektora, a korišćenjem jed.(6.16), data je sledećim izrazom:

$$V_D \cdot \rho_D \cdot c_D \cdot \frac{\partial \theta_D(t)}{\partial t} = \frac{\lambda_{DW} \cdot A_{DW}}{\delta_{DW}} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + \frac{\lambda_{JH} \cdot A_{JH}}{\delta_{JH}} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + I^2 \cdot R_0 + I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha \cdot (\theta_D(t) - \theta_B(t)) - (G_{izl}^K(t) \cdot h''(t) - G_{ul}^K(t) \cdot h_{ul}^K(t)) \quad (6.82)$$

Konačna linearizovana jednačina održanja energije za detektor, a u skladu sa prilogom III, ima oblik:

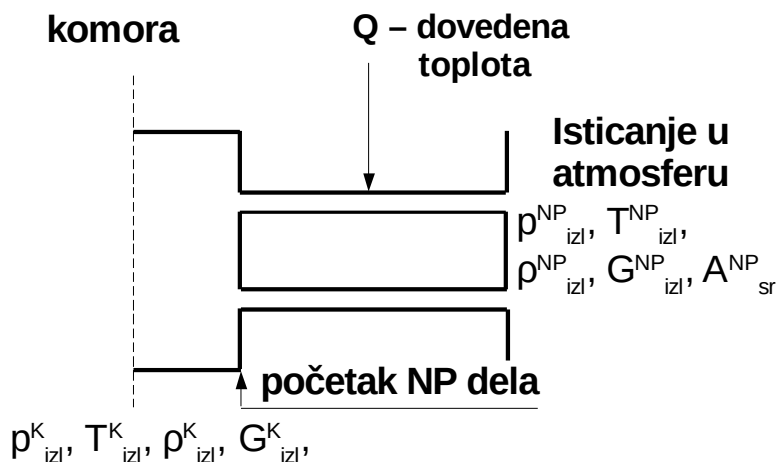
$$\overline{\Delta Y}(t) = \frac{1}{0.28345} \cdot \left( -\frac{\partial \overline{\Delta \theta_D}(t)}{\partial t} - 0.035 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 0.26305 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) - 0.26298 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) \right) + \frac{1}{0.28345} \cdot \left( +0.56881 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 1.28187 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 0.60442 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \right) \quad (6.83)$$

U sledećoj, tabeli 6.6., biće dati osnovni parametri detektora.

Detektor (Indijum- Antimon)	
gustina	5770 [kg/m <sup>3</sup> ]
specifična toplota	0.2 [kJ/kg]
Džulova toplota	50 [mW]
Toplotni gubici	600 [mW]

Tabela 6.6. Osnovni parametri detektora

## 6.4.6. Model ponašanja nisko – pritisna strana



Sl.6.8. Nisko – pritisni deo ulaz – izlaz

*Pretpostavka 6.16:* Promenljiva površina poprečnog preseka niskopritisnog dela razmenjivača toplote, vidi se na Sl. 3.12., zameniće se prosečnom (srednjom) vrednošću površine poprečnog preseka tj. usvojiće se  $A_{sr}^{NP}$ .

*Pretpostavka 6.17:* Odnos površina poprečnog preseka komore i suženog preseka je dovoljno veliki da se koeficijent  $k$  totalnog pritiska na izlaznu površinu komore, može usvojiti  $k=1$ . Ovdje je iskorišćen eksperimentalni podatak Benedikta, lit.[106].

Konačne analitičke jednačine su, za presek na izlazu iz komore označen sa  $p_0^{NP}$  i za presek na rastojanju  $x_1$  od početka niskopritisnog dela razmenjivača toplote označen sa  $p_{izl}^K$ :

- jednačine stanja rashlađivača (kriogenog fluida), korišćenjem jed.(2.2), date su jed.(6.51):

$$\rho_{izl}^K = \frac{p_{izl}^K}{z_{izl}^K \cdot R \cdot T_{izl}^K},$$

i jed. (6.52):

$$\rho_0^{NP} = \frac{p_0^{NP}}{z_0^{NP} \cdot R \cdot T_0^{NP}}$$

- jednačina promene stanja, za usvojenu politropsku promenu stanja od preseka  $p_0^{NP}$  do preseka  $p_{izl}^K$ , a na osnovu jed.(2.57), dobija se jed.(6.56), a napisana kao što sledi:

$$p_{izl}^K = p_0^{NP} \cdot \left( \frac{\rho_{izl}^K}{\rho_0^{NP}} \right)^{n_{NP}}$$



- Majerova jednačina za realan fluid, korišćenjem jed.(2.13) do jed.(2.17) od preseka  $_0^{NP}$  do  $_{izl}^K$  :

$$c_{psr} = \frac{\kappa_{sr}}{\kappa_{sr} - 1} \cdot R \cdot \frac{(z_{izl}^K \cdot T_{izl}^K - z_0^{NP} \cdot T_0^{NP})}{(T_{izl}^K - T_0^{NP})} \quad (6.84)$$

- s obzirom da je brzina u komori jednaka nuli jednačina kontinuiteta se ne koristi pri ovom razmatranju, već samo jednačina za maseni protok realnog gasa na rastojanju  $x_1$  od početka niskopritisnog dela razmenjivača toplote, jed. (2.60), a u skladu sa lit.[101], glasi:

$$G_{izl}^K = A_{sr}^{NP} \cdot \rho_{izl}^K \cdot w_{izl,sr}^K \quad (6.85)$$

- jednačina količine kretanja, jed. (6.23), napisana u vektorskom obliku, i njenim projektovanjem u smeru strujanja fluida, može se napisati:

$$p_0^{NP} = p_{izl}^K + 1.2 \cdot \rho_{izl}^K \cdot w_{izl,sr}^K{}^2 \quad (6.86)$$

- jednačina održanja energije, jed. (2.58), korišćenjem jed. (2.30) za razliku entalpije realnog gasa, jed. (2.48) i jed. (2.46), i izraza za razmenu toplote pri politropskoj stanja a u skladu sa lit.[101], može se napisati:

$$\frac{\kappa_{sr}}{\kappa_{sr} - 1} \cdot R \cdot \frac{(z_{izl}^K \cdot T_{izl}^K - z_0^{NP} \cdot T_0^{NP})}{(T_{izl}^K - T_0^{NP})} \cdot (T_{izl}^K - T_0^{NP}) + \frac{1}{2} \cdot 1.55 \cdot w_{izl,sr}^K{}^2 = c_{vsr} \cdot \frac{n_{NP} - \kappa_{sr}}{n_{NP} - 1} \cdot (T_{izl}^K - T_0^{NP}), \quad (6.87)$$

pri čemu je:  $\kappa_{sr}$  dato jed. (2.47). Izraz (6.87) se mogao dobiti i korišćenjem jed.(6.16) uz korišćenje članova koji definišu kinetičku energiju.

U jednačinu održanja energije je ubačen Koriolisov koeficijent za prstenasti presek  $\alpha = 1.55$  - koeficijent neravnomernosti kinetičke energije za laminarno strujanje, a u jednačinu količine kretanja Businesskov koeficijent  $\beta = 1.2$  - koeficijent neravnomernosti količine kretanja za laminarno strujanje.

Rešavanjem sistema analitičkih jednačina, jed. (6.51), jed. (6.52), jed. (6.56), jed. (6.84) - jed. (6.87), dobijaju se parametri na ulazu u nisko – pritisni deo razmenjivača toplote.

Ako se pođe od jednačine količine kretanja u diferencijalnom obliku, jed.(6.22), napisanu kao što sledi:

$$\frac{dp}{\rho} + wdw + \frac{\tau_w \cdot O \cdot dl}{\rho \cdot A} = 0$$

i iskoristi jednačina adijabate  $p \cdot v^\kappa = const$ ,  $\kappa = \kappa_{sr}$ , posle fiktivne integracije dobija se sledeća jednačina,  $w_1 = 0$ :

$$\frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2} - \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{w_2^2}{2} + \int_1^2 \frac{\tau_w \cdot O \cdot dl}{\rho \cdot A} = 0 \quad (6.88)$$

Lokalni gubitak strujne energije se može predstaviti kao gubitak dela kinetičke energije, tako da se dobija konačna jednačina, u kojoj je uzet i koeficijent neravnomernosti kinetičke energije za laminarno strujanje  $\alpha = 1.55$ :

$$\frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2} - \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} + 1.55 \cdot \frac{w_2^2}{2} + \xi_2 \cdot \frac{w_2^2}{2} = 0. \quad (6.89)$$

Iz jed. (6.89) ukupna strujna energija u izvoru rashlađivača i ukupna strujna energija na izlazu iz izvora rashlađivača se razlikuju za onoliko koliko iznosi gubitak kinetičke energije predstavljen preko lokalnog otpora usled suženja preseka  $\xi_2$ .

Osnovna bilansna jednačina - jednačina kontinuiteta za neravnotežna stanja procesa, a na osnovu jed. (6.10), data je jednačinom:

$$V_{NP} \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = G_{ul}^{NP}(t) \cdot x_2(t) - G_{izl}^{NP}(t). \quad (6.90)$$

ili u razvijenom obliku, korišćenjem jed. (6.89) i jed. (6.55), a u skladu sa prilogom IV, dobija se sledeća jednačina:

$$V_{NP} \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = A_{ul}^{NP} \cdot \rho_{ul}^{NP}(t) \cdot \frac{A_{sr}^{NP}}{A_{ul}^{NP}} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} \cdot x_2(t) - A_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t) \cdot w_{izl}^{NP}(t). \quad (6.91)$$

Konačna linearizovana jednačina kontinuiteta, a u skladu sa Prilogom IV, ima oblik:

$$\overline{\Delta p_0^{NP}}(t) = \frac{1}{9.5731} \cdot \left( \frac{\partial \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t)}{\partial t} - 0.051 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \right) \cdot \frac{1}{9.5731} \cdot \left( 10.12707 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) + 10.12707 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) \right). \quad (6.92)$$

Jednačina za pad pritiska pri izotermskoj promeni stanja za stišljiv fluid, jed.(6.31), je potrebna za formiranje bilansne jednačine količine kretanje i data je izrazom:

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{16 \cdot \lambda_s \cdot l \cdot z_{sr} \cdot R \cdot T}{\pi^2 \cdot D^5} \cdot G^2.$$

Osnovna bilansna jednačina - jednačina količine kretanja za neravnotežna stanja procesa, a na osnovu jed.(6.13), data je sledećom jednačinom:

$$V_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t) \cdot \frac{\partial w_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} + V_{NP} \cdot w_{izl}^{NP}(t) \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = \left( p_0^{NP}(t) - 1.2 \cdot \rho_{ul}^{NP}(t) \cdot w_{ul,sr}^{NP}(t) \cdot x_2(t) - \sqrt{p_{izl,N}^{NP} + k_{113}} \right) \cdot A_{sr}^{NP}, \quad (6.93)$$

ili u razvijenom obliku, a u skladu sa prilogom IV:

$$\frac{\partial w_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = -\frac{w_{izl}^{NP}(t)}{\rho_{izl}^{NP}(t)} \cdot \frac{\rho_{ul}^{NP}(t)}{l_{NP}} \cdot k_{116} \cdot x_2(t) \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} + \frac{A_{NP}}{V_{NP}} \cdot w_{izl}^{NP2}(t) + \frac{P_0^{NP}(t)}{l_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t)} - \frac{1.2}{l_{NP}} \cdot \frac{\rho_{ul}^{NP}(t)}{\rho_{izl}^{NP}(t)} \cdot k_{116}^2 \cdot T_0^{NP}(t) \cdot x_2(t) - \sqrt{\frac{P_{izl,N}^{NP2}}{l_{NP}^2 \cdot \rho_{izl}^{NP2}(t)} + \frac{k_{110}}{l_{NP}^2} \cdot (T_{izl}^{NP}(t) - T_0^{NP}(t) \cdot k_{01}) \cdot w_{izl}^{NP2}(t)}} \quad (6.94)$$

Konačna linearizovana jednačina količine kretanja, a u skladu sa prilogom IV, ima oblik:

$$\overline{\Delta p_0^{NP}}(t) = \frac{1}{1.44434 \cdot 10^7} \cdot \left( \frac{\partial \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t)}{\partial t} + 3.12368 \cdot 10^5 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) + 0.03124 \cdot 10^7 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) \right) \cdot \frac{1}{1.44434 \cdot 10^7} \cdot \left( +1.65741 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) + 0.08662 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \right) \quad (6.95)$$

U toku procesa cooldown dolazi do uspostavljanja temperaturskog gradijenta, tj. temperaturskog profila gasa duž strujnog toka na niskopritisnom delu razmenjivača toplote. S obzirom da je temperatura okoline znatno viša nego temperatura na koju se hladi osetljivi element - detektor, dolazi i do formiranja temperaturskog profila duž zida Dewarove posude.

*Pretpostavka 6.18:* Usvajam da je temperaturski profil zida Dewarove posude, u toku procesa cooldown, isti kao i temperaturski profil gasa na niskopritisnom delu razmenjivača toplote.

Sistem se hladi na temperaturu od 100K, te je i početna temperatura gasa u niskopritisnom delu 100K, a izlazna temperatura jednaka izlaznoj temperaturi niskopritisnog dela na kraju razmenjivača toplote. Temperaturski profil duž strujnog toka ima dobro poznati oblik eksponencijalne funkcije, koji se u analiziranom slučaju svodi na sledeći izraz:

$$T_{21k}(x_1) = e^{(R_{21}-1) \frac{k_{11} \cdot A_{r1} \cdot x_1}{G \cdot c_{psr3}}} \cdot \left( \frac{T_{11k} - R_{21} \cdot T_{21p}}{R_{21} - 1} + T_{21p} \right) - \frac{T_{11k} - R_{21} \cdot T_{21p}}{R_{21} - 1}, \quad (6.96)$$

pri čemu je:

$T_{21k}(x_1)$  - promena temperature na niskopritisnom delu u zavisnosti od rastojanja  $x_1$  (konačna temperatura niskopritisnog dela razmenjivača toplote),

$R_{21}$  - odnos toplotnih ekvivalenata, dat izrazom,

$$R_{21} = \frac{G \cdot c_{psr3}}{G \cdot c_{psr1}}, \quad (6.97)$$

$c_{psr3}$  - srednji specifični toplotni kapacitet na niskopritisnom delu razmenjivača toplote,

$c_{psr1}$  - srednji specifični toplotni kapacitet na visokopritisnom delu razmenjivača toplote,

$k_{11}$  - koeficijent prolaza toplote,

$T_{11k}$  - izlazna temperatura visokopritisnog dela razmenjivača toplote,

$T_{21p}$  - početna temperatura niskopritisnog dela razmenjivača toplote.

$A_{r1} = \frac{A_r}{l_{iz}}$  - površina razmenjivača toplote, definisana po 1mm dužine (rastojanja).

Iz napred rečenog, može se zaključiti da profil temperature zida Dewara, na kraju procesa cooldown, definisan jed. (6.96), ne menja se sve dotle dok mu se ne dovede rashladni kapacitet sposoban da dalje ohladi zid Dewara. S obzirom da se u sledećem procesu, definisanom kao, period hlađenja, dovodi rashladni kapacitet dovoljan samo za hlađenje osetljivog elementa – detektora, temperaturski profil zida Dewara zadržava svoju temperatursku promenu (graadijent).

Temperaturski profil gasa u procesu, period hlađenja, duž niskopritisnog dela razmenjivača toplote, ima takođe oblik eksponencijalne funkcije, dat izrazom:

$$T_{2k}(x_1) = e^{\frac{(R_2-1) \cdot k_1 \cdot A_{r1} \cdot x_1}{G \cdot c_{pv} \cdot 3}} \cdot \left( \frac{T_{1k} - R_2 \cdot T_{2p}}{R_2 - 1} + T_{2p} \right) - \frac{T_{1k} - R_2 \cdot T_{2p}}{R_2 - 1}. \quad (6.98)$$

Definisanje parametara u prethodnoj jednačini je isto, kao i za jednačinu koja odgovara režimu cooldown. U režimu, rashladni period, početna temperatura gasa, niskopritisnog dela razmenjivača toplote je  $81.7K$ , a izlazna, odgovara izlaznoj temperaturi razmenjivača toplote u toku režima, period hlađenja.

Na kraju, će se pokušati odrediti da li dolazi do prelaza toplote između gasa i zida Dewarove posude. To se može uraditi, koristeći sledeći matematički zapis:

$$Q_1 = \int_0^{l_{iz}} \alpha_{NP} \cdot d_1 \cdot \pi \cdot (T_{21k}(x_1) - T_{2k}(x_1)) \cdot dx_1, \quad (6.99)$$

gde je:

$\alpha_{NP}$  - koeficijent konvekcije (prelaza toplote) niskopritisnog dela,

$d_1$  - prečnik Dewarove posude.

Integraljenjem jed. (6.99) dobija se da je  $Q_1 = 0$ , tj. da je proces adijabatski, odakle se zaključuje da nema razmene toplote između zida Dewarove posude i gasa, koji struji u niskopritisnom delu razmenjivača toplote.

*Pretpostavka 6.19:* Član  $V_{NP} \cdot \frac{\partial p_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = 0$ , jer je pritisak na izlazu iz niskopritisnog dela razmenjivača toplote jednak atmosferskom i konstantan je, tako da ga nema u jednačini energije.

Osnovna bilansna jednačina – jednačina održanja energije za neravnotežna stanja procesa, a na osnovu jed. (6.16), data je sledećim izrazom:

$$\begin{aligned}
V_{NP} \cdot h_{izl}^{NP}(t) \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} + V_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t) \cdot \frac{\partial h_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = G_{ul}^{NP}(t) \cdot h_{ul}^{NP}(t) \cdot x_2(t) - G_{izl}^{NP}(t) \cdot h_{izl}^{NP}(t) \\
+ k_{113} \cdot \rho_{izl}^{NPm}(t) \cdot w_{izl}^{NPm}(t) \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \frac{p^B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T^B(t) \cdot \frac{z^B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t) \right) - \left( \theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t) \right) \right), \quad (6.100)
\end{aligned}$$

ili u razvijenom obliku, a u skladu sa prilogom IV:

$$\begin{aligned}
c_{p3} \cdot \frac{\partial \theta_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = c_{p3} \cdot \left( \theta_0^{NP}(t) - \theta_{izl}^{NP}(t) \right) \cdot \frac{\rho_{ul}^{NP}(t)}{l_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t)} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{\theta_0^{NP}(t)} \cdot x_2(t) \\
+ \frac{k_{113}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl}^{NPm-1}(t) \cdot w_{izl}^{NPm}(t) \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \frac{p^B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T^B(t) \cdot \frac{z^B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t) \right) - \left( \theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t) \right) \right). \quad (6.101)
\end{aligned}$$

Konačna linearizovana jednačina održanja energije, a u skladu sa prilogom IV, ima oblik:

$$\begin{aligned}
\overline{\Delta p_0^{NP}}(t) = \frac{1}{89.4238} \cdot \left( -\frac{\partial \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t)}{\partial t} - 1.453 \cdot 10^3 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) - 0.47609 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \right) \\
\frac{1}{89.4238} \cdot \left( 76.20159 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) + 76.45402 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) + 1.2617 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta p^B}(t) \right) \\
\frac{1}{89.4238} \cdot \left( +6.165 \cdot 10^3 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) - 1.7323 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta \theta^B}(t) \right) \\
\frac{1}{89.4238} \cdot \left( -1.8782 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta \rho^B}(t) + 108.06577 \cdot \overline{\Delta x}(t) \right) \quad (6.102)
\end{aligned}$$

U sledećoj, tabeli 6.7., biće dati osnovni parametri koji karakterišu stanje na izlazu iz nisko – pritisnog dela razmenjivača toplote.

Izlaz iz nisko – pritisna strana	
pritisak	1.0[bar]
temperatura	295.74[K]
gustina	1.19[kg/m <sup>3</sup> ]
koeficijent kompresibilnosti	0.99006
entalpija	295.4[kJ/kg]
eksponent adijabate	0.008253
srednja površina poprečnog preseka	35.67mm <sup>2</sup>
ekvivalentni prečnik	2.937mm

Tabela 6.7. Parametri stanje na izlazu iz nisko – pritisnog dela razmenjivača toplote.

Prilikom obrade poglavlja VI, korišćena je lit.[59]-[78] i [99]-[112].

## 7.0. DINAMIKA KRIOGENOG RAZMENJIVAČA TOPLOTE KAO OBJEKTA UPRAVLJANJA

### 7.1. Matematičko modeliranje

Matematičkim modelom se vrši formalno opisivanje procesa, korišćenjem matematičkih simbola, relacija, operacija ili dijagrama. Takođe, matematičkim modelom se definišu i statičke kao i dinamičke osobine sistema nezavisno od početnih uslova, vrednosti ulaznih veličina i karaktera njihovih promena. lit. [51].

Verodostojnost matematičkog modela se ogleda u tome da je u potpunosti sposoban da zameni stvarni, fizički sistem, a to znači da sadrži sve neophodne informacije o sistemu koji predstavlja.

Prilikom formiranja matematičkog modela nekog sistema, objekta ili procesa osnovne etape su:

- 1) opis procesa,
- 2) izrada, po mogućstvu, simboličko-funkcionalne šeme,
- 3) usvajanje modela (kontrolna granica, pretpostavke),
- 4) postavljanje neophodnog broja bilansnih jednačina i potrebnog broja dopunskih jednačina,
- 5) izbor upravljačkih, upravljanih i poremećajnih veličina, kao i veličina stanja,
- 6) formiranje odgovarajućih matematičkih modela u vremenskom, kompleksnom i frekventnom domenu, kao i u prostoru stanja,
- 7) formiranje, po mogućstvu, odgovarajućih blok-dijagrama,
- 8) konkretizacija, linearizacija matematičkog modela za neki usvojeni nominalni radni režim, tako da se dobiju numeričke vrednosti vremenskih i drugih konstantni sistema. lit.[38],[39],[48].

Pri analiziranju sistema veoma je značajno, produbiti saznanja o sistemu, što je od krucijalne važnosti za modeliranje. Modeliranje procesa se odvija usvajanjem kontrolnih granica kao i određenog broja pretpostavki, da bi se na taj način stvarni sistem pojednostavio i idealizovao. Posebno treba voditi računa o broju i opravdanosti usvojenih pretpostavki pri čemu svaka usvojena pretpostavka mora da sadrži odgovarajuće obrazloženje. Na osnovu detaljnog obrazloženja mora da se vidi kako pretpostavka utiče na pojednostavljenja u matematičkom smislu. Nedovoljan broj pretpostavki može da dovede do veoma složenih matematičkih modela, koji nemaju veliku upotrebnu vrednost, a preterani broj usvojenih pretpostavki može značajno da izmeni sliku o stvarnom sistemu. lit.[38],[39],[48].

Da bi postupak rešavanja dobijenog sistema diferencijalnih jednačina, doveo do zadovoljavajućih rešenja, potrebno je izvršiti takav izbor upravljanih, upravljačkih i poremećajnih veličina koje bi omogućile formiranje takvog matematičkog modela iz kojeg će se jasno uočiti promene izlaznih veličina. Primena osnovnih zakona fizike, prvenstveno zakona o održanju mase, impulsa i energije, ali i niz drugih zakona koje nameće sama priroda procesa, je osnova za kvalitetno analitičko izvođenje odgovarajućih modela.

Usvajanjem konkretnih numeričkih vrednosti, kao što su vremenske i druge konstante sistema, se vrši konačno oblikovanje matematičkih modela. Kako su najčešće u pitanju

linearizovani matematički modeli, potrebno je usvojiti jedan nominalni radni režim rada sistema. Potom se prikupljaju relevantni podaci o njemu, uzimajući u obzir podatke o radnim i geometrijskim karakteristikama sistema što omogućava lako izračunavanje traženih koeficijenata u diferencijalnim jednačinama. lit.[38],[51].

Naravno, za uspešno rešavanje dobijenog sistema diferencijalnih jednačina, tj. njegovog matematičkog modela, potrebno je i poznavanje odgovarajućih uslova, naročito graničnih i početnih uslova.

Takođe, treba analizirati i upotrebnu vrednost dobijenog matematičkog modela, tj. u kojoj meri je on verodostojan stvarnom procesu i sa koliko poverenja se isti može koristiti u izvođenju odgovarajućih zaključaka.

Ekperimentalno snimljeno ponašanje realnog sistema, mogućnost da se dobijeni sistem jednačina reši za identične uslove u kojima je sproveden eksperiment, kao i da se dobijeni rezultati u grafičkom obliku uporede sa onim eksperimentalnim, mogu da daju koristan odgovor na napred definisana pitanja. lit.[38],[51].

## 7.2. Dinamika strujnih i strujno-termičkih procesa

Realni fluidi kreću se pod uticajem neke rezultujuće sile koja može nastati kako usled dejstva spoljašnjih (zapreminskih) sila kao što su viskozne, elastične i inercione sile, tako i usled dejstva sila pritiska. Prilikom razmatranja procesa, uzimanje u obzir neke od pomenutih sila, zavisi od prirode problema kao i od željene tačnosti njegovog izučavanja.

Ako se zanemare viskozne, kao i elastične sile koje se javljaju kod stišljivih fluida, takvo strujanje se posmatra kao strujanje neviskoznog (savršenog) i nestišljivog fluida. Inače, pri strujanju gasova velikim brzinama, pri  $M > 0.2$ , stišljivost fluida ne sme se zanemariti, tako da je tada u pitanju slučaj strujanja viskoznog, stišljivog fluida koji ima najveći značaj za proučavanje realnog strujanja. Međutim, pokušaj opisivanja takvih pojava nailazi na veoma složene problem, tako da je do sada samo mali broj problema uspešno rešen. Usled viskoznosti fluida i međusobnog uticaja zidova cevi i njih samih, prilikom strujanja fluida dolazi do pojave njihovog otpora kretanju usled njihove mase i sila otpora trenja. Cevovodi, kojima se transportuju fluidi, predstavljaju posebno ograničenje na njihovo kretanje. Prema tome. ponašanje strujnih procesa pored osnovnih osobina fluida i režima strujanja biti diktirano i osobinama sprovodnog aparata. lit. [38],[51].

Gubici strujne energije u cevovodu pored gubitaka usled trenja mogu biti i gubici strujne energije usled lokalnih gubitaka (lokalnih otpora), a koji se javljaju ako se u cevovod ugrade: ventili, kolena, prigušnice i drugi elementi koji dovode do lokalnih gubitaka strujne energije, kao sastavnih delova pomoćne opreme. Međusobna zavisnost pritisaka i protoka znatno otežava proučavanje dinamike strujanja. Takođe, razlika pritisaka dovodi do kretanja fluida, računajući i slučajeve kada pumpa ili kompresor predstavljaju izvore fluidne struje.

Strujanje fluida određuju, i druge pojave koje treba uzeti u obzir, kao što su hidraulični udari, strujanje nadzvučnim brzinama, stojeći i udarni talasi, rezonantni efekti i dr. Kada je neophodno uzeti u obzir i elastična svojstva zidova i cevi sudova, kroz koje se fluid kreće ili u kojima je uskladišten, ova problematika postaje još složenija. lit.[38],[51].

U različitim kanalima, stacionarno strujanje nestišljivog fluida kroz cev konstantnog poprečnog preseka, odvija se pri konstantnoj brzini,  $w = const$ , a stacionarno strujanje stišljivog fluida pri konstantnom masenom fluksu (strujnoj gustini)  $\rho w = const$ . Karakteristično za oba slučaja je da se strujanje u kanalima odvija pri konstantnom protoku u



stacionarnim radnim režimima. U prelaznim režimima, prilikom strujanja nestišljivih fluida, čija je gustina relativno velika, dolazi do ubrzanja fluidne mase, koja izaziva značajne promene pritiska i protoka. Taj dinamički član se ne može zanemariti prilikom strujanja nestišljivog fluida, što nije slučaj kod strujanja gasova i para.

Akumulacija je proces, u prelaznim režimima, koji predstavlja povećanje ili smanjenje ukupne mase fluida u jedinici zapremine, tj. pri konstantnoj zapremini. To je karakteristika, specifična osobina, stišljivih gasova i para. Prema tome, korišćenje jednačine kontinuiteta u matematičkom modeliranju ovih procesa, je nezaobilazno. Cevovodi zajedno sa pomoćnom opremom (ventili, prigušnice, lokalni otpori, filterske grupe), sudovi pod pritiskom, izvori fluidne struje (pumpe, kompresori), obrazuju strujno kolo, koje se po analogiji sa električnim kolom (analogija koja važi samo za laminarna strujanja, a ne važi za turbulentna strujanja), može prilično jednostavno izučavati, ako se uvedu slični, analogni pojmovi. lit.[48].

Takođe, vrlo bitno pri strujanju gasova je:

- ako se, proces sabijanja ili širenja odvija dovoljno sporo, tako da se uspostavlja dobra razmena toplote sa okolinom, promena stanja gasa pokorava se izotermnom procesu.

- u slučaju, ako se proces sabijanja ili širenja odvija brzo, tako da je razmena toplote sa okolinom relativno slaba, promena stanja gasa pokorava se adijabatskom procesu. lit.[48].

U velikom broju strujnih procesa, na kretanje fluida, bitno utiče izmena toplotnog stanja fluida praćena promenom temperature, koja povlači promenu gustine, a posledično i promenu pritiska, kao i niz drugih svojstava fluida.

Temperatursko polje elemenata, koji služe za transport fluida (cevi, cevovodi) i njegovo uskladištenje (sudovi, rezervoari) se menja, usled razmene toplote sa okolinom, tako da dolazi do promene fizičkih osobina materijala istih. Promena koja će se uzeti u obzir zavisi od prirode razmatranog procesa. Takođe, na kvalitet i kvantitet prenosa toplote utiče postojanje temperaturskog gradijenta između prijemnika i predajnika toplote.

Razmena toplote najčešće se obavlja između čvrste površine i fluida (rekuperativni razmenjivači toplote) ili fluida u kretanju (konvektivni razmenjivači toplote) tako da su ovi i slični procesi obuhvaćeni zajedničkim nazivom strujno-termički procesi. lit.[38],[51].

Procesi pretvaranja elektro i solarne energije u toplotnu, kao i klasični procesi sagorevnja posmatraju se i analiziraju kao termički procesi. Prema tome, strujno-termički i termički procesi mogu se javiti ili u sklopu drugih tehnoloških operacija (postupaka) ili individualno.

Definisanje strujno-termičkih procesa zahteva da se pored jednačina koje određuju strujni proces uvede i jednačina koja će odrediti temperatursko polje. Iz tog razloga upotrebljava se jednačina toplotnog bilansa ispisana za nestacionarna stanja rada procesa. Ta jednačina, nije ništa drugo nego, prvi princip termodinamike primenjen na svakii akumulator toplote u procesu. lit.[38],[51].

Temperaturska polja kako čvrstih materijala tako i fluida, po pravilu su nehomogena:

$$\theta = \theta(t, \xi, \eta, \nu), \quad (7.1)$$

gde su:  $\xi, \eta, \nu$  koordinate, što u matematičkim modelima strujno-termičkih procesa povlači prisustvo parcijalnih diferencijalnih jednačina, pri čemu su ovakvi matematički modeli veoma kompleksni i njihova aplikativna vrednost često se dovodi u pitanje.

Najčešće se temperatursko polje proglašava homogenim ili zavisnim od jedne prostorne koordinate. U tom slučaju se smatra da je izražena neka geometrijska karakteristika sprovodnog aparata ili temperaturski gradijent u tom procesu. lit.[38],[51].

Prostiranje toplote odvija se na tri načina:

1. provođenjem (kondukcijom) – molekularno prostiranje i tada se delići materije ne kreću. Toplotni protok određen je Furijeovim zakonom u stacionarnom stanju,:

$$Q_{\lambda}(\xi, \eta, \nu) = -\lambda \cdot A \cdot |\text{grad}\theta(\xi, \eta, \nu)| = -\lambda \cdot A \cdot \left( \frac{\partial\theta(\xi, \eta, \nu)}{\partial\xi} + \frac{\partial\theta(\xi, \eta, \nu)}{\partial\eta} + \frac{\partial\theta(\xi, \eta, \nu)}{\partial\nu} \right). \quad (7.2)$$

Poslednji izraz za jednoslojan, homogen, ravan zid poprima oblik:

$$Q_{\lambda}(\xi) = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot (\theta_1(\xi) - \theta_2(\xi)). \quad (7.3)$$

Izraz  $\frac{\delta}{\lambda}$  poznat je u literaturi kao toplotni otpor.

2. prelazom (konvekcijom) - molarno prostiranje i tada se delići materije kreću i prenose sa sobom svoju unutrašnju energiju. Toplotni protok određen je Njutnovim zakonom:

$$Q_{\lambda}(t, \xi, \eta, \nu) = \alpha \cdot A \cdot \Delta\theta(t, \xi, \eta, \nu). \quad (7.4)$$

Konvekcija može biti prirodna i prinudna.

3. Zračenjem (radijacijom) – kada se unutrašnja energija materije pretvara u elektromagnetnu energiju magnetnih talasa. Toplotni protok koje emituje apsolutno crno telo, određen je Štefan –Bolcmanovim zakonom:

$$Q_{\lambda}(t, \xi, \eta, \nu) = \sigma \cdot A \cdot \theta^4(t, \xi, \eta, \nu). \quad (7.5)$$

Kombinovani prenos toplote, u literaturi nazvan kao prolaz toplote, objedinjuje provođenje i prelaz toplote. Ako iz nekog suda ili rezervoara dotiče ili ističe nosilac toplote u strujno-termičkim procesima je definisan kao radni fluid. Na osnovu bilansnih jednačina, koje se postavljaju za ponašanje procesa u prelaznim nestacionarnim režimima rada, kao konačni rezultat dobija se matematički model strujno-termičkih procesa. Napomenuće se, da za svaki deo procesa, koji je sposoban da akumulira toplotu se postavljaju jednačine toplotnog bilansa. lit.[38],[51].

### 7.3. Izbor upravljačkih, upravljanih, poremećajnih veličina

Temperatura detektora je regulisana veličina, dok svi ostali parametri procesa predstavljaju ili veličine stanja ili ulazne ili izlazne veličine. U daljem izlaganju biće izveden matematički model za temperaturu detektora kao parametar koji se reguliše, pomeranje igle kao upravljačke veličine, a pritisak u boci, temperatura u boci, gustina u boci, temperatura okoline kao poremećaji. Pritisak okoline je usvojen da je konstantan-atmosferski (iako je u praktičnim primenama, realnim uslovima, zavistan od visiinske koordinate  $z$  tj.  $p(z) = \text{const}$ ). Hladnjak najčešće radi, u laboratorijskim uslovima, pri tom konstantnom pritisku, premda se i on može varirati, ubacivanjem u izlazni deo hladnjaka, prigušnica, ventila itd.

### 7.4. Matematički model razmatranog procesa - nestacionarne jednačine ponašanja procesa trajanje (period) hlađenja

Da bi se uradio, formirao model u prostoru stanja, potrebno je iskoristiti linearizovane diferencijalne jednačine svakog segmenta, koje su detaljno opisane i obrađene u poglavlju VI

i odgovarajućim priložima. Dakle, ovde će biti nabrojane po segmentima u drugačijem obliku podesnom za analizu u prostoru stanja, tako da se može napisati:

#### 7.4.1. Izvor kriogenog rashlađivača (boca)

Konačna linearizovana jednačina kontinuiteta, ima oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta p_{izl}^B}(t)}{\partial t} = & -51.05473 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 59.49359 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) \\ & - 17.1637 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) + 25.55368 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 25.55368 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) \end{aligned} \quad (7.6)$$

Konačna linearizovana jednačina količine kretanja, ima oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta w_{izl}^B}(t)}{\partial t} = & 3.16538 \cdot 10^8 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) - 17.1673 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 3.16537 \cdot 10^8 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) \\ & + 34.29924 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 57.1802 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^B}(t) + 17.1673 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) \end{aligned} \quad (7.7)$$

#### 7.4.2. Visoko-pritisna strana razmenjivača toplote

Konačna linearizovana jednačina kontinuiteta, ima oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t)}{\partial t} = & 0.08651 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 0.07239 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) - 0.02909 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) \\ & + 0.0433 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 0.04341 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 0.08671 \cdot \overline{\Delta w_{2izl}^{VP}}(t) \end{aligned} \quad (7.8)$$

Konačna linearizovana jednačina količine kretanja, ima oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta w_{2izl}^{VP}}(t)}{\partial t} = & -0.19204 \cdot \overline{\Delta w_{2izl}^{VP}}(t) - 0.02757 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 1.26426 \cdot 10^6 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) \\ & - 0.13082 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) + 0.19472 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 1.26426 \cdot 10^6 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) \\ & + 0.41704 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^B}(t) - 4.59 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 8.33724 \cdot 10^5 \cdot \overline{\Delta x}(t) \end{aligned} \quad (7.9)$$

Konačna linearizovana jednačina održanja energije, ima oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta x}(t)}{\partial t} = & -0.24642 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 0.27748 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.41964 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.59467 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\ & + 0.45437 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 20.6159 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 0.0746 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) \\ & - 7.24462 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) + 22.4209 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 15.0615 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) \\ & - 0.09204 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) - 0.09204 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) + 1.73695 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) \end{aligned} \quad (7.10)$$

#### 7.4.3. Komora

Konačna linearizovana jednačina kontinuiteta, ima oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)}{\partial t} = & 6.55902 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 6.08538 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 7.63802 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\ & + 6.8638 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 8.25147 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 0.18006 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) + 1.35437 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) \end{aligned} \quad (7.11)$$

Konačna linearizovana jednačina održanja energije, ima oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta x_2}(t)}{\partial t} = & -1.85913 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 1.72497 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.31323 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 5.74349 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\ & - 7.34677 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 0.16116 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) + 1.21220 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) \end{aligned} \quad (7.12)$$

#### 7.4.4. Detektor

Konačna linearizovana jednačina održanja energije za detektor, ima oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta \theta_D}(t)}{\partial t} = & -0.035 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 0.26305 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) - 0.28345 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 0.26298 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) \\ & + 0.56881 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 1.28187 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 0.60442 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \end{aligned} \quad (7.13)$$

#### 7.4.5. Nisko-pritisna strana razmenjivača toplote

Konačna linearizovana jednačina kontinuiteta, ima oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t)}{\partial t} = & 9.5731 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 0.051 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \\ & - 10.12707 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) - 10.12707 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) \end{aligned} \quad (7.14)$$

Konačna linearizovana jednačina količine kretanja, ima oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t)}{\partial t} = & -3.12368 \cdot 10^5 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) - 0.03124 \cdot 10^7 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) \\ & + 1.44434 \cdot 10^7 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 1.65741 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) - 0.08662 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \end{aligned} \quad (7.15)$$

Konačna linearizovana jednačina održanja energije, ima oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t)}{\partial t} = & -1.453 \cdot 10^3 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) - 89.4238 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.47609 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \\ & + 76.20159 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) + 76.45402 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) + 1.2617 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) \\ & + 6.165 \cdot 10^3 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) - 1.7323 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 1.8782 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) + 108.06577 \cdot \overline{\Delta x}(t) \end{aligned} \quad (7.16)$$

Na bazi prethodnih jednačina, jed. (7.6) do jed. (7.16), moguće je formirati model u prostoru stanja, pri čemu je jednačina stanja, data sledećim izrazom:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{b} \cdot u(t) + \mathbf{F} \cdot \mathbf{z}(t) \quad (7.17)$$

gde su:

$\mathbf{x}(t)$  - vektor stanja,  $u(t)$  - upravljanje,  $\mathbf{z}(t)$  - vektor poremećaja. Dalje, sa  $A, \mathbf{b}, F$  su obeležene matrice i to matrica stanja, matrica upravljanja i matrica poremećaja, sledstveno.

Jed. (7.17), može se napisati u konkretnom obliku:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \\ \dot{x}_5(t) \\ \dot{x}_6(t) \\ \dot{x}_7(t) \\ \dot{x}_8(t) \\ \dot{x}_9(t) \\ \dot{x}_{10}(t) \\ \dot{x}_{11}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -59.49359 & 0 & -25.55368 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3.16537 \cdot 10^8 & -57.1802 & 17.1673 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.07239 & 0 & -0.04341 & -0.08671 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.26426 \cdot 10^6 & 0.41704 & -1.26426 \cdot 10^6 & -0.19204 & -8.337 \cdot 10^5 & -4.59 \cdot 10^4 & 0.41964 & 0.45437 & -0.0746 & -0.09204 & 0 \\ -7.24462 & 0 & -0.27748 & 0 & -0.59467 & 0.41964 & -7.63802 & -8.25147 & 1.35437 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6.08598 & 0 & 6.8638 & -7.63802 & 0.31323 & -7.34677 & 1.21220 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.72497 & 0 & 5.74349 & 0.31323 & -1.28187 & -0.60442 & -0.26305 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.26298 & 0 & -1.28187 & 0.56881 & 9.5731 & 0.051 & 0 & -10.12707 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9.5731 & 1.44434 \cdot 10^7 & -0.08662 & 0 & -0.03124 \cdot 10^7 & 0 \\ 6.165 \cdot 10^5 & 0 & 0 & 0 & 108.06577 & -89.42378 & -0.47609 & 0 & 0 & 76.20159 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \\ x_7(t) \\ x_8(t) \\ x_9(t) \\ x_{10}(t) \\ x_{11}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -51.05473 \\ 34.29924 \\ 0.08651 \\ -0.02757 \\ -0.24642 \\ 6.55902 \\ -1.85913 \\ -0.28345 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t) + \begin{bmatrix} -17.16737 \\ 3.16538 \cdot 10^8 \\ -0.02909 \\ -0.13082 \\ -15.0615 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ z_3(t) \\ z_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 25.55368 & 0 & 0 & 0 \\ -17.1673 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0433 & 0 & 0 & 0 \\ 0.19472 & 0 & 0 & 0 \\ 22.4209 & 20.6159 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.18006 & 0 \\ 0 & 0 & 0.16116 & 0 \\ 0 & 0 & -0.035 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.2615 \cdot 10^4 & -1.8782 \cdot 10^4 & -1.7323 \cdot 10^4 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ z_3(t) \\ z_4(t) \end{bmatrix}$$

(7.18)

Jednačina izlaza data je sledećim izrazom:

$$\mathbf{x}_i(t) = C \cdot \mathbf{x}(t) \quad (7.19)$$

gde je:

$\mathbf{x}_i(t)$  - vektor izlaza, a sa  $C$  matrica izlaza.

Jed. (7.19), može se napisati u konkretnom obliku:

$$x_i(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \\ x_7(t) \\ x_8(t) \\ x_9(t) \\ x_{10}(t) \\ x_{11}(t) \end{bmatrix}. \quad (7.20)$$

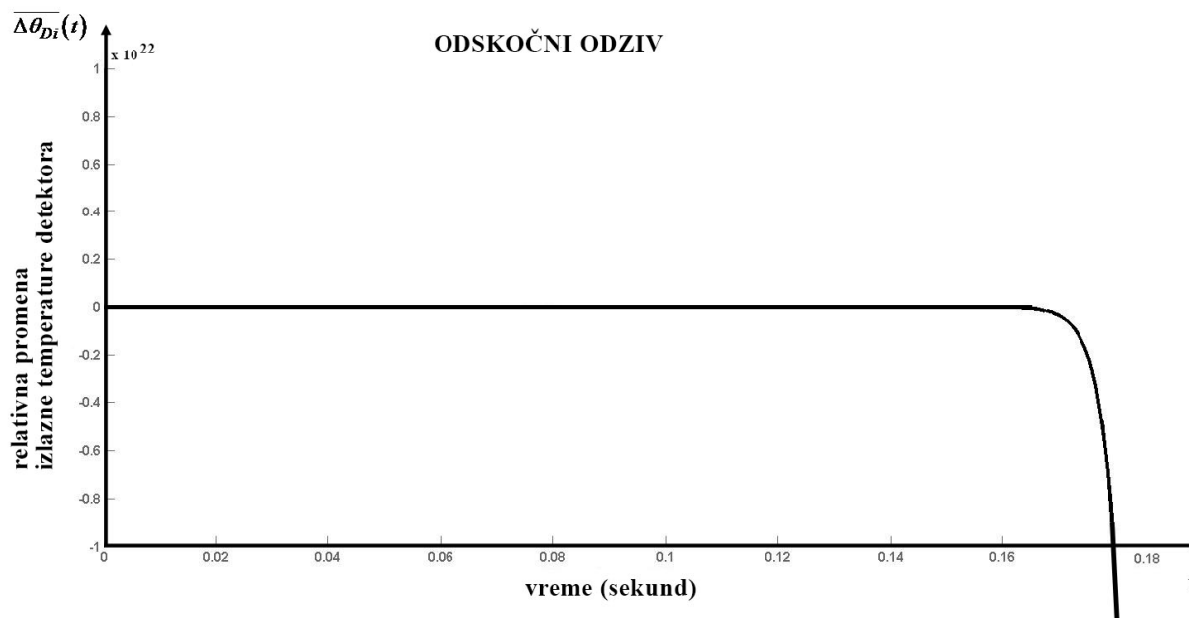
Spektar sopstvenih vrednosti matrice  $A$ , dat je sledećim izrazom:

$$\sigma\{A\} = \left\{ -3.124 \cdot 10^5 \quad -1.457 \cdot 10^3 \quad 338.745 \quad -305.743 \right. \\ \left. -132.299 \quad -17.586 \quad -7.731 \pm 0.261i \right. \\ \left. -0.36 \quad 0.035 \pm 0.362i \right\} \quad (7.21)$$

Relativna odstupanja pojedinih veličina napisaće se na sledeći način:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) & u(t) &= \overline{\Delta Y}(t) & z_1(t) &= \overline{\Delta p_B}(t) \\ x_2(t) &= \overline{\Delta \omega_{izl}^B}(t) & & & z_2(t) &= \overline{\Delta \rho_B}(t) \\ x_3(t) &= \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) & & & z_3(t) &= \overline{\Delta \theta_B}(t) \\ x_4(t) &= \overline{\Delta \omega_{2izl}^{VP}}(t) & & & z_4(t) &= \overline{\Delta \theta_{OK}}(t) \\ x_5(t) &= \overline{\Delta x}(t) & & & & \\ x_6(t) &= \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) & & & & \\ x_7(t) &= \overline{\Delta x_2}(t) & & & & \\ x_8(t) &= \overline{\Delta \theta_D}(t) & & & & \\ x_9(t) &= \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) & & & & \\ x_{10}(t) &= \overline{\Delta \omega_{izl}^{NP}}(t) & & & & \\ x_{11}(t) &= \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) & & & & \end{aligned} \quad (7.22)$$

Na osnovu modela u prostoru stanja, mogu se pomoću softverskog paketa MATLAB, uraditi odskočni odzivi objekta upravljanja, neregulisanog objekta automatskog upravljanja tj. procesa bez upravljanja za različite ulazne pobude, koji su dati na sledećim slikama, S1.7.1., S1.7.2., S1.7.3., S1.7.4., S1.7.5.:



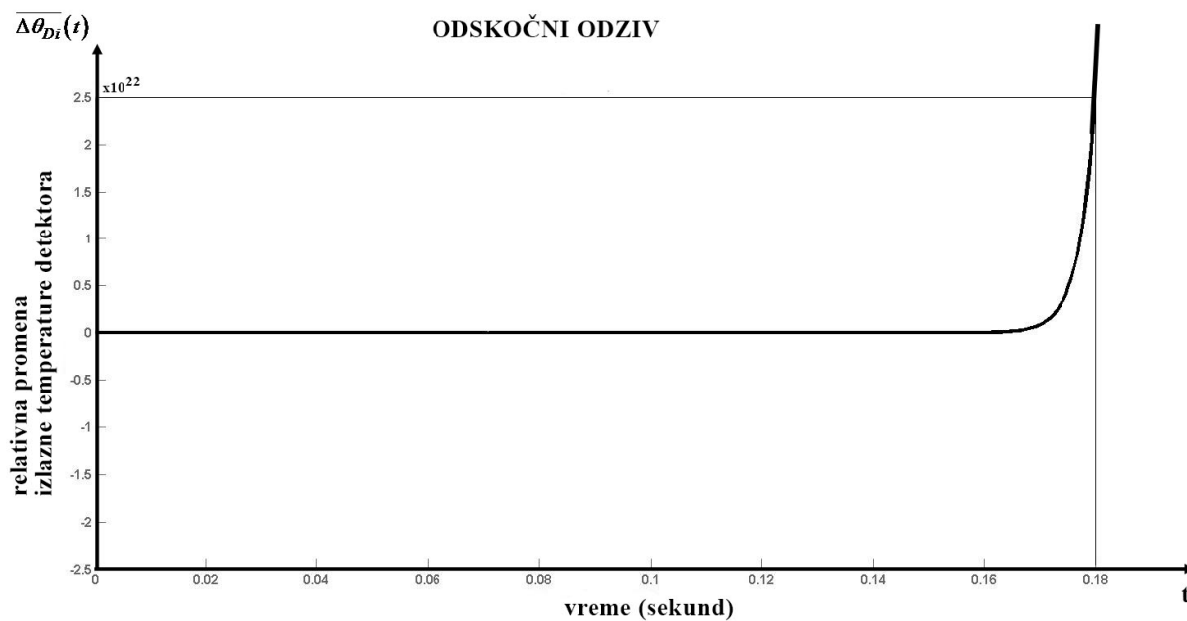
S1.7.1. Odziv: relativna promena temperature detektora pri jediničnoj odskočnoj promeni pomeranja igle

Prilikom rada sa toplotnim procesima, sa porastom protoka, povećava se temperatura objekta koji se zagreva. U slučaju rada sa rashladnim procesima, situacija je nešto drugačija. Sa porastom protoka, temperatura opada tj. sistem se dodatno hladi na određenu temperaturu. To dovodi da sistem radi sa predznakom minus, ispred temperature koja se zahteva. Naravno, može se reći i na drugačiji način, temperatura raste, kada protok opada. Prema tome, primenjujući prethodno rečeno, na gornji dijagram odziv bi trebao da bude okrenut na gore, a ne kao na dijagramu na dole.

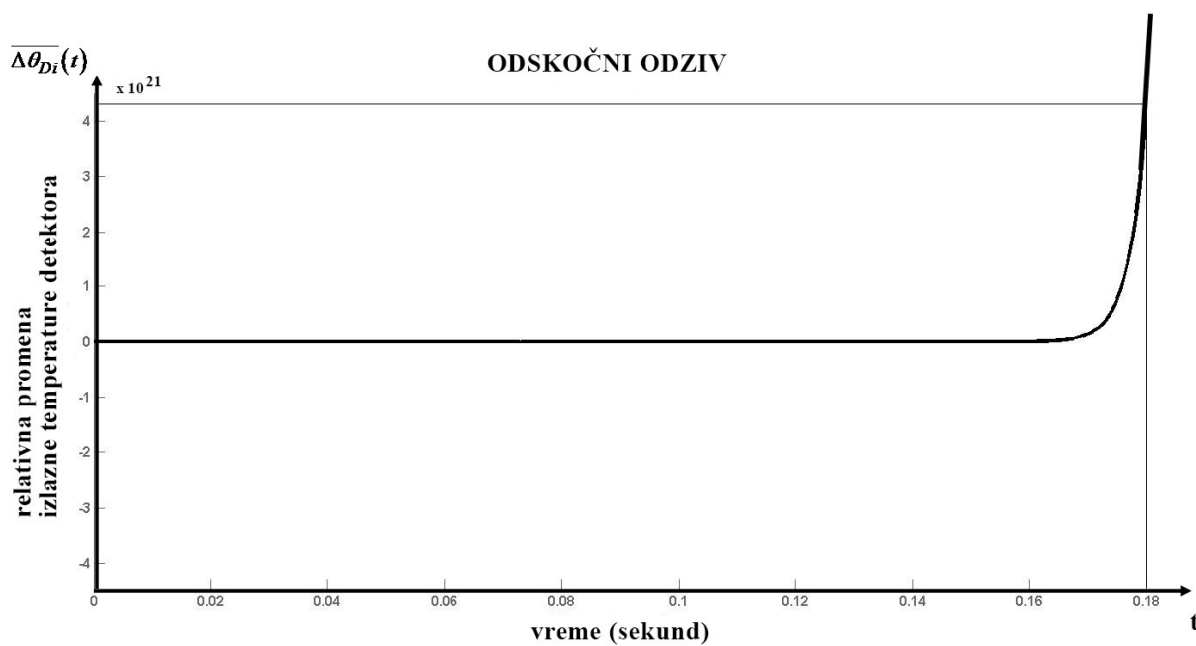
U matematičkom modeliranju, najčešće se koristi temperatura izražena u Kelvinima. U ovom matematičkom modelu upotrebljavana je temperatura u stepenima Celzijusa. To dovodi do sledećeg tumačenja relativne promene temperature posmatranog elementa:

- relativna promena kada se odnos temperatura izražava u stepenima Celzijusa je pozitivna, kada temperatura opada.
- relativna promena kada se odnos temperatura izražava u stepenima Celzijusa je negativna, kada temperatura raste. To je suprotno od slučaja kada se relativna promena temperature izražava kao odnos temperatura u Kelvinima.

Na kraju, primenom navedenog pravila na prethodni dijagram, temperatura okrenuta na gore raste, što u realnosti znači da opada. Prema tome, sa povećanjem pomeranja igle, temperatura detektora će da opada.

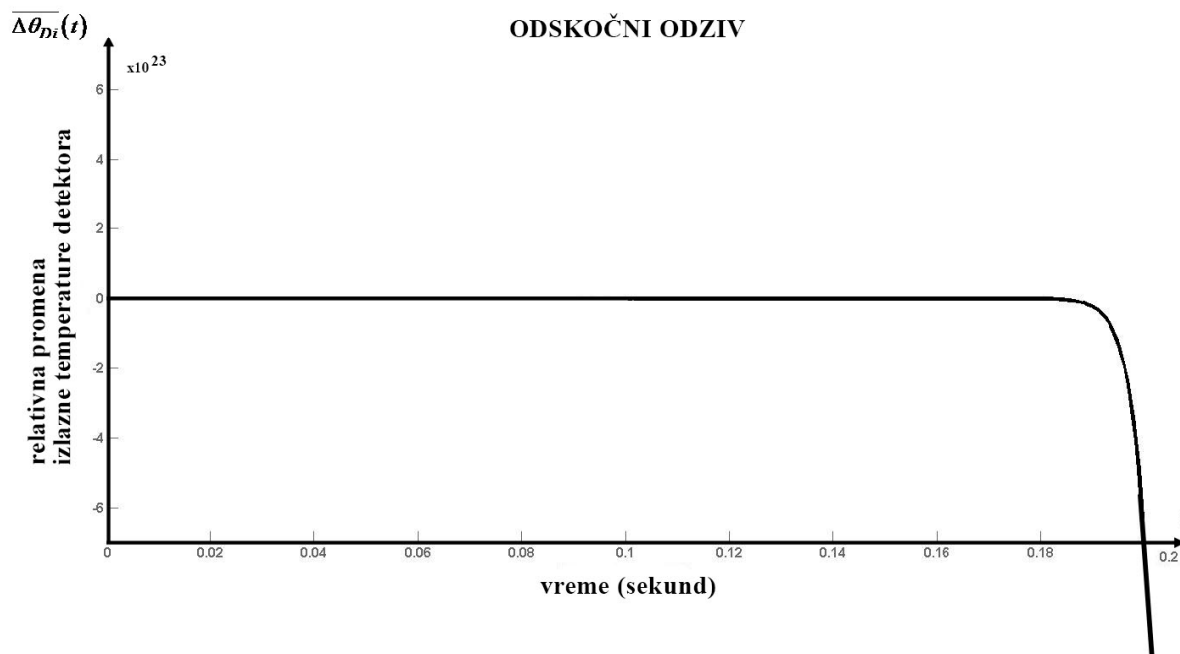


Sl.7.2. Odziv: relativna promena temperature detektora  
pri jediničnoj odskočnoj promeni pritiska u boci

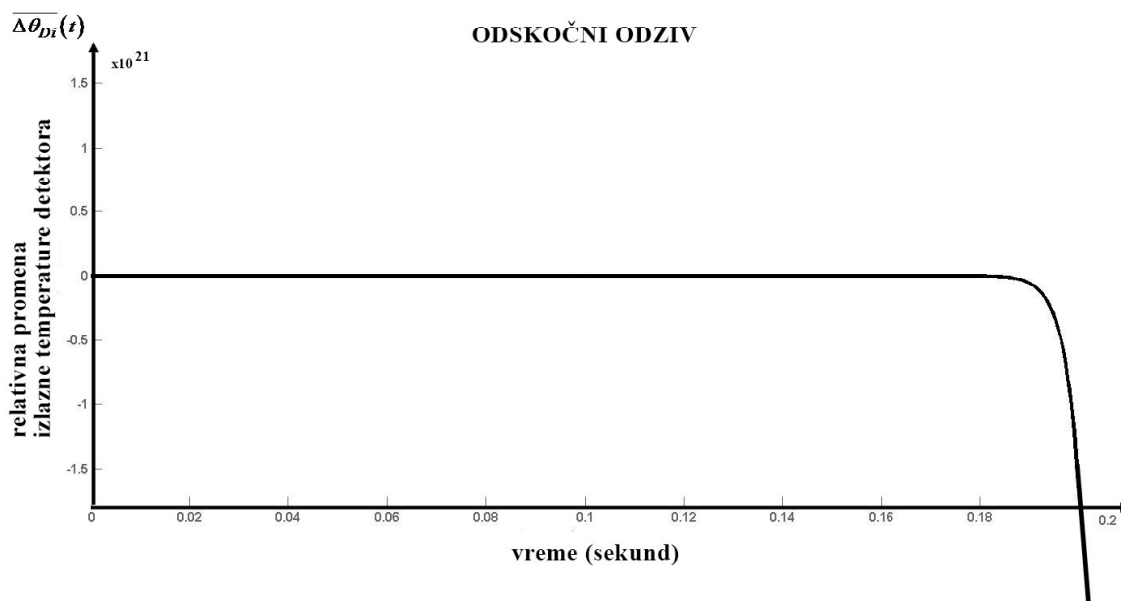


Sl.7.3. Odziv: relativna promena temperature detektora  
pri jediničnoj odskočnoj promeni gustine u boci





S1.7.4. Odziv: relativna promena temperature detektora pri jediničnoj odskočnoj promeni temperature u boci



S1.7.5. Odziv: relativna promena temperature detektora pri jediničnoj odskočnoj promeni temperature okoline

Razmatrani model je teorijsko-analitički, a to znači da je posmatrano kako bi se sistem ponašao, ako bi tri veličine stanja jednačine stanja mogle da imaju bilo koju vrednost, a četvrta na osnovu ove tri bila direktno određena. Realno, za upotrebljeni gas to nije slučaj, već na osnovu poznate dve veličine stanja, druge dve veličine stanja su direktno određene. Analizom odziva sistema, je utvrđeno, da odzivi teorijskog-analitičkog modela ne odstupaju od realnog, tako da učinjena pretpostavka nema uticaja.

## **8.0. MOGUĆI IZBOR KONCEPTA UPRAVLJANJA U PRIMENI NA OBJEKTE UPRAVLJANJA PRI RAZMATRANJU RAZLIČITIH TIPOVA HLADNJAKA**

### **8.1. Osnove teorije regulisanja**

Upravljanje nekim sistemom podrazumeva poznavanje prirode procesa koji se u njemu odvijaju kao i imati na raspolaganju odgovarajući upravljački algoritam. Na taj način moguće je postići zahtevane ciljeve, tj. performanse sistema. Nekad, da bi moglo da se izvrši upravljanje, potrebno je i poznavanje tekućeg stanja upravljanog procesa. Prema tome, upravljački sistemi se mogu podeliti na sisteme bez povratne sprege i sisteme sa povratnom spregom. lit.[58].

Osnove teorije upravljanja u sistemima se zasnivaju na zadatom algoritmu baziranom na poznavanju funkcionisanja upravljanog sistema. Pri projektovanju sistema obično se najpre definiše algoritam takvog funkcionalnog upravljanja a potom se realizuje odgovarajući uređaj, programator. Skup informacija unutar upravljačkog sistema (uređaja) koje konstituišu odgovarajuću upravljačku veličinu naziva se koncept upravljanja. Navedeni koncept upravljanja pripada otvorenom sistemu automatskog upravljanja i ima široku primenu, međutim, ima i ozbiljne nedostatke. Osnovni nedostatak se pokazuje u slučajevima kada sistem promeni režim ili uslove rada i tada može doći do nedozvoljenog odstupanja između željenog i stvarnog ponašanja sistema. lit.[58].

Drugi način regulisanja se može realizovati ako se uvede povratna sprega u sistem. Zadatak povratne sprege je da izmerene izlazne veličine sistema vraća na ulaz u sistem i pri tome ih uporedi sa referentnim, željenim vrednostima izlaza. Odstupanje nominalnog od stvarnog ponašanja formira grešku i ona prestavlja veličinu koju upravljački sistem treba da minimizira.

Takođe, postoje i kombinovani sistemi automatskog upravljanja koji se veoma često primenjuju u praksi. lit.[58].

Osnovna karakteristika sistema automatskog upravljanja je da se odlikuju određenim zakonom ili zakonima upravljanja. U suštini može se na sledeći način definisati zakon upravljanja koji predstavlja matematičku zavisnost na osnovu koje upravljački uređaj obrađuje relevantne signale (informacije) i generiše odgovarajuća upravljačka dejstva. Inače, upravljački uređaji se nazivaju regulatori, ako je reč o sistemima u zatvorenom kolu dejstva. Klasifikacija regulatora se vrši na osnovu vrste zakona upravljanja, ako se razmatraju regulatori u kontinualnim linearnim sistemima. lit.[58].

S obzirom da primenom osnovnih zakona upravljanja njihovo dejstvo može da linearno zavisi od greške, njenog integrala ili prvog izvoda greške po vremenu, na bazi ovih činjenica sledi podela regulatora na proporcionalni, integralni i diferencijalni regulator. Na osnovu navedenih osnovnih tipova regulatora moguće je formirati i složenije proporcionalno-integralne i proporcionalno-diferencijalne regulatore, kao i najsloženije proporcionalno-integralno-diferencijalne regulatore. Osnovni zahtevi koji se postavljaju pred svaki sistem regulisanja su: stabilnost, tačnost i brzina odziva, bez obzira na tip regulatora i način njegove realizacije. Na kraju, napomenuće se da su navedeni zahtevi ujedno i osnovni problemi regulacije. lit.[58].

### **8.2. Uslovi za uvođenje automatskog upravljanja objektima**

Da bi se opravdano uvelo automatsko upravljanje objektima treba da budu zadovoljeni odgovarajući uslovi, i to:

- ponašanje objekta mora da bude specificirano,
- odstupanje ponašanja objekta od željenih vrednosti mora da budu tačno definisano, i to pri dozvoljenim promenama željene veličine i poremećaja,
- odstupanja zahtevaju upravljanje objektom, tako da ako odstupanja nema, nema ni upravljanja objektom,
- informacije o objektu i poremećajima moraju da budu dostupne upravljačkom sistemu,
- objekat automatskog upravljanja mora da poseduje regulišići organ koji je sposoban da menja upravljačku veličinu u najširim granicama,
- s obzirom da radni režimi mogu biti stacionarni, nestacionarni i prelazni režimi, koncept upravljanja objektom mora da obezbedi pouzdan, kvalitetan rad pri svim navedenim režimima. lit.[51],[52],[56].

Automatsko upravljanje, u današnjem visokotehnoškom mašinskom razvoju, mora obezbediti ostvarivanje visoke tačnosti i preciznosti, pouzdanosti i rentabilnosti.

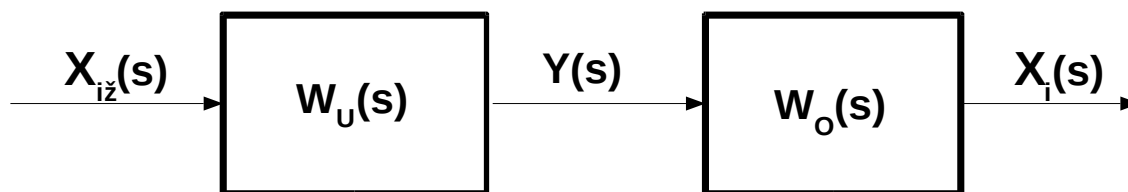
Prema tome, predmet ovog doktorata je bila primena i karakteristike, visokotehnoške regulacije savremenih Džul Tomsonovih hladnjaka, tzv. diskretno upravljani minihladnjaci i njeno upoređivanje sa već postojećim konceptom upravljanja.

U daljem radu će biti dati mogući koncepti automatskog upravljanja, sa osvrtom koji je primenjen na odgovarajući vrstu regulisanih minihladnjaka. S obzirom da vrsta minihladnjaka: neregulisani minihladnjak, nema regulišići organ tokom procesa trajanje hlađenja, tako da neće ni biti predmet pri usvajanju i primeni koncepta automatskog upravljanja.

### 8.3. Sistemi u otvorenom kolu dejstva sa i bez delovanja poremećaja - otvoreni sistemi automatskog upravljanja

U nekim slučajevima, se može smatrati, da je dejstvo poremećaja na objekat zanemarljivo malo. Na osnovu dobijenih informacija upravljačko dejstvo se formira o željenom izlazu ili ponašanju objekta. Inače, u osnovi, se izlaže materija preuzeta iz lit.[51].

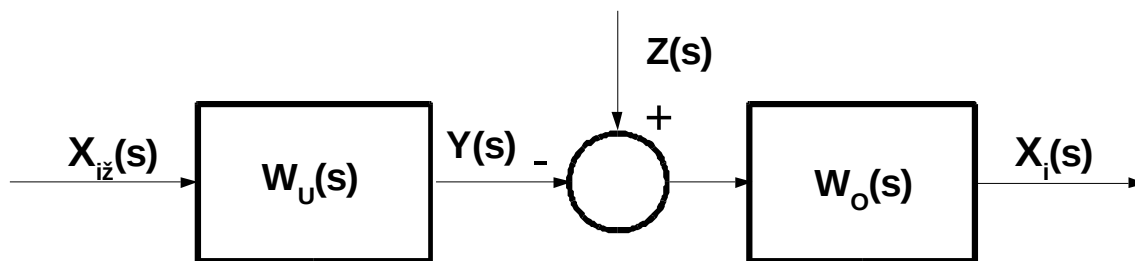
Na slici 8.1. prikazan je sistem u otvorenom kolu dejstva bez delovanja poremećaja i bez regulacije. Oznake su:  $W_U(s)$ - prenosna funkcija upravljačkog dela sistema,  $W_O(s)$ - prenosna funkcija objekta upravljanja.



Sl.8.1. Sistem u otvorenom kolu dejstva bez delovanja poremećaja

Otvoreni sistem automatskog upravljanja bez direktne kompenzacije poremećaja je sistem kada na objekat upravljanja deluje i poremećaj. U tom slučaju se za formiranje upravljačkog dejstva ne koristi informacija o delovanju poremećaja već samo informacija o željenom izlazu objekta.

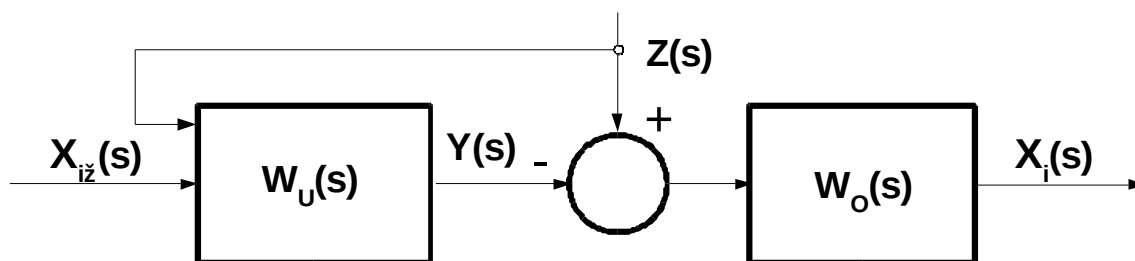
Na slici 8.2. prikazan je sistem u otvorenom kolu dejstva sa delovanjem poremećaja.



Sl.8.2. Sistem u otvorenom kolu dejstva sa delovanjem poremećaja ali bez direktne kompenzacije poremećaja

Otvoreni sistem automatskom upravljanja sa direktnom kompenzacijom poremećaja je sistem kada na objekat takođe deluje poremećaj. U tom slučaju se za formiranje upravljačkog dejstva koristi i informacija o poremećaju i informacija o željenom izlazu objekta.

Na slici 8.3. prikazan je sistem u otvorenom kolu dejstva sa delovanjem poremećaja i sa direktnom kompenzacijom poremećaja.

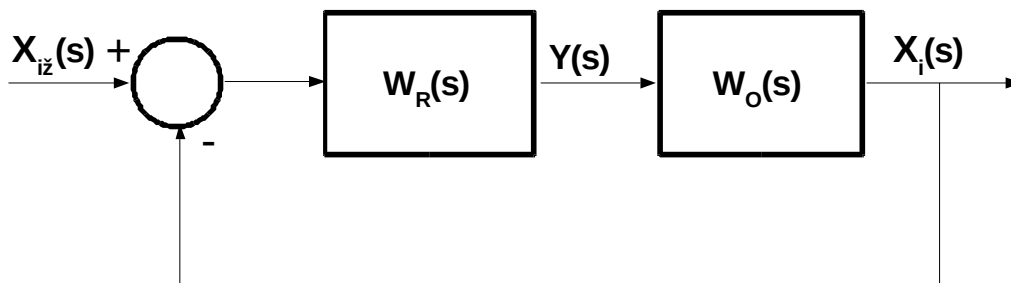


Sl.8.3. Sistem u otvorenom kolu dejstva sa direktnom kompenzacijom poremećaja

#### 8.4. Sistemi u zatvorenom kolu dejstva sa i bez delovanja poremećaja - zatvoreni sistemi automatskog upravljanja

U nekim slučajevima, se može smatrati, da je dejstvo poremećaja na objekat zanemarljivo malo. Na osnovu dobijenih informacija upravljačko dejstvo se formira o željenom izlazu ili ponašanju objekta.

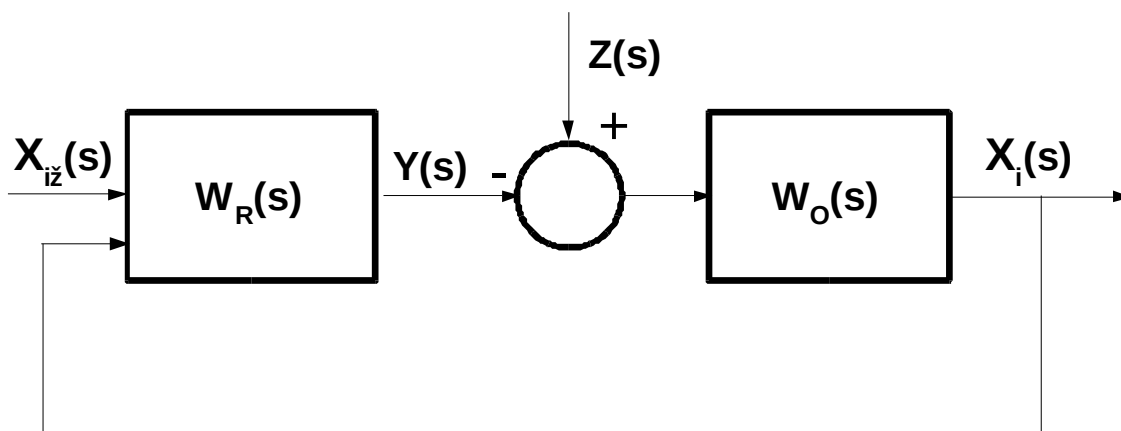
Na slici 8.4. prikazan je sistem u zatvorenom kolu dejstva bez delovanja poremećaja.



Sl.8.4. Sistem u zatvorenom kolu dejstva bez delovanja poremećaja

Zatvoreni sistem automatskog upravljanja se primenjuje u prilikama kada na proces deluje poremećaj. U tom slučaju se za formiranje upravljačkog dejstva koristi informacija o željenom i stvarnom izlazu objekta.

Na slici 8.5. prikazan je sistem u zatvorenom kolu dejstva sa delovanjem poremećaja, tj. princip rada regulisanog minihladnjaka: minihladnjaka sa kontinualnim ciklusom bilo da je u pitanju konstantan ili promenljiv pritisak. Minihladnjak sa dvostrukim strujanjem je minihladnjak koji u principu ne radi kao regulisani hladnjak tokom procesa trajanje hlađenja iako je u njemu implementiran izvršni organ regulatora. Izvršni organ regulatora dobije signal od regulatora da reaguje u slučaju pojave poremećaja, tako da hladnjak iz režima neregulisanog hladnjaka prelazi u režim regulisanog hladnjaka. Izvršni organ regulatora je dobio indirektnu informaciju o stvarnom izlazu, koji je različit od željenog izlaza, tako da je sistem odregao i pritom počeo da radi sa sledećim konceptom upravljanja, zatvoreni sistem automatskog upravljanja sa indirektnom kompenzacijom poremećaja.

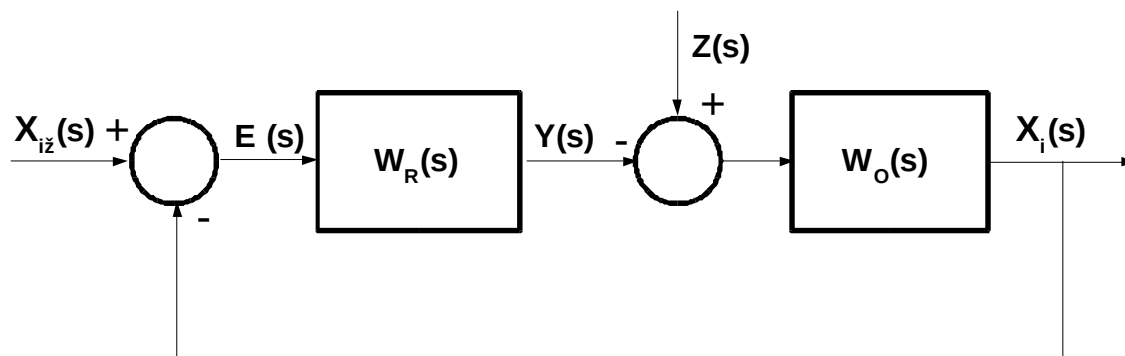


Sl.8.5. Sistem u zatvorenom kolu dejstva sa delovanjem poremećaja

Zatvoreni sistem automatskom upravljanja predstavlja sistem sa indirektnom kompenzacijom poremećaja (amplitudno upravljanje), i to je sistem kada na objekat takođe deluje poremećaj. U tom slučaju se za formiranje upravljanja koristi greška izlaza objekta, u oznaci  $\varepsilon(t)$ , nastala usled delovanja poremećaja na rad objekta. Prema tome, posledica prethodno iznešenog je promena same izlazne veličine objekta.

Napomenuće se da se greška stvara i u sistemu u zatvorenom kolu dejstva bez delovanja poremećaja. Inače, greška se stvara u objektu upravljanja a registruje u upravljačkom sistemu. U objektu upravljanja dolazi do odstupanja stvarnog od željenog ponašanja objekta.

Na slici 8.6. prikazan je sistem u zatvorenom kolu dejstva sa indirektnom kompenzacijom poremećaja, sa PID regulatorom, tj. princip rada regulisanog minihladnjaka: mini-hladnjaka sa diskretno upravljanim ciklusom pri konstantnom pritisku.

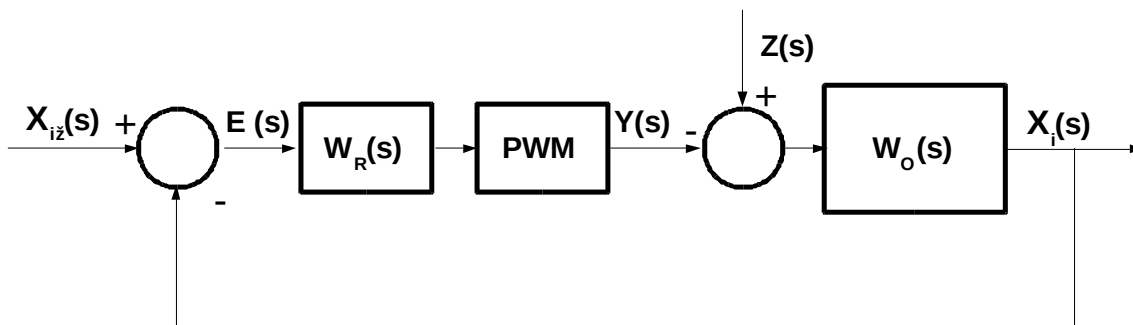


Sl.8.6. Sistem u zatvorenom kolu dejstva sa indirektnom kompenzacijom poremećaja (amplitudno upravljanje)

Blok dijagram na sl.8.6. je češći prikaz blok dijagrama na sl.8.5.

### 8.5. Sistem u zatvorenom kolu dejstva sa indirektnom kompenzacijom poremećaja i amplitudno frekventnim upravljanjem

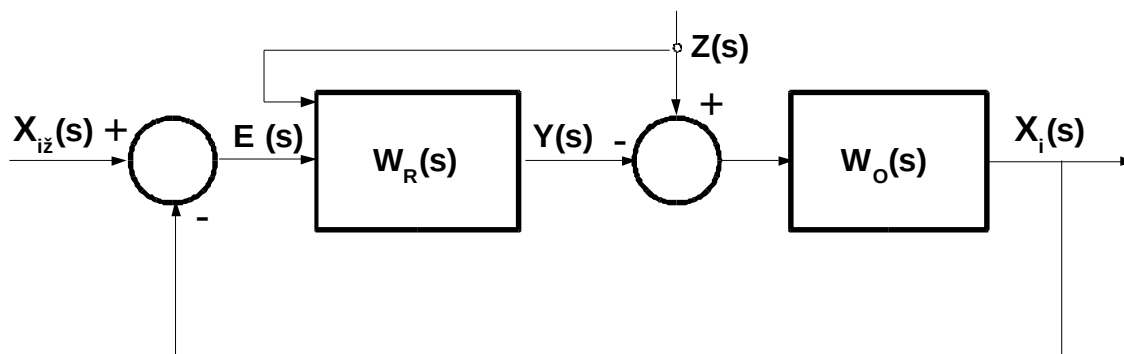
Na slici 8.7. prikazan je sistem u zatvorenom kolu dejstva sa delovanjem poremećaja, sa PID regulatorom i prenosnim organom tipa sa širinskom modulacijom signala, PWM-širinskim modulom, tj. princip rada regulisanog hladnjaka: minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom pri radu sa promenljivim pritiskom.



Sl.8.7. Sistem u zatvorenom kolu dejstva sa indirektnom kompenzacijom poremećaja (amplitudno - frekventno upravljanje)

### 8.6. Kombinovani sistemi automatskog upravljanja

Kombinovani sistemi automatskog upravljanja, prikazan na sl.8.8., predstavljaju sisteme koji objedinjuju kako svojstva otvorenih tako i svojstva zatvorenih sistema automatskog upravljanja. Oni obezbeđuju i direktnu i indirektnu kompenzaciju poremećaja. Za formiranje upravljačkog dejstva koristi se i informacija o grešci izlaza objekta upravljanja i informacija o poremećaju.



### 8.8. Kombinovani sistem automatskog upravljanja

Posebnu klasu kombinovanih sistema automatskog upravljanja čine adaptivni sistemi. Ovaj koncept upravljanja izlazi van okvira ovih razmatranja.

## 9.0. LINEARNA ANALIZA SLOŽENOG REGULATORA

### 9.1. Linearna analiza složenog regulatora - kontinualna regulacija složenog mikroobjekta

#### 9.1.1. Redukcija reda modela neregulisanog objekta automatskog upravljanja

Na osnovu modela u prostoru stanja, može se odrediti prenosna funkcija objekta upravljanja gde je promena pomeranja izvršnog organa ulazna veličina u objekat automatskog upravljanja, a temperatura na detektoru izlazna veličina objekta automatskog upravljanja, data u opštem obliku:

$$W_o(s) = \frac{\varphi(s)}{f(s)}, \quad (9.1)$$

pri čemu je polinom u brojiocu 10 reda, i ima oblik (num1):

$$\begin{aligned} \varphi(s) = & -0.2834 \cdot s^{10} - 8.899e04 \cdot s^9 - 1.392e08 \cdot s^8 - 5.386e09 \cdot s^7 + 1.465e13 \cdot s^6 \\ & + 1.359e15 \cdot s^5 + 5.792e16 \cdot s^4 - 3.553e17 \cdot s^3 - 7.503e18 \cdot s^2 - 3.483e18 \cdot s + 3.404e18 \end{aligned} \quad (9.1a)$$

a polinom u imeniocu 11 reda, i ima oblik (den1):

$$\begin{aligned} f(s) = & s^{11} + 3.14e05 \cdot s^{10} + 4.967e08 \cdot s^9 + 2.763e10 \cdot s^8 - 5.289e13 \cdot s^7 - 8.014e15 \cdot s^6 \\ & - 2.262e17 \cdot s^5 - 2.191e18 \cdot s^4 - 7.205e18 \cdot s^3 - 2.143e18 \cdot s^2 - 8.065e17 \cdot s - 3.132e17 \end{aligned} \quad (9.1b)$$

tako da je prenosna funkcija objekta automatskog upravljanja, data sledećim izrazom:

$$\begin{aligned} W_o(s) = & \frac{-0.2834 \cdot s^{10} - 8.899e04 \cdot s^9 - 1.392e08 \cdot s^8 - 5.386e09 \cdot s^7 + 1.465e13 \cdot s^6}{s^{11} + 3.14e05 \cdot s^{10} + 4.967e08 \cdot s^9 + 2.763e10 \cdot s^8 - 5.289e13 \cdot s^7 - 8.014e15 \cdot s^6} \\ & \frac{+ 1.359e15 \cdot s^5 + 5.792e16 \cdot s^4 - 3.553e17 \cdot s^3 - 7.503e18 \cdot s^2 - 3.483e18 \cdot s + 3.404e18}{- 2.262e17 \cdot s^5 - 2.191e18 \cdot s^4 - 7.205e18 \cdot s^3 - 2.143e18 \cdot s^2 - 8.065e17 \cdot s - 3.132e17} \end{aligned} \quad (9.2)$$

Prema tome, sada treba odrediti korene polinoma u brojiocu (nule) kao i korene polinoma u imeniocu (polove), koji su prikazani na slici 9.1, pri čemu su nule prikazane kružićima, a polovi zvezdicama. Na Sl.9.1. se vidi da su i nule i polovi prenosne funkcije grupisani. Za obradu ovog poglavlja korišćena je lit. [113] - [130].

Pojam koji je vrlo važan jeste pojam *dominantnih polova sistema*. Sistemi često imaju veliki broj polova, mogu biti visokog reda, međutim uticaj mnogih od njih je neznatan ili beznačajan i oni se mogu zanemariti, dok je uticaj nekih drugih polova vrlo značajan pa se takvi polovi nazivaju dominantnim.

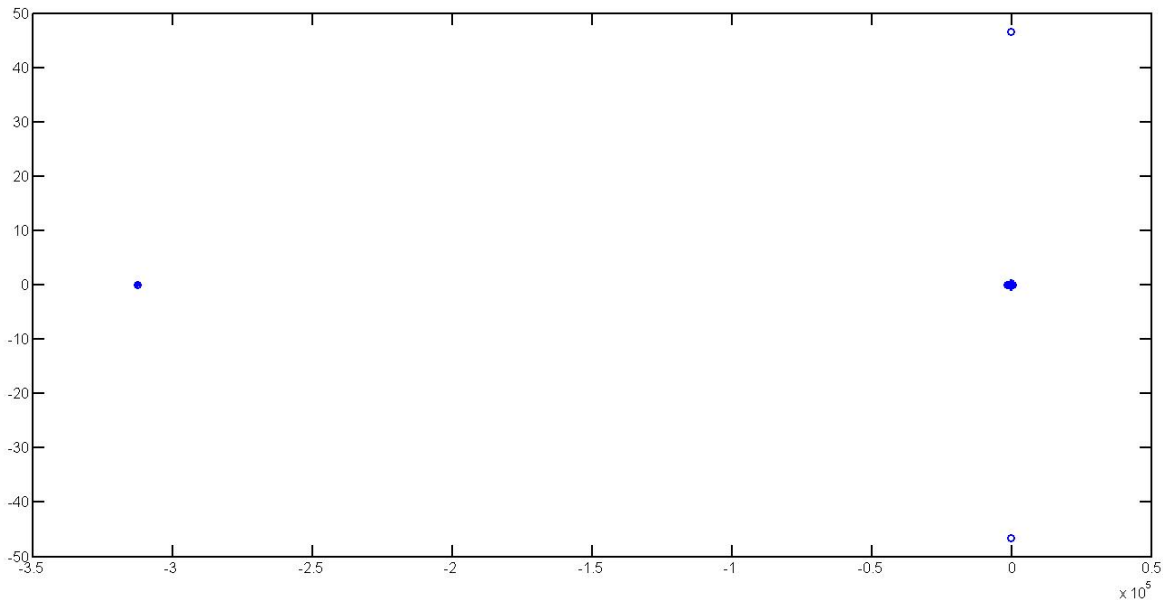
**Sledi redukcija reda modela procesa**, kako ima previše nula i polova blizu jedni drugih takozvanih nestabilnih dipola, na sledeći način, pomoću softverskog paketa MATLAB:

```
h=tf(num1,den1);
```

```
[hb,g] = balreal(h);
```



g - naredba da dobijemo 11 balanced grammians (balansirani nestabilni dipoli),



SI.9.1. Položaj korena nula i polova razmatrane prenosne funkcije objekta upravljanja

g =

```

Inf
Inf
Inf
3.106053873766949
0.117903654126764
0.008396708070776
0.000384849113402
0.000070276064934
0.000010612169976
0.000000020653574
0.000000000000001

```

**Inf je beskonačno.** Poslednjih osam dijagonalnih ulaza balansiranih nestabilnih dipola su mali, tako da ih eliminišemo direktnom metodom za brisanje. Prema tome je:

hmdc = modred(hb,4:11,'mdc');

hdel = modred(hb,4:11,'del'); vršimo zanemarivanje od 4-11 člana,

g=zpk(hdel) dobijaju se nule, polovi i pojačanje:

$$W_{Oapprox}(s) = \frac{3.2127 \cdot (s - 339.9) \cdot (s - 0.1821)}{(s - 338.7) \cdot (s^2 - 0.06986 \cdot s + 0.1326)}, \quad (9.3)$$

ili g=tf(hdel) tako da se dobija prenosna funkcija:

$$W_{Oaprox}(s) = \frac{3.213 \cdot s^2 - 1093 \cdot s + 198.9}{s^3 - 338.8 \cdot s^2 + 23.8 \cdot s - 44.9} = \frac{\varphi(s)}{f(s)}. \quad (9.3a)$$

Polovi prenosne funkcije, jed. (9.3) ili jed. (9.3.a), dati su sledećim izrazom:

$$p\{f(s)\} = \{338.7 \ 0.0349 \pm 0.3625i\} \quad (9.4)$$

Iz jed. (9.4) proizilazi veoma bitna konstatacija, da polovi redukovane funkcije u prvobitnom pokušaju redukcije, imaju iste brojne vrednosti kao i pozitivne vrednosti spektra sopstvenih vrednosti matrice  $A$ . S obzirom da, u prenosnoj funkciji jed. (9.3), postoji nestabilni dipol koji se mora eliminisati jer priroda procesa ne sadrži pol i nulu u istoj tački ali tako da se očuva statičko pojačanje sistema, zaključuju se, da se prenosna funkcija mora naknadno redukovati. Prema tome, tražena funkcija prenosa objekta upravljanja je drugog reda, a ne trećeg, data sledećim izrazom:

$$W_{Oaprox}(s) = 3.2241 \cdot \frac{(s - 0.1821)}{(s^2 - 0.06986 \cdot s + 0.1326)}. \quad (9.5)$$

### 9.1.2. Projektovanje složenog regulatora za proces funkcije prenosa $W_O(s) = W_{Oaprox}(s)$

Složeni regulator  $W_R(s)$  definisan u ovom primeru projektuje se pod ograničenjima na robusnost i osetljivost na merni šum (nepredvidljive devijacije u prenosu signala tokom vremena). Podešljivi parametri složenog regulatora  $W_R(s)$ , su vremenska konstanta  $\lambda$  i faktor relativnog prigušenja  $\xi$  dominantnih polova procesa u sprezi sa regulatorom  $W_R(s)$ .

Na kraju je pomoću simulacije, upotrebom softverskog paketa MATLAB - Simulink, izvršeno poređenje dobijenih parametara složenog regulatora sa stvarnim ponašanjem- radom sistema. Rezultati će pokazati, Sl.9.6., veoma zadovoljavajuće performanse rada složenog regulatora.

U daljem izlaganju sledi postupak projektovanja složenog regulatora, a na osnovu jed. (9.2) koja je svedena na upravljiv oblik definisan jed. (9.5). Prenosna funkcija objekta upravljanja data je sledećim izrazom (polovi prenosne funkcije u desnoj poluravni):

$$W_O(s) = k \cdot \frac{1 - T_z \cdot s}{T_{z1}^2 \cdot s^2 - 2 \cdot \xi \cdot T_{z1} \cdot s + 1}. \quad (9.6)$$

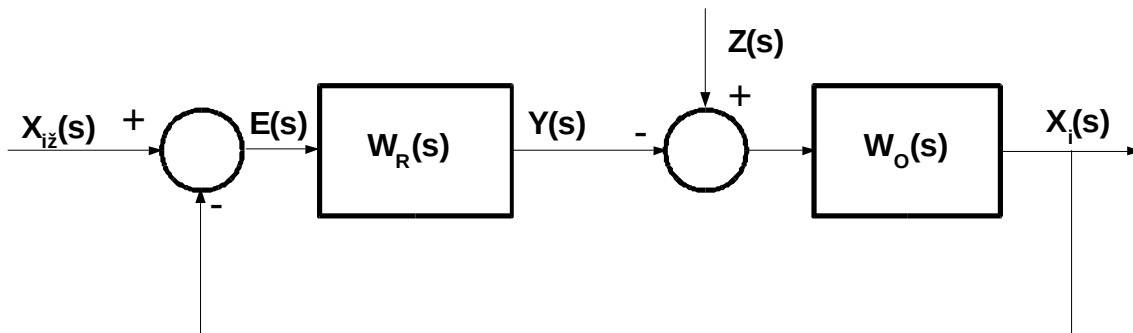
gde je:

$k$  - koeficijent (faktor) statičkog pojačanja sistema,

$T_z, T_{z1}$  - vremenske konstante, pri čemu je  $T_{z1} = \frac{1}{\omega_n}$ ,

$\omega_n$  - neprigušena, prirodna sopstvena učestanost sistema.

Blok dijagram sistema automatskog upravljanja sa složenim regulatorom prikazana je na Sl.9.2.:



Sl.9.2. Blok dijagram sistema automatskog upravljanja

Uvodi se, željena komplementarna funkcija osetljivosti,  $T_z(s)$ , data sledećim izrazom:

$$T_z(s) = \frac{(\eta_2 \cdot s^2 + \eta_1 \cdot s + 1) \cdot (1 - T_z \cdot s)}{(\lambda \cdot s + 1)^4}, \quad (9.7)$$

S obzirom da je:

$$T(s) + S(s) = 1, \quad (9.8)$$

tada važe jednakosti:

$$T(s) = \frac{W_{OK}(s)}{1 + W_{OK}(s)}; \quad (9.9)$$

i max komplementarna osetljivost:

$$M_p = \max_{\omega, \lambda} \left| \frac{W_{OK}(j \cdot \omega)}{1 + W_{OK}(j \cdot \omega)} \right|, \quad W_{OK}(j \cdot \omega) = W_R(j \cdot \omega) \cdot W_O(j \cdot \omega). \quad (9.10)$$

Funkcija osetljivosti  $S(s)$  je data izrazom:

$$S(s) = \frac{1}{1 + W_{OK}(s)}; \quad (9.11)$$

i maksimalna osetljivost:

$$M_s = \max_{\omega, \lambda} \left| \frac{1}{1 + W_{OK}(j \cdot \omega)} \right|, \quad W_{OK}(j \cdot \omega) = W_R(j \cdot \omega) \cdot W_O(j \cdot \omega). \quad (9.12)$$

Komplementarna funkcija osetljivosti regulisanog procesa data je izrazom:

$$\frac{W_R(s) \cdot W_O(s)}{1 + W_R(s) \cdot W_O(s)} = T(s). \quad (9.13)$$

Izjednačavanjem željene komplementarne funkcije i komplementarne funkcije  $T_z(s) = T(s)$ , dobija se jednačina za regulator  $W_R(s)$ :

$$W_R(s) = \frac{T(s)}{1-T(s)} \cdot \frac{1}{W_O(s)}. \quad (9.14)$$

Ako je  $X_{iz}(s) = 0$  tada je:

$$\frac{X_i(s)}{Z(s)} = \frac{W_O(s)}{1+W_O(s) \cdot W_R(s)}, \quad (9.15)$$

a s obzirom da je:

$$S(s) = \frac{1}{1+W_O(s) \cdot W_R(s)}, \quad (9.16)$$

to je:

$$\frac{X_i(s)}{Z(s)} = S(s) \cdot W_O(s), \quad (9.17)$$

tako da je:

$$\frac{X_i(s)}{Z(s)} = (1-T(s)) \cdot W_O(s). \quad (9.18)$$

Uzmimo sada željene vrednosti funkcija u razmatranje, poslednji izraz će imati oblik:

$$\frac{X_{iz}(s)}{Z_z(s)} = (1-T_z(s)) \cdot W_O(s). \quad (9.19)$$

Zamenimo sada  $T_z(s)$  u prethodni izraz, dobija se:

$$X_{iz}(s) = \left( 1 - \frac{(\eta_2 \cdot s^2 + \eta_1 \cdot s + 1) \cdot (1 - T_z \cdot s)}{(\lambda \cdot s + 1)^4} \right) \cdot W_O(s) \cdot Z_z(s). \quad (9.20)$$

Preuređivanjem zadnjeg izraza i ubacivanjem izraza za  $W_O(s)$ , pri čemu mora biti zadovoljen uslov  $s=0 \Rightarrow X_{iz}(s)=0$ , dobija se:

$$X_{iz}(s) = \frac{(\lambda \cdot s + 1)^4 - (\eta_2 \cdot s^2 + \eta_1 \cdot s + 1) \cdot (1 - T_z \cdot s)}{T_{z1}^2 \cdot s^2 - 2 \cdot \xi \cdot T_{z1} \cdot s + 1} \cdot \frac{k \cdot (1 - T_z \cdot s)}{(\lambda \cdot s + 1)^4} \cdot Z_z(s). \quad (9.21)$$

gde je:

$\lambda$  - parametar koji je direktno proporcionalan vremenskoj konstanti uspostavljanja stacionarnog stanja (odziva sistema) Sistema Automatskog upravljanja (SAU), na referentni signal.

Najpre odrediće se polovi prenosne funkcije sistema,  $W_O(s)$ , te se dobija:

$$T_{z1}^2 \cdot s^2 - 2 \cdot \xi \cdot T_{z1} \cdot s + 1 = 0 \Rightarrow s_{1,2} = a \pm j \cdot b. \quad (9.22)$$

Prema dobijenim polovima prenosne funkcije sistema, određuje se koje će pravilo, od tri moguća, biti primenjeno da bi se odredili parametri  $\overline{\eta_1, \eta_n}$ :

**Pravilo 1:** Polovi su višestruki i jednaki nuli.

**Pravilo 2:** Polovi su višestruki i različiti od nule.

**Pravilo 3:** Polovi su prosti.

Sada je lako zaključiti da se radi o trećem pravilu, te imamo:

$$(\lambda \cdot s + 1)^4 - (\eta_2 \cdot s^2 + \eta_1 \cdot s + 1) \cdot (1 - T_z \cdot s) \Big|_{s_1 = a + j \cdot b} = 0 \quad (9.23)$$

$$(\lambda \cdot s + 1)^4 - (\eta_2 \cdot s^2 + \eta_1 \cdot s + 1) \cdot (1 - T_z \cdot s) \Big|_{s_2 = a - j \cdot b} = 0 \quad (9.24)$$

te na osnovu poslednje dve jednačine dobijaju se parametri  $\eta_1$  i  $\eta_2$ .

S obzirom da se sada imaju svi potrebni parametri, rešenje jednačine za regulator (kontroler) je:

$$W_R(s) = \frac{(\eta_2 \cdot s^2 + \eta_1 \cdot s + 1) \cdot (T_{z1}^2 \cdot s^2 - 2 \cdot \xi \cdot T_{z1} \cdot s + 1)}{(\lambda \cdot s + 1)^4 - (\eta_2 \cdot s^2 + \eta_1 \cdot s + 1) \cdot (1 - T_z \cdot s)} \cdot \frac{1}{k}. \quad (9.25)$$

Da bi dobili konačnu prenosnu funkciju regulatora  $W_{R1}(s)$  potrebno je  $W_R(s)$  pomnožiti sa:

$$W_{R1}(s) = W_R(s) \cdot \frac{(\lambda \cdot s + 1)^2}{\eta_2 \cdot s^2 + \eta_1 \cdot s + 1}. \quad (9.26)$$

Posle racionalisanja, dobija se:

$$W_{R1}(s) = \frac{(\eta_4 \cdot s^2 + \eta_3 \cdot s + 1)}{s \cdot (T_f \cdot s + 1)} \cdot \frac{1}{k_1}, \quad (9.27)$$

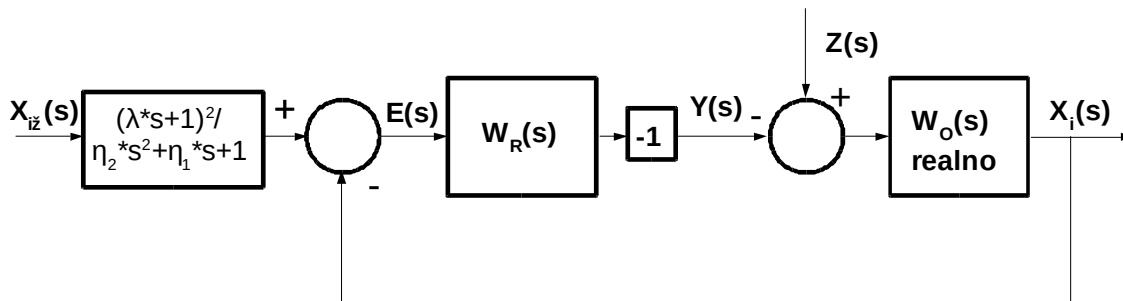
što predstavlja klasičan PID (proporcionalno- integralno-diferencijalni) regulator, sa svojim karakterističnim koeficijentima. U poslednjem izrazu je:

$k_1$  - koeficijent (faktor) statičkog pojačanja sistema,

$T_f$  - vremenska konstanta koja usporava uspostavljanje izlazne veličine tokom trajanja prelaznog procesa,

$\eta_3, \eta_4$  - konstante.

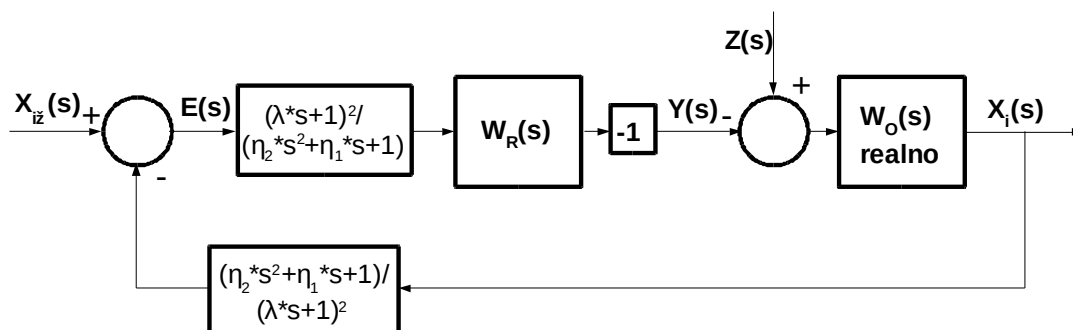
Uvedimo filter - kompenzator u upravljačku strukturu, negativan koeficijent pojačanja, i realnu prenosnu funkciju sistema, prikazano na Sl.9.3., tako da se dobija:



Sl.9.3. Blok dijagram sistema automatskog upravljanja

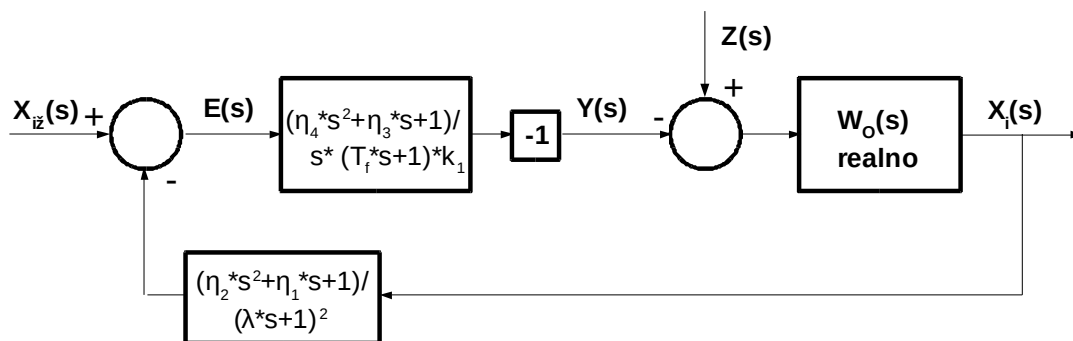
Napomenuće se da uvođenje filtera (kompenzatora) u upravljačku strukturu ima za cilj izdvajanje korisnog signala od šuma, tj. da izvrši minimizaciju smetnji, pri čemu filteri (kompenzatori) mogu biti analogni i digitalni. Izvori šumova mogu biti različiti u SAU: visokofrekventne smetnje; smetnje merenja izazvane mehaničkim vibracijama, turbulentnim protocima, greškama samih davača i mernih preetvarača; elektromagnetne smetnje koje deluju na prenošenje signala tj. na prenosne vodove.

Na osnovu algebre blok dijagrama, upravljačka struktura se može prikazati na sledeći način, Sl.9.4. i Sl.9.5.:



Sl.9.4. Blok dijagram sistema automatskog upravljanja

i konačno:



Sl.9.5. Blok dijagram sistema automatskog upravljanja

### 9.1.3. Primena jed. (9.6) - jed. (9.27) na realnu prenosnu funkciju objekta upravljanja

Realna prenosna funkcija objekta upravljanja ima oblik  $W_{Oreal}(s)$ :

$$W_{Oreal}(s) = 3.2241 \cdot \frac{(s - 0.1821)}{(s^2 - 0.06986 \cdot s + 0.1326)}. \quad (9.28)$$

Poslednji izraz može se napisati na sledeći način:

$$W_{Oreal}(s) = 0.58710 \cdot \frac{(5.491488 \cdot s - 1)}{(s^2 - 0.06986 \cdot s + 0.1326)}. \quad (9.29)$$

Komplementarna funkcija je jednaka sledećem izrazu:

$$T(s) = -\frac{(\eta_2 \cdot s^2 + \eta_1 \cdot s + 1) \cdot (5.491488 \cdot s - 1)}{(\lambda \cdot s + 1)^4}. \quad (9.30)$$

Parametri  $\eta_1$  i  $\eta_2$  se računaju po sledećim izrazima:

$$\eta_1 = 0.733408 + 0.01891 \cdot \lambda^4 - 0.114927 \cdot \lambda^3 - 0.94668 \cdot \lambda^2 + 0.534215 \cdot \lambda, \quad (9.31)$$

$$\eta_2 = 4.75957 \cdot \lambda + 6.534286 - 0.570571 \cdot \lambda^3 - 0.03869673 \cdot \lambda^4 + 1.3000777 \cdot \lambda^2. \quad (9.32)$$

Za usvojeno  $\lambda = 0.1$  (usvojena vrednost definiše visinu prebačaja tj. vreme uspostavljanja željene vrednosti prelaznog procesa, stabilnost sistema usled poremećaja) dobija se vrednost parametara:

$$\eta_1 = 0.77725 \text{ i } \eta_2 = 7.02267. \quad (9.33)$$

Na kraju prenosna funkcija regulatora ima sledeći oblik:

$$W_{R1}(s) = -170.32716 \cdot \frac{(s + 10)^2}{s \cdot (s + 385689.15)}. \quad (9.34)$$

Sada se poslednji izraz rearanžira u prihvatljivijem obliku PID-regulatoora:

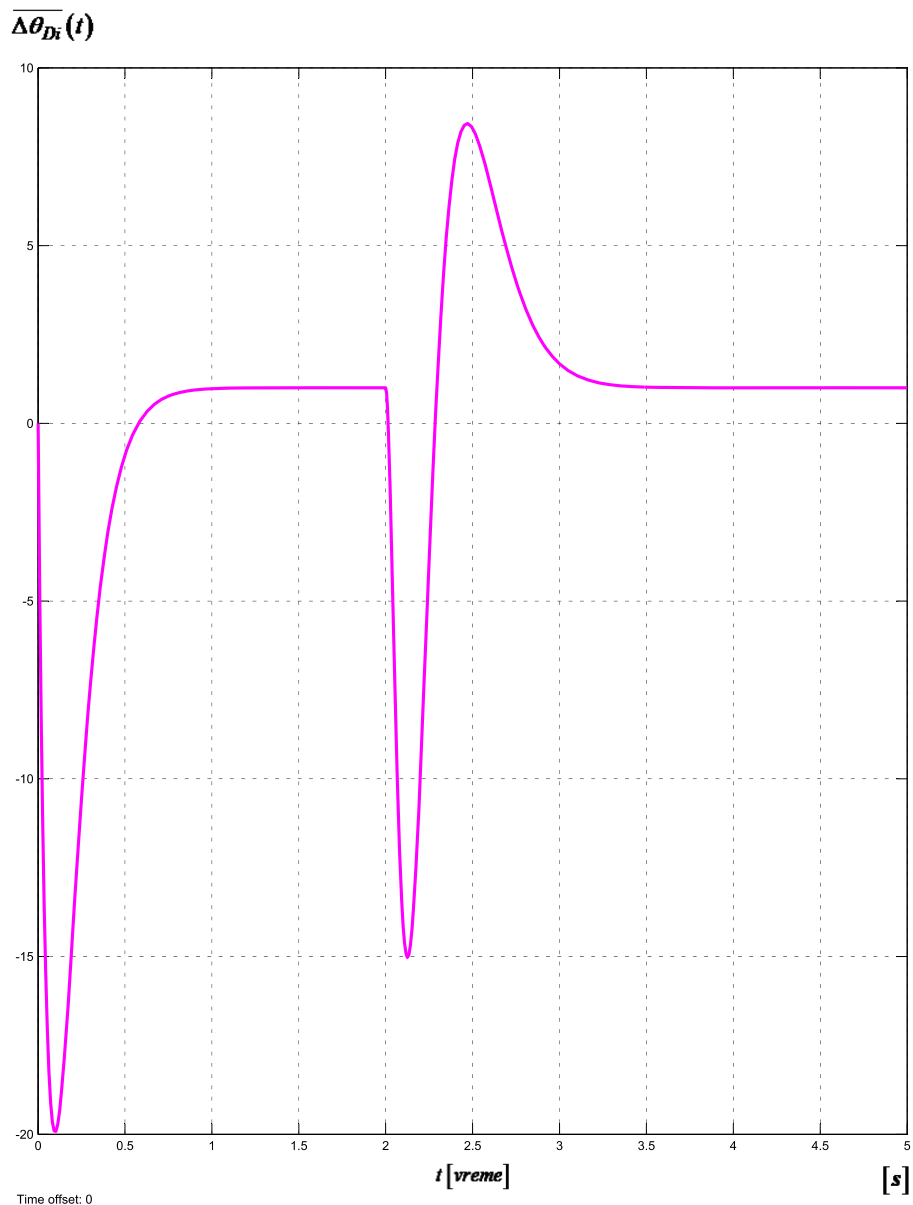
$$W_{R1}(s) = -0.04416177 \cdot \frac{\left(\frac{s}{10} + 1\right)^2}{s \cdot \left(\frac{s}{385689.15} + 1\right)}. \quad (9.35)$$

Razvijajući funkciju u brojiocu, poslednjeg izraza, dobijaju se koeficijenti PID regulatora:

$$k_D = 0.0004416177; k_p = 0.008832354; k_I = 0.04416177. \quad (9.36)$$

Na kraju, na osnovu blok dijagrama Sl.9.5., može se izvršiti simulacija sistema u zatvorenom kolu dejstva pomoću softverskog paketa MATLAB-Simulink, gde se u sistemu ne vrši klasična regulacija nego samo održava konstantnu željenu temperaturu pri konstantnom

pritisku, bez otvaranja i zatvaranja izvršnog organa, već zauzimanjem odgovarajućeg položaja, SI.9.6. Takođe, se može uočiti, vreme uspostavljanja željene temperature na početku, a takođe i vreme uspostavljanja željene vrednosti pri prelaznom procesu usled poremećaja, gde se opaža kako regulator kompenzuje uticaj poremećaja i uspostavlja željenu izlaznu veličinu-temperaturu. Na apscisnoj osi je vreme (s), a na ordinaatnoj osi vrednost izlazne veličine (temperature detektora).

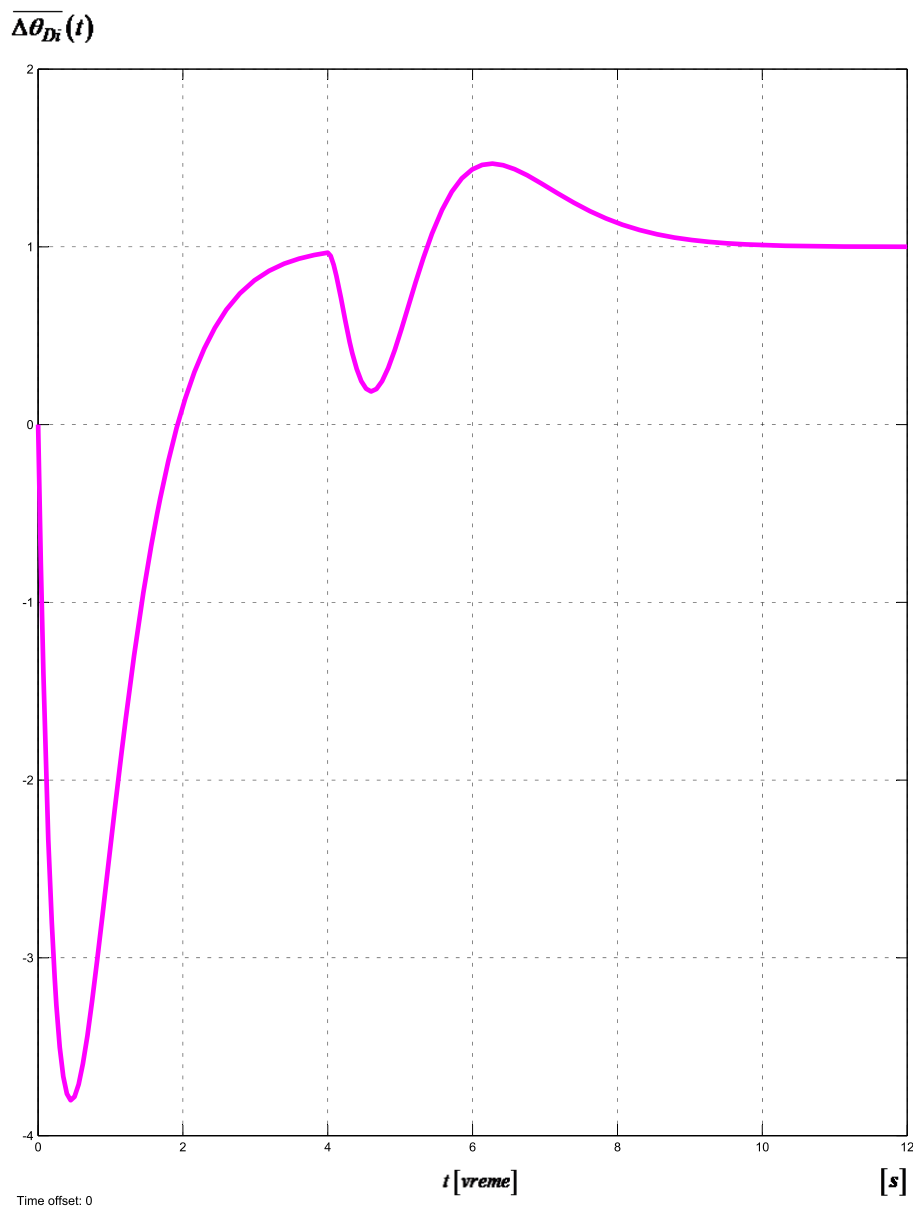


SI.9.6. Odskočni odziv sistema u zatvorenom kolu dejstva sa klasičnim PID regulatorom, na ulazu odskočna promena poremećaja ( $\lambda = 0.1$ )

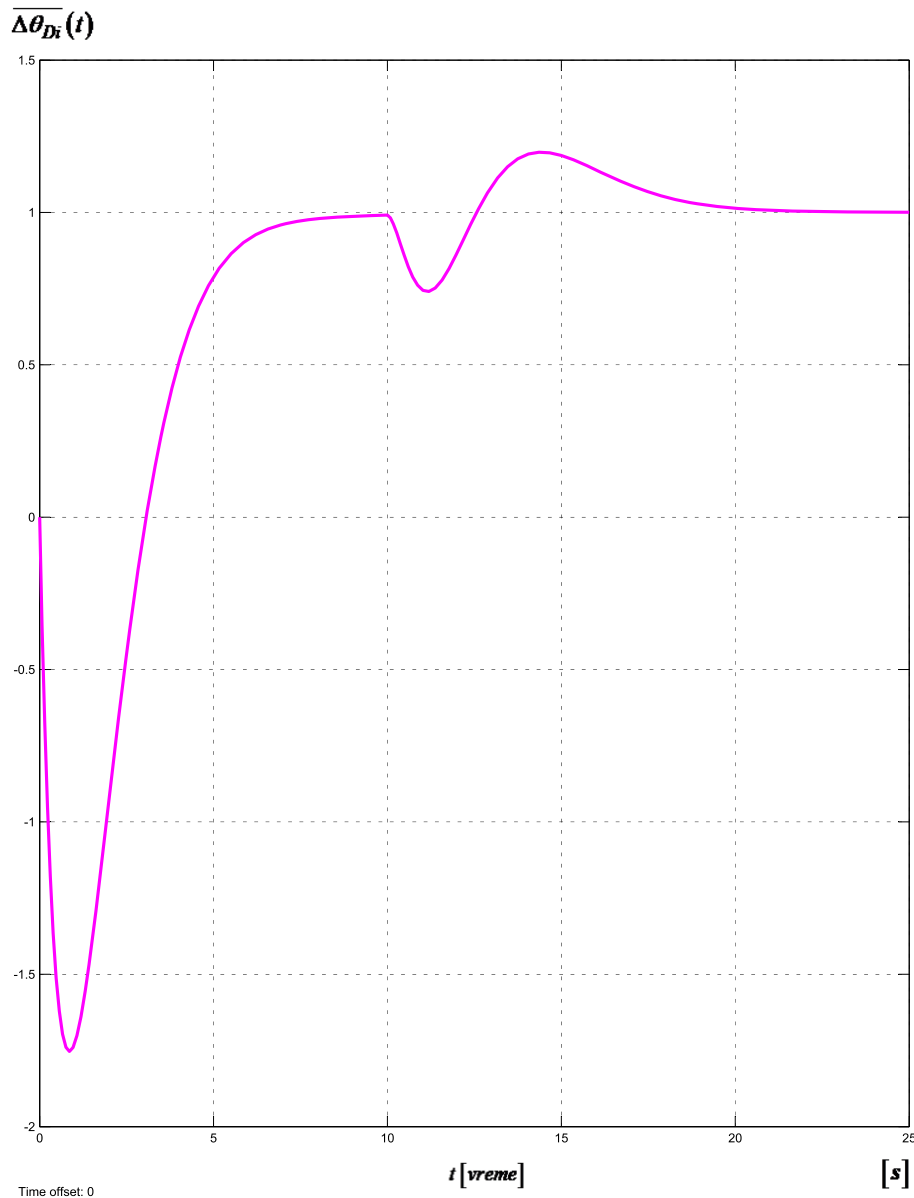
Na SI.9.7-SI.9.10 prikazan je odskočni odziv sistema u zatvorenom kolu dejstva sa klasičnim PID regulatorom, u slučaju kada je na ulazu odskočna promena poremećaja, a za različite vrednosti parametra regulatora  $\lambda$ . Uticaj parametra regulatora  $\lambda$  je značajan i pri praćenju



vremenskog kašnjenja, jer sa njegovim povećanjem, povećava se i vremensko kašnjenje sistema pri uspostavljanju stacionarnog stanja, a to se vidi upoređivanjem Sl.9.6.-Sl.9.9. Veće vrednosti za  $\lambda$  daju manji prebačaj, manju nemiinimalnu fazu, a duže vreme uspostavljanja željene vrednosti prelaznog procesa. Vreme trajanja nemiinimalne faze (podbačaja), predstavlja u stvari vremensko kašnjenje sistema, a zbir nemiinimalne faze i prebačaja predstavlja vreme smirenja tj. vreme uspostavljanja stacionarnog stanja sistema.

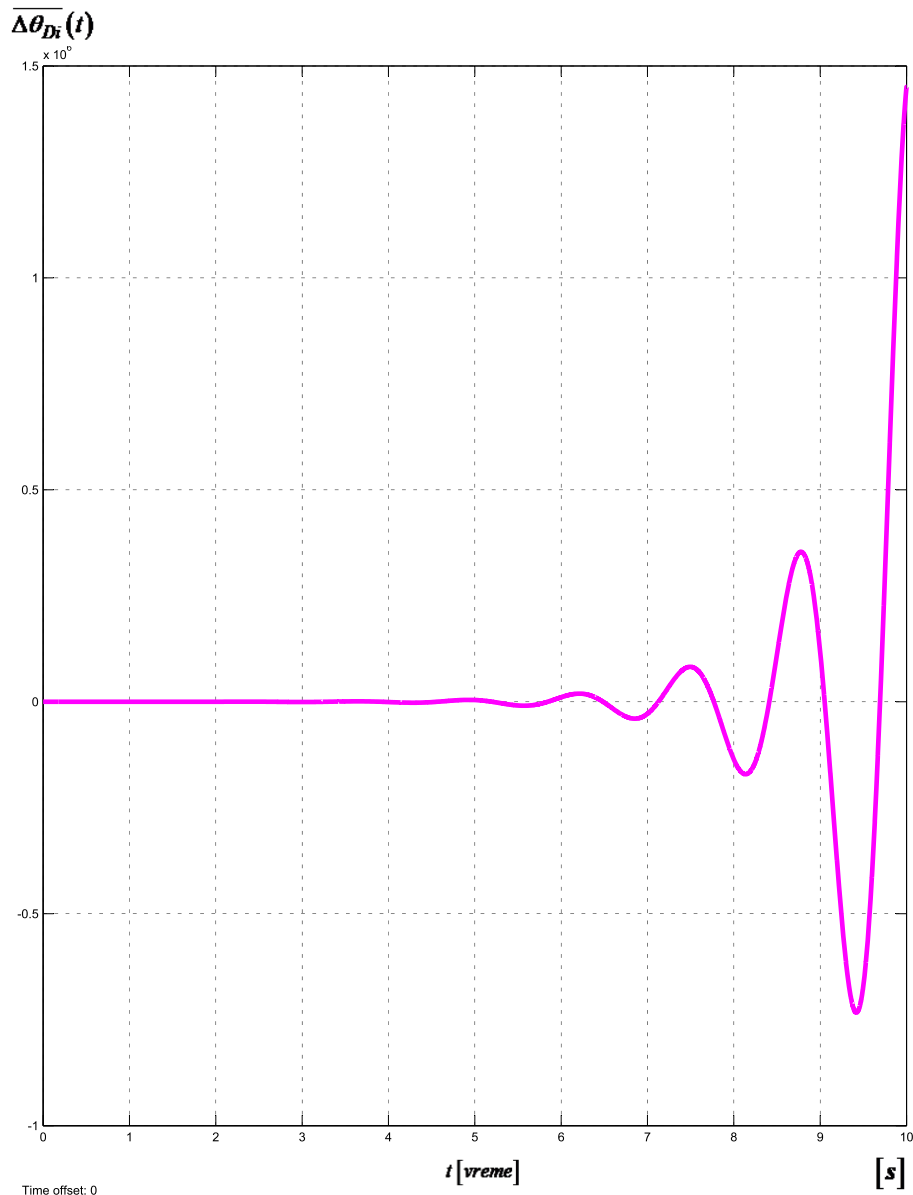


Sl.9.7. Odskočni odziv sistema u zatvorenom kolu dejstva sa klasičnim PID regulatorom, na ulazu odskočna promena poremećaja ( $\lambda = 0.5$ )



SI.9.8. Odskočni odziv sistema u zatvorenom kolu dejstva sa klasičnim PID regulatorom, na ulazu odskočna promena poremećaja ( $\lambda = 1$ )

Na SI.9.10. prikazan je slučaj, šta se dešava, kada se parametar regulatora smanji na vrednost  $\lambda = 0.05$ . U tom slučaju sistem osciluje, tj. to je slučaj kada nema regulacije. To je nepoželjno sa stanovišta regulacije objekta upravljanja, te se takve vrednosti nazivaju kritičnim vrednostima, a teži se da parametar regulatora bude najmanje 55% veći od granične kritične vrednosti tj. od vrednosti parametra regulatora kada sistem proosciluje. Dakle, sistem van toga je aperiodičan sa jednim prebačajem, preskokom ili bez preskoka u toku uspostavljanja nove vrednosti stacionarnog stanja nakon dejstva regulatora.

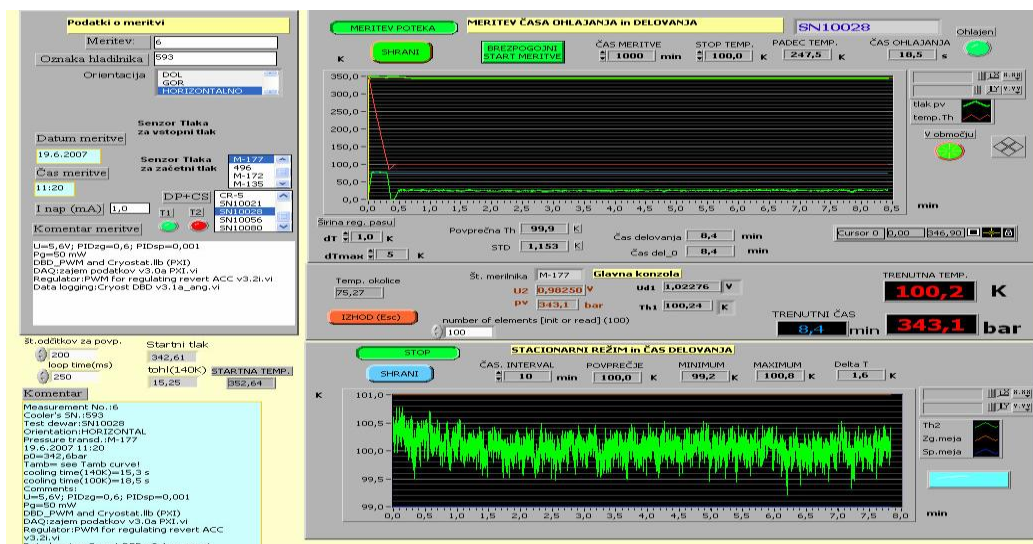


Sl.9.9. Odskočni odziv sistema u zatvorenom kolu dejstva sa klasičnim PID regulatorom, na ulazu odskočna promena poremećaja ( $\lambda = 0.05$ )

Usvajanjem odgovarajućeg parametra regulatora  $\lambda$ , najpre se treba udaljiti (izbegnuti) od njegove granične kritične vrednosti, a zatim izvršiti definisanje potrebnog vremena smirenja i neminalne faze (podbačaja regulisane veličine), a samim tim i vremena uspostavljanja stacionarnog stanja prelaznog procesa, pri radu sistema.

Na sledećoj slici, pomoću softverskog paketa LABVIEW, može se uočiti klasična regulacija – održavanje željene srednje vrednosti temperature, pri konstantnom pritisku sa otvaranjem i zatvaranjem izvršnog organa.

## Interfejs programa LABVIEW



### Sl.9.10. Regulacija softverskim paketom LABVIEW

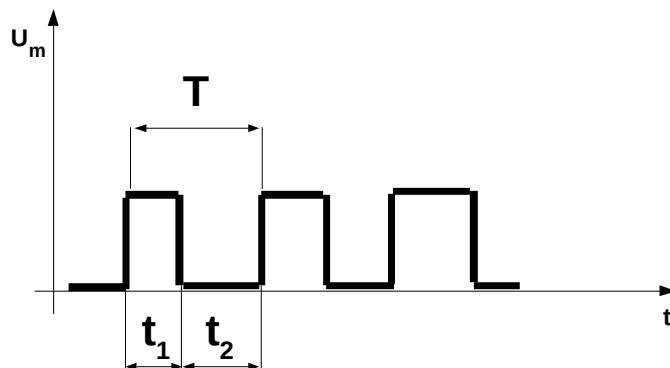
Na kraju, napomenuje se, još jednom, da su na slikama 9.6. i 9.10. dva različita tipa **amplitudne regulacije pri konstantnom pritisku, napajanje radnim fluidom iz kompresora**, s tim što je prvi sa konstantnom amplitudom, a drugi može biti sa promenljivom amplitudom ili konstantnom amplitudom. Režim rada sa konstantnom amplitudom može biti izveden na dva načina: prvi, prikazan na slici 9.6, kontinualni rad (bez impulsa) sa konstantnom amplitudom, i drugi, prikazan na slici 9.10, impulsni rad sa konstantnom amplitudom, pri čemu visina amplitude, određuje vreme trajanja impulsa i odstupanje od zahtevane temperature. Ukoliko je amplituda veća, odstupanje od zahtevane vrednosti temperature je veće, a samim tim i vreme trajanja impulsa duže. Kada radi sa promenljivom amplitudom, tada radi i sa promenljivom frekvencom, tako da se kaže da radi u režimu amplitudno-frekventne modulacije, pri konstantnom pritisku.

## 9.2. Upravljanje sa diskretnim (impulsnim) regulatorom protoka - isticanje iz boce (izvora rashlađivača)

Impulsna regulacija je oblik regulacije koji obezbeđuje impulsno (kratkotrajno) uključivanje izvršnih organa, čime se onemogućava da regulisana veličina usled inercije premaši zadatu vrednost. Impulsni regulatori kod kojih je trajanje impulsa i pauze konstantno ne obezbeđuju brzu reakciju na promene u samom sistemu. Ukoliko se međutim, trajanje impulsa (ili pauze) menja, odnosno modulise u zavisnosti od veličine odstupanja na izlazu sistema tada se na taj način može dobiti značajno brža reakcija na promene izlazne veličine. Kod regulatora čiji se rad zasniva na primeni širinsko impulsne modulacije (PWM), amplitude upravljačkog signala

(impulsa) ima uvek istu vrednost ali dužina trajanja impulsa (ili pauze) zavisi upravo od toga koliko je veliki signal greške, odnosno odstupanje od zadate vrednosti na ulazu PWM regulatora.

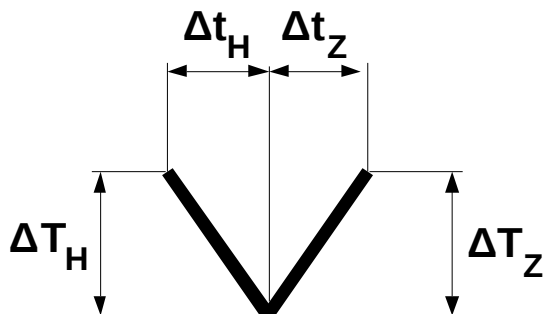
Na slici 9.11. vidi se širinsko impulsna modulacija kod koje se vrši modulacija dužine trajanja impulsa. Takođe na slici 9.11. su obeležena dva vremena  $t_1$  i  $t_2$ , pri čemu je  $t_1$  vreme trajanja impulsa, a  $t_2$  vreme koje odgovara pauzi između dva impulsa. Uobičajeno je da vreme  $t_1$  raste, a vreme  $t_2$  pada. Dakle, sabiranjem vremena  $t_1$  i  $t_2$ , dobija se parametar, koji se naziva perioda oscilovanja  $T$ . Tokom trajanja nekog procesa regulacije, parametar širinsko impulsne modulacije, period oscilovanja, teoretski može da raste, opada, ili je konstantan. Uobičajeno je da opada. Na slici 9.11. može se primetiti i parametar, amplituda, koja je označena sa  $U_m$ .



Sl.9.11. Širinsko impulsna modulacija

Ukoliko je odstupanje od zadate vrednosti veliko tada će i dužina trajanja impulsa biti veća. Ukoliko bi sad ovu situaciju primenili na polje temperaturne regulacije, to bi značilo da će grejač koji treba da izvrši zagrevanje nekog suda, biti duže uključen (duži impulsi rada) sve dok je odstupanje veliko, odnosno sve dok je temperatura u njemu daleko ispod zadate vrednosti temperature, koja treba da se dostigne. Prema tome, širinsko impulsna regulacija može da se koristi pri regulaciji temperature jer daje veliku preciznost.

Pregrevanje elementa koji se hladi, se odigrava pri konstantnom gradijentu toplote. Posledica toga je konstantno vreme trajanja impulsa kritičnog preseka koje se odigrava dok raste temperatura. Nakon toga temperatura pada sa različitim gradijentom  $k_H$ , prikazan na slici 9.12., koji je sve manji, pa je raspon između impulsa sve kraći, proporcionalno smanjenju pritiska tj. sa padom pritiska, pada i gradijent  $k_H$ . Dakle, može se konstantovati da sa padom pritiska pada i period oscilovanja tj. da su pritisak i period oscilovanja direktno proporcionalni, što je bila ključna osnova prilikom razmatranja izbora vrste i načina regulacije, a potom i primene širinsko impulsne modulacije u ovoj doktorskoj disertaciji.



Sl.9.12. Prikaz gradijenta promene temperature

Dakle impulsa je sve više tokom procesa trajanje hlađenja. Prema tome,  $k_H$  se definiše kao:

$$k_H = \frac{\Delta T_H}{\Delta t_H},$$

pri čemu je:

$\Delta T_H$  - promena temperature pri padu temperature tokom jednog impulsa,

$\Delta t_H$  - vreme za koje se izvrši pad temperature tokom jednog impulsa.

Gradijent temperature za proces zagrevanja je konstantan, i dat je sledećim izrazom:

$$k_Z = \frac{\Delta T_Z}{\Delta t_Z},$$

$\Delta T_Z$  - promena temperature pri rastu temperature tokom jednog impulsa,

$\Delta t_Z$  - vreme za koje se izvrši porast temperature tokom jednog impulsa.

Sabiranjem vremena  $\Delta t_H$  i  $\Delta t_Z$  dobija se ukupno vreme trajanja jednog impulsa.

Pri impulsnoj regulaciji promena pritiska pri jednom impulsu, i vreme za koje se izvrši taj pad može se dobiti iz sistema sledećih jednačina:

- jednačina adijabate za stanja u izvoru rashlađivača:

$$p_2 = p_1 \cdot \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{n_{sr}},$$

- jednačina isticanja iz izvora rashlađivača (boce) za vreme trajanja jednog impulsa:

$$p_2 = p_1 \cdot e^{-b_1 \cdot t_1},$$

- jednačina stanja realnog gasa za stanje na kraju jednog impulsa:

$$p_2 = \rho_2 \cdot z_2 \cdot R_1 \cdot T_2,$$

- jednačina za maseni protok:

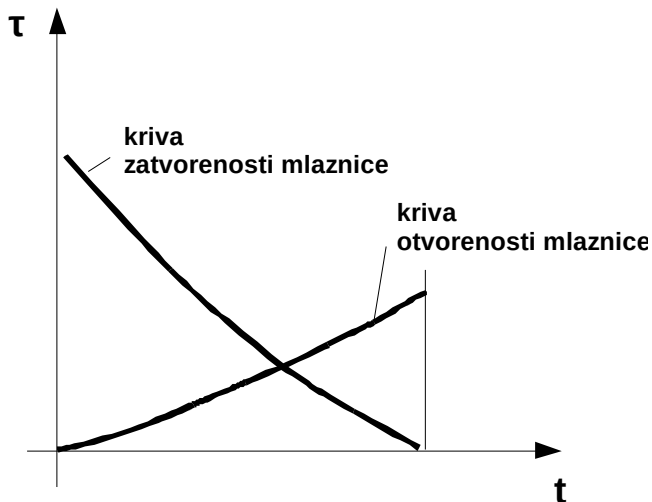
$$t_1 = \frac{\Delta m}{G_{sr}},$$

pri čemu je  $G_{sr}$  dato sledećim izrazom:

$$G_{sr} = \frac{G_1 - G_2}{\ln \frac{G_1}{G_2}},$$

a,  $G_1$  - maseni protok koji se može ostvariti pri početnom pritisku  $p_1$  u izvoru rashlađivača, a  $G_2$  - maseni protok koji se može ostvariti pri konačnom pritisku  $p_2$  u izvoru rashlađivača. Pri

regulaciji masenim protokom važi sledeća jednakost  $\Delta t_H = t_1$ , i to je vreme otvorenosti mlaznice. Pored vremena otvorenosti mlaznice koristi se i termin vreme zatvorenosti mlaznice. Na sledećoj slici 9.13. prikazana je promena ovih vremena tokom procesa trajanje hlađenja. Oznaka  $\tau$  predstavlja vreme otvorenosti ili vreme zatvorenosti mlaznice, a  $t$  vreme trajanja procesa trajanje hlađenja. Karakteristika ovog dijagrama je da kriva zatvorenosti mlaznice ne polazi od y-ose, već je pomerena od nje za vrednost vremenskog trajanja prvog impulsa otvorenosti mlaznice. Krive u suštini predstavljaju spoj geometrijskih mesta tačaka vremena otvorenosti ili vremena zatvorenosti mlaznice tokom trajanja procesa trajanje hlađenja.



Sl.9.13. Promena vremena otvorenosti i zatvorenosti mlaznice tokom procesa trajanje hlađenja

Dakle, primeniće se prethodno rečeno na realan proces. Ako regulator sve češće ispušta smešu, a u svakom sledećem impulsu smeša je sve suvlja, tada su impulsi temperature sve češći, ali i gradijenti promene njene temperaturske sinusoide sve blaži, a amplitude temperature sve niže. To je posledica nedostatka vlage u jednom impulsu koja bi duže održavala temperaturu u jednom impulsu. Tada vlaga (tečnost) sve brže isparava, detektor se sve brže greje, regulator mora za kraće vreme da se otvori i doda novi gas sa vlagom.

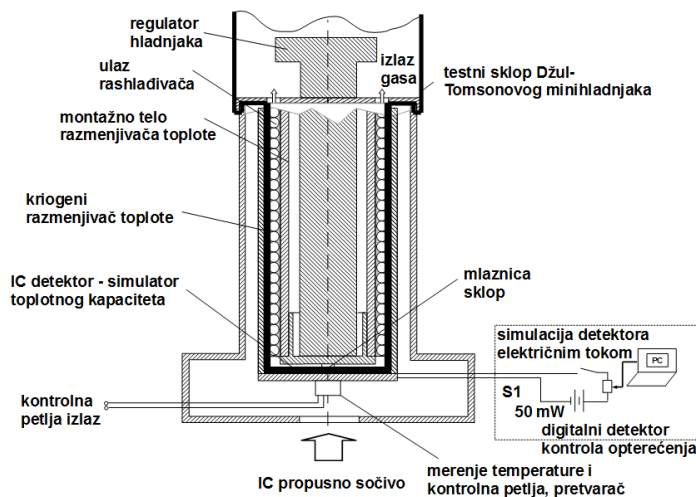
## 10.0. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE RADA SISTEMA U ZATVORENOM KOLU DEJSTVA

### 10.1. Šema merenja

Džul Tomsonovi minihladnjaci su sklopovi koji obezbeđuju veoma niske temperature a koje se postižu upotrebom kriogenih rashlađivača. Njihova uloga je da u toku zahtevanog radnog režima, očuva temperaturu u datom temperaturskom opsegu. Dakle, osnovna uloga Džul Tomsonovih minihladnjaka je da ohlade IC osetljivi element, koji predstavlja prijemnika spoljnjeg toplotnog zračenja u različitim IC senzorskim sklopovima. Uređaj za hlađenje tj. razmenjivač toplote mora da ispuni stroge termo-tehničke uslove koji su promenljivi sa operativnim stanjima.

Prilikom eksploatacije, kako tokom procesa trajanje hlađenja tako i procesa cooldown, karakteristike minihladnjaka obezbeđuju i održavanje kvaliteta senzora. Režim trajanje hlađenja je realizovan kao kvazi kontinualan proces razmene toplote kontrolisan unutar dopuštenih vrednosti glavnog protoka. Proizvodnja veoma preciznih izmenljivih komponenata na integrisanim laboratorijskim sklopovima u eksperimentima, kao i upotreba naročito skupe laboratorijske opreme, je neophodno ukoliko se vrši eksperimentalno istraživanje ovih tipova podsklopova.

Na Sl.10.0. prikazan je eksperimentalni sklop Dewarove posude sa minihladnjakom.



Sl.10.0. Eksperimentalni sklop Dewarove posude sa minihladnjakom

Dakle, cilj je bio da se razvije najbolje konstruktivno rešenje za prikladnu integraciju detektora i senzorskog sklopa. Metodologija istraživanja je tipična eksperimentalna optimizacija konstruktivnih komponenata koje ponekad zahtevaju dugotrajna testiranja fino izrađenih komponenata sa različitim dimenzijama, merenim u mikronima. Projektovana laboratorijska oprema može koristiti ove različite komponente realno konstruisanog Džul Tomsonovog



minihladnjaka, SI.10.0., praćena sa prikladno konstruisanom Dewarovom posudom i njihovoj eksperimentalnoj integraciji. S obzirom da svi elementi sklopa detektora su skupe i osjetljive komponente obično izrađene kao strogo poverljiva tehnologija, simulacija ponašanja sklopa je strogo zahtevna. Ovo ponašanje mora da odredi prag karakteristika senzora, unutar opsega parametara, za dostupna stanja sistema u eksploataciji.

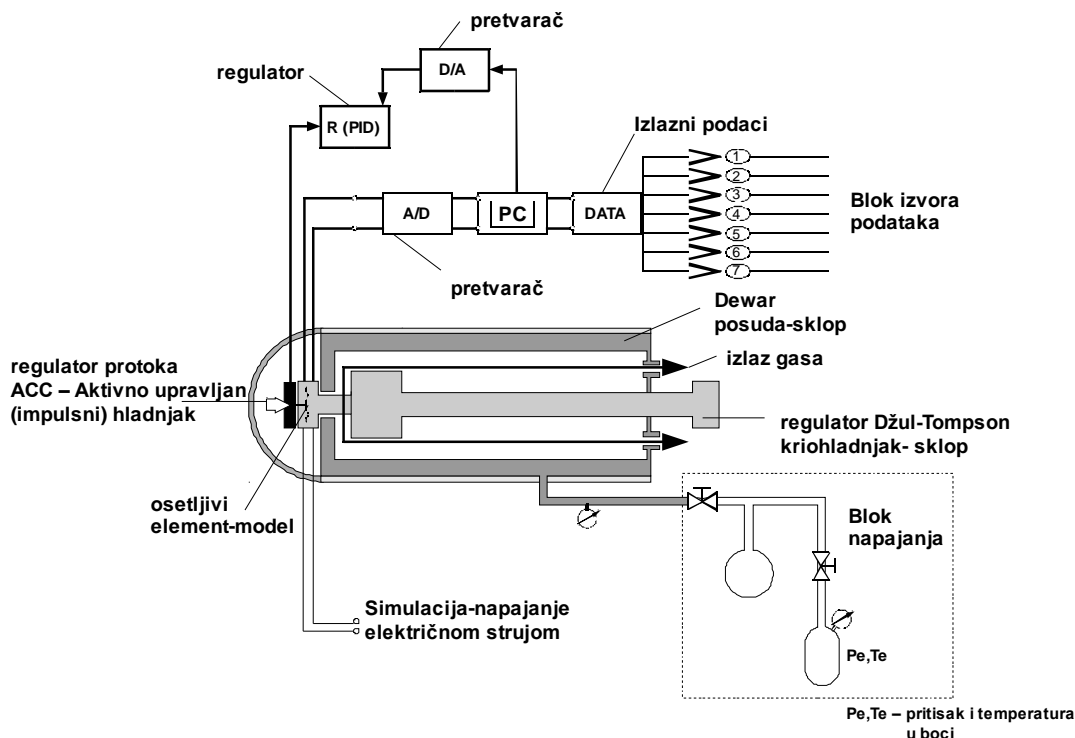
Eksperimentalna oprema obezbeđuje najbolja testna rešenja svih konstruktivnih komponenata, bez korišćenja tehnologije realnog senzora detektora. Ovo se postiže korišćenjem uzorka koji simulira temperaturu osjetljivog elementa, kao funkcionalnog modela realno konstruisanog skupog prototipa detektora.

Bilo kojoj podešenoj Dewarovoj posudi može biti pridružen unutra sklop simulatora detektora, SI.10.0., i u unutrašnjoj površini montiran sklop minihladnjaka. Performanse detektora su bile simulirane pomoću specijalno pripremljenog uzorka bakarne ploče kao termo provodnika i toplotnog kapaciteta modela, kao realno osjetljivog elementa zahtevanog u radu. Debljina uzorka osjetljivog elementa je izabrana na osnovu prikladnog proračuna. Eksperimentalni rezultati predstavljaju realno ponašanje svih istraživanih sklopova jer termičko ponašanje prototipa detektora je ekvivalentno realnoj jedinici.

Dewarova posuda, bazirana na predhodnom konstruktivnom rešenju i izradi, mora biti pripremljena kao vakuumski sistem u preliminarnom laboratorijskom postupku. Dewarova posuda uključuje podešavanje Džul Tomsonovog minihladnjaka kao razmenjivača toplote rashladnog paketa. To može biti integrisano sa ili bez regulatora protoka rashlađivača. Slika eksperimentalnog, tako i realno konstruisanog sklopa Dewarove posude, upotrebljene kao osnova podsklopa IC senzora u ovom istraživanju je data SI.10.0. Da bi simulacija detektora bila realna, prototipska jedinica mora obezbediti 50mW toplotne snage da simulira rasipanje toplote pri radu detektora. Prekomerna toplotna snaga je izvršena posredstvom DC električne struje zagrevanjem toplotno otpornog elementa sastavljenog od cekasove žice (S1 podsklop na SI.10.0.) i može biti različita da bi se simulirali realni uslovi. Potpuni uzorak paketa sada se ponaša slično sistemu u realnim uslovima. Temperaturni senzori se sastoje od dioda i konstantnog izvora struje kontrolisanog preko prikladno razvijenog softvera uz pomoć A/D i D/A pretvarača. Rezultati dobijeni na eksperimentalnoj instalaciji sa prototipom detektora upoređeni sa realnim sistemom sa realnim IC sensorima su isti. Prezentovani rezultati za Džul Tomsonov minihladnjak u ovom istraživanju su koristili azot kao rashlađivač. Testiranje je takođe bilo realizovano i sa argonom i drugim kriogenim mešavinama koje se koriste za ovu vrstu kriogenih mini uređaja.

Eksperimentalne vrste Džul Tomsonovog minihladnjaka su univerzalno korišćene kao modularni podsklopovi montirani u Dewarovoj posudi za namenu testiranja. Regulisani ili neregulisani model minihladnjaka je testiran u promenljivim uslovima testiranja u pogledu promenljivih karakteristika senzora temperature. Zahtevani uslovi su simulirani osjetljivim elementom kroz petlju S1, SI. 10.1. Regulator u ovom podsistemu je specijalni podsklop koji je

odvojeno integrisan u prototip Dewarove posude u podsklop hladnjaka, kao naročito konstruisan modul. Na slici 10.1. prikazan je dijagram toka merenja.



Sl. 10.1. Dijagram toka merenja

Izmenom podsklopa regulatora hladnjaka, u istoj jedinstvenoj univerzalno konstruisanoj Dewarovoj posudi, tako da je bilo moguće napraviti promenljive reference uslova testiranja. Tri reprezentativne vrste regulatora, su bila umetnuta, u neregulisani sklop hladnjaka. To obezbeđuje eksperimentalno istraživanje rashladnih performansi u testovima upoređivanja. Ovakav konstruktivni pristup obezbeđuje opremu za testiranje ispitivanog sistema. Dobijeni rezultati omogućavaju ispitivanje ponašanja i optimizaciju sistema. Stepem korisnosti regulacije hlađenja, stepen korisnosti rashlađivača i kvalitet kontrolnih petlji su ispitivani, da bi napravili konstruktivne promene kako na početku istraživanja i razvoja, tako i u eksploataciji. Tako je moguće da se simulira i meri degradacija karakteristika u realnom senzoru. Ovakav pristup testiranju ima prednost nad sposobnošću da se koristi isto hlađenje i podsistem senzora kao i testiranje performansi sa ili bez regulacije protoka rashlađivača. Predstavnicima kontrolnih regulatora, kao podsklopovi upotrebljeni ovde su: samo regulišući tip regulatora, regulator za dvostruko strujanje i impulsna regulacija strujanja rashlađivača u neregulisanoj preliminarno konstruisanoj Džul Tomsonovom minihladnjaku. Cilj testiranja je bio da se istraže optimalni uslovi regulisanog ili neregulisanoj temperaturnog režima procesa trajanje hlađenja, tako da se izabere najbolji koncept koji izbegava nestacionarna stanja ponašanja temperature, koja prouzrokuju degradaciju hlađenja detektora tokom rada.

U članku, lit.[88], neko rešenje eksperimentalnog sklopa kriogenog minihladnjaka, s obzirom na mešavinu rashlađivača i Džul Tomsonovog ciklusa mešavine, je predstavljeno. U okviru rada, u njegovom rukopisu je predstavljena univerzalna eksperimentalna oprema koja je bila konstruisana, da bi se omogućilo modularno testiranje potpunih Dewarovih sklopova i njegovih podsklopova uređaja, radi testiranja uslova u procesima cooldown i trajanje hlađenja.

Oprema korišćena u ovom ispitivanju Sl.10.1. se sastoji od: univerzalnog sklopa Dewarove posude koja bi mogla biti vrsta prototipa ili realno upotrebljen tip, sa Džul Tomsonovim minihladnjakom, u pogledu različitih izmenljivih regulatora protoka rashlađivača; kontrolni blok i izvor snabdevanja rashlađivača; oprema sa sposobnošću da kontroliše performanse; pretvarač temperature za merenje temperature detektora; simulator detektora sa uzorcima promenljivog toplotnog kapaciteta; testiranje svake vrste regulatora protoka rashlađivača koji je umetnut u Džul Tomsonov minihladnjak.

Kontrolne funkcije su takođe vođene utvrđenim i željenim stanjima okruženja i zahtevanom temperaturom detektora. Cilj eksperimenta je bio da testira vreme razvoja temperature detektora u kontinualnim performansama procesa trajanje hlađenja. Izmenljivi regulatori zahtevaju direktan broj ulaznih funkcija u kontrolni blok.

Rashlađivač koji snabdeva podsklop Džul Tomsonov minihladnjak, se raspoređuje kroz komponente hladnjaka do detektora, preko mlaznice sa fiksnim ili dvostruko promenljivim poprečnim presekom u regulisanom ili neregulisanom režimu. Ovaj sistem je prikazan kao eksperimentalan opis instalacije sa objašnjenjem osnova postupka, Sl.10.1.

Posuda pod pritiskom kao snabdevač rashlađivača je bila napunjena azotom 380 bara sa zapreminom 150 do 700 ccn. Oprema je bila snabdevena sistemom ventila koji obezbeđuju pražnjenje gasa u zavisnosti od vremena. Pretvarači temperature u svim slučajevima testiranja su bili prikačeni na detektor preko podataka o spajanju sklopa sa A/D pretvaračem i PC. Za slučaj samo regulišućeg Džul Tomsonovog minihladnjaka, merna petlja povratne sprege je kontrolisana preko povratnog pritiska za ponašanje temperature detektora merene u zavisnosti od vremena, što je podrazumevalo da je sistem bio analogno upravljani.

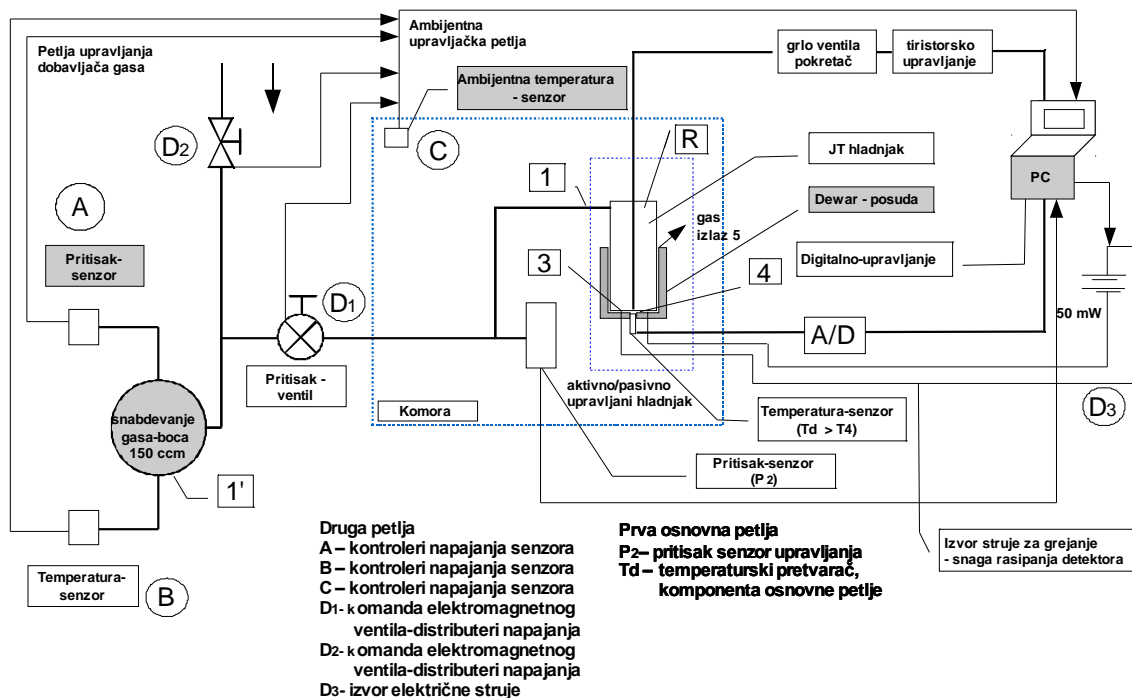
Da bi koristili istu petlju u merenjima za impulsnu regulaciju protoka rashlađivača, priključena petlja PID regulatora je bila konstruisana i implementirana kao eksperimentalna osnova za simulaciona testiranja. PID regulator kontroliše tok protoka rashlađivača pomoću implementiranog kratko vremenskog premeštanja izvršnog organa da bi se otvorilo grlo mlaznice. Integrisana kontrola izmerene temperature za ovaj slučaj je bila realizovana korišćenjem PC u povratnoj petlji.

Potpune eksperimentalne petlje dijagrama toka, Sl.10.1.a., integrisane su sledećim eksperimentalnim podsklopovima i vođene od jedne tačke:

- kontrolni tok signala snabdevanja, za merenje pritiska i temperature pražnjenja rashlađivača,
- kontrolni tok signala ambijentnog stanja temperature, i

- tri kontrolne petlje karakteristika (performansi) minihladnjaka, koje se sastoje od integrisane petlje za temperaturu detektora, kontrolna petlja za regulator protoka hladnjaka i kontrolna petlja za simulaciju toplotnog opterećenja detektora, Sl. 10.1.a.

Na slici 10.1.a. prikazana je šema instalacije.



Sl.10.1.a. Šema instalacije

Integrisane petlje omogućavaju testiranje različitih modularnih konstrukcija Džul Tomsonovog minihladnjaka, i prilagođenih regulatorskih sklopova, sa različitim zahtevima razvoja, istraživanja ili rukovanja i održavanja procesa tokom eksploatacije. Sklop Džul Tomsonovog minihladnjaka mora da zadovolji zahtevne dimenzione zahteve za senzor na raketama ili drugoj opremi za posmatranje koja koristi Dewarovu posudu.

Istraživanje je bilo neophodno da se poboljšaju rashladne performanse, razvojem novih vrsta Džul Tomsonovih minihladnjaka, korišćenjem istog detektora u Dewarovoj posudi predviđenoj u ovoj eksperimentalnoj instalaciji.

Regulacija tekuće snage toplotnog kapaciteta simulatora umesto realno korišćenog IC senzora detektora omogućava simulaciju raznovrsnih vrsta detektora i njegovih IC flukseva u različitim uslovima okruženja u sigurnim ograničenim performansama.

Specijalna komora koja može da simulira pritisak okruženja i temperaturske uslove je odgovorna za analizu ponašanja senzora podsistema u zahtevanim stanjima okruženja.

Različite vrste rashlađivača su takođe moguće za simulaciju, uključujući varijacije mešavina rashlađivača.

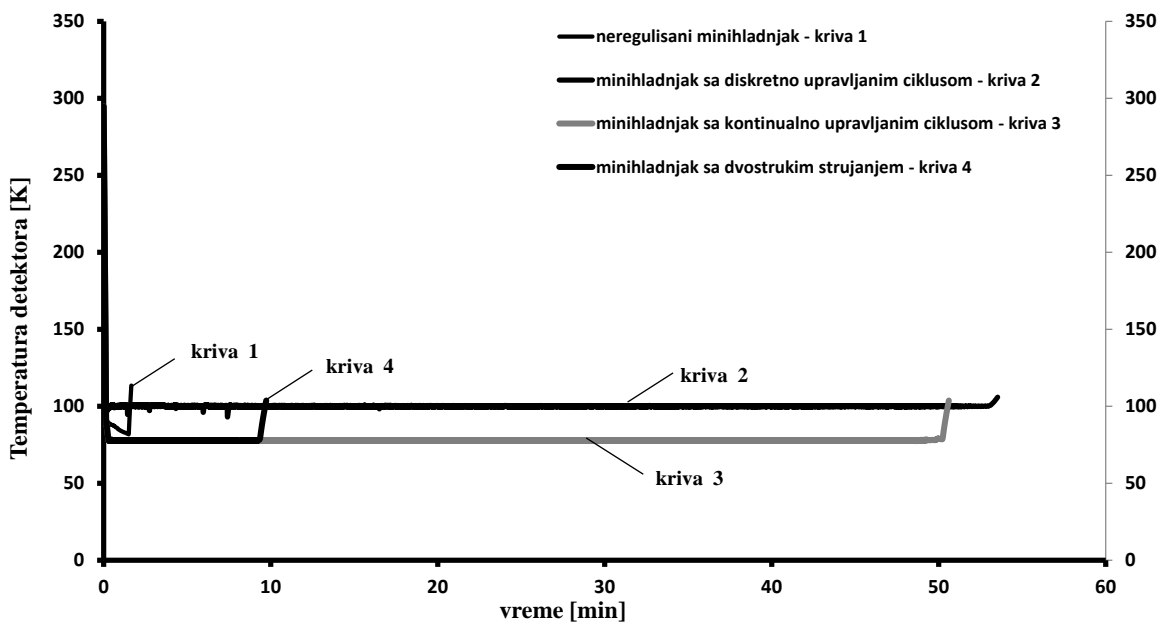
Centralni blok C se sastoji od kontrolne petlje za merenje pritiska i temperature okruženja oko senzora (sklopa Dewarove posude sa hladnjakom) i senzora temperature detektora Td. Ostale merne i regulacione petlje (sporedne) su označene kao blokovi A do D3. Njihova funkcija je da kontrolišu parametre za snabdevanje rashlađivačem. Integrisane petlje omogućavaju korišćenje, modula regulatora R kao promenljive konstrukcije, u istoj eksperimentalnoj šemi. Na ovaj način, je sposobno bilo da se ispita poboljšanje karakteristika, vremena i temperature detektora, osetljivog elementa u kontrolisanom i nekontrolisanom (neregulisanom) snabdevanju rashlađivačem. Ovaj eksperimentalni blok dijagram dozvoljava, za bilo koju modularno, dimenziono, prilagođenu konstrukciju Džul Tomsonovog minihladnjaka i regulatorskog sklopa R, bude upotrebljena pod istim uslovima, na istoj opremi, sa istim detektorom i istim sklopom Dewarove posude.

To dozvoljava uzajamno upoređivanje izvršnog kvaliteta regulacije protoka rashlađivača. Ova oprema dopušta promenu sklopa Džul Tomsonovog minihladnjaka, koji ispunjavaju potrebne zahteve za dimenzijama Dewarove posude, a posebno istraživanje karakteristika pri razvoju Džul Tomsonovog minihladnjaka koristeći isti detektor u Dewarovoj posudi. Regulacija tekuće snage, toplotnog kapaciteta imitacije detektora, može takođe biti izvršena promenom izvora električne energije u petlji električnog strujnog kola, pri izvesnim ograničenjima. Postavljanjem uslova okruženja u bloku C (odgovarajuću izlaznu temperaturu i pritisak), to je bilo sposobno da simulira ponašanje detektora u neophodnom okruženju u kojem realni senzori mogu raditi. Regulacija različitim vrstama rashlađivača je takođe moguća na ovoj opremi. Kontrola načina rada Džul Tomsonovog minihladnjaka i izvora toplotnih flukseva na realnom detektoru D3, može biti regulisano varijacijom pritiska i protoka bloka A,B komandama D1 i D2. Dakle, ova oprema simulira sve realne parametre IC senzora u zahtevanom opsegu temperatura i u prelaznom režimu, cooldown, i u radnom režimu, process trajanje hlađenja, ili integrisano u oba režima. Ova univerzalna oprema omogućava modularnu zamenu uređaja koji imitiraju specifična stanja u kojima sklop Dewarove posude, senzor i Džul Tomsonov minihladnjak rade kao ključni funkcionalni elementi hlađenja IC senzora.

## 10.2. Eksperimentalno ispitivanje termodinamičkih parametara detektora

Na sledećoj slici 10.2., prikazani su rezultati merenja procesa trajanje hlađenja za sva četiri tipa regulatora. Očigledno je da najkraći proces trajanje hlađenja je kod minihladnjaka sa otvorenim ciklusom bez upravljanja. Proces trajanje hlađenja je kod minihladnjaka sa dvostrukim ciklusom znatno duži od prethodno pomenutog. Upoređujući minihladnjaka sa kontinualno upravljanim ciklusom i minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom primećuje se da postoji mala razlika u trajanju procesa trajanje hlađenja, koja delimično potiče i od temperature na kojoj se vrši regulacija. Veća temperatura regulacije podrazumeva duže trajanje procesa trajanje hlađenja. Takođe, sam proces trajanje hlađenja, kod poslednja dva tipa minihladnjaka je znatno duži od napred pomenutih. Prema slici 10.2., upravljanje pri procesu trajanje hlađenja kod minihladnjaka sa diskretno upravljanim ciklusom se dešava pri temperaturi

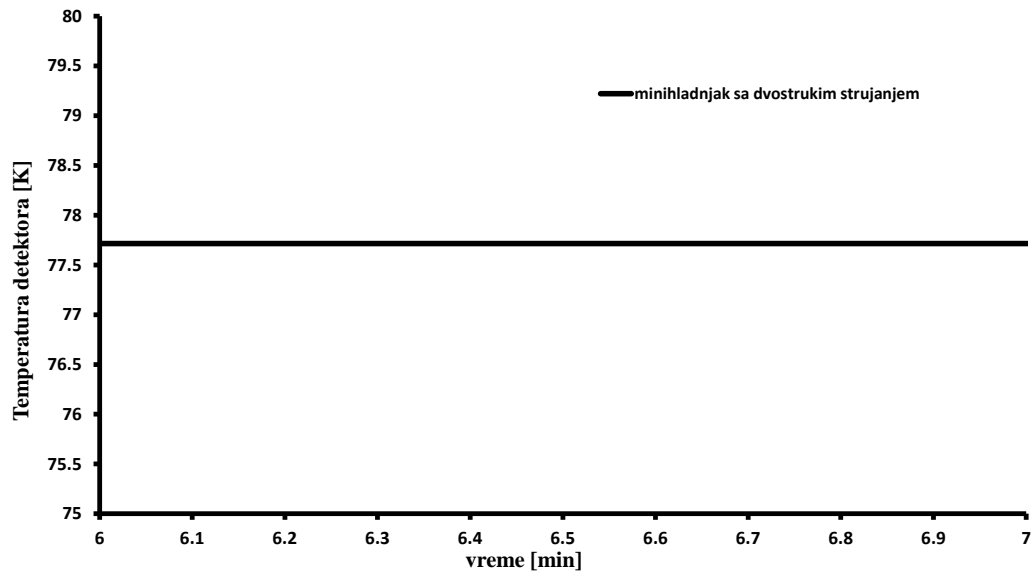
$T = 100[K]$ , dok kod minihladnjaka sa kontinualno upravljanim ciklusom pri temperaturi  $T = 78[K]$ . Dakle, minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom ima značajnu prednost u odnosu na minihladnjak sa kontinualno upravljanim ciklusom, a takođe i u odnosu na preostala dva tipa minihladnjaka, jer kako može održavati zahtevanu temperaturu  $T = 100[K]$ , tako može održavati i bilo koju drugu zadatu temperaturu, koja kako može biti ista, tako može biti i promenljiva duž celog procesa trajanje hlađenja. Sa ovom analizom je i pokazan značaj i suština doktorske disertacije, to jest novog načina pristupa hlađenja IC senzora tj. detektora.



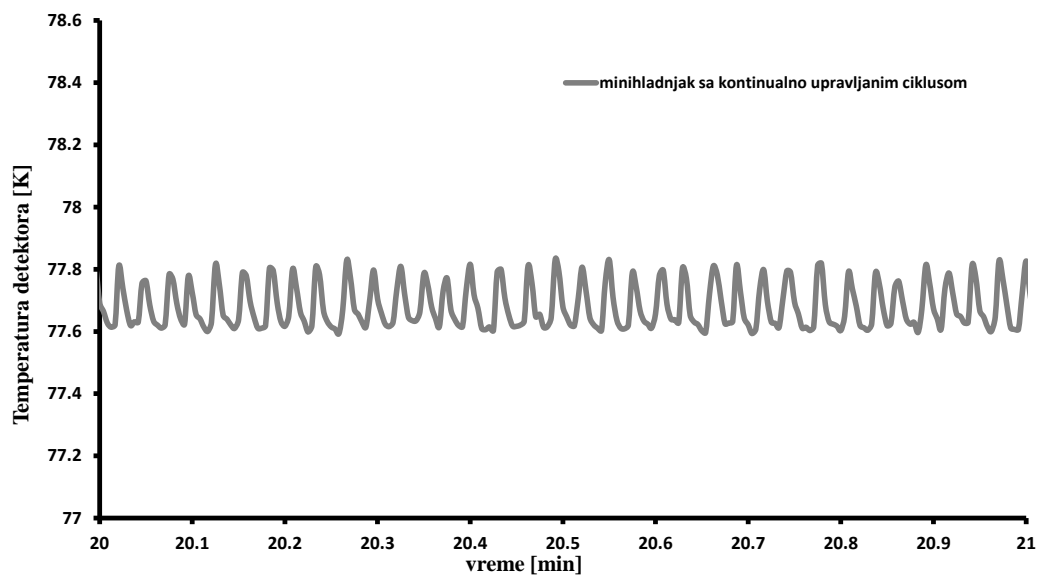
Sl.10.2. Uporedni dijagrami procesa trajanje hlađenja za sva 4 tipa hladnjaka

Standardno odstupanje režima tj. procesa trajanje hlađenja je različito za svaku vrstu primenjenih hladnjaka. Za neregulisani sklop hladnjaka, standardno odstupanje je veće, i njegova približna vrednost iznosi  $\sigma = 2.794$ , nego regulisanog sklopa hladnjaka  $\sigma = 1.75$ . Relativna greška režima tj. procesa trajanje hlađenja, merena kao srednja vrednost, za sva tri tipa modelskog sklopa, je bila manja nego 10%. Svi pomenuti rezultati su dobijeni na jedinstvenoj eksperimentalnoj instalaciji. Prema tome, sistematske greške su homogene, a koje dozvoljavaju direktno upoređivanje svih podsklopova. Ova vrsta univerzalne instalacije prikazuje najbolje parametarske različite efekte konstruktivnih rešenja.

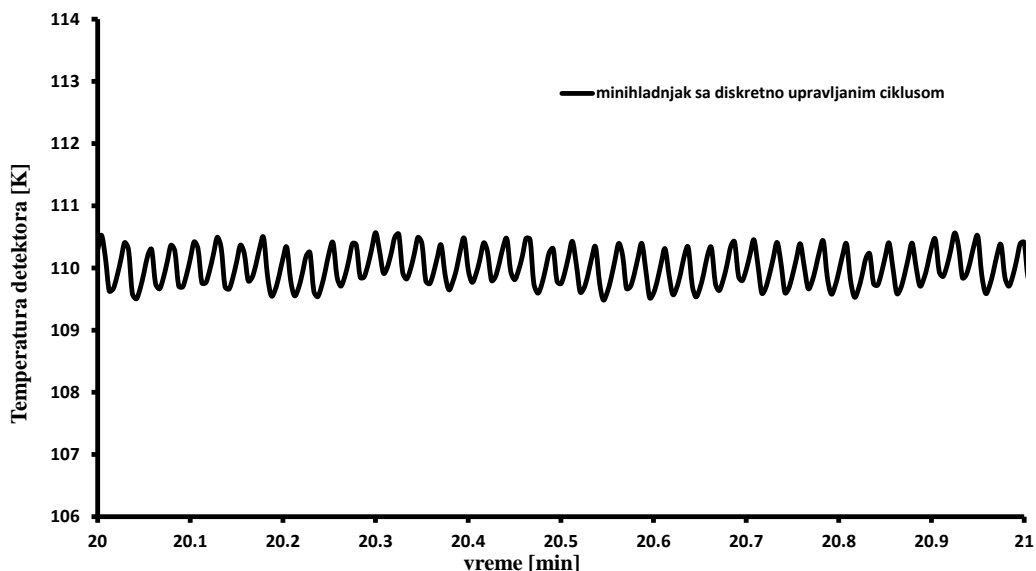
Na Sl.10.3-Sl.10.5. prikazani su detalji (dijagrami rada) dijagrama procesa trajanje hlađenja za različite tipove regulisanih minihladnjaka, koji su prikazani na Sl.10.2.



Sl.10.3. Dijagram rada minihladnjaka sa dvostrukim strujanjem

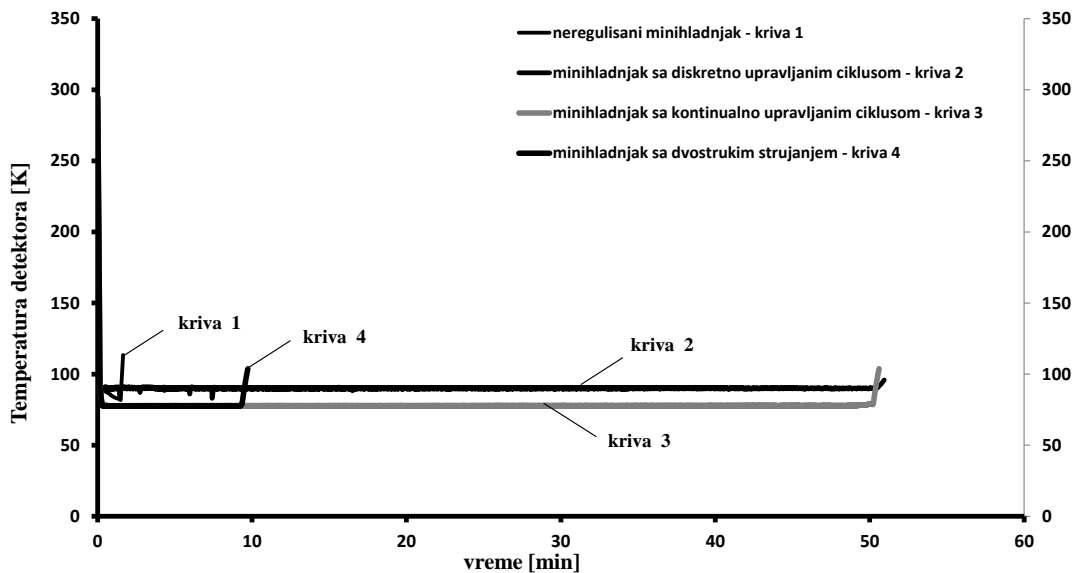


Sl.10.4. Dijagram rada minihladnjaka sa kontinualno upravljanim ciklusom



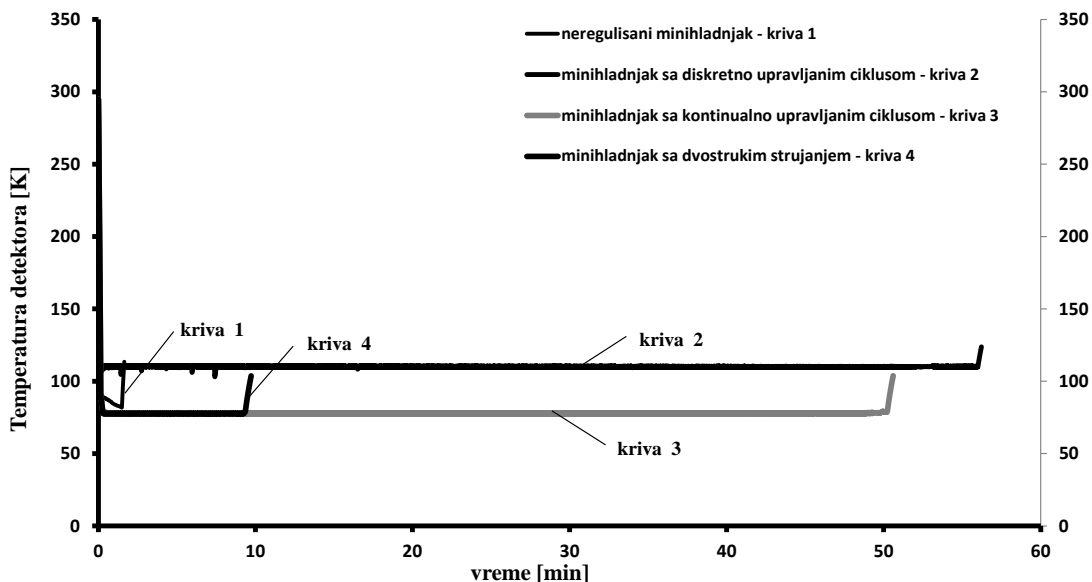
Sl.10.5. Dijagram rada minihladnjaka sa diskretnim upravljanim ciklusom

Na Sl.10.6-Sl.10.8. prikazana je regulacija tokom procesa trajanje hlađenja kriogenim fluidom azotom,, i to za različite temperature regulacije minihladnjaka sa diskretno upravljanim ciklusom, i njegovo upoređivanje sa ostalim tipovima minihladnjaka. Takođe, dijagraami procesa trajanje hlađenja su uporedivi, jer su urađeni za isto toplotno opterećenje, prilikom rada različitih tipova minihladnjaka.

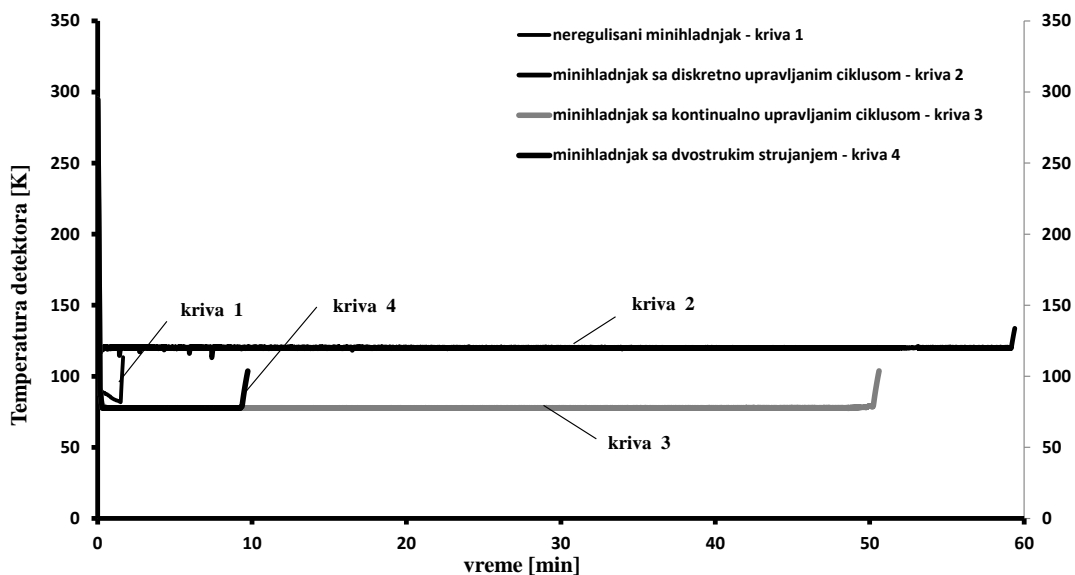


Sl.10.6. Uporedni dijagrami procesa trajanje hlađenja za sva 4 tipa minihladnjaka (minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom kontroliše proces trajanje hlađenja pri  $T = 90[K]$ )



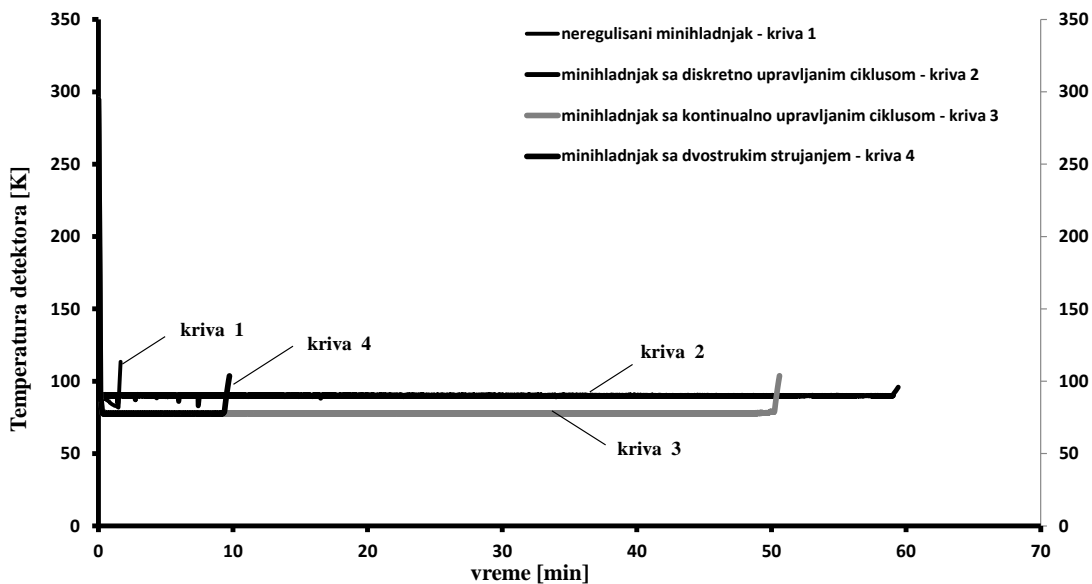


Sl.10.7. Uporedni dijagrami procesa trajanje hlađenja za sva 4 tipa minihladnjaka (minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom kontroliše proces trajanje hlađenja pri  $T = 110[K]$ )

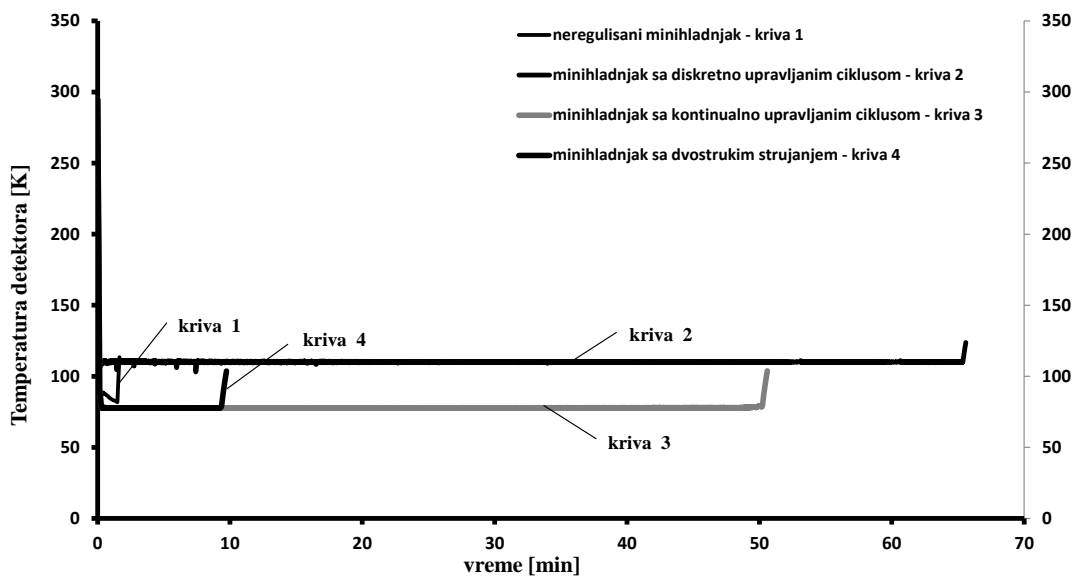


Sl.10.8. Uporedni dijagrami procesa trajanje hlađenja za sva 4 tipa minihladnjaka (minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom kontroliše proces trajanje hlađenja pri  $T = 120[K]$ )

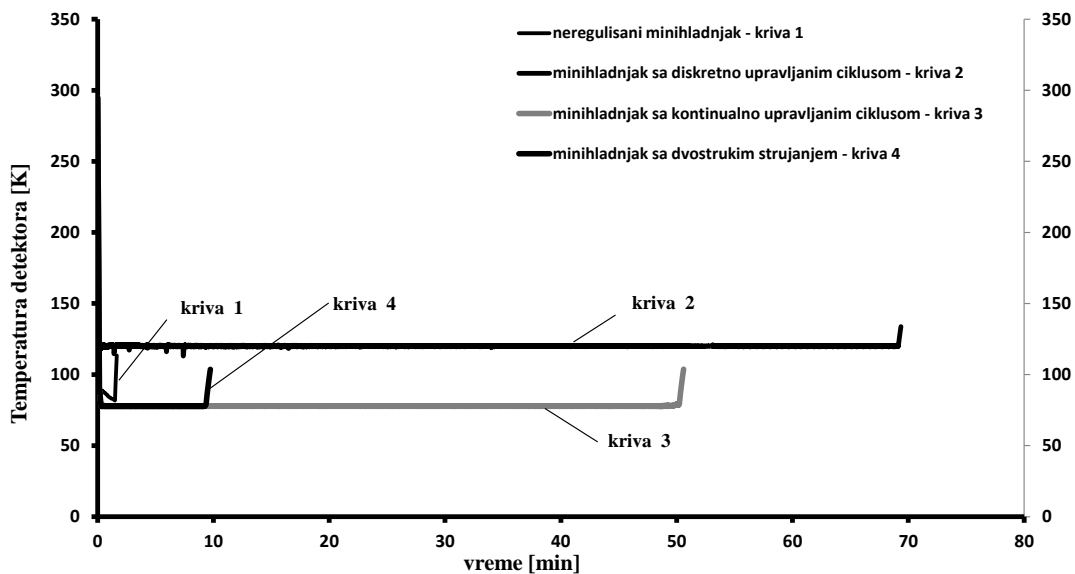
Na Sl.10.9-Sl.10.11. prikazana je regulacija tokom procesa trajanje hlađenja kriogenim fluidom vazduhom, i to za različite temperature regulacije minihladnjaka sa diskretno upravljanim ciklusom, i njegovo upoređivanje sa ostalim tipovima minihladnjaka. Takođe, dijagraami procesa trajanje hlađenja nisu uporedivi, jer su urađeni za različita toplotna opterećenja prilikom rada različitih tipova minihladnjaka.



Sl.10.9. Uporedni dijagrami procesa trajanje hlađenja za sva 4 tipa minihladnjaka (minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom kontroliše proces trajanje hlađenja pri  $T = 90[K]$ )

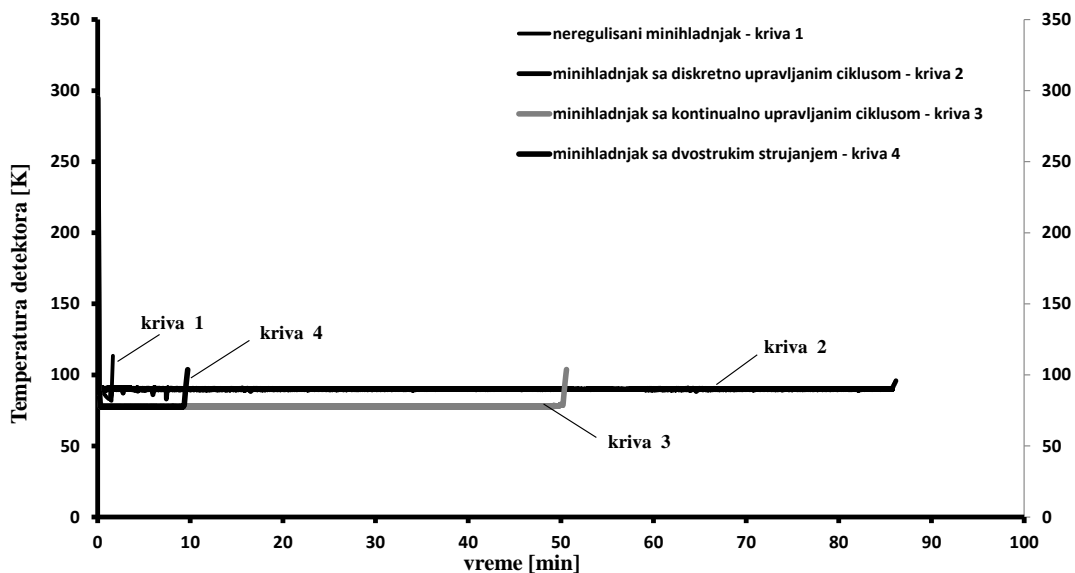


Sl.10.10. Uporedni dijagrami procesa trajanje hlađenja za sva 4 tipa minihladnjaka (minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom kontroliše proces trajanje hlađenja pri  $T = 110[K]$ )

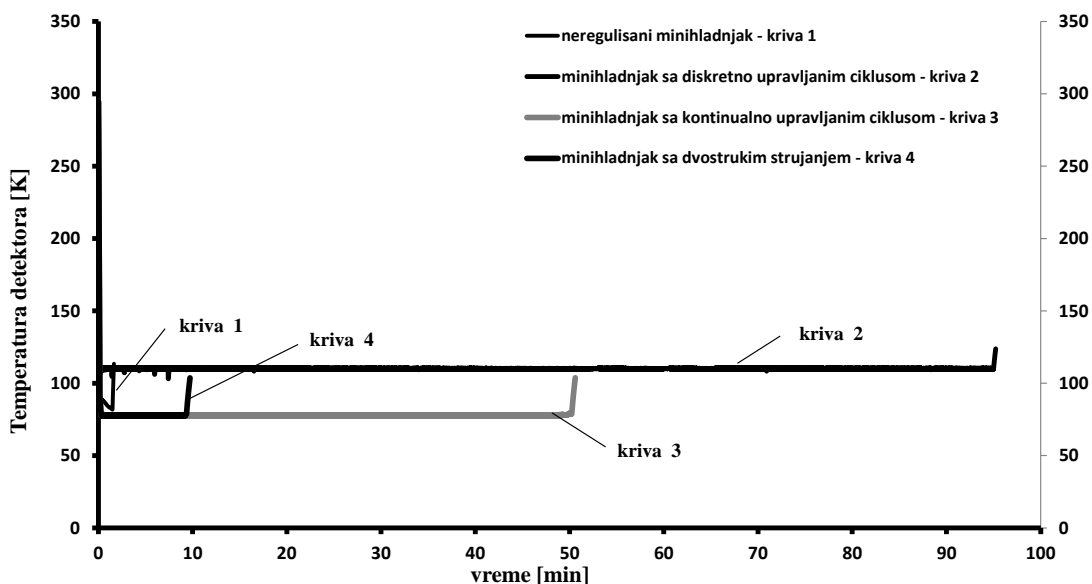


Sl.10.11. Upporedni dijagrami procesa trajanje hlađenja za sva 4 tipa minihladnjaka (minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom kontroliše proces trajanje hlađenja pri  $T = 120[K]$ )

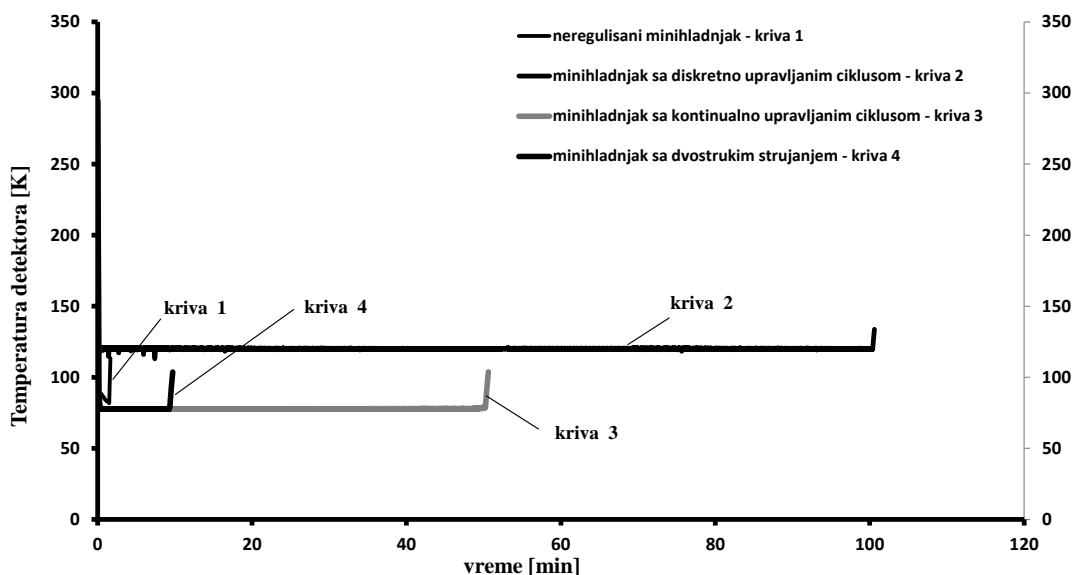
Na Sl.10.12-Sl.10.14. prikazana je regulacija tokom procesa trajanje hlađenja kriogenim fluidom argonom, i to za različite temperature regulacije minihladnjaka sa diskretno upravljanim ciklusom, i njegovo upoređivanje sa ostalim tipovima minihladnjaka. Takođe, dijagraami procesa trajanje hlađenja nisu uporedivi, jer su urađeni za različita toplotna opterećenja prilikom rada različitih tipova minihladnjaka.



Sl.10.12. Upporedni dijagrami procesa trajanje hlađenja za sva 4 tipa minihladnjaka (minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom kontroliše proces trajanje hlađenja pri  $T = 90[K]$ )



Sl.10.13. Uporedni dijagrami procesa trajanje hlađenja za sva 4 tipa minihladnjaka (minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom kontroliše proces trajanje hlađenja pri  $T = 110[K]$ )



Sl.10.14. Uporedni dijagrami procesa trajanje hlađenja za sva 4 tipa minihladnjaka (minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom kontroliše proces trajanje hlađenja pri  $T = 120[K]$ )

Takođe, dijagrami rada različitih tipova reguliranih minihladnjaka prikazani na Sl.10.3-Sl.10.5. predstavljaju detalje i dijagrama trajanja procesa trajanje hlađenja različitih tipova minihladnjaka koji su prikazani na Sl.10.6.-Sl.10.14.

Na osnovu prikazanih dijagrama zaključuje se da samo minihladnjak sa diskretno upravljanim ciklusom može izvršiti regulaciju na bilo kojoj zahtevanoj temperaturi (temperaturska razlika između radnog fluida i detektora neznatna), a koja se razlikuje od pritiska isparavanja, što je i cilj ove doktorske disertacije.

## 11.0. ANALIZA RAZLIČITIH TIPOVA ISPARAVANJA I DISKUSIJA NAČINA REGULACIJE

### 11.1. Osnovne termodinamičke jednačine za regulaciju temperature u zoni detektora

Prilikom regulacije temperature u zoni detektora mogu se javiti dva tipa regulacije masenim protokom ili masom. Koji će slučaj u realnosti biti zavisi od Rejnoldsovog broja kriogenog fluida u zoni detektora. Može se smatrati da je za Rejnoldsove brojeve  $Re \leq 5$ , gde nema nikakvog turbulentnog vrtloga, prirodna konvekcija (regulacija masom). Za  $Re > 5$  prinudna konvekcija se može posmatrati kao regulacija masenim protokom.

Jednačina za razmenu toplote pri regulaciji sa masenim protokom, data je sledećim izrazom:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{m_D \cdot c_D \cdot \Delta t_D}{\Delta t}, \quad (11.1)$$

gde je:

$$\dot{Q}_{GUBICI} = 0. \quad (11.2)$$

$\Delta t$  [s] - vreme razmene toplote, tj. vreme otvorenosti mlaznice sa stanovišta impulsne regulacije.

$Q$  [KJ] - toplotna masa koja učestvuje u razmeni toplote prilikom impulsne regulacije.

Takođe je:

$$\dot{Q} = \alpha_1 \cdot A_1 \cdot \Delta t_m \quad (11.3)$$

gde je:

$\alpha_1 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$  - koeficijent prelaza toplote,

$A_1 \left[ m^2 \right]$  - površina poprečnog preseka za razmenu, promenljiva, a mora biti veća od najnepovoljnijeg slučaja, i uvek je različita tj. manja ili jednaka max mogućoj.

$\Delta t_m \left[ ^\circ K \right]$  - logaritamska razlika temperatura između gasa i elementa koji učestvuje u razmeni toplote.

Ukoliko postoje gubici pri regulaciji, tada gornje jednačine imaju oblik:

$$(\dot{Q} - \dot{Q}_{GUBICI}) = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{m_D \cdot c_D \cdot \Delta t_D}{\Delta t} \quad (11.4)$$

i

$$\dot{Q} = \alpha_1 \cdot A_1 \cdot \Delta t_m \quad (11.5)$$

Na kraju pri regulaciji masenim protokom napomenuće se da temperatura pada za vreme otvorenosti mlaznice. Takođe sa promenom pritiska prilikom regulacije  $\Delta t$  - vreme isparavanja (razmene toplote) raste.

Regulacija masom je regulacija pri kojoj temperatura može da pada i za vreme otvorenosti mlaznice. To se dešava i u slučaju kada je mlaznica zatvorena, što zavisi od količine tečne faze kriogenog fluida u zoni detektora. Vreme otvorenosti mlaznice  $\Delta t$  raste, a vreme isparavanja

opada. Jednačine sa kojima se može opisati promena termodinamičkih osobina radnog fluida u procesu regulaciju su:

$$\begin{aligned} G_1 \cdot (1 - x_1) \cdot t_1 \cdot \Delta h &= m_{11} \cdot \Delta h + Q_1 \cdot (t_1 + t_2) \\ \alpha_1 \cdot A_1 \cdot \Delta t_m \cdot (t_1 + t_2) &= m_{11} \cdot \Delta h + Q_1 \cdot (t_1 + t_2) \\ m_{11} \cdot \Delta h &= m_D \cdot c_D \cdot \Delta t_D \end{aligned} \quad (11.6)$$

gde je:

$Q_1$  - toplotni gubici,

$m_{11}$  - preostala masa za hlađenje detektora,

$t_1$  - vreme otvorenosti mlaznice,

$t_2$  - dodatno vreme za isparavanje po zatvaranju mlaznice, može biti pozitivno ili negativno. Tu se ima i dva dodatna koeficijenta:

$\psi_1 = 1$  - popravak koeficijenta prolaza toplote i

$\nu_1 = 1$  - popravak broja površina za razmenu toplote.

Ukoliko je  $t_2$  negativno jednačine razmene toplote pri impulsnoj regulaciji masom su:

$$\begin{aligned} G_1 \cdot (1 - x_1) \cdot t_1 \cdot \Delta h &= m_{11} \cdot \Delta h + Q_1 \cdot t_1 \\ \alpha_1 \cdot A_1 \cdot \Delta t_m \cdot t_2 &= m_{11} \cdot \Delta h + Q_1 \cdot t_2 \\ m_{11} \cdot \Delta h &= m_D \cdot c_D \cdot \Delta t_D \end{aligned} \quad (11.7)$$

pri čemu je očigledno da je vreme  $t_2$  ustvari ukupno vreme potrebno za isparavanje preostale mase  $m_{11}$ , a koja je iskorišćena za promenu toplotne mase elementa čija se temperature održava.

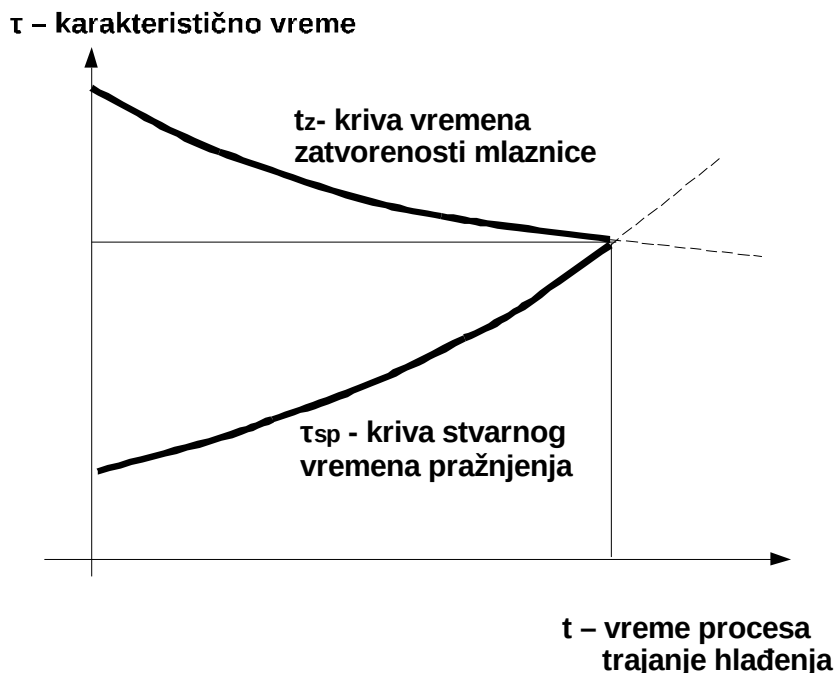
Na osnovu iznesenog jasno je da, širinska modulacija, ne može raditi sa konstantnim parametrima. To znači, da će vreme otvorenosti i zatvorenosti mlaznice u impulsnim režimima tokom rada biti diktirano termodinamičkim parametrima isparavanja na detektoru (regulacija masom).

## 11.2. Analiza karakterističnih vremena sistema i načina impulsne regulacije

Prilikom regulacije masenim protokom za razliku od regulacije masom rashladnog fluida u razmatranje se mora uzeti nestacionarni režim uspostavljanja masenog protoka. Ukoliko je karakteristično vreme,  $\tau = \frac{m}{G} \Rightarrow \tau = f(p)$ , za željenu početnu vrednost mase "m", puno manje od vremena isparavanja upravljanje masenim protokom malo se razlikuje od upravljanja masom. Ukoliko je to vreme (vreme pražnjenja), istog reda veličine kao i vreme isparavanja jednog impulsnog ciklusa tada postoji opasnost da frekventne karakteristike uređaja koji upravlja protokom i samog detektora sa komorom u kojoj je smešten, uđu u frekventne režime. Važno je napomenuti da je prelazni režim uspostavljanja masenog protoka meren između dva preseka u instalaciji, između kojih je referentna zapremina koja određuje vremensku (frekventnu)

karakteristiku posmatranog protoka. Ova zapremina će se smatrati karakterističnom za posmatranje frekventnog procesa hlađenja (impulsne regulacije) detektora.lit.[9].

**Dijagram odnosa vremena prelaznog režima, vremena trajanja zatvorene mlaznice duž celog procesa trajanje hlađenja, a to znači u funkciji promene pritiska (pri jednom impulsu), prikazan je na slici 10.1.**



Sl. 10.1. Karakteristična vremena rada hladnjaka

Granica mogućnosti impulsnog regulisanja je kada se vreme prelaznog režima i referentne zapremine preseče (poklopi) sa vremenom zatvorenosti mlaznice  $t_z$ . (odnosi se na hladnjak, a ne na hlađenje detektora).

$$\tau_{MP} = \frac{m}{G} \quad (11.8)$$

gde je:

$G$  - maseni protok pri posmatranom pritisku,

$$m = \frac{p \cdot V}{R \cdot T_{sr}} \quad (11.9)$$

gde je:

$p$  - pritisak (srednji) u karakterističnoj zapremini hladnjaka,

$V$  - karakteristična zapremina hladnjaka, koja odgovara max vremenu mogućeg pražnjenja  $\tau_{MP}$ , pri minimalnom radnom pritisku,

$R$  - gasna konstanta,

$T_{sr}$  - srednja temperatura u karakterističnoj zapremini hladnjaka.

Vreme zatvorenosti mlaznice  $t_z$  treba biti 5 do 10 puta manje od karakterističnog vremena  $\tau_{MP}$  za stabilan rad hladnjaka. Takođe, ima se:

$\tau_{SP}$  - stvarno vreme pražnjenja karakteristične zapremine, pri impulsnoj regulaciji,

$\tau_{MP}$  - vreme max mogućeg pražnjenja karakteristične zapremine, te slede tri moguća slučaja:

$\tau_{SP} < t_z$ ,  $\tau_{SP} < \tau_{MP}$ ,  $\tau_{MP} < = > t_z$ ; gde je: oznaka  $< = >$  manje, jednako, veće; hladnjak čeka,

$\tau_{SP} = \tau_{MP} = t_z$ , hladnjak impulsno regulira.

$\tau_{SP} > t_z$ ,  $\tau_{SP} > \tau_{MP}$ ,  $\tau_{MP} < = > t_z$ , hladnjak ne radi impulsno.

Prema tome, mini-hladnjak predstavlja simbol po malim karakterističnim zapreminama, a ne po malim konstruktivnim veličinama (dimenzijama) hladnjaka. Njegova karakteristična vremena mogu biti velika samo ako su karakteristični protoci mali.



## 12.0. DOPRINOSI I ZAKLJUČAK

### 12.1. Doprinosi i zaključak

U ovoj doktorskoj disertaciji, naučni doprinosi mogu se sistematizovati i sumirati kroz sledeće opšte i posebne doprinose. Opšti doprinosu su:

1. Razvijeni su originalni matematički modeli kriogenog razmenjivača toplote, kao objekta automatskog upravljanja, čime je omogućena i kvalitativna i kvantitativna analiza njegovih statičkih i dinamičkih karakteristika, kao i mogućnost da se u izvesnoj meri unaprede njegove izvesne konstruktivne karakteristike.

2. Efikasno je primenjena specifična metoda redukcije reda matematičkog modela objekta upravljanja a sve sa ciljem da objekta sa sniženim redom, bude pogodan za primenu postojećih teorijskih rezultata i sintezu i projektovanje budućih regulatora, shodno postavljenim zahtevima.

3. Na bazi strogo postavljenih zahteva sintetizovan je odgovarajući klasični PID regulator i povezan sa objektom upravljanja u sistem u zatvorenom kolu dejstva (sistem regulisanja).

4. Za indentične zahteve rada kriogenog razmenjivača toplote, projektovan je poseban složen regulator sastavljen od klasičnog PID prenosnog organa sa redno pridruženom PWM-jedinicom, čime je obezbeđeno diskretno (impulsno) upravljanje razmatranim procesom, poznatom u literaturi kao širinska amplitudna regulacija.

5. Svi ovi teorijski rezultati, podvrgnuti su standardnim postupcima simulacije, iz čega su proistekli brojni odskočni odzivi kako neregulisanog objektatako i sistema u zatvorenom kolu dejstva u slučajevima klasične, kontinualne regulacije i regulacije sa diskretnim (impulsnim) upravljanjem.

6. Sprovedena su i opsežna eksperimentalna ispitivanja, koja su se za potrebe ovog rada svela na formiranje odgovarajuće eksperimentalne instalacije, koja je obezbedila snimanje prelaznih procesa u sva tri slučaja, a za različite režime rada kriogenog razmenjivača toplote.

Polazeći od specifičnosti rekuperativnih razmenjivača toplote koji predstavljaju posebnu kategoriju termodinamičkih mašina za hlađenje u ovom radu su učinjeni posebni doprinosi navedeni u daljem tekstu.

1. U opštem principu konstrukcije razmenjivača toplote pomoću graničnih površina između fluida koji se u radnom ciklusu hladi, izvršen je doprinos konstrukciji hladnjaka. On se sastojao u prilagođavanju zahtevima detektora iskazanim kroz njegove potrebe čime je obezbeđen doprinos u oblasti integrisanog konstruisanja ovakvih uređaja sa i bez regulacije. Stepem složenosti razmenjivača toplote i njegove prateće smeštajne konstruktivne mogućnosti zahtevale su posebne uslove sa dodatnim podsistemima i komponentama koje su integralno trebale da

obezbede ponašanje i upravljanje hlađenim objektom. U tom smislu, u ovom radu je učinjen poseban doprinos, izborom spiralnog protočnog elementa u kome se vrši odvođenje toplote u cevi a van koga se vrši dovodenje toplote ravnotežno po svakom preseku cevi. Ovo je doprinos konstrukciji koji se ogleda u obezbeđivanju maksimalnih toplotnih flukseva na minimalnoj zapremini. Ovakav uređaj koristi se na raketnim i municijskim samonavođenim podsklopovima u glavi za samonavođenje na veoma malim kalibrima u ograničenim zapreminama po dužini projektila što odgovara navedenim zahtevima.

2. Poseban doprinos iskazan je takođe u realizaciji zahteva za jednokratnim eksploatacionim karakteristikama za navedene primene a koje ograničava zahtevani princip rekuperativnosti i koji je bilo veoma teško ostvariti s obzirom da je dominantna kontaktna površina za uspešnu razmenu toplote veoma velika, pa samim tim je bilo komplikovano obezbediti konfiguraciju materijala i konstrukcije kojima se ona realizuje u malim zapreminama.

3. Značajan doprinos je razmatranje mogućnosti korišćenja različitih kriogenih fluida, kao što su vazduh, azot, argon, za rekuperativnu razmenu i njihove uglavnom izobličene karakteristike strujanja u odnosu na idealne fluide. U okviru toga doprinos je i u proučavanju konvektivno konduktivne razmene unutar zatvorenog sistema razmenjivača prouzrokovan odstupanjima realnih od idealnih fluida što je dalo mogućnost da se svojstva realnih fluida koriste za usmeravanje radnog ciklusa u cilju poboljšanja ukupne efikasnosti. Samim tim su uspešno prevaziđeni sukobljeni zahtevi za gore pomenute velike rashladne površine sa malom zapreminom u mini-hladnjaku. Praćenje Džul-Tomsonovog koeficijenta čije promenljive vrednosti u toku ciklusa hlađenja bitno doprinose njegovoj efikasnosti korišćeno je radi odabira karakteristika realnih gasova čime je ostvaren doprinos u integraciji konstrukcije hladnjaka i termodinamike realnih gasova. Upravo po ovoj karakteristici ovaj se uređaj često naziva Džul Tomsonov mini-hladnjak.

4. Metodološki doprinos je i u determinističkom pristupu analizi kroz međuzavisnosti sinergijskih procesa termodinamike, razmene toplote i mase, mehanike fluida (gasodinamike), kriogene tehnologije, zatim sistema automatskog upravljanja sa aspekta regulisanja, kao i nekih drugih pratećih oblasti. One su u radu bile povezane ili holističkim ili eksperimentalnim aproksimativnim pristupom, što se pokazalo kao uspešno s obzirom na željeno poklapanje eksperimentalnih vrednosti temperature, pritiska i masenih protoka kao i njihovih vremenskih funkcija, u uslovima regulisanog ili neregulisanog hladnjaka. To je podrazumevalo metodologiju analize i sinteze koja je realizovana na fundamentalnom ali i fenomenološkom teorijskom pristupu kao i daljem razvoju opšte prihvaćenih aproksimativnih metoda analitike. Ove metode su bile pripremljene za opšte i posebne numeričke postupke čiji dobijeni rezultati potvrđuju sinergijske rezultate sa eksperimentima na proverenim realno izvedenim mini-hladnjacima. Ovaj doprinos je realizovan kroz matematički model nestacionarnog dinamičkog ponašanja veličina stanja kriogenih fluida. Njegova realizacija izvršena je za razvoj funkcije u okolini procenjenog ekstremnog nominalnog stanja svih spregnutih segmenata hladnjaka. Time je učinjen doprinos skraćivanja postupka simulacije i modeliranja radi procene ponašanja objekta upravljanja.

5. Prethodno navedenom metodologijom, pored posebnog dat je i opšti doprinos metodologiji istraživanja, koja je potvrđena kao teorijska dokazana kao praktično konstruktivna, i ocenjena kao numeričko-simulaciona i eksperimentalna.

6. U ovom radu je realizovan i poseban doprinos istraživanju automatskog upravljanja upravljanja objektom sa aspekta načina tretmana radnog procesa i njegovih fizičkih zahteva. To pitanje je suštinski orijentisalo koncept automatskog upravljanja na celovitu integraciju mini-hladnjaka sa realizovanim parametrima objekta upravljanja a ne na pojedinačno upravljanje i kontrolu konstruisanih elemenata sistema. Ovo je opravdano s obzirom da je navedeni sistem namenjen jednokratnoj upotrebi za koju je karakteristično da se nakon otpočinjanja rada ne vrši prekid funkcionisanja sistema i ponovno uspostavljanje njegove funkcije pa je analiza u ovom radu morala da bude orijentisana ka procesnom pristupu. To znači da je kao poseban doprinos usvojen i konstruktorski zadat zahtev da se izlazna veličina detektora kontroliše, a procesom upravlja na bazi unapred zadatih zahteva ili upravlja jednom od njegovih veličina stanja koristeći podatke o regulisanoj veličini.

7. Ova klasa razmenjivača toplote izaziva veliku pažnju vrlo uzanog kruga naučne javnosti koji uglavnom rade u vojnim i specijalizovanim laboratorijama na istraživanjima sa ograničenim pristupom u objavljivanju podataka. Sam podsistem hladnjak i njegov objekat upravljanja ili kontrole, detector, imaju dva karakteristična režima rada. Performanse ova dva režima se visoko ocenjuju po dostignutom kvalitetu i smatraju vrhunskim rezultatima savremene tehnologije. One se iskazuju kroz karakteristike vremena nestacionarnog uspostavljanja, poznatog kao *cooldown* režim, i kvazi-stacionarnog režima rada (poznatog kao *run-time*, režim trajanja hlađenja), i njihovog relativnog odnosa u toku procesa rada. Oba ova režima takođe su poseban doprinos realizovan konstrukcijom i idejnim rešenjima u ovoj disertaciji i to u oba tipa konstrukcije sa unapred predviđenim resursnim performansama (neregulisanim i regulisanim hladnjacima), na modelima za jednokratnu upotrebu.

8. Poseban doprinos u ovoj doktorskoj disertaciji je i suštinski predstavljena generacijska nadgradnja jednog tipa neregulisanih mini-hladnjaka u novi poboljšani tip delimično regulisanih ili regulisanih mini-hladnjaka iste ili slične konstrukcije. Oba ovakva tipa konstrukcije su u operativnoj primeni na senzorima različitih tipova glava za samonavođenje tako da se može zaključiti da su međusobne dinamičke karakteristike komplementarne pa samim tim se koristi mogućnost da se iste ili slične konstrukcije upotrebljavaju i kao neregulisane i kao regulisane.

9. Poseban doprinos predstavlja vrsta upravljanja procesom pomoću regulacije mehom (membranom) koja je amplitudno procesna analogna regulacija rashladnog sistema. Ovakva regulacija karakteriše se dominantnom kontrolom mase rashlađivača i predstavlja karakteristiku ovog tipa procesne regulacije. U ovom radu izvršeno je tehničko-tehnološki unapređenje i primenjen novi način regulacije a to je frekventna ili (amplitudno – frekventna) procesna regulacija. Njena karakteristika je direktno upravljanje izlazne procesne funkcije rashladnog

sistema masenim protokom i to na osnovu zahtevane regulisane veličine predmeta koji se hladi-detektora.

10. U jedanaestom poglavlju je razmatrano karakteristično vreme sa aspekta rada sistema kao i različiti načini isparavanja kriogenog fluida u zoni detektora u vezi sa navedenim uslovima upravljanja procesom po zahtevu mase ili masenog protoka rashlađivača. U vezi sa tim kao poseban doprinos razmatrana je bitna osobina celog sistema koji karakteriše proces a to je njegovo karakteristično gasodinamičko vreme. Vreme trajanja procesa hlađenja u zoni detektora može biti duže ili kraće od vremena reagovanja regulatora što određuje mogućnost primene odgovarajućeg tipa upravljanja. Takođe proces kontinualnog protoka rashlađivača iz rezervoara i sistema zadate zapremine menja karakteristično gasodinamičko vreme procesa i dovodi u pitanje granicu režima kontinualnog hlađenja sa aspekta mogućnosti regulacije određenog tipa. Ovakav način naučnog pristupa i razmatranja je bio polazna osnova za primenu novog frekventnog (impulsnog) regulatora, što takođe predstavlja poseban doprinos u ovoj doktorskoj disertaciji.

11. Način isparavanja kriogenog fluida u zoni detektora je u dosadašnjim naučnim razmatranjima tretiran kao isparavanje sa prirodnom cirkulacijom što je bilo diktirano načinom konstrukcije hladnjaka kao i njegove analogne regulacije. Zahtevani gasodinamički parametri u zoni detektora tj. potreba za načinom dolaska fluida u zonu isparavanja uslovia je zahtev za upotrebu impulsne regulacije čime je promenjena i sama konstrukcija hladnjaka. To je uslovia i da se promeni pristup analizi procesa hlađenja detektora sa prirodne cirkulacije čija je posledica hlađenje isparavanjem na prinudnu cirkulaciju čija je posledica hlađenje konvekcijom u zoni detektora. Ova analiza predstavlja poseban doprinos u ovoj doktorskoj disertaciji jer je teorijska osnova prethodno navedenih modela procesnog automatskog upravljanja masom i masenim protokom kriogenog rashlađivača.

12. Značajan naučni doprinos u ovoj doktorskoj disertaciji predstavlja prilagođavanje teorijske termodinamike idealnog gasa na teorijsku termodinamiku realnog gasa kroz nekoliko sopstvenih, i originalnih formula za potrebe rešavanja matematičkog modela razmatranog procesa. Takođe, teorijski je izveden i izraz za isticanje gasa (izraz za maseni protok) koji uzima u obzir i trenje, preko eksponenta adijabate, a važi za realni gas. Pored prethodno pomenutih teorijskih doprinosa dat i eksperimentalni naučni doprinos sa aspekta empirijskih formula za izračunavanje masenog protoka realnog gasa pri ekspanziji u jednofaznoj oblasti i eksperimentalne empirijske formule pri ekspanziji realnog gasa iz jednofazne u dvofaznu oblast.

13. Prilikom formiranja matematičkog modela ukazala sa neophodna potreba da se nađe izraz koji će definisati promenu gustine, u zavisnosti od pritiska i stepena suvoće pri vrednostima bliskim jedinici. Iznalaženje i primena tog izraza, takođe predstavlja prilagođavanje teorijske termodinamike za potrebe postavljanja i rešavanja pomenutog modela, i predstavlja poseban naučni doprinos.

14. U ovom radu pokazano je da nova vrsta Džul-Tomsonovog mini-hladnjaka može da zadovolji održavanje temperature detektora, čak i kada se zahtevana temperatura detektora

razlikuje od temperature na izlazu iz zone detektora kojoj odgovara pritisak isparavanja karakterističan za dvofaznu oblast. Ovakav novi način regulacije a to je frekventna ili (amplitudno – frekventna) procesna regulacija (impulsna regulacija) iskorišćen je za razvoj novog tipa izvršnog organa koji koristi direktno upravljanje preko regulatora mini-hladnjaka. Na taj način je dobijen hladnjak koji može da se ponaša u širem spektru parametara regulisane veličine i da zameni do sada razvijene tipove mini-hladnjaka koji su projektovani za strogo zadate uslove temperature na izlazu iz zone detektora, što predstavlja poseban naučni doprinos u razvoju i regulaciji mini-hladnjaka.

## 12.2. Predlozi za dalja istraživanja

Kao mogući pravci daljih istraživanja mogu se indentifikovati nekoliko problema vezanih kako za način regulacije u nestacionarnim radnim režimima tako i termodinamička i gasodinamička svojstva radnog fluida u zoni detektora, geometrijsku optimizaciju kako samog hladnjaka tako i primenjenih elemenata koji su neophodni za rad univerzalne jedinstvene instalacije. Dalja istraživanja treba da se usmere na:

- Ispitivanje na poboljšanju konstruktivnih i termodinamičkih karakteristika savremenih tehnološki usavršenih Dewarovih posuda za potrebe jedinstvene univerzalne instalacije;

- Ispitivanja pri kojima je potrebno utvrditi intervale vremena aproksimiranih veličina stanja kao nominalnih za kvazistacionarne jednačine i to za potrebe ispitivanja stabilnosti sistema u tim vremenskim intervalima, a to se odnosi na ponašanje sistema pri promeni gradijenta pritiska;

- Ispitati različite tipove impulsnih i kontinualnih regulatora radi utvrđivanja odnosa vremena reagovanja i karakterističnih vremena procesa za različite konstrukcije i dimenzije hladnjaka;

- Upotreba impulsne regulacije za procese automatskog upravljanja masom odnosno hlađenje isparavanjem, što je opravdano naročito kod procesa koji ne zavise od konstantnog izvora rashlađivača.

**PRILOG I:****1. Boca:** jednačina kontinuiteta

$$V_C \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^B(t)}{\partial t} = -G_{izl}^B(t), \text{ gde je: } V_C = A_C \cdot l_C - \text{zapremina izlazne cevi boce.}$$

$$V_C \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^B(t)}{\partial t} = -k_{11} \cdot 0.871 \cdot A_{KR}(Y(t)) \sqrt{p_{izl}^B(t) \cdot \rho_{izl}^B(t)} \cdot k_{12}(\kappa_{12}) \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$k_{11} = f(\kappa_{11}, \kappa_{12}, p_{izl}^{VP}(t), \rho_{izl}^{VP}(t), p_{izl}^B(t), \rho_{izl}^B(t))$$

$$k_{12}(\kappa_{12}) = \sqrt{\kappa_{12} \cdot \left(\frac{2}{\kappa_{12} + 1}\right)^{\frac{\kappa_{12} + 1}{\kappa_{12} - 1}}} - \text{koeficijent ; } \kappa_{12} - \text{eksponent adijabate}$$

$$k_{11} = \sqrt{p_{izl,N}^{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \sqrt{\kappa_{11} \cdot \left(\frac{2}{\kappa_{11} + 1}\right)^{\frac{\kappa_{11} + 1}{\kappa_{11} - 1}}} \cdot \frac{1}{k_{12}(\kappa_{12}) \cdot \sqrt{p_{izl,N}^B \cdot \rho_{izl,N}^B}} \quad \kappa_{11} - \text{eksponent adijabate}$$

Površina kritičnog preseka, data je sledećim izrazom:

$$A_{KR}(Y(t)) = \pi \cdot \sin \theta \cdot Y(t) \cdot d - \pi \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos \theta \cdot Y^2(t)$$

$$A_{KR}(Y(t)) = k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)$$

$$k_{13} = \pi \cdot \sin \theta \cdot d \quad k_{14} = \pi \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos \theta$$

$\theta = 15^\circ$  - poluugao ili ugao konusa igle.

$$V_C \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^B(t)}{\partial t} = -k_{11} \cdot 0.871 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \sqrt{p_{izl}^B(t) \cdot \rho_{izl}^B(t)} \cdot k_{12}(\kappa_{12}) \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$V_C \cdot \frac{\rho_{izl}^B(t)}{n_B \cdot p_{izl}^B(t)} \cdot \frac{\partial p_{izl}^B(t)}{\partial t} = -k_{11} \cdot 0.871 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \sqrt{p_{izl}^B(t) \cdot \rho_{izl}^B(t)} \cdot k_{12}(\kappa_{12}) \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$V_C \cdot \frac{\partial p_{izl}^B(t)}{\partial t} = -k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot n_B \cdot \sqrt{p_{izl}^{B3}(t) \cdot \frac{1}{\rho_{izl}^B(t)}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\frac{\partial p_{izl}^B(t)}{\partial t} = -k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \frac{n_B}{V_C} \cdot \sqrt{p_{izl}^{B \frac{3 \cdot n_B - 1}{n_B}}(t) \cdot \frac{1}{\rho_B(t)}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\begin{aligned} \Delta G_{izl}^B(t) &= \left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial Y} \right)_N \cdot \Delta Y(t) + \left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial p_{izl}^B} \right)_N \cdot \Delta p_{izl}^B(t) \\ &+ \left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial p_B} \right)_N \cdot \Delta p_B(t) + \left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial \rho_B} \right)_N \cdot \Delta \rho_B(t) + \left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial \rho_{izl}^{VP}} \right)_N \cdot \Delta \rho_{izl}^{VP}(t) \end{aligned}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^B}{\partial Y}\right)_N = -k_{15} \cdot (k_{13} - 2 \cdot k_{14} \cdot Y_N) \cdot \sqrt{p_{izl,N}^B \frac{3 \cdot n_B - 1}{n_B} \cdot \frac{1}{\rho_{B,N}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^B}{\partial p_{izl}^B}\right)_N = -k_{15} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{B,N} \frac{1}{n_B} \cdot \frac{3 \cdot n_B - 1}{n_B} \cdot p_{izl,N}^B \frac{2 \cdot n_B - 1}{n_B}}{\rho_{B,N} \cdot 2 \cdot \sqrt{p_{izl,N}^B \frac{3 \cdot n_B - 1}{n_B}}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^B}{\partial p_B}\right)_N = -k_{15} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{izl,N}^B \frac{3 \cdot n_B - 1}{n_B} \cdot \frac{1}{n_B} \cdot p_{B,N} \frac{1 - n_B}{n_B}}{\rho_{B,N} \cdot \sqrt{p_{B,N} \frac{1}{n_B}}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^B}{\partial \rho_B}\right)_N = -k_{15} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{p_{izl,N}^B \frac{3 \cdot n_B - 1}{n_B} \cdot p_{B,N} \frac{1}{n_B} \cdot \left(-\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\rho_{B,N}^3}}\right) \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^B}{\partial \rho_{izl}^{VP}}\right)_N = -k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \frac{n_B}{V_C} \cdot \sqrt{p_{izl}^B \frac{3 \cdot n_B - 1}{n_B} (t) \cdot \frac{p_B^{n_B}(t)}{\rho_B(t)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}}$$

$$\Delta G_{izl}^B(t) = G_{11} \cdot \Delta Y(t) + G_{12} \cdot \Delta p_{izl}^B(t) + G_{13} \cdot \Delta p_B(t) + G_{14} \cdot \Delta \rho_B(t)$$

$$\frac{\partial \overline{\Delta p_{izl}^B}(t)}{\partial t} = G_{11} \cdot \frac{Y_N}{p_{izl,N}^B} \cdot \overline{\Delta Y}(t) + G_{12} \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) + G_{13} \cdot \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \cdot \overline{\Delta p_B}(t) + G_{14} \cdot \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta p_{izl}^B}(t)}{\partial t} &= -51.05473 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 59.49359 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) \\ &\quad - 17.1637 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) + 25.55368 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 25.55368 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) \end{aligned}$$

### 1.1 Boca: jednačina količine kretanja

$$V_C \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^B(t) \cdot w_{izl}^B(t)}{\partial t} = \left( \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{p_B(t)}{\rho_B(t)} - \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{p_{izl}^B(t)}{\rho_{izl}^B(t)} - (\alpha + \xi_2) \cdot \frac{w_{izl}^{B2}(t)}{2} \right) \cdot A_C \cdot \rho_{izl}^B(t)$$

$$l_C \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^B(t) \cdot w_{izl}^B(t)}{\partial t} = \left( \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{p_B(t)}{\rho_B(t)} - \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{p_{izl}^B(t)}{\rho_{izl}^B(t)} - (\alpha + \xi_2) \cdot \frac{w_{izl}^{B2}(t)}{2} \right) \cdot \rho_{izl}^B(t)$$

Prilikom proračuna iskorišćena je analitički dobijena vrednost za  $\xi_2 = 0.667$ .

$$l_C \cdot w_{izl}^B(t) \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^B(t)}{\partial t} + l_C \cdot \rho_{izl}^B(t) \cdot \frac{\partial w_{izl}^B(t)}{\partial t} = \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{p_B(t)}{\rho_B(t)} \cdot \rho_{izl}^B(t) - \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{\rho_{izl}^B(t)}{\rho_B(t)} \cdot p_B^{\frac{1}{n_B}}(t) \cdot p_{izl}^{\frac{n_B-1}{n_B}}(t) - (\alpha + \xi_2) \cdot \frac{w_{izl}^{B2}(t)}{2} \cdot \rho_{izl}^B(t)$$

$$l_C \cdot w_{izl}^B(t) \cdot \left( -k_{11} \cdot \frac{0.871}{V_C} \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \sqrt{p_{izl}^B(t) \cdot \rho_{izl}^B(t)} \cdot k_{12}(\kappa_{12}) \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}} \right) + l_C \cdot \rho_{izl}^B(t) \cdot \frac{\partial w_{izl}^B(t)}{\partial t} = \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{p_B(t)}{\rho_B(t)} \cdot \rho_{izl}^B(t) - \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{\rho_{izl}^B(t)}{\rho_B(t)} \cdot p_B^{\frac{1}{n_B}}(t) \cdot p_{izl}^{\frac{n_B-1}{n_B}}(t) - (\alpha + \xi_2) \cdot \frac{w_{izl}^{B2}(t)}{2} \cdot \rho_{izl}^B(t)$$

$$\frac{\partial w_{izl}^B(t)}{\partial t} = \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{p_B(t)}{l_C \cdot \rho_B(t)} - \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{p_B^{\frac{1}{n_B}}(t)}{\rho_B(t) \cdot l_C} \cdot p_{izl}^{\frac{n_B-1}{n_B}}(t) - (\alpha + \xi_2) \cdot \frac{w_{izl}^{B2}(t)}{2 \cdot l_C}$$

$$+ w_{izl}^B(t) \cdot k_{11} \cdot k_{12} \cdot \frac{0.871}{V_C} \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \sqrt{\frac{1}{\rho_B(t)} \cdot p_{izl}^{\frac{n_B-1}{n_B}}(t)} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial p_B} \right)_N = \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{1}{l_C \cdot \rho_{B,N}}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial \rho_B} \right)_N = \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{p_{B,N}}{l_C} \cdot \left( -\frac{1}{\rho_{B,N}^2} \right)$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial p_B} \right)_N = \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{p_{izl,N}^{\frac{n_B-1}{n_B}}}{l_C \cdot \rho_{B,N}} \cdot \frac{1}{n_B} \cdot p_{B,N}^{\frac{1-n_B}{n_B}}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial \rho_B} \right)_N = \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}{l_C} \cdot p_{izl,N}^{\frac{n_B-1}{n_B}} \cdot \left( -\frac{1}{\rho_{B,N}^2} \right)$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial p_{izl}^B} \right)_N = \frac{n_B}{n_B - 1} \cdot \frac{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}{\rho_{B,N} \cdot l_C} \cdot \frac{n_B - 1}{n_B} \cdot p_{izl,N}^{\frac{1}{n_B}}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial w_{izl}^B} \right)_N = (\alpha + \xi_2) \cdot \frac{2 \cdot w_{izl,N}^B}{2 \cdot l_C}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial w_{izl}^B} \right)_N = k_{11} \cdot k_{12} \cdot \frac{0.871}{V_C} \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho_{B,N}} \cdot p_{izl,N}^{\frac{n_B-1}{n_B}}}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^B}{\partial Y} \right)_N = w_{izl,N}^B \cdot k_{11} \cdot k_{12} \cdot \frac{0.871}{V_C} \cdot (k_{13} - 2 \cdot k_{14} \cdot Y_N) \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho_{B,N}} \cdot p_{izl,N}^{\frac{n_B-1}{n_B}}}$$



$$\left(\frac{\partial G_{izl}^B}{\partial p_{izl}^B}\right)_N = w_{izl,N}^B \cdot k_{11} \cdot k_{12} \cdot \frac{0.871}{V_C} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}{\rho_{B,N}} \cdot \frac{n_B - 1}{n_B} \cdot p_{izl,N}^B \cdot \frac{1}{n_B}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{p_{izl,N}^B \cdot \frac{n_B - 1}{n_B}}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^B}{\partial p_{izl}^B}\right)_N = w_{izl,N}^B \cdot k_{11} \cdot k_{12} \cdot \frac{0.871}{V_C} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}{\rho_{B,N}} \cdot \frac{n_B - 1}{n_B} \cdot p_{izl,N}^B \cdot \frac{1}{n_B}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{p_{izl,N}^B \cdot \frac{n_B - 1}{n_B}}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^B}{\partial \rho_B}\right)_N = w_{izl,N}^B \cdot k_{11} \cdot k_{12} \cdot \frac{0.871}{V_C} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}} \cdot p_{izl,N}^B \cdot \frac{n_B - 1}{n_B}} \cdot \left(-\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\rho_{B,N}^3}}\right)$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^B}{\partial p_B}\right)_N = w_{izl,N}^B \cdot k_{11} \cdot k_{12} \cdot \frac{0.871}{V_C} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{izl,N}^{\frac{n_B - 1}{n_B}}}{\rho_{B,N}} \cdot \frac{1}{n_B} \cdot p_{B,N}^{\frac{1 - n_B}{n_B}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^B}{\partial \rho_{izl}^{VP}}\right)_N = w_{izl,N}^B \cdot k_{11} \cdot k_{12} \cdot \frac{0.871}{V_C} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}} \cdot p_{izl,N}^{\frac{n_B - 1}{n_B}}}{\rho_{B,N}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta w_{izl}^B}(t)}{\partial t} &= 3.16538 \cdot 10^8 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) - 17.1673 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 3.16537 \cdot 10^8 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) \\ &+ 34.29924 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 57.1802 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^B}(t) + 17.1673 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) \end{aligned}$$

## PRILOG II:

### 2.1 Visoko – pritisna strana: jednačina kontinuiteta

$$V_{VP} \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{VP}(t)}{\partial t} = G_{uz}^{VP}(t) - G_{izl}^{VP}(t)$$

$$V_{VP} \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{VP}(t)}{\partial t} = k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \sqrt{p_{izl}^{B \frac{n_B+1}{n_B}}(t) \cdot \frac{\rho_B(t)}{p_B^{\frac{1}{n_B}}(t)} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}} - A_{VP} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot w_{2izl}^{VP}(t) \cdot 3.138$$

$$k_{16} = \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP}}$$

$$\frac{\partial \rho_{izl}^{VP}(t)}{\partial t} = k_{16} \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{p_{izl}^{B \frac{n_B+1}{n_B}}(t) \cdot \frac{\rho_B(t)}{p_B^{\frac{1}{n_B}}(t)} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}} - 3.138 \cdot \frac{\rho_{izl}^{VP}(t) \cdot w_{2izl}^{VP}(t)}{l_{VP}}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial Y} \right)_N = k_{16} \cdot (k_{13} - 2 \cdot k_{14} \cdot Y_N) \cdot \sqrt{p_{izl,N}^{B \frac{n_B+1}{n_B}} \cdot \frac{\rho_{B,N}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_{izl}^B} \right)_N = k_{16} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \frac{\rho_{B,N} \cdot \frac{n_B+1}{n_B} \cdot p_{izl,N}^{\frac{1}{n_B}}}{\sqrt{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}} \cdot 2 \cdot \sqrt{p_{izl,N}^{B \frac{n_B+1}{n_B}}}}}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_B} \right)_N = k_{16} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{p_{izl,N}^{B \frac{n_B+1}{n_B}} \cdot \rho_{B,N}} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot n_B} \cdot \frac{p_{B,N}^{\frac{1-n_B}{n_B}}}{\sqrt{\left( p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}} \right)^3}} \right)$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \rho_B} \right)_N = k_{16} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{izl,N}^{B \frac{n_B+1}{n_B}}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\rho_{B,N}}}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \rho_{izl}^{VP}} \right)_N = k_{16} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{p_{izl,N}^{B \frac{n_B+1}{n_B}} \cdot \frac{\rho_{B,N}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \rho_{izl}^{VP}} \right)_N = 3.138 \cdot \frac{w_{2izl,N}^{VP}}{l_{VP}}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial w_{2izl}^{VP}} \right)_N = 3.138 \cdot \frac{\rho_{izl,N}^{VP}}{l_{VP}}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t)}{\partial t} &= 0.08651 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 0.07239 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) - 0.02909 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) \\ &\quad + 0.0433 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 0.04341 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 0.08671 \cdot \overline{\Delta w_{2izl}^{VP}}(t) \end{aligned}$$

## 2.2 Visoko – pritiska strana: jednačina količine kretanja

$$\begin{aligned} l_{VP2} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \frac{\partial w_{2izl}^{VP}(t)}{\partial t} + l_{VP2} \cdot w_{2izl}^{VP}(t) \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{VP}(t)}{\partial t} &= p_{izl}^B(t) - \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot z_1 \cdot R \cdot T_{izl}^{VP}(t) \\ &\quad + \beta \cdot \rho_B(t) \cdot \left( \frac{p_{izl}^B(t)}{p_B(t)} \right)^{\frac{1}{n_B}} \cdot \frac{A_C^2}{A_{VP}^2 \cdot 3.138^2} \cdot w_{izl}^{B2}(t) - \beta \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot w_{2izl}^{VP2}(t) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial w_{2izl}^{VP}(t)}{\partial t} = \frac{1}{l_{VP2} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t)} \cdot \left( \begin{aligned} &-l_{VP2} \cdot w_{2izl}^{VP}(t) \cdot \frac{k_{16}}{3.138} \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{\frac{p_{izl}^{B \frac{n_B+1}{n_B}}(t) \cdot \frac{\rho_B(t)}{p_B^{\frac{1}{n_B}}(t)} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}}}{}} \\ &+ l_{VP2} \cdot \frac{\rho_{izl}^{VP}(t) \cdot w_{2izl}^{VP2}(t)}{l_{VP}} + p_{izl}^B(t) - \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot z_1 \cdot R \cdot T_{izl}^{VP}(t) \\ &+ \beta \cdot \rho_B(t) \cdot \left( \frac{p_{izl}^B(t)}{p_B(t)} \right)^{\frac{1}{n_B}} \cdot \left( \frac{A_C}{A_{VP} \cdot 3.138} \right)^2 \cdot w_{izl}^{B2}(t) - \beta \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot w_{2izl}^{VP2}(t) \end{aligned} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_{2izl}^{VP}(t)}{\partial t} &= -\frac{w_{2izl}^{VP}(t)}{\rho_{izl}^{VP}(t)} \cdot \frac{k_{16}}{3.138} \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{\frac{p_{izl}^{B \frac{n_B+1}{n_B}}(t) \cdot \frac{\rho_B(t)}{p_B^{\frac{1}{n_B}}(t)} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}}}{}} + \frac{w_{2izl}^{VP2}(t)}{l_{VP}} \\ &+ \frac{p_{izl}^B(t)}{l_{VP2} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t)} - \frac{z_1 \cdot R \cdot T_{izl}^{VP}(t)}{l_{VP2}} + \frac{\beta \cdot \rho_B(t)}{l_{VP2} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t)} \cdot \left( \frac{p_{izl}^B(t)}{p_B(t)} \right)^{\frac{1}{n_B}} \cdot \left( \frac{A_C}{A_{VP} \cdot 3.138} \right)^2 \cdot w_{izl}^{B2}(t) - \frac{\beta \cdot w_{2izl}^{VP2}(t)}{l_{VP2}} \end{aligned}$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial w_{2izl}^{VP}} \right)_N = \frac{1}{\rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \frac{k_{16}}{3.138} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{izl,N}^{B \frac{n_B+1}{n_B}} \cdot \frac{\rho_{B,N}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}}{}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \rho_{izl}^{VP}}\right)_N = -\frac{w_{2izl,N}^{VP}}{2 \cdot \sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}} \cdot \frac{k_{16}}{3.138} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{izl,N}^B \cdot \frac{n_B+1}{n_B} \cdot \rho_{B,N}}{p_{B,N} \cdot \frac{1}{n_B}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial Y}\right)_N = \frac{w_{2izl,N}^{VP}}{\rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \frac{k_{16}}{3.138} \cdot (k_{13} - 2 \cdot k_{14} \cdot Y_N) \cdot \sqrt{\frac{p_{izl,N}^B \cdot \frac{n_B+1}{n_B} \cdot \rho_{B,N}}{p_{B,N} \cdot \frac{1}{n_B}}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_{izl}^B}\right)_N = \frac{w_{2izl,N}^{VP}}{\rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \frac{k_{16}}{3.138} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{\rho_{B,N}}{p_{B,N} \cdot \frac{1}{n_B}}} \cdot \frac{n_B+1}{2 \cdot \sqrt{p_{izl,N}^B \cdot \frac{n_B+1}{n_B}}} \cdot p_{izl,N}^B \cdot \frac{1}{n_B}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_B}\right)_N = \frac{w_{2izl,N}^{VP}}{\rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \frac{k_{16}}{3.138} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{izl,N}^B \cdot \frac{n_B+1}{n_B} \cdot \rho_{B,N}}{p_{B,N} \cdot \frac{1}{n_B}}} \cdot \left( -\frac{1 \cdot p_{B,N} \cdot \frac{1-n_B}{n_B}}{2 \cdot n_B \cdot \sqrt{\left(p_{B,N} \cdot \frac{1}{n_B}\right)^3}} \right)$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \rho_B}\right)_N = \frac{w_{2izl,N}^{VP}}{\rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \frac{k_{16}}{3.138} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{izl,N}^B \cdot \frac{n_B+1}{n_B} \cdot \rho_{B,N}}{p_{B,N} \cdot \frac{1}{n_B}}} \cdot \frac{1}{p_{B,N} \cdot \frac{1}{n_B}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\rho_{B,N}}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial w_{2izl}^{VP}}\right)_N = \frac{2 \cdot w_{2izl,N}^{VP}}{l_{VP}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_{izl}^B}\right)_N = \frac{1}{l_{VP2} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \rho_{izl}^{VP}}\right)_N = \frac{p_{izl,N}^B}{l_{VP2}} \cdot \left( -\frac{1}{\rho_{izl,N}^{VP2}} \right)$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial T_{izl}^{VP}}\right)_N = \frac{z_1 \cdot R}{l_{VP2}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \rho_B}\right)_N = \frac{\beta}{l_{VP2} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \left(\frac{p_{izl,N}^B}{p_{B,N}}\right)^{\frac{1}{n_B}} \cdot \left(\frac{A_C}{A_{VP1}}\right)^2 \cdot w_{izl,N}^B \cdot A_{VP1} = A_{VP} \cdot 3.138$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \rho_{izl}^{VP}}\right)_N = \frac{\beta \cdot \rho_{B,N}}{l_{VP2}} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_{izl,N}^{VP2}}\right) \cdot \left(\frac{p_{izl,N}^B}{p_{B,N}}\right)^{\frac{1}{n_B}} \cdot \left(\frac{A_C}{A_{VP1}}\right)^2 \cdot w_{izl,N}^B$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_{izl}^B}\right)_N = \frac{\beta \cdot \rho_{B,N}}{l_{VP2} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \left(\frac{A_C}{A_{VP1}}\right)^2 \cdot w_{izl,N}^B \cdot \frac{1}{n_B} \cdot \left(\frac{p_{izl,N}^B}{p_{B,N}}\right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot \frac{1}{p_{B,N}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_B}\right)_N = \frac{\beta \cdot \rho_{B,N}}{l_{VP2} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \left(\frac{A_C}{A_{VP1}}\right)^2 \cdot w_{izl,N}^B \cdot \frac{1}{n_B} \cdot \left(\frac{p_{izl,N}^B}{p_{B,N}}\right)^{1-n_B} \cdot \left(-\frac{p_{izl,N}^B}{p_{B,N}^2}\right)$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \omega_{izl}^B}\right)_N = \frac{\beta \cdot \rho_{B,N}}{l_{VP2} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \left(\frac{A_C}{A_{VP1}}\right)^2 \cdot \left(\frac{p_{izl,N}^B}{p_{B,N}}\right)^{\frac{1}{n_B}} \cdot 2 \cdot w_{izl,N}^B$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial w_{2izl}^{VP}}\right)_N = \frac{\beta}{l_{VP2}} \cdot 2 \cdot w_{2izl,N}^{VP}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta w_{2izl}^{VP}}{\partial t} &= -0.19204 \cdot \overline{\Delta w_{2izl}^{VP}}(t) - 0.02757 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 1.26426 \cdot 10^6 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) - 0.13082 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) \\ &+ 0.19472 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 1.26426 \cdot 10^6 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.41704 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^B}(t) - 4.59 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 8.33724 \cdot 10^5 \cdot \overline{\Delta x}(t) \end{aligned}$$

### 2.3 Visoko – pritisna strana: jednačina održanja energije

$$V_{VP} \cdot h_{izl}^{VP}(t) \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{VP}(t)}{\partial t} + V_{VP} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \frac{\partial h_{izl}^{VP}(t)}{\partial t} = G_{ul}^{VP}(t) \cdot h_{ul}^{VP}(t) - G_{izl}^{VP}(t) \cdot h_{izl}^{VP}(t) - Q_{ODV}^{VP}(t)$$

$$h_{izl}^{VP}(t) = h_{00}^{NP} + c_{p3} \theta_0^{NP}(t) - r \cdot (1 - x(t)) \quad h_{ul}^{VP}(t) = h_{0-350bar}^{VP} + c_{p1} \cdot (\theta_{izl}^B(t) - \theta_0)$$

$$T_{izl}^B(t) = \left(\frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)}\right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B}$$

$$h_{ul}^{VP}(t) = h_{0-350bar}^{VP} + c_{p1} \cdot \left( \left(\frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)}\right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - 273K \right) \quad k_{21} = k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871$$

$$Q_{ODV}^{VP}(t) = k_{113} \cdot \rho_{izl}^{NPm}(t) \cdot w_{izl}^{NPm}(t) \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \left(\frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)}\right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t) \right) - (\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t)) \right)$$

$$k_{113} = \frac{k_{111}}{1.26134} A_{izl}^{NPm} \cdot A_{raz} \quad k_{112} = \ln \left( \frac{\left(\frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)}\right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t)}{\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t)} \right)$$

$$V_{VP} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \frac{\partial h_{izl}^{VP}(t)}{\partial t} = -h_{izl}^{VP}(t) \cdot (G_{uz}^{VP}(t) - G_{izl}^{VP}(t)) + G_{ul}^{VP}(t) \cdot h_{ul}^{VP}(t) - G_{izl}^{VP}(t) \cdot h_{izl}^{VP}(t) - Q_{ODV}^{VP}(t)$$

$$V_{VP} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \frac{\partial h_{izl}^{VP}(t)}{\partial t} = G_{ul}^{VP}(t) \cdot (h_{ul}^{VP}(t) - h_{izl}^{VP}(t)) - Q_{ODV}^{VP}(t)$$

$$h_0^{NP}(t) = h_{00}^{NP} + c_{p3} \theta_0^{NP}(t)$$

$$V_{VP} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \left( \frac{\partial h_0^{NP}(t)}{\partial t} + r \cdot \frac{\partial x(t)}{\partial t} \right) = k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{p_{izl}^{B \frac{n_B+1}{n_B}}(t) \cdot \frac{\rho_B(t)}{p_B^{\frac{1}{n_B}}(t)}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\cdot \left( h_{00}^{VP} + c_{p1} \cdot \left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - 273K \right) - h_{00}^{NP} - c_{p3} \theta_0^{NP}(t) + r \cdot (1-x(t)) \right)$$

$$- k_{113} \cdot \rho_{izl}^{NPm}(t) \cdot w_{izl}^{NPm}(t) \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t) \right) - (\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t)) \right)$$

$$h_{01} = h_{00}^{VP} - h_{00}^{NP} + r$$

$$\left( \frac{\partial h_0^{NP}(t)}{\partial t} + r \cdot \frac{\partial x(t)}{\partial t} \right) = \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t)} \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{p_{izl}^{B \frac{n_B+1}{n_B}}(t) \cdot \frac{\rho_B(t)}{p_B^{\frac{1}{n_B}}(t)}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl}^{VP}(t)}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\cdot \left( c_{p1} \cdot \left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - 273K \right) - c_{p3} \theta_0^{NP}(t) - r \cdot x(t) + h_{01} \right)$$

$$- \frac{k_{113}}{V_{VP} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t)} \cdot \rho_{izl}^{NPm}(t) \cdot w_{izl}^{NPm}(t) \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t) \right) - (\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t)) \right)$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \rho_{izl}^{VP}} \right)_N = \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP}} \cdot \left( -\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}} \right) \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{p_{izl,N}^{B \frac{n_B+1}{n_B}} \cdot \frac{\rho_{B,N}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\cdot \left( c_{p1} \cdot \left( \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}^B} - 273K \right) - c_{p3} \theta_{0,N}^{NP} - r \cdot x_N + h_{01} \right)$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial Y} \right)_N = \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot (Y_N - 2 \cdot k_{14} \cdot Y_N) \cdot \sqrt{p_{izl,N}^{B \frac{n_B+1}{n_B}} \cdot \frac{\rho_{B,N}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\cdot \left( c_{p1} \cdot \left( \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}^B} - 273K \right) - c_{p3} \theta_{0,N}^{NP} - r \cdot x_N + h_{01} \right)$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_{izl}^B}\right)_N = \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{\rho_{B,N}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot \frac{n_B + 1}{2 \cdot n_B} \cdot p_{izl,N}^{\frac{1-n_B}{2 \cdot n_B}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\cdot \left( c_{p1} \cdot \left( \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}^B} - 273K \right) - c_{p3} \theta_{0,N}^{NP} - r \cdot x_N + h_{01} \right) + \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2)$$

$$\cdot \sqrt{\frac{p_{B,N}^{\frac{n_B+1}{n_B}} \cdot \rho_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot c_{p1} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}^B} \cdot \frac{1-n_B}{n_B} \cdot \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-2 \cdot n_B}{n_B}} \cdot \left( -\frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \rho_B}\right)_N = \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{B,N}^{\frac{n_B+1}{n_B}}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\rho_{B,N}}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\cdot \left( c_{p1} \cdot \left( \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}^B} - 273K \right) - c_{p3} \theta_{0,N}^{NP} - r \cdot x_N + h_{01} \right)$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_B}\right)_N = \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{B,N}^{\frac{n_B+1}{n_B}}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot \rho_{B,N} \cdot \left( -\frac{1}{2 \cdot n_B} \right) \cdot p_{B,N}^{-\frac{1+2 \cdot n_B}{2 \cdot n_B}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\cdot \left( c_{p1} \cdot \left( \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}^B} - 273K \right) - c_{p3} \theta_{0,N}^{NP} - r \cdot x_N + h_{01} \right) + \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2)$$

$$\cdot \sqrt{\frac{p_{B,N}^{\frac{n_B+1}{n_B}} \cdot \rho_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot c_{p1} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}^B} \cdot \frac{1-n_B}{n_B} \cdot \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-2 \cdot n_B}{n_B}} \cdot \left( \frac{1}{p_{izl,N}^B} \right)$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial T_B}\right)_N = \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{B,N}^{\frac{n_B+1}{n_B}}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot \frac{\rho_{B,N}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}} \cdot c_{p1} \cdot \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}^B}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial z_B}\right)_N = \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{B,N}^{\frac{n_B+1}{n_B}}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot \frac{\rho_{B,N}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}} \cdot c_{p1} \cdot \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{1}{z_{izl}^B}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \theta_0^{NP}}\right)_N = \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{B,N}^{\frac{n_B+1}{n_B}}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot \frac{\rho_{B,N}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}} \cdot c_{p3} \cdot (-1)$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial x}\right)_N = \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot 0.871}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{\frac{p_{B,N}^{\frac{n_B+1}{n_B}}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}}} \cdot \frac{\rho_{B,N}}{p_{B,N}^{\frac{1}{n_B}}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}}{\sqrt{\rho_{izl,N}^{VP}}} \cdot (-r)$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \rho_{izl}^{VP}}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{VP}} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_{izl,N}^{VP,2}}\right) \cdot \rho_{izl,N}^{NP,m} \cdot w_{izl,N}^{NP,m} \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}^B} - T_{izl,N}^{NP} \right) - (\theta_{izl,N}^{VP} - \theta_{0,N}^{NP}) \right)$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \rho_{izl}^{NP}}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot m \cdot \rho_{izl,N}^{NP,m-1} \cdot w_{izl,N}^{NP,m} \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}^B} - T_{izl,N}^{NP} \right) - (\theta_{izl,N}^{VP} - \theta_{0,N}^{NP}) \right)$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial w_{izl}^{NP}}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP,m} \cdot m \cdot w_{izl,N}^{NP,m-1} \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}^B} - T_{izl,N}^{NP} \right) - (\theta_{izl,N}^{VP} - \theta_{0,N}^{NP}) \right)$$

$$A = \frac{\left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t) \right) - (\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t))}{\ln \left( \frac{\left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t)}{\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t)} \right)}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_B}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP,m} \cdot w_{izl,N}^{NP,m} \cdot A_0 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial p_B}\right)_N = A_0 \quad A_0 = -2.464 \cdot 10^{-5} \frac{m \cdot K \cdot s^2}{kg}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_{izl}^B}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP,m} \cdot w_{izl,N}^{NP,m} \cdot A_1 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial p_{izl}^B}\right)_N = A_1 \quad A_1 = -2.464 \cdot 10^{-5} \frac{m \cdot K \cdot s^2}{kg}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial T_B}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP,m} \cdot w_{izl,N}^{NP,m} \cdot A_2 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial \theta_B}\right)_N = A_2 \quad A_2 = 8.87605$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial z_B}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP,m} \cdot w_{izl,N}^{NP,m} \cdot A_3 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial z_B}\right)_N = A_3 \quad A_3 = 2.283 \cdot 10^3 K$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial T_{izl}^{NP}}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP,m} \cdot w_{izl,N}^{NP,m} \cdot A_4 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial \theta_{izl}^{NP}}\right)_N = A_4 \quad A_4 = -8.87605$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \theta_{izl}^{VP}}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP,m} \cdot w_{izl,N}^{NP,m} \cdot A_5 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial \theta_{izl}^{VP}}\right)_N = A_5 \quad A_5 = 0.14516$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \theta_0^{NP}}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{VP} \cdot \rho_{izl,N}^{VP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP,m} \cdot w_{izl,N}^{NP,m} \cdot A_6 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial \theta_0^{NP}}\right)_N = A_6 \quad A_6 = -0.14516$$

$$\Delta h_0^{NP}(t) = c_{p3} \cdot \Delta \theta_0^{NP}(t) \quad c_{p3} \cdot \Delta \theta_0^{NP}(t) = c_{p3} \cdot \frac{v'' - v'}{s'' - s'} \cdot \Delta p_0^{NP}(t)$$



$$c_{p3} \cdot \Delta\theta_0^{NP}(t) = 9.00161[kJ/kg] \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \quad \frac{c_{p3}}{r \cdot x_N} \cdot \Delta\theta_0^{NP}(t) = 0.05506 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)$$

$$\begin{aligned} 0.05506 \cdot \frac{\partial \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\Delta x}(t)}{\partial t} &= -0.05742 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.11472 \cdot \overline{\Delta Y}(t) \\ +0.17678 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) + 0.05742 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 0.11936 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) + 0.01913 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) \\ +0.24616 \cdot \overline{\Delta z_B}(t) - 4.768 \cdot 10^{-3} \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.0866 \cdot \overline{\Delta x}(t) + 0.11504 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) \\ -0.09204 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) - 0.09204 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) + 7.4214 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) - 7.4214 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) \\ -1.75681 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 22.6097 \cdot \overline{\Delta z_B}(t) + 1.73695 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) - 7.162 \cdot 10^{-3} \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\ -0.13009 \cdot \overline{\Delta x}(t) + 0.0111 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta x}(t)}{\partial t} &= -0.45334 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 0.4206 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.42 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.00946 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\ -0.01723 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) - 0.01705 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) + 0.0023 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) - 0.00053 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) - 0.35732 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\ +0.0922 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 0.0855 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.00155 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 0.45154 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 0.00351 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) \\ +0.00347 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) - 0.00991 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 0.0746 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) - 0.05742 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.11472 \cdot \overline{\Delta Y}(t) \\ +0.17678 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) + 0.05742 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 0.11936 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) + 0.01913 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) + 0.24616 \cdot \overline{\Delta z_B}(t) \\ -4.768 \cdot 10^{-3} \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.0866 \cdot \overline{\Delta x}(t) + 0.11504 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 0.09204 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) - 0.09204 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) \\ +7.4214 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) - 7.4214 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) - 1.75681 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 22.6097 \cdot \overline{\Delta z_B}(t) + 1.73695 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) \\ -7.162 \cdot 10^{-3} \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.13009 \cdot \overline{\Delta x}(t) + 0.0111 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\ -0.01372 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) = -0.000274 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.005 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\ -0.01358 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) = -0.00034 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.0062 \cdot \overline{\Delta x}(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta x}(t)}{\partial t} &= -0.24642 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 0.27748 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.42011 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.59467 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\ +0.45384 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) - 0.00053 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) - 1.74759 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 0.0746 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) \\ -7.24462 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) + 0.05742 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) + 7.30204 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) - 22.3635 \cdot \overline{\Delta z_B}(t) \\ -0.09204 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) - 0.09204 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) + 1.73695 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) \\ -0.00053 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) = -0.00047 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 0.000527 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \\ -22.3635 \cdot \overline{\Delta z_B}(t) = -22.3635 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) + 22.3635 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) + 22.3635 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \overline{\Delta x}(t)}{\partial t} = & -0.24642 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 0.27748 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.41964 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.59467 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\
& + 0.45437 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 20.6159 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 0.0746 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) \\
& - 7.24462 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) + 22.4209 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 15.0615 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) \\
& - 0.09204 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) - 0.09204 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) + 1.73695 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t)
\end{aligned}$$

### PRILOG III:

#### 3.1. Komora: -jednačina kontinuiteta

U jednačini protoka zanemaren je deo koji odgovara čistoj tečnosti pri ekspanziji, jer je izuzetno mali.

$$V_K \cdot \frac{\partial \rho_{ul}^{NP}(t)}{\partial t} = 1.07 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{\kappa_{13} \cdot p_{izl}^{VP}(t) \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa_{13} + 1}\right)^{\frac{\kappa_{13} + 1}{\kappa_{13} - 1}}} \\ + 1.07 \cdot 0.814 \cdot (1 - x(t)) \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{ul}^L(t) \cdot (p_{ul}^M(t) - p_{OK})} - G_{ul}^{NP}(t) \cdot x_2(t)$$

Zbog malih promena.  $p_{izl}^K(t)$  i  $p_{ul}^{NP}(t)$  može se usvojiti da su:  $p_{izl}^K(t) \approx const$  i  $p_{ul}^{NP}(t) \approx const$ . S obzirom da su razlike između  $p_{izl}^K(t)$  i  $p_{ul}^{NP}(t)$  male može se usvojiti  $p_{izl}^K(t) \approx p_{ul}^{NP}(t)$ . S obzirom da se pritisak u komori i pritisak okoline neznatno razlikuju, zbog malog pada pritiska, može se usvojiti  $p_{izl}^K(t) \approx p_{ul}^{NP}(t) \approx p_{OK}$ .

$$\rho_{ul}^L(t) = \frac{\rho_{ul}^G(t)}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul}^G(t)}$$

$$G_{ul}^{NP}(t) = \rho_{ul}^{NP}(t) \cdot A_{sr}^{NP} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)}$$

$$V_K \cdot \frac{\partial \rho_{ul}^{NP}(t)}{\partial t} = 1.07 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl}^{VP}(t)} \\ + 0.871 \cdot (1 - x(t)) \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul}^G(t)}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul}^G(t)} \cdot (p_{ul}^M(t) - p_{OK})} \\ - \rho_{ul}^{NP}(t) \cdot A_{sr}^{NP} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} \cdot x_2(t)$$

$$\left(\frac{\partial G_{ul}^K}{\partial Y}\right)_N = \frac{1.07 \cdot k_{23}}{V_K} \cdot (k_{13} - 2 \cdot k_{14} \cdot Y_N) \cdot \rho_{izl,N}^{VP} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl,N}^{VP}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{ul}^K}{\partial \rho_{izl,N}^{VP}}\right)_N = \frac{1.07 \cdot k_{23}}{V_K} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl,N}^{VP}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{ul}^K}{\partial \theta_{izl}^{VP}}\right)_N = \frac{1.07 \cdot k_{23}}{V_K} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \rho_{izl,N}^{VP} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{T_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{ul}^K}{\partial x}\right)_N = \frac{0.871}{V_K} \cdot (-1) \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul,N}^G}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G} \cdot (p_{ul,N}^M - p_{OK})}$$

$$\left(\frac{\partial G_{ul}^K}{\partial Y}\right)_N = \frac{0.871}{V_K} \cdot (1-x_N) \cdot (k_{13} - 2 \cdot k_{14} \cdot Y_N) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul,N}^G}{1-k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G} \cdot (p_{ul,N}^M - p_{OK})}$$

$$\left(\frac{\partial G_{ul}^K}{\partial \rho_{ul}^G}\right)_N = \frac{0.871}{V_K} \cdot (1-x_N) \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{2 \cdot (p_{ul,N}^M - p_{OK})} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ul,N}^G}{1-k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G}}} \cdot \frac{(1-k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G)^2}{\rho_{ul,N}^G}$$

$$\left(\frac{\partial G_{ul}^K}{\partial p_{ul}^M}\right)_N = \frac{0.871}{V_K} \cdot (1-x_N) \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul,N}^G}{1-k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{(p_{ul,N}^M - p_{OK})}}$$

$$\left(\frac{\partial G_{ul}^{NP}}{\partial \rho_{ul}^{NP}}\right)_N = \frac{A_{sr}^{NP}}{V_K} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}} \cdot x_{2,N}$$

$$\left(\frac{\partial G_{ul}^{NP}}{\partial \theta_0^{NP}}\right)_N = \rho_{ul,N}^{NP} \frac{A_{sr}^{NP}}{V_K} \cdot k_{116} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}}} \cdot x_{2,N}$$

$$\left(\frac{\partial G_{ul}^{NP}}{\partial x_2}\right)_N = \rho_{ul,N}^{NP} \frac{A_{sr}^{NP}}{V_K} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}}$$

$$\Delta h_{izl}^{VP}(t) = c_{pt} \cdot \Delta \theta_t(t)$$

$$\Delta h_{izl}^{VP}(t) = \Delta i_0^{NP}(t) + r \cdot \Delta x(t)$$

$$\Delta h_0^{NP}(t) = c_{p3} \cdot \Delta \theta_0^{NP}(t)$$

$$\Delta h_{izl}^{VP}(t) = c_{pt} \cdot \frac{v''-v'}{s''-s'} \cdot \Delta p_{ul}^M(t)$$

$$\Delta h_{izl}^{VP}(t) = c_{pt} \cdot \frac{v''-v'}{s''-s'} \cdot \frac{p_N^2}{z \cdot R \cdot \rho_N^2 \cdot k_1} \cdot \Delta \rho_{ul}^G(t)$$

S obzirom da je pri jednofaznom strujanju gasa:  $\overline{\Delta \rho_{izl}^K}(t) = \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t)$  (a pri dvofaznom strujanju može se usvojiti pretpostavka, da za male promene ulazne veličine, važi ta jednakost) ima se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t)}{\partial t} &= 7.12826 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 7.13561 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.12955 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) + 2.35308 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\ &\quad - 2.19267 \cdot \overline{\Delta x}(t) + 0.56274 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 0.29244 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) + 0.28933 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) \\ &\quad - 7.67561 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) - 0.41742 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 7.67561 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \end{aligned}$$

Kako je:  $\overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) = 0.891 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.995 \overline{\Delta x_2}(t)$  te je sređeni oblik jednačine kontinuiteta komore:

$$0.891 \cdot \frac{\partial \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)}{\partial t} - 0.995 \cdot \frac{\partial \overline{\Delta x_2}(t)}{\partial t} = 7.691 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 7.13561 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 7.12684 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\ + 0.16041 \cdot \overline{\Delta x}(t) + 0.29244 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) + 0.28933 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) - 0.03838 \cdot \overline{\Delta x_2}(t)$$

### 3.2. Komora: -jednačina održanja energije

$$V_K \cdot \rho_{izl}^K(t) \cdot \frac{\partial h_{izl}^K(t)}{\partial t} + V_K \cdot h_{izl}^K(t) \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^K(t)}{\partial t} = G_{ul}^K(t) \cdot h_{ul}^K(t) - G_{izl}^K(t) \cdot x_2(t) \cdot h_{izl}^K(t) + Q_{DOV}^{A-1} \\ + \frac{\lambda_{DW}}{\delta_{DW}} \cdot A_{DW} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + \frac{\lambda_{JH}}{\delta_{JH}} \cdot A_{JH} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + I^2 \cdot R_0 + I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha \cdot (\theta_D(t) - \theta_B(t))$$

gde je:

$$h_0^{NP}(t) - r + r \cdot x_2(t) + \Delta h^{A-1}(t) = h_{izl}^K(t)$$

a,

$\Delta h^{A-1}(t)$ -promena entalpije od suženog preseka A do preseka gde je uspostavljen otpor, i u slučaju čistog gasa od preseka A-1, važi izraz  $\Delta h^{A-1}(t) = c_{p3} \cdot \theta_0^{NP}(t) \cdot (e^{z \cdot x} - 1)$ . Ukoliko je u pitanju dvofazna mešavina izraz za promenu entalpije od preseka A-1 je znatno složeniji. Međutim, promena entalpije  $\Delta h^{A-1}(t)$ , ima vrednost koja je znatno manja od vrednosti svih drugih članova u jednačini  $h_0^{NP}(t) - r + r \cdot x_2(t) + \Delta h^{A-1}(t) = h_{izl}^K(t)$ . S obzirom da se sada diferencira poslednji izraz, dobija se promena promene entalpije, male veličine drugog reda  $\partial(\Delta h^{A-1}(t))$ , te se može zanemariti. S obzirom da je:

$$V_K \cdot \frac{\partial \rho_{ul}^{NP}(t)}{\partial t} = G_{ul}^K(t) - G_{ul}^{NP}(t) \cdot x_2(t)$$

može se napisati:

$$V_K \cdot \rho_{izl}^K(t) \cdot \left( \frac{\partial h_0^{NP}(t)}{\partial t} + r \cdot \frac{\partial x_2(t)}{\partial t} + \frac{\partial \Delta h^{A-1}(t)}{\partial t} \right) = G_{ul}^K(t) \cdot h_{ul}^K(t) - G_{ul}^K(t) \cdot h_{izl}^K(t) \\ + G_{izl}^K(t) \cdot x_2(t) \cdot \Delta h^{A-1}(t) + \frac{\lambda_{DW}}{\delta_{DW}} \cdot A_{DW} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) \\ + \frac{\lambda_{JH}}{\delta_{JH}} \cdot A_{JH} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + I^2 \cdot R_0 + I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha \cdot (\theta_D(t) - \theta_B(t))$$

Zanemarivanjem člana  $\frac{\partial \Delta h^{A-1}(t)}{\partial t}$  i usvajanjem da je:  $(G_{izl}^K(t) \cdot x_2(t) - G_{ul}^K(t)) \cdot \Delta h^{A-1}(t) \approx 0$

i  $G_{ul}^{NP}(t) = G_{izl}^K(t)$  može se napisati sledeća jednačina:

$$\begin{aligned}
V_K \cdot \rho_{izl}^K(t) \cdot \left( \frac{\partial h_0^{NP}(t)}{\partial t} + r \cdot \frac{\partial x_2(t)}{\partial t} \right) &= G_{ul}^K(t) \cdot h_{ul}^K(t) - G_{ul}^K(t) \cdot (h_0^{NP}(t) - r + r \cdot x_2(t)) \\
+ \frac{\lambda_{DW}}{\delta_{DW}} \cdot A_{DW} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) &+ \frac{\lambda_{JH}}{\delta_{JH}} \cdot A_{JH} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + I^2 \cdot R_0 + I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha \cdot (\theta_D(t) - \theta_B(t))
\end{aligned}$$

i konačno jednačina održanja energije za komoru data je sledećom jednačinom:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial i_0^{NP}(t)}{\partial t} + r \cdot \frac{\partial x_2(t)}{\partial t} &= \frac{r \cdot (x(t) - x_2(t))}{V_K \cdot \rho_{izl}^K(t)} \cdot \left( 1.07 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl}^{VP}(t)} \right. \\
&+ 0.871 \cdot (1 - x(t)) \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul}^G(t)}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul}^G(t)} \cdot (p_{ul}^M(t) - p_{OK})} \\
&+ \frac{\lambda_{DW} \cdot A_{DW}}{\delta_{DW} \cdot V_K \cdot \rho_{izl}^K(t)} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + \frac{\lambda_{JH} \cdot A_{JH}}{\delta_{JH} \cdot V_K \cdot \rho_{izl}^K(t)} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) \\
&+ \frac{I^2 \cdot R_0}{V_K \cdot \rho_{izl}^K(t)} + \frac{I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha}{V_K \cdot \rho_{izl}^K(t)} \cdot (\theta_D(t) - \theta_B(t))
\end{aligned}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^K} \right)_N = \frac{r \cdot (x_N - x_{2,N})}{V_K} \cdot \left( -\frac{1}{\rho_{izl,N}^K} \right) \cdot 1.07 \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl,N}^{VP} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl,N}^{VP}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial x} \right)_N = \frac{r}{V_K \cdot \rho_{izl,N}^K} \cdot 1.07 \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl,N}^{VP} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl,N}^{VP}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial x_2} \right)_N = \frac{r \cdot (-1)}{V_K \cdot \rho_{izl,N}^K} \cdot 1.07 \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl,N}^{VP} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl,N}^{VP}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial Y} \right)_N = \frac{r \cdot (x_N - x_{2,N})}{V_K \cdot \rho_{izl,N}^K} \cdot 1.07 \cdot (k_{13} - 2 \cdot k_{14} \cdot Y_N) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl,N}^{VP} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl,N}^{VP}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^{VP}} \right)_N = \frac{r \cdot (x_N - x_{2,N})}{V_K \cdot \rho_{izl,N}^K} \cdot 1.07 \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot k_{23} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl,N}^{VP}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial T_{izl}^{VP}} \right)_N = \frac{r \cdot (x_N - x_{2,N})}{V_K \cdot \rho_{izl,N}^K} \cdot 1.07 \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl,N}^{VP} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{T_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^K} \right)_N = \frac{r \cdot (x_N - x_{2,N})}{V_K} \cdot \left( -\frac{1}{\rho_{izl,N}^K} \right) \cdot 0.871 \cdot (1 - x_N) \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul,N}^G}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G} \cdot (p_{ul,N}^M - p_{OK})}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial x} \right)_N = \frac{r \cdot ((1 - x_N) + (x_N - x_{2,N}) \cdot (-1))}{V_K \cdot \rho_{izl,N}^K} \cdot 0.871 \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul,N}^G}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G} \cdot (p_{ul,N}^M - p_{OK})}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial x_2} \right)_N = \frac{r \cdot (-1)}{V_K \cdot \rho_{izl,N}^K} \cdot 0.871 \cdot (1 - x_N) \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul,N}^G}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G} \cdot (p_{ul,N}^M - p_{OK})}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial Y} \right)_N = \frac{r \cdot (x_N - x_{2,N})}{V_K \cdot \rho_{izl,N}^K} \cdot 0.871 \cdot (1 - x_N) \cdot (k_{13} - 2 \cdot k_{14} \cdot Y_N) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul,N}^G}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G} \cdot (p_{ul,N}^M - p_{OK})}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{ul}^G}\right)_N = \frac{r \cdot (x_N - x_{2,N})}{V_K \cdot \rho_{izl,N}^K} \cdot 0.871 \cdot (1 - x_N) \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{2 \cdot (p_{ul,N}^M - p_{OK})} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ul,N}^G}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G}}} \cdot \frac{(1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G)^2}{1}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial p_{ul}^M}\right)_N = \frac{r \cdot (x_N - x_{2,N})}{V_K \cdot \rho_{izl,N}^K} \cdot 0.871 \cdot (1 - x_N) \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul,N}^G}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{(p_{ul,N}^M - p_{OK})}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^K}\right)_N = \frac{\lambda_{DW} \cdot A_{DW}}{\delta_{DW} \cdot V_K} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_{izl,N}^K{}^2}\right) \cdot (\theta_{B,N} - \theta_{D,N})$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_B}\right)_N = \frac{\lambda_{DW} \cdot A_{DW}}{\delta_{DW} \cdot V_K \cdot \rho_{izl,N}^K}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_D}\right)_N = \frac{\lambda_{DW} \cdot A_{DW}}{\delta_{DW} \cdot V_K \cdot \rho_{izl,N}^K}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^K}\right)_N = \frac{\lambda_{JH} \cdot A_{JH}}{\delta_{JH} \cdot V_K} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_{izl,N}^K{}^2}\right) \cdot (\theta_{B,N} - \theta_{D,N})$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_B}\right)_N = \frac{\lambda_{JH} \cdot A_{JH}}{\delta_{JH} \cdot V_K \cdot \rho_{izl,N}^K}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_D}\right)_N = \frac{\lambda_{JH} \cdot A_{JH}}{\delta_{JH} \cdot V_K \cdot \rho_{izl,N}^K}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^K}\right)_N = \frac{I^2 \cdot R_0}{V_K} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_{izl,N}^K{}^2}\right)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^K}\right)_N = \frac{I^2 \cdot R_0}{V_K} \cdot \alpha \cdot \left(-\frac{1}{\rho_{izl,N}^K{}^2}\right) \cdot (\theta_{D,N} - \theta_{B,N})$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_D}\right)_N = \frac{I^2 \cdot R_0}{V_K \cdot \rho_{izl,N}^K} \cdot \alpha$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_B}\right)_N = \frac{I^2 \cdot R_0}{V_K \cdot \rho_{izl,N}^K} \cdot \alpha$$

$$\frac{c_{p3}}{r} \cdot \Delta \theta_0^{NP}(t) = 0.0438 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}(t)}$$

Zamenom gornjih izraza dobija se linearizovani oblik polazne jednačine održanja energije komore:

$$\begin{aligned}
0.0438 \cdot \frac{\partial \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\Delta x_2}(t)}{\partial t} &= 1.45852 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) + 5.67709 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 1.45702 \cdot \overline{\Delta Y}(t) \\
&- 1.45852 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 0.02648 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.48097 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 7.13561 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 0.11514 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) \\
&+ 0.89636 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 0.11502 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 0.05978 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) - 0.05914 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) - 0.56332 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \\
&- 1.21674 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) + 0.14278 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) + 1.07396 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) - 0.22719 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) + 0.02666 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) \\
&+ 0.20053 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) - 0.1241 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) + 0.0034 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) - 0.003006 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) - 0.0004 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t)
\end{aligned}$$

Preuređivanjem poslednje jednačine dobija se prostiji oblik jednačine održanja energije komore:

$$\begin{aligned}
0.0438 \cdot \frac{\partial \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\Delta x_2}(t)}{\partial t} &= 0.00903 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) + 6.09248 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 1.57204 \cdot \overline{\Delta Y}(t) \\
&- 1.45852 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 0.02648 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 7.69893 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \\
&- 0.05978 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) - 0.05914 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) + 0.16904 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) + 1.27148 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t)
\end{aligned}$$

Na kraju treba rešiti sistem jednačina (jednačina kontinuiteta komore i jednačina održanja energije komore). Množenjem jednačine kontinuiteta sa 1.005025 dobija se:

$$\begin{aligned}
0.895 \cdot \frac{\partial \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)}{\partial t} - \frac{\partial \overline{\Delta x_2}(t)}{\partial t} &= 7.72965 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 7.17147 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 7.16265 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\
&+ 0.16122 \cdot \overline{\Delta x}(t) + 0.29371 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) + 0.29078 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) - 0.03857 \cdot \overline{\Delta x_2}(t)
\end{aligned}$$

i sabiranjem sa jednačinom održanja energije dobija se konačni oblik jednačine kontinuiteta:

$$\begin{aligned}
0.9388 \cdot \frac{\partial \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)}{\partial t} &= 7.72965 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 7.17147 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 7.16265 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 0.16122 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\
&+ 0.29371 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) + 0.29078 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) - 0.03857 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 0.00903 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) \\
&+ 6.09248 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 1.57204 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 1.45852 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 0.02648 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\
&- 7.69893 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) - 0.05978 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) - 0.05914 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) + 0.16904 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) + 1.27148 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t)
\end{aligned}$$

Množenjem jednačine kontinuiteta sa -20.34246 dobija se:

$$\begin{aligned}
-0.0438 \cdot \frac{\partial \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)}{\partial t} + 0.0489 \cdot \frac{\partial \overline{\Delta x_2}(t)}{\partial t} &= -0.378 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 0.3508 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.3503 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\
&- 0.00789 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 0.01437 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) - 0.01422 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) + 0.00189 \cdot \overline{\Delta x_2}(t)
\end{aligned}$$

i sabiranjem sa jednačinom održanja energije dobija se konačni oblik jednačine održanja energije:

$$\begin{aligned}
1.0489 \cdot \frac{\partial \overline{\Delta x_2}(t)}{\partial t} &= -0.378 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 0.3508 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.3503 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.00789 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\
&- 0.01437 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) - 0.01422 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) + 0.00189 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 0.00903 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) \\
&+ 6.09248 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 1.57204 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 1.45852 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 0.02648 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\
&- 7.69893 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) - 0.05978 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) - 0.05914 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) + 0.16904 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) + 1.27148 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t)
\end{aligned}$$



Preuređivanjem jednačine kontinuiteta komore dobija se sledeći oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)}{\partial t} = & 8.23354 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 7.63898 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 7.62958 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 0.17173 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\ & + 0.31286 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) + 0.30974 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) - 0.04108 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 0.00962 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) \\ & + 6.48965 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 1.67452 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 1.55360 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 0.02821 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\ & - 8.20082 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) - 0.06368 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) - 0.063 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) + 0.18006 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) + 1.35437 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) \end{aligned}$$

S obzirom da je:

$$0.24918 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) = 0.005 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 0.09045 \cdot \overline{\Delta x}(t)$$

$$0.24674 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) = 0.0062 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 0.11197 \cdot \overline{\Delta x}(t)$$

$$0.00962 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) = 0.00857 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.00957 \cdot \overline{\Delta x_2}(t)$$

dobija se konačni oblik jednačine kontinuiteta komore:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)}{\partial t} = & 6.55902 \cdot \overline{\Delta Y}(t) + 6.08538 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 7.63802 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\ & + 6.86638 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 8.25147 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 0.18006 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) + 1.35437 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) \end{aligned}$$

Preuređivanjem jednačine održanja energije komore dobija se sledeći oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta x_2}(t)}{\partial t} = & -0.36038 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 0.33445 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.33397 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.00752 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\ & - 0.0137 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) - 0.01356 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) + 0.0018 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 0.00861 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) \\ & + 5.80845 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 1.49875 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 1.39052 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) - 0.02525 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\ & - 7.34 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) - 0.057 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) - 0.05638 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) + 0.16116 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) + 1.21220 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) \end{aligned}$$

S obzirom da je:

$$-0.0707 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) = -0.00141 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.0257 \cdot \overline{\Delta x}(t)$$

$$-0.06994 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) = -0.00175 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.3174 \cdot \overline{\Delta x}(t)$$

$$0.00861 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) = 0.00767 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.00857 \cdot \overline{\Delta x_2}(t)$$

dobija se konačni oblik jednačine održanja energije komore:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta x_2}(t)}{\partial t} = & -1.85913 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 1.72497 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t) + 0.31323 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 5.74349 \cdot \overline{\Delta x}(t) \\ & - 7.34677 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) + 0.16116 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) + 1.21220 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) \end{aligned}$$

### 3.2 Komora-detektor:

Polazna jednačina održanja energije za detektor data je sledećim izrazom:

$$V_D \cdot \rho_D \cdot c_D \cdot \frac{\partial \theta_D(t)}{\partial t} = \frac{\lambda_{DW} \cdot A_{DW}}{\delta_{DW}} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + \frac{\lambda_{JH} \cdot A_{JH}}{\delta_{JH}} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) \\ + I^2 \cdot R_0 + I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha \cdot (\theta_D(t) - \theta_B(t)) - (G_{izl}^K(t) \cdot h''(t) - G_{ul}^K(t) \cdot h_{ul}^K(t))$$

gde je:

$h''(t)$  -entalpija na izlazu iz komore prilikom hlađenja detektora ( tečnost ne ulazi u nisko-  
pritisni deo ).

$$V_D \cdot \rho_D \cdot c_D \cdot \frac{\partial \theta_D(t)}{\partial t} = \frac{\lambda_{DW} \cdot A_{DW}}{\delta_{DW}} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + \frac{\lambda_{JH} \cdot A_{JH}}{\delta_{JH}} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) \\ + I^2 \cdot R_0 + I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha \cdot (\theta_D(t) - \theta_B(t)) - (G_{izl}^K(t) \cdot h''(t) - G_{ul}^K(t) \cdot h_{ul}^K(t))$$

Usvojimo,  $V_D \cdot \rho_D \cdot c_D = k_{01}$ , pa je:

$$k_{01} \cdot \frac{\partial \theta_D(t)}{\partial t} = \frac{\lambda_{DW} \cdot A_{DW}}{\delta_{DW}} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + \frac{\lambda_{JH} \cdot A_{JH}}{\delta_{JH}} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + I^2 \cdot R_0 \\ + I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha \cdot (\theta_D(t) - \theta_B(t)) + \left( 1.07 \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl}^{VP}(t)} \right. \\ \left. + 0.871 \cdot (1 - x(t)) \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul}^G(t)}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul}^G(t)} \cdot (p_{ul}^M(t) - p_{OK})} \right) \\ \cdot (h_0^{NP}(t) - r + r \cdot x(t)) - \rho_{ul}^{NP}(t) \cdot A_{sr}^{NP} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} \cdot h''(t)$$

Preuređivanjem poslednje jednačine dobija se:

$$\frac{\partial \theta_D(t)}{\partial t} = \frac{\lambda_{DW} \cdot A_{DW}}{\delta_{DW} \cdot k_{01}} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + \frac{\lambda_{JH} \cdot A_{JH}}{\delta_{JH} \cdot k_{01}} \cdot (\theta_B(t) - \theta_D(t)) + \frac{I^2 \cdot R_0}{k_{01}} \\ + \frac{I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha}{k_{01}} \cdot (\theta_D(t) - \theta_B(t)) + \left( \frac{1.07}{k_{01}} \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl}^{VP}(t) \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl}^{VP}(t)} \right. \\ \left. + \frac{0.871}{k_{01}} \cdot (1 - x(t)) \cdot (k_{13} \cdot Y(t) - k_{14} \cdot Y^2(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul}^G(t)}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul}^G(t)} \cdot (p_{ul}^M(t) - p_{OK})} \right) \\ \cdot (h_{0-1bar} + c_{p3} \cdot \theta_0^{NP}(t) - r + r \cdot x(t)) - \frac{\rho_{ul}^{NP}(t)}{k_{01}} \cdot A_{sr}^{NP} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} \cdot (h_{0-1bar} + c_{p3} \cdot \theta_0^{NP}(t))$$

gde je:

$h_{0-1bar}$  - referentna entalpija pri pritisku  $p = 1 \text{ bar}$  i referentnoj temperaturi  $t = 0 [^{\circ}\text{C}]$ .

$$\left( \frac{\partial G}{\partial \theta_B} \right)_N = \frac{\lambda_{DW} \cdot A_{DW}}{\delta_{DW} \cdot k_{01}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_D}\right)_N = \frac{\lambda_{DW} \cdot A_{DW}}{\delta_{DW} \cdot k_{01}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_B}\right)_N = \frac{\lambda_{JH} \cdot A_{JH}}{\delta_{JH} \cdot k_{01}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_D}\right)_N = \frac{\lambda_{JH} \cdot A_{JH}}{\delta_{JH} \cdot k_{01}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_D}\right)_N = \frac{I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha}{k_{01}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_B}\right)_N = \frac{I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha}{k_{01}}$$

Usvojiće se:

$$k_{101} = h_{0,N}^{NP} - r + r \cdot x_N$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial Y}\right)_N = \frac{1.07}{k_{01}} \cdot (k_{13} - 2 \cdot k_{14} \cdot Y_N) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl,N}^{VP} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl,N}^{VP}} \cdot k_{101}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^{VP}}\right)_N = \frac{1.07}{k_{01}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot k_{23} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl,N}^{VP}} \cdot k_{101}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T_{izl}^{VP}}\right)_N = \frac{1.07}{k_{01}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl,N}^{VP} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R} \cdot k_{101} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{T_{izl,N}^{VP}}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_0^{NP}}\right)_N = \frac{1.07}{k_{01}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl,N}^{VP} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl,N}^{VP}} \cdot c_{p3}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)_N = \frac{1.07}{k_{01}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot k_{23} \cdot \rho_{izl,N}^{VP} \cdot \sqrt{z_1 \cdot R \cdot T_{izl,N}^{VP}} \cdot r$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)_N = \frac{0.871}{k_{01}} \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul,N}^G}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G} \cdot (p_{ul,N}^M - p_{OK})} \cdot ((-1) \cdot (h_0 + c_{p3} \cdot \theta_{0,N}^{NP} - r + r \cdot x_N) + (1 - x_N) \cdot r)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial Y}\right)_N = \frac{0.871}{k_{01}} \cdot (1 - x_N) \cdot (k_{13} - 2 \cdot k_{14} \cdot Y_N) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul,N}^G}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G} \cdot (p_{ul,N}^M - p_{OK})} \cdot (h_0 + c_{p3} \cdot \theta_{0,N}^{NP} - r + r \cdot x_N)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{ul}^G}\right)_N = \frac{0.871}{k_{01}} \cdot (1-x_N) \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{2 \cdot (p_{ul,N}^M - p_{OK})}$$

$$\cdot (h_0 + c_{p3} \cdot \theta_{0,N}^{NP} - r + r \cdot x_N) \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ul,N}^G}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G}}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial p_{ul}^M}\right)_N = \frac{0.871}{k_{01}} \cdot (1-x_N) \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul,N}^G}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G}}$$

$$\cdot (h_0 + c_{p3} \cdot \theta_{0,N}^{NP} - r + r \cdot x_N) \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{(p_{ul,N}^M - p_{OK})}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta_0^{NP}}\right)_N = \frac{0.871}{k_{01}} \cdot (1-x_N) \cdot (k_{13} \cdot Y_N - k_{14} \cdot Y_N^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{ul,N}^G}{1 - k_{15} \cdot \rho_{ul,N}^G}} \cdot (p_{ul,N}^M - p_{OK}) \cdot c_{p3}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{ul}^{NP}}\right)_N = \frac{A_{sr}^{NP}}{k_{01}} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}} \cdot (i_{0-lbar} + c_{p3} \cdot \theta_{0,N}^{NP})$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T_0^{NP}}\right)_N = \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{k_{01}} \cdot A_{sr}^{NP} \cdot k_{116} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}}} \cdot (i_0 + c_{p3} \cdot \theta_{0,N}^{NP}) + c_{p3} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}} \right)$$

Sada se može napisati jednačina održanja energije detektor u relativnim koordinatama:

$$\frac{\partial \overline{\Delta \theta_D}(t)}{\partial t} = -0.02954 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 0.22218 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) - 0.005516 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 0.04149 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t)$$

$$+ 0.0006218 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) + 0.00008267 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 0.26271 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 0.26298 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t)$$

$$- 0.004775 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.08672 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 0.06466 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 1.17449 \cdot \overline{\Delta x}(t)$$

$$- 0.01191 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 0.02074 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 0.01078 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) - 0.01066 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t)$$

$$- 0.005105 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 0.60746 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^{NP}}(t) + 0.10259 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t)$$

$$- 0.01078 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^G}(t) = -0.00022 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.00391 \cdot \overline{\Delta x}(t)$$

$$- 0.01066 \cdot \overline{\Delta p_{ul}^M}(t) = -0.00027 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.00484 \cdot \overline{\Delta x}(t)$$

$$0.60746 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^{NP}}(t) = 0.54125 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.60442 \cdot \overline{\Delta x_2}(t)$$

Konačno dobija se jednačina održanja energije za detektor:

$$\frac{\partial \overline{\Delta \theta_D}(t)}{\partial t} = -0.035 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 0.26305 \cdot \overline{\Delta \theta_D}(t) - 0.28345 \cdot \overline{\Delta Y}(t) - 0.26298 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{VP}}(t)$$

$$+ 0.56881 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 1.28187 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 0.60442 \cdot \overline{\Delta x_2}(t)$$

## PRILOG IV:

### 4.1 Nisko-pritisni deo: - jednačina kontinuiteta

Polazni oblik jednačine kontinuiteta niskopritisnog dela:

$$V_{NP} \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = G_{ul}^{NP}(t) \cdot x_2(t) - G_{izl}^{NP}(t)$$

gde je:

$$G_{izl}^{NP}(t) = A_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t) \cdot w_{izl}^{NP}(t)$$

Napisaće se izraz za ulaznu brzinu u niskopritisni deo – na osnovu diferencijalnog oblika jednačine količine kretanja pretpostavljajući da se razlika ukupnih energija može napisati kao kvadrat kinetičke energije:

$$w_{ul,sr}^{NP}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot n_{NP}}{n_{NP} - 1} \cdot R \cdot T_0^{NP}(t) \cdot (z_0 - z_{ul}^{NP} \cdot e^{\gamma \cdot x})}$$

ili u jednostavnijem obliku:

$$w_{ul,sr}^{NP}(t) = k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)}$$

Ubacivajući ove izraze u polazni izraz ima se sledeće:

$$V_{NP} \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = A_{ul}^{NP} \cdot \rho_{ul}^{NP}(t) \cdot \frac{A_{sr}^{NP}}{A_{ul}^{NP}} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} \cdot x_2(t) - A_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t) \cdot w_{izl}^{NP}(t)$$

ili malim sređivanjem:

$$\frac{\partial \rho_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = \frac{\rho_{ul}^{NP}(t)}{l_{NP}} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} \cdot x_2(t) - \frac{A_{izl}^{NP}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t) \cdot w_{izl}^{NP}(t)$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial \rho_{ul}^{NP}} \right)_N = \frac{k_{116}}{l_{NP}} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}} \cdot x_{2,N}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial T_0^{NP}} \right)_N = \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{l_{NP}} \cdot k_{116} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}}} \cdot x_{2,N}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial x_2} \right)_N = \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{l_{NP}} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^{NP}} \right)_N = \frac{A_{izl}^{NP}}{V_{NP}} \cdot w_{izl,N}^{NP}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial w_{izl}^{NP}} \right)_N = \frac{A_{izl}^{NP}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t)}{\partial t} &= 10.12615 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^K}(t) + 0.5507 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^K}(t) \\ &+ 10.1265 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) - 10.12707 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) - 10.12707 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) \end{aligned}$$

Korišćenjem poznate zamene potrebnih veličina:

$$10.12615 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) = 9.0224 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 10.0755 \cdot \overline{\Delta x_2}(t)$$

dobija se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t)}{\partial t} &= 9.5731 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 0.051 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \\ &- 10.12707 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) - 10.12707 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) \end{aligned}$$

#### 4.2 Nisko-pritisni deo: jednačina količine kretanja

$$\begin{aligned} V_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t) \cdot \frac{\partial w_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} + V_{NP} \cdot w_{izl}^{NP}(t) \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = \\ \left( p_0^{NP}(t) - 1.2 \cdot \rho_{ul}^{NP}(t) \cdot w_{ul,sr}^{NP2}(t) \cdot x_2(t) - \sqrt{p_{izl,N}^{NP2} + k_{113}} \right) \cdot A_{sr}^{NP} \end{aligned}$$

pri čemu je:  $p_{izl,N}^{NP} = 1 \text{ bar}$  - pritisak okoline.

Kako je:

$$w_{ul,sr}^{NP}(t) = k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)}$$

$$V_{NP} = l_{NP} \cdot A_{sr}^{NP}$$

$$k_{113} = \frac{\lambda_{sr} \cdot l_{NP} \cdot z_\theta \cdot R}{A_{ekv}^2 \cdot d_{ekv}} \cdot \frac{T_{izl}^{NP}(t) - T_0^{NP}(t) \cdot e^{\chi \cdot x}}{\ln \left( \frac{T_{izl}^{NP}(t)}{T_0^{NP}(t) \cdot e^{\chi \cdot x}} \right)} \cdot A_{NP}^2 \cdot \rho_{izl}^{NP2}(t) \cdot w_{izl}^{NP2}(t)$$

$z_\theta$  - srednja vrednost koeficijenta kompresibilnosti gasa,

$$k_{114} = \ln \left( \frac{T_{izl}^{NP}(t)}{T_0^{NP}(t) \cdot e^{\chi \cdot x}} \right)$$

$$k_{115} = \frac{\lambda_{sr} \cdot l_{NP} \cdot z_\theta \cdot R}{A_{ekv}^2 \cdot d_{ekv}}$$

$$k_{110} = \frac{k_{115}}{k_{114}} \cdot A_{izl}^{NP2}$$

Zamenom gornjih jednakosti u polazni izraz, dobija se:

$$\frac{\partial w_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = -\frac{w_{izl}^{NP}(t)}{\rho_{izl}^{NP}(t)} \cdot \left( \frac{\rho_{ul}^{NP}(t)}{l_{NP}} \cdot k_{116} \cdot x_2(t) \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} - \frac{A_{NP}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t) \cdot w_{izl}^{NP}(t) \right) + \frac{1}{l_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t)}$$

$$\cdot \left( p_0^{NP}(t) - 1.2 \cdot \rho_{ul}^{NP}(t) \cdot k_{116}^2 \cdot T_0^{NP}(t) \cdot x_2(t) - \sqrt{p_{izl,N}^{NP\ 2} + \frac{k_{115}}{k_{114}} \cdot (T_{izl}^{NP}(t) - T_0^{NP}(t) \cdot k_{01}) \cdot A_{NP}^2 \cdot \rho_{izl}^{NP2}(t) \cdot w_{izl}^{NP2}(t)} \right)$$

i preuređivanjem sledeći izraz za jednačinu količine kretanja niskopritisnog dela:

$$\frac{\partial w_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = -\frac{w_{izl}^{NP}(t)}{\rho_{izl}^{NP}(t)} \cdot \frac{\rho_{ul}^{NP}(t)}{l_{NP}} \cdot k_{116} \cdot x_2(t) \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} + \frac{A_{NP}}{V_{NP}} \cdot w_{izl}^{NP2}(t) + \frac{p_0^{NP}(t)}{l_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t)}$$

$$- \frac{1.2}{l_{NP}} \cdot \frac{\rho_{ul}^{NP}(t)}{\rho_{izl}^{NP}(t)} \cdot k_{116}^2 \cdot T_0^{NP}(t) \cdot x_2(t) - \sqrt{\frac{p_{izl,N}^{NP\ 2}}{l_{NP}^2 \cdot \rho_{izl}^{NP2}(t)} + \frac{k_{110}}{l_{NP}^2} \cdot (T_{izl}^{NP}(t) - T_0^{NP}(t) \cdot k_{01}) \cdot w_{izl}^{NP2}(t)}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial w_{izl}^{NP}} \right)_N = \frac{1}{\rho_{izl,N}^{NP}} \cdot \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{l_{NP}} \cdot k_{116} \cdot x_{2,N} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial \rho_{ul}^{NP}} \right)_N = \frac{w_{izl,N}^{NP}}{\rho_{izl,N}^{NP}} \cdot \frac{k_{116}}{l_{NP}} \cdot x_{2,N} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^{NP}} \right)_N = w_{izl,N}^{NP} \left( -\frac{1}{\rho_{izl,N}^{NP\ 2}} \right) \cdot \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{l_{NP}} \cdot k_{116} \cdot x_{2,N} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial T_0^{NP}} \right)_N = \frac{w_{izl,N}^{NP}}{\rho_{izl,N}^{NP}} \cdot \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{l_{NP}} \cdot k_{116} \cdot x_{2,N} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial x_2} \right)_N = \frac{w_{izl,N}^{NP}}{\rho_{izl,N}^{NP}} \cdot \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{l_{NP}} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial w_{izl}^{NP}} \right)_N = \frac{A_{NP}}{V_{NP}} \cdot 2 \cdot w_{izl,N}^{NP}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial p_0^{NP}} \right)_N = \frac{1}{l_{NP} \cdot \rho_{izl,N}^{NP}}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^{NP}} \right)_N = \frac{p_{0,N}^{NP}}{l_{NP}} \cdot \left( -\frac{1}{\rho_{izl,N}^{NP\ 2}} \right)$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial \rho_{ul}^{NP}} \right)_N = \frac{1.2}{l_{NP}} \cdot \frac{k_{116}^2}{\rho_{izl,N}^{NP}} \cdot T_{0,N}^{NP} \cdot x_{2,N}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial T_0^{NP}} \right)_N = \frac{1.2}{l_{NP}} \cdot \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{\rho_{izl,N}^{NP}} \cdot k_{116}^2 \cdot x_{2,N}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^{NP}} \right)_N = \frac{1.2}{l_{NP}} \cdot \rho_{ul,N}^{NP} \cdot \left( -\frac{1}{\rho_{izl,N}^{NP}} \right) \cdot k_{116}^2 \cdot T_{0,N}^{NP} \cdot x_{2,N}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial x_2}\right)_N = \frac{1,2}{l_{NP}} \cdot \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{\rho_{izl,N}^{NP}} \cdot k_{116}^2 \cdot T_{0,N}^{NP}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^{NP}}\right)_N = \frac{\frac{p_{izl,N}^{NP 2}}{l_{NP}^2} \cdot \left(-\frac{2}{\rho_{izl,N}^{NP 3}}\right)}{2 \cdot \sqrt{\frac{P_{izl,N}^{NP 2}}{l_{NP}^2 \cdot \rho_{izl,N}^{NP 2}} + \frac{k_{110}}{l_{NP}^2} \cdot (T_{izl,N}^{NP} - T_{0,N}^{NP} \cdot k_{01})} \cdot w_{izl,N}^{NP 2}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T_{izl}^{NP}}\right)_N = \frac{\frac{k_{110}}{l_{NP}^2} \cdot w_{izl,N}^{NP 2}}{2 \cdot \sqrt{\frac{P_{izl,N}^{NP 2}}{l_{NP}^2 \cdot \rho_{izl,N}^{NP 2}} + \frac{k_{110}}{l_{NP}^2} \cdot (T_{izl,N}^{NP} - T_{0,N}^{NP} \cdot k_{01})} \cdot w_{izl,N}^{NP 2}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T_0^{NP}}\right)_N = \frac{-\frac{k_{110}}{l_{NP}^2} \cdot k_{01} \cdot w_{izl,N}^{NP 2}}{2 \cdot \sqrt{\frac{P_{izl,N}^{NP 2}}{l_{NP}^2 \cdot \rho_{izl,N}^{NP 2}} + \frac{k_{110}}{l_{NP}^2} \cdot (T_{izl,N}^{NP} - T_{0,N}^{NP} \cdot k_{01})} \cdot w_{izl,N}^{NP 2}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial w_{izl}^{NP}}\right)_N = \frac{\frac{k_{110}}{l_{NP}^2} \cdot (T_{izl,N}^{NP} - T_{0,N}^{NP} \cdot k_{01}) \cdot 2 \cdot w_{izl,N}^{NP}}{2 \cdot \sqrt{\frac{P_{izl,N}^{NP 2}}{l_{NP}^2 \cdot \rho_{izl,N}^{NP 2}} + \frac{k_{110}}{l_{NP}^2} \cdot (T_{izl,N}^{NP} - T_{0,N}^{NP} \cdot k_{01})} \cdot w_{izl,N}^{NP 2}}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}}{\partial t}(t) = & -10,12645 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) - 10,12645 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^K}(t) + 10,12645 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) - 0,5507 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) \\ & + 20,25414 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) + 1,44339 \cdot 10^7 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 1,44339 \cdot 10^7 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) - 7,1974 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^K}(t) \\ & - 0,78282 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 7,1974 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) + 1,41215 \cdot 10^7 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) - 1,65741 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) \\ & + 6,48555 \cdot 10^3 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 3,12368 \cdot 10^5 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) - 10,12645 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) - 7,1974 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \end{aligned}$$

Kako je:

$$-17,32385 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) = -15,4356 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 17,23723 \cdot \overline{\Delta x_2}(t)$$

i na kraju se dobija konačna jednačina količine kretanja nisko-pritisne strane:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}}{\partial t}(t) = & -3,12368 \cdot 10^5 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) - 0,03124 \cdot 10^7 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) \\ & + 1,44434 \cdot 10^7 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 1,65741 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) - 0,08662 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \end{aligned}$$

#### 4.3. Nisko-pritisna strana: jednačina održanja energije

m-eksponent Reynoldsovog broja



$$V_{NP} \cdot h_{izl}^{NP}(t) \cdot \frac{\partial \rho_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} + V_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t) \cdot \frac{\partial h_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = G_{ul}^{NP}(t) \cdot h_{ul}^{NP}(t) \cdot x_2(t) - G_{izl}^{NP}(t) \cdot h_{izl}^{NP}(t) \\ + k_{113} \cdot \rho_{izl}^{NPm}(t) \cdot w_{izl}^{NPm}(t) \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t) \right) - (\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t)) \right)$$

Pri čemu je (napomenimo još jednom):

$$k_{113} = \frac{k_{111}}{1.26134} A_{izl}^{NPm} \cdot A_{raz} \quad k_{112} = \ln \left( \frac{\left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t) \right)}{\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t)} \right)$$

$$h_{izl}^{NP}(t) = h_{0-ibar}^{NP} + c_{p3} \cdot (\theta_{izl}^{NP}(t) - \theta_0) \quad \theta_0 \text{-temperatura koja odgovara temperaturi od } 0 [^{\circ}C].$$

$$h_{ul}^{NP}(t) = h_{0-ibar}^{NP} + c_{p3} \cdot (\theta_{ul}^{NP}(t) - \theta_0)$$

$$V_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t) \cdot \frac{\partial h_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = -h_{izl}^{NP}(t) \cdot \left( A_{sr}^{NP} \cdot \rho_{ul}^{NP}(t) \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} \cdot x_2(t) - A_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t) \cdot w_{izl}^{NP}(t) \right) \\ + A_{sr}^{NP} \cdot \rho_{ul}^{NP}(t) \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} \cdot x_2(t) \cdot h_{ul}^{NP}(t) \cdot x_2(t) - A_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t) \cdot w_{izl}^{NP}(t) \cdot h_{izl}^{NP}(t) \\ + k_{113} \cdot \rho_{izl}^{NPm}(t) \cdot w_{izl}^{NPm}(t) \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t) \right) - (\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t)) \right)$$

Konačni izraz za jednačinu održanje energije niskopritisne strane:

$$c_{p3} \cdot \frac{\partial \theta_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = (h_{ul}^{NP}(t) - h_{izl}^{NP}(t)) \cdot \frac{\rho_{ul}^{NP}(t)}{l_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t)} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} \cdot x_2(t) \\ + \frac{k_{113}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl}^{NPm-1}(t) \cdot w_{izl}^{NPm}(t) \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t) \right) - (\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t)) \right)$$

$$c_{p3} \cdot \frac{\partial \theta_{izl}^{NP}(t)}{\partial t} = c_{p3} \cdot (\theta_0^{NP}(t) - \theta_{izl}^{NP}(t)) \cdot \frac{\rho_{ul}^{NP}(t)}{l_{NP} \cdot \rho_{izl}^{NP}(t)} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_0^{NP}(t)} \cdot x_2(t) \\ + \frac{k_{113}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl}^{NPm-1}(t) \cdot w_{izl}^{NPm}(t) \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}^B} - T_{izl}^{NP}(t) \right) - (\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t)) \right)$$

Usvajajući sledeći izraz:

$$k_{20} = c_{p3} \cdot (\theta_{0,N}^{NP} - \theta_{izl,N}^{NP}), \text{ može se napisati sledeće:}$$

$$\left( \frac{\partial G}{\partial \theta_{izl}^{NP}} \right)_N = c_{p3} \cdot (-1) \cdot \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{l_{NP} \cdot \rho_{izl,N}^{NP}} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}} \cdot x_{2,N}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{ul}^{NP}}\right)_N = k_{20} \cdot \frac{1}{l_{NP} \cdot \rho_{izl,N}^{NP}} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}} \cdot x_{2,N}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^{NP}}\right)_N = k_{20} \cdot \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{l_{NP}} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_{izl,N}^{NP 2}}\right) \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}} \cdot x_{2,N}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T_0^{NP}}\right)_N = k_{20} \cdot \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{l_{NP} \cdot \rho_{izl,N}^{NP}} \cdot k_{116} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}}} \cdot x_{2,N} + \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{l_{NP} \cdot \rho_{izl,N}^{NP}} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}} \cdot x_{2,N} \cdot c_{p3}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial x_2}\right)_N = k_{20} \cdot \frac{\rho_{ul,N}^{NP}}{l_{NP} \cdot \rho_{izl,N}^{NP}} \cdot k_{116} \cdot \sqrt{T_{0,N}^{NP}}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{izl}^{NP}}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{NP}} \cdot (m-1) \cdot \rho_{izl,N}^{NP m-2} \cdot w_{izl,N}^{NP m} \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}} - T_{izl,N}^{NP} \right) - (\theta_{izl,N}^{VP} - \theta_{0,N}^{NP})$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial w_{izl,N}^{NP}}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP m-1} \cdot m \cdot w_{izl,N}^{NP m-1} \cdot \frac{1}{k_{112}} \left( \left( \frac{p_{B,N}}{p_{izl,N}^B} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_{B,N} \cdot \frac{z_{B,N}}{z_{izl}} - T_{izl,N}^{NP} \right) - (\theta_{izl,N}^{VP} - \theta_{0,N}^{NP})$$

$$A = \frac{\left( \left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}} - T_{izl}^{NP}(t) \right) - (\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t))}{\ln \left( \frac{\left( \frac{p_B(t)}{p_{izl}^B(t)} \right)^{\frac{1-n_B}{n_B}} \cdot T_B(t) \cdot \frac{z_B(t)}{z_{izl}} - T_{izl}^{NP}(t)}{\theta_{izl}^{VP}(t) - \theta_0^{NP}(t)} \right)}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_B}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP m-1} \cdot w_{izl,N}^{NP m} \cdot A_0 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial p_B}\right)_N = A_0 \quad A_0 = -2.464 \cdot 10^{-5} \frac{m \cdot K \cdot s^2}{kg}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial p_{izl}^B}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP m-1} \cdot w_{izl,N}^{NP m} \cdot A_1 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial p_{izl}^B}\right)_N = A_1 \quad A_1 = -2.464 \cdot 10^{-5} \frac{m \cdot K \cdot s^2}{kg}$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial T_B}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP m-1} \cdot w_{izl,N}^{NP m} \cdot A_2 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial \theta_B}\right)_N = A_2 \quad A_2 = 8.87605$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial z_B}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP m-1} \cdot w_{izl,N}^{NP m} \cdot A_3 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial z_B}\right)_N = A_3 \quad A_3 = 2.283 \cdot 10^3 K$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial T_{izl}^{NP}}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP m-1} \cdot w_{izl,N}^{NP m} \cdot A_4 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial \theta_{izl}^{NP}}\right)_N = A_4 \quad A_4 = -8.87605$$

$$\left(\frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \theta_{izl}^{VP}}\right)_N = \frac{k_{113}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP m-1} \cdot w_{izl,N}^{NP m} \cdot A_5 \quad \left(\frac{\partial A}{\partial \theta_{izl}^{VP}}\right)_N = A_5 \quad A_5 = 0.14516$$

$$\left( \frac{\partial G_{izl}^{VP}}{\partial \theta_0^{NP}} \right)_N = \frac{k_{113}}{V_{NP}} \cdot \rho_{izl,N}^{NP \ m-1} \cdot w_{izl,N}^{NP \ m} \cdot A_6 \quad \left( \frac{\partial A}{\partial \theta_0^{NP}} \right)_N = A_6 \quad A_6 = -0.14516$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta \theta_{izl}^{NP}}{\partial t} = & -10.12645 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) - 95.31509 \cdot \overline{\Delta \rho_{ul}^{NP}}(t) + 95.31509 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) \\ & - 1.22636 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^K}(t) - 95.31509 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) - 19.11351 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) + 76.45402 \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) \\ & - 6.16499 \cdot 10^3 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) + 6.16499 \cdot 10^3 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) + 1.45939 \cdot 10^3 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) + 1.8782 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta z_B}(t) \\ & - 1.44289 \cdot 10^3 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) + 5.94965 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^K}(t) + 108.06577 \cdot \overline{\Delta x}(t) - 9.22107 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^K}(t) \end{aligned}$$

Kako je:

$$-95.31509 \cdot \overline{\Delta \rho_0^{NP}}(t) = -84.926 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) + 94.839 \cdot \overline{\Delta x_2}(t)$$

$$1.8782 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta z_B}(t) = 1.8782 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) - 1.8782 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) - 1.8782 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t)$$

Konačno se dobija jednačina održanja energije niskopritisnog dela:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta \theta_{izl}^{NP}}{\partial t} = & -1.453 \cdot 10^3 \cdot \overline{\Delta \theta_{izl}^{NP}}(t) - 89.4238 \cdot \overline{\Delta p_0^{NP}}(t) - 0.47609 \cdot \overline{\Delta x_2}(t) \\ & + 76.20159 \cdot \overline{\Delta \rho_{izl}^{NP}}(t) + 76.45402 \cdot \overline{\Delta w_{izl}^{NP}}(t) + 1.2617 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta p_B}(t) \\ & + 6.165 \cdot 10^3 \cdot \overline{\Delta p_{izl}^B}(t) - 1.7323 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta \theta_B}(t) - 1.8782 \cdot 10^4 \cdot \overline{\Delta \rho_B}(t) + 108.06577 \cdot \overline{\Delta x}(t) \end{aligned}$$

**PRILOG V:****Strujanje u cevima razmenjivača toplote**

Bilansne jednačine koje određuju promenu stanja fluida kod strujno termičkih procesa u cevima razmenjivača toplote: jednačina kontinuiteta, jednačina o održanju količine kretanja, jednačina održanja energije mogu da se nađu u literaturi i to za opšti slučaj - strujanje fluida u nagnutom kanalu sa promenljivim poprečnim presekom. Pretpostavlja se konstantan poprečni presek.

**Jednačina kontinuiteta**

Pod pretpostavkom da nema unutrašnjeg izvora ili ponora, tj. da nema hemijske niti nuklearne reakcije promena mase u elementarnoj zapremini,  $dV = A \cdot d\xi$ , može se napisati:

$$\frac{\partial m(t, \xi)}{\partial t} = G(t, \xi) - \left( G(t, \xi) + \frac{\partial G(t, \xi)}{\partial \xi} \cdot d\xi \right) = -\frac{\partial G(t, \xi)}{\partial \xi} \cdot d\xi$$

S obzirom da je:  $dm = \rho \cdot A \cdot d\xi$ , dalje je:

$$\frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial t} = -\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial G(t, \xi)}{\partial \xi}.$$

Imajući u vidu da je:

$$G(t, \xi) = \rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi) \cdot A,$$

ova jednačina može da se napiše na sledeći način:

$$\frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial \xi} = 0$$

koja je praktično izvorna za jednodimenzijnsko strujanje radnih medijuma.

Usled razmene toplote i uslova strujanja duž cevi menjaju se parametri stanja: pritisak i temperatura, odnosno entalpija kod dvofaznog toka ili sadržaj pare, a gustina je prema jednačini stanja funkcija ovih parametara, tj.  $\rho = \rho(p, i)$ , pa se dalje može pisati:

$$\frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial t} = \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial p(t, \xi)} \right)_{i=const} \cdot \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial t} + \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial h(t, \xi)} \right)_{p=const} \cdot \frac{\partial h(t, \xi)}{\partial t}$$

Kad se prethodna jednačina zameni u jednačinu (.2), dobija se:

$$\frac{\partial G(t, \xi)}{\partial \xi} = -A \cdot \left( \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial p(t, \xi)} \right)_{i=const} \cdot \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial t} + \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial h(t, \xi)} \right)_{p=const} \cdot \frac{\partial h(t, \xi)}{\partial t} \right)$$

### Jednačina održanja količine kretanja

Vremenska promena količine kretanja jednaka je sumi sila koje tu promenu proizvode, što se može napisati:

$$\frac{d(m(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{dt} = \sum F_i$$

$$\frac{\partial(m(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial t} = G(t, \xi) \cdot w(t, \xi) + A \cdot p(t, \xi)$$

$$- \left( G(t, \xi) \cdot w(t, \xi) + \left( \frac{\partial(G(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial \xi} \right) \cdot d\xi \right)$$

$$- A \cdot \left( p(t, \xi) + \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \cdot d\xi \right) - A \cdot \left( \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{tr} + \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr} \right) \cdot d\xi$$

Razvijanjem prethodnog izraza uz korišćenje dobro poznatih zavisnosti, kao i jednačine kontinuiteta, dobija se:

$$\frac{\partial(\rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho(t, \xi) \cdot w^2(t, \xi))}{\partial \xi} = - \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} - \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{tr} - \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr}$$

Leva strana jednačina predstavlja nestacionarni deo jednačine količine kretanja. U slučaju stacionarnog strujanja taj deo ne postoji. Desni deo poslednje jednačine količine kretanja, napisan u takvom obliku odgovara nestišljivom strujanju fluida, dok za stišljiva strujanja fluida ima nešto drugačiji oblik, koji je pokazan u matematičkom modelu tj. u odeljku gde je urađena simulacija, a takođe i nešto kasnije u teorijskom poglavlju o strujanju stišljivog fluida.

Poslednja jednačina može da se napiše i u sledećem obliku:

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(G(t, \xi))}{\partial t} + \frac{1}{A^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{G^2(t, \xi)}{\rho(t, \xi)} \right) = - \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} - \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{tr} - \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr}$$

Leva strana poslednje jednačine može se napisati korišćenjem jednačine kontinuiteta, u sledećem obliku:

$$\frac{\partial(\rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial \xi} = w(t, \xi) \cdot \frac{\partial(\rho(t, \xi))}{\partial t} + \rho(t, \xi) \cdot \frac{\partial(w(t, \xi))}{\partial t}$$

$$+ \rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi) \cdot \frac{\partial(w(t, \xi))}{\partial \xi} + w(t, \xi) \cdot \frac{\partial(\rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial \xi}$$

odnosno:

$$\frac{\partial(\rho(t,\xi) \cdot w(t,\xi))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho(t,\xi) \cdot w(t,\xi) \cdot w(t,\xi))}{\partial \xi} = w(t,\xi) \cdot \left( \frac{\partial(\rho(t,\xi))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho(t,\xi) \cdot w(t,\xi))}{\partial \xi} \right) + \rho(t,\xi) \cdot \frac{\partial(w(t,\xi))}{\partial t} + \rho(t,\xi) \cdot w(t,\xi) \cdot \frac{\partial(w(t,\xi))}{\partial \xi}$$

na osnovu čega se može napisati:

$$\rho(t,\xi) \cdot \frac{\partial(w(t,\xi))}{\partial t} + \rho(t,\xi) \cdot w(t,\xi) \cdot \frac{\partial(w(t,\xi))}{\partial \xi} = -\frac{\partial p(t,\xi)}{\partial \xi} - \left( \frac{\partial p(t,\xi)}{\partial \xi} \right)_{ir} - \left( \frac{\partial p(t,\xi)}{\partial \xi} \right)_{gr}.$$

Ako se leva strana prethodne jednačine, obeleži na sledeći način:

$$\left( \frac{\partial(p(t,\xi))}{\partial \xi} \right)_{ub} = \rho(t,\xi) \cdot \frac{\partial(w(t,\xi))}{\partial t} + \rho(t,\xi) \cdot w(t,\xi) \cdot \frac{\partial(w(t,\xi))}{\partial \xi},$$

odnosno:

$$\left( \frac{\partial(p(t,\xi))}{\partial \xi} \right)_{ub} = \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(G(t,\xi))}{\partial t} + \frac{1}{A^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{G^2(t,\xi)}{\rho(t,\xi)} \right),$$

što predstavlja komponentu pada pritiska koja nastaje zbog promene brzine, odnosno zbog pojave ubrzanja fluidne struje.

Sada se može napisati:

$$\left( \frac{\partial(p(t,\xi))}{\partial \xi} \right)_{ub} = -\frac{\partial p(t,\xi)}{\partial \xi} - \left( \frac{\partial p(t,\xi)}{\partial \xi} \right)_{ir} - \left( \frac{\partial p(t,\xi)}{\partial \xi} \right)_{gr}.$$

Iz prethodne jednačine sledi da je gradijent pritiska fluidne struje, dat sa:

$$\frac{\partial(p(t,\xi))}{\partial \xi} = - \left( \left( \frac{\partial p(t,\xi)}{\partial \xi} \right)_{ub} + \left( \frac{\partial p(t,\xi)}{\partial \xi} \right)_{ir} + \left( \frac{\partial p(t,\xi)}{\partial \xi} \right)_{gr} \right).$$

Gradijent pritiska fluidne struje, jednak je:

$$\left( \frac{\partial(p(t,\xi))}{\partial \xi} \right)_{ub} = \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(G(t,\xi))}{\partial t} + \frac{1}{A^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{G^2(t,\xi)}{\rho(t,\xi)} \right),$$

te ako se namenski potraži izvod po prostornoj promenljivoj drugog sabirka,  $\xi$ , dobija se:

$$\left( \frac{\partial(p(t,\xi))}{\partial \xi} \right)_{ub} = \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(G(t,\xi))}{\partial t} + \frac{2 \cdot G(t,\xi)}{A^2 \cdot \rho(t,\xi)} \cdot \frac{\partial(G(t,\xi))}{\partial \xi} - \frac{G^2(t,\xi)}{A^2 \cdot \rho^2(t,\xi)} \cdot \frac{\partial(\rho(t,\xi))}{\partial \xi}$$

i zameni u prethodnju jednačinu, dobija se:

$$\frac{\partial(p(t, \xi))}{\partial \xi} = -\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(G(t, \xi))}{\partial t} - \frac{2 \cdot G(t, \xi)}{A^2 \cdot \rho(t, \xi)} \cdot \frac{\partial(G(t, \xi))}{\partial \xi} + \frac{G^2(t, \xi)}{A^2 \cdot \rho^2(t, \xi)} \cdot \frac{\partial(\rho(t, \xi))}{\partial \xi} - \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{tr} - \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr}$$

Može se napisati:

$$\frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial \xi} = \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial p(t, \xi)} \right)_{i=const} \cdot \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} + \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial h(t, \xi)} \right)_{p=const} \cdot \frac{\partial h(t, \xi)}{\partial \xi}$$

Kada se poslednja jednačina uvrsti u prethodnu i reši po  $\frac{\partial(p(t, \xi))}{\partial \xi}$ , dobija se:

$$\frac{\partial(p(t, \xi))}{\partial \xi} \cdot \left( 1 - \frac{G^2(t, \xi)}{A^2 \cdot \rho^2(t, \xi)} \cdot \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial p(t, \xi)} \right)_{i=const} \right) = -\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(G(t, \xi))}{\partial t} - \frac{2 \cdot G(t, \xi)}{A^2 \cdot \rho(t, \xi)} \cdot \frac{\partial(G(t, \xi))}{\partial \xi} - \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{tr} - \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr} + \frac{G^2(t, \xi)}{A^2 \cdot \rho^2(t, \xi)} \cdot \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial h(t, \xi)} \right)_{p=const} \cdot \frac{\partial h(t, \xi)}{\partial \xi}$$

Koristeći izraz za  $\frac{\partial(G(t, \xi))}{\partial \xi}$ , konačno se dobija:

$$\frac{\partial(p(t, \xi))}{\partial \xi} = \frac{1}{1 - \frac{G^2(t, \xi)}{A^2 \cdot \rho^2(t, \xi)} \cdot \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial p(t, \xi)} \right)_{i=const}} \cdot \left( -\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(G(t, \xi))}{\partial t} + \frac{2 \cdot G(t, \xi)}{A \cdot \rho(t, \xi)} \cdot \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial p(t, \xi)} \right)_{i=const} \cdot \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial t} + \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial h(t, \xi)} \right)_{p=const} \cdot \frac{\partial h(t, \xi)}{\partial t} \right) - \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{tr} - \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr} + \frac{G^2(t, \xi)}{A^2 \cdot \rho^2(t, \xi)} \cdot \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial h(t, \xi)} \right)_{p=const} \cdot \frac{\partial h(t, \xi)}{\partial \xi}$$

Brzina fluida pri kojoj pad pritiska postaje beskonačno veliki dobije se kada imenilac prethodnog izraza, izjednači sa nulom:

$$1 - w^2(t, \xi) \cdot \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial p(t, \xi)} \right)_{i=const} = 0,$$

odakle je:

$$w(t, \xi) = \left( \left( \frac{\partial \rho(t, \xi)}{\partial p(t, \xi)} \right)_{i=const} \right)^{\frac{1}{2}}$$

### Jednačina održanja energije

Vremenska promena energije fluida nastaje usled vremenske promene dovodnih i odvodnih energetskih tokova kao i rada odgovarajućih sila, u analiziranoj kontrolnoj zapremini..

$$\begin{aligned} \frac{\partial \left( m(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) \right)}{\partial t} &= G(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) \\ &- \left[ G(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) + \frac{\partial \left( G(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) \right)}{\partial \xi} \cdot d\xi \right] \\ &+ \alpha \cdot O \cdot (\theta_z(t, \xi) - \theta(t, \xi)) \cdot d\xi - A \cdot \left( \frac{\partial (p(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial \xi} - w(t, \xi) \cdot \left( \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{ir} + \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr} \right) \right) \cdot d\xi \end{aligned}$$

U poslednjoj jednačini prva dva sabirka predstavljaju (izražavaju) toplotnu energiju koja se konvekcijom unosi i iznosi iz uočene kontrolne zapremine.

Treći sabirak odgovara količini toplotne energije koju radni medijum, preko zida cevi, razmenjuje sa spoljnom okolinom ili drugim radnim fluidom. Poslednji sabirak reprezentuje rad sila pritiska. Poslednja jednačina može da se skрати članom  $A \cdot d\xi$  i uz izvesna preuređivanja, dobija se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \left( \rho(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left( \rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) \right)}{\partial \xi} &= \\ + \alpha \cdot \frac{O}{A} \cdot (\theta_z(t, \xi) - \theta(t, \xi)) - \frac{\partial (p(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial \xi} + w(t, \xi) \cdot \left( \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{ir} + \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr} \right) & \end{aligned}$$

Drugi član na desnoj strani prethodne jednačine, može da se napiše u sledećem obliku:

$$\frac{\partial (p(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial \xi} = \frac{\partial \left( \rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi) \cdot \frac{p(t, \xi)}{\rho(t, \xi)} \right)}{\partial \xi},$$

i ukoliko se vrati u prethodnu jednačinu, dobija se:



$$\frac{\partial \left( \rho(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left( \rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} + \frac{p(t, \xi)}{\rho(t, \xi)} \right) \right)}{\partial \xi} =$$

$$+ \alpha \cdot \frac{O}{A} \cdot (\theta_z(t, \xi) - \theta(t, \xi)) + w(t, \xi) \cdot \left( \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{ir} + \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr} \right)$$

Ako se na obe strane prethodne jednačine doda član koji izražava lokalnu promenu pritiska,  $\frac{\partial(p(t, \xi))}{\partial t}$ , dobija se:

$$\frac{\partial \left( \rho(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} + \frac{p(t, \xi)}{\rho(t, \xi)} \right) \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left( \rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi) \cdot \left( u(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} + \frac{p(t, \xi)}{\rho(t, \xi)} \right) \right)}{\partial \xi} =$$

$$+ \alpha \cdot \frac{O}{A} \cdot (\theta_z(t, \xi) - \theta(t, \xi)) + \frac{\partial(p(t, \xi))}{\partial t} + w(t, \xi) \cdot \left( \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{ir} + \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr} \right)$$

Imajući u vidu sledeću poznatu relaciju:

$$h(t, \xi) = u(t, \xi) + \frac{p(t, \xi)}{\rho(t, \xi)}$$

dobija se:

$$\frac{\partial \left( \rho(t, \xi) \cdot \left( h(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left( \rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi) \cdot \left( h(t, \xi) + \frac{w^2(t, \xi)}{2} \right) \right)}{\partial \xi} =$$

$$+ \alpha \cdot \frac{O}{A} \cdot (\theta_z(t, \xi) - \theta(t, \xi)) + \frac{\partial(p(t, \xi))}{\partial t} + w(t, \xi) \cdot \left( \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{ir} + \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr} \right)$$

Zbog relativno malih brzina strujanja radnog medijuma, može se zanemariti član koji izražava kinetičku energiju a u odnosu na ukupno razmenjenu toplotu, a uz korišćenje jednačine kontinuiteta:

$$\frac{\partial(\rho(t, \xi) \cdot h(t, \xi))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi) \cdot h(t, \xi))}{\partial \xi} = \rho(t, \xi) \cdot \frac{\partial(h(t, \xi))}{\partial t}$$

$$+ \rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi) \cdot \frac{\partial(h(t, \xi))}{\partial \xi} + h(t, \xi) \cdot \left( \frac{\partial(\rho(t, \xi))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi))}{\partial \xi} \right)$$

tako da se može konačno napisati:

$$\rho(t, \xi) \cdot \frac{\partial(h(t, \xi))}{\partial t} + \rho(t, \xi) \cdot w(t, \xi) \cdot \frac{\partial(h(t, \xi))}{\partial \xi} = \alpha \cdot \frac{O}{A} \cdot (\theta_z(t, \xi) - \theta(t, \xi))$$

$$+ \frac{\partial(p(t, \xi))}{\partial t} + w(t, \xi) \cdot \left( \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{tr} + \left( \frac{\partial p(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{gr} \right)$$

## PRILOG VI:

### Ispiravanje u tecnom filmovanom sloju u odgovarajucoj granicnoj zapremini

Filmsko isparavanje je neefikasan način prolaza toplote. Često se dešava u mnogim kriogenim sistemima. Tokom početnog cool-down procesa odmah posle J-T ventila (mlaznice), temperatura površine je dovoljno visoka tako da je filmsko isparavanje gotovo uvek ostvareno. lit

Za filmsko isparavanje na horizontalnim cevima, čiji su prečnici relativno mali, konvektivni doprinos prelazu toplote može biti određen, kao što sledii, Westwater and Breen (1962):

$$Nu = 0.62 \cdot K_D \cdot (Ra_b / Ja_G)^{0.25}.$$

$$K_D = 1.0 \text{ za } Bo \geq 13.8 \text{ ili } K_D = (0.6 + 0.442 \cdot Bo)^{-0.5} \text{ za } Bo < 13.8,$$

gde je, Rayleigh broj za filmsko isparavanje,  $Ra_b$ , definisan kao:

$$Ra_b = \frac{g \cdot \rho_p \cdot (\rho_t - \rho_p) \cdot D^3 \cdot Pr_G}{\mu_p^2}.$$

Jakobov broj,  $Ja_G$ , je definisan:

$$Ja_G = \frac{c_{pG} \cdot (T_f - T_{sat})}{(i_{fg})_e}.$$

gde je,  $(h_{fg})_e$  efektivna toplota isparavanja koja uključuje prateći efekat pregrevanja u parnom filmu, definisana je sledećim izrazom:

$$(h_{fg})_e = h_{fg} + 0.34 \cdot c_{pG} \cdot (T_f - T_{sat}).$$

Osobine gasa su procenjene pri srednjoj temperaturi filma, tj,  $\frac{T_f + T_{sat}}{2}$ , a tečnosti pri temperaturi zasićenja.

Takođe u literaturi, postoje i izrazi za minimalni toplotni fluks, tzv. Leidenfrost-ovu tačku, ali oni ovde neće biti analizirani.

### Ispiravanje prinudnom konvekcijom

Za isparavanje prinudnom konvekcijom u vertikalnim cevima, pri strujanju na gore, koristi se poznati izraz Chen (1963), koji definiše ukupni prelaz toplote:

$$\alpha = F \cdot \alpha_l + S \cdot \alpha_b,$$

gde su:

$\alpha_l$  i  $\alpha_b$  - koeficijenti prelaza toplote za jednofaznu konvekciju tečnosti i mehurasto isparavanje.

$F$  i  $S$  - su dinamički faktori.

Jednofazni koeficijent prelaza toplote za tečnost samo, može se dobiti korišćenjem Dittus-Boelter/McAdams jednačine:

$$\alpha_l = 0.023 \cdot \left( \frac{\lambda_l}{D} \right) \cdot \text{Re}_l^{0.8} \cdot \text{Pr}_l^{0.4}.$$

Doprinos mehurastom isparavanju se određuje korišćenjem korelacije predložene, Forster i Zuber (1955) za isparavanje u velikoj zapremini:

$$\alpha_b = 0.00122 \cdot \left( \frac{\lambda_l^{0.79} \cdot c_{pl}^{0.45} \cdot \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \cdot \mu_l^{0.29} \cdot l_{fg}^{0.24} \cdot \rho_p^{0.24}} \right) \cdot (T_f - T_{sat}(p_t))^{0.24} \cdot (p_{sat}(T_f) - p_t)^{0.75}.$$

Koeficijent konvektivnog isparavanja  $F$  može biti dobijen na osnovu eksperimentalnih podataka:

$$F = \begin{cases} 1 & X_u^{-1} \leq 0.1 \\ 2.35 \cdot (0.213 + X_u^{-1})^{0.736} & X_u^{-1} > 0.1 \end{cases}$$

gde je:

$X_u$  - Lockhart-Martinelli parameter, pri čemu je dat sledećim izrazom:

$$X_u = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \cdot \left( \frac{\rho_p}{\rho_l} \right)^{0.5} \cdot \left( \frac{\mu_l}{\mu_p} \right)^{0.1}.$$

Faktor ugušenja  $S$  mehurastog isparavanja, dat je sledećim izrazom:

$$S = \frac{1}{1 + 2.53 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Re}_{TP}^{1.17}},$$

gde je:

$\text{Re}_{TP} = \text{Re}_l \cdot F^{1.25}$  - lokalni dvofazni Reynolds-ov broj. Napomenuće se da koeficijent i eksponenti u izrazu za  $\alpha_l$ , zavise od vrste fluida, načina i vrste strujanja.

## Literatura

- [1] Accetta S.J., D.L.Shumaker, *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook-Electro-Optical components*, Volume 3, Infrared Information Analysis Centar and SPIE Optical Engineering Press, USA 1993.
- [2] Tirnanić S., S.Bursać, *Raketni sistemi – vođenje i upravljanje*, Vojnoizdavački zavod, Beograd 2001.
- [3] Burgess E., *Long range ballistic missiles*, The Macmillan company, USA 1962.
- [4] Razingar A., *Elektronsko izvidanje i maskiranje*, II dopunjeno izdanje, Vojnoizdavački i novinski centar, Beograd 1989.
- [5] Carleone J., *Tactical Missile Warheads*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA 1993.
- [6] Chatfield B.A., *Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA 1997.
- [7] Zarchan P., *Tactical and Strategic Missile Guidance*, Second edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA 1994.
- [8] Eichblatt J.E., *Test and Evaluation of the Tactical Missile*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA 1989.
- [9] Milinović M., *Raketni pogon*, Vazduhoplovna tehnička akademija, Beograd 1998.
- [10] Неупокоев К.Ф., *Стрельба зенитными ракетами*, Военное Издательство Министерства обороны СССР, Москва 1980.
- [11] Моссаковский И.В., А.Г.Макаренков, П.И. Никитин, Ю.И.Саввин, И.Н.Спиридонов, *Прочность ракетных конструкций*, Высшая школа, Москва 1990.
- [12] Fleeman I.E., *Tactical Missile Design*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA 2001.
- [13] Jakšić Z., *Micro and Nanophotonics for Semiconductor Infrared Detectors*, Springer, Switzerland, 2014.
- [013] Rogalski A., *Infrared Detectors*, Second edition, CRC Press, USA, 2011.
- [14] Vasiljević D., *Optički uređaji i optoelektronika*, Mašinski fakultet, Beograd, 2004.
- [15] Leo, W.R., *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York (1994)
- [16] Galović A., *Termodinamika I*, I izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [17] Galović A., *Nauka o toplini II*, II izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1997.
- [18] Rant Z., *Termodinamika*, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1963.
- [19] Bošnjaković F., *Nauka o toplini I*, V izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1978.
- [20] Bošnjaković F., *Nauka o toplini II*, IV izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
- [21] Milinčić D., D.K.Voronjec, *Termodinamika*, II izdanje, Mašinski fakultet, Beograd, 1991.
- [22] Milinčić D., *Prostiranje toplote*, V izdanje, Naučna knjiga, Beograd, 1989.
- [23] McAdams W. H., *Prostiranje toplote*, Građevinska knjiga, Beograd, 1969.
- [24] Rikalović R.M., *Dobošasti razmenjivači toplote*, SMEITS, Beograd, 2002.
- [25] Đorđević B., V.Valent, S.Šerbanović, *Termodinamika i termotehnika*, Građevinska knjiga, Beograd, 1990.
- [26] Slipčević B., *Razmenjivači toplote*, II izdanje, SMEITS, Beograd, 2009.
- [27] Ghiaasiaan S.M., *Two phase flow, boiling and condensation in conventional and miniature systems*, Cambridge University Press, New York, 2008.
- [28] Lahey T.R., F.J.Moody, *The thermal-hydraulics of a boiling water nuclear reactor*, Second Edition, American Nuclear Society, Illinois USA, 1993.
- [29] Whalley B.P., *Two phase flow and heat transfer*, Oxford Science publications, Oxford University Press, Oxford, 1996.
- [30] Winterton H.S.R., *Thermal design of nuclear reactors*, Pergamon Press, UK, 1981.
- [31] Brkić Lj., T. Živanović, *Parni kotlovi*, Mašinski fakultet, Beograd, 1997.
- [32] Šel J., *Nauka o toploti*, Mašinski fakultet, Beograd, 1973.
- [33] Lykov V.A., *Teorija teploprovodnosti*, Vysshaja Shkola, Moskva, 1967.
- [34] Rohsenow M.W., J.P.Hartnett, Y.I.Cho, *Handbook of heat transfer*, Third edition, MCGRAW-HILL, USA, 1998.
- [35] Вукалович П.М., И.И.Новиков, *Термодинамика*, Машиностроение, Москва, 1972.
- [36] Жуковский В.С., *Термодинамика*, Энергоиздат, Москва, 1983.

- [37] Debeljković Lj. D., *Dinamika objekata i procesa*, Mašinski fakultet, Beograd, 1983.
- [38] Debeljković Lj. D., *Dinamika objekata i procesa*, II izdanje, Mašinski fakultet, Beograd, 1989.
- [39] Debeljković Lj. D., *Zbirka zadataka iz dinamike objekata i procesa*, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
- [40] Debeljković Lj. D., S. A. Milinković, L. L. Pezo, S. D. Šarboh, V. M. Milentijević, *Dinamika procesa sa raspodeljenim parametrima: analiza i sinteza u parametarskoj ravni*, Čigoja štampa, Beograd, 2000.
- [41] Debeljković Lj. D., V. S. Mulić, *Dinamika parnih kotlova - matematički modeli razmenjivača toplote i pomoćne opreme kotlovskih postrojenja sa stanovišta upravljanja*, Čigoja štampa, Beograd, 2001.
- [42] Debeljković Lj. D., V. S. Mulić, G. V. Simeunović, *Dinamika razmenjivača toplote I* DEO, Čigoja štampa, Beograd, 2002.
- [43] Debeljković Lj. D., V. S. Mulić, G. V. Simeunović, *Dinamika razmenjivača toplote II* DEO, Čigoja štampa, Beograd, 2005.
- [44] Friedly J. C., *Dynamic behavior of processes*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1972.
- [45] Jaćimović B., S. Genić, *Toplotne operacije i aparati*, Mašinski fakultet, Beograd, 1992.
- [46] Mitrović Z. *Dinamika rekuperativnih razmenjivača toplote*, Magistarska teza, Mašinski fakultet, Beograd, Beograd, 1991.
- [47] Ray, H. W., *Advance process control*, McGraw Hill (USA), 1981.
- [48] Debeljković, Lj. D., G. V. Simeunović, V. S. Mulić, *Matematički modeli objekata i procesa u sistemima automatskog upravljanja I* Deo, Mašinski fakultet, Beograd, 2006.
- [49] Debeljković, Lj. D., A. M. Sićović, G. V. Simeunović, V. S. Mulić, *Matematički modeli objekata i procesa u sistemima automatskog upravljanja II* Deo, Mašinski fakultet, Beograd, 2006.
- [50] Debeljković, Lj. D., V. S. Mulić, A. M. Sićović, G. V. Simeunović, *Dinamika parnih kotlova II* Deo, Mašinski fakultet, Beograd, 2007.
- [51] Milojković B., Lj. Grujić, *Automatsko Upravljanje*, Mašinski fakultet, Beograd, 1977.
- [52] D'Azzo J. J., C. H. Houpis, *Linear Control System Analysis and Design*, Mc Graw Hill, USA, 1975.
- [53] Debeljković Lj. D., B. R. Milojković, *Projektovanje Linearnih Sistema*, Mašinski Fakultet, Beograd, 1987.
- [54] Debeljković Lj. D. *Zbirka Zadataka iz Projektovanja Linearnih Sistema*, Mašinski fakultet, Beograd, 1988.
- [55] Sekulić M., *Osnovi Teorije Automatskog Upravljanja - Servomehanizmi*, Naučna knjiga, 1976.
- [56] Stojić M., *Kontinualni Sistemi Automatskog Upravljanja*, Građevinska knjiga, Beograd, 1978.
- [57] Šurina T., *Analiza i Sinteza Servomehanizama i Procesne Regulacije*, Školska knjiga, Zagreb, 1974.
- [58] <http://www.automatika.ftn.uns.ac.rs/nastavni-materijali-sau>
- [59] <http://www.le-tehnika.com>
- [60] Дилевская В.Е., *Криогенные микро-теплообменники*, Машиностроение, Москва, 1978.
- [61] Суслов А.Д., М.А.Горшков, А.В.Маслаков, Дроссельные микроохладители, Машиностроение, Москва, 1978.
- [62] Frost W., *Heat transfer at low temperatures*, Plenum Press, New York, 1975.
- [63] Walker G., *Cryocoolers, Part II: Applications*, Springer, USA, 2012.
- [64] Walker G., *Miniature Refrigerators for Cryogenic Sensors and Cold Electronics*, Oxford science publications, USA, 1989.
- [65] Barron F.R., *Cryogenic Heat Transfer*, First Edition, Taylor & Francis, USA, 1999.
- [66] Kreith F., *The CRC Handbook of Thermal Engineering*, CRC Press, Boca Raton, USA, 2000.
- [67] Pobell F., *Matter and methods at low temperatures*, Third Edition, Springer, USA, 2007.
- [68] Flynn M.T., *Cryogenic engineering*, Second Edition-Revised and Expanded, Taylor & Francis, USA, 2005.
- [69] Maytal Z.B., J.M.Pfotenhauer, *Miniature Joule-Thomson Cryocooling: Principles and Practice*, Springer, USA, 2013.
- [70] Mukhopadhyay M., *Fundamentals of Cryogenic Engineering*, Kindle Edition, PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2010.
- [71] Bryson E.W., *Cryogenics*, Hanser Gardner Publications, USA, 1999.
- [72] Timmerhaus D.K., R.P.Reed, *Cryogenic engineering - fifty years of progress*, Springer, USA, 2007.
- [73] Van Sciver W.S., *Helium Cryogenics*, Second Edition, Springer, USA, 2012.

- [74] Tarawneh M., F.Al-Ghathian, M.A.Nawafleh, N.Al-Kloub, *Numerical Simulation and Performance Evaluation of Stirling Engine Cycle*, Journal of Mechanical and Industrial Engineering, pp. 615-628, 2010.
- [75] Qu W., I.Mudawar, *Measurement and correlation of critical heat flux in two-phase micro-channel heat sinks*, International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 2045-2059, 2004.
- [76] Gungor E.K., R.H.S.Winterton, *A general correlation for flow boiling in tubes and annuli*, International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 351-358, 1986.
- [77] Liu X., J.H.Lienhard, J.S.Lombara, *Convective Heat Transfer by Impingement of Circular Liquid Jets*, Journal of Heat Transfer, pp. 571-582, 1991.
- [78] Kutateladze S.S., *Boiling Heat Transfer*, International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 1-31, 1961.
- [79] Hong, Y.J., Park, S.J., Kim, H.B., *The Performance of Joule Thomson Refrigerator*, Cryocoolers, vol. 13, pp.497-502, 2004.
- [80] Hong, Y.J., Park, S.J., Choi, Y.D., *A Numerical Study of the Performance of a Heat Exchanger for a Miniature Joule-Thomson Refrigerator*, Cryocoolers, vol. 15, pp.379-386, 2009.
- [81] Chua, H.T., Wang, X., Teo, H.Y., *A Numerical study of the Hampson-type miniature Joule-Thomson cryocooler*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, pp.582-593, 2006.
- [82] Maytal, B.Z., *Performance of Ideal Flow Regulated Joule-Thomson Cryocooler*, Cryogenics, vol. 34, pp. 723-726, 1994.
- [83] Chien, S.B., Chen, L.T., Chou, F.C., 1996, *A study on the Transient Characteristics of a Self-regulating Joule-Thomson Cryocooler*, Cryogenics, vol. 36, pp. 979-984, 1996.
- [84] Xue, H., Ng, K.C., Wang, J.B. *Performance evaluation of the recuperative heat exchanger in a miniature Joule-Thomson cooler*, Applied Thermal Engineering, vol. 21, pp.1829-1844, 2001.
- [85] Ng, K.C., Xue, H., Wang, J.B., *Experimental and numerical study on a miniature Joule-Thomson cooler for steady-state characteristics*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 45, pp. 609-618, 2002.
- [86] Bradley, P.E., Radebaugh, R., Huber, M., Lin, M.H., Lee, Y.C., *Development of a Mixed-Refrigerant Joule-Thomson Micro-cryocooler*, Cryocoolers vol. 15, pp.425-432, 2009.
- [87] ter Brake, H.J.M., Lerou, P.P.P.M., Burger, J.F., Holland, H.J., Derking, J.H., Rogalla, H., *Micromachined Joule-Thomson coolers for cooling low-temperature detectors and electronics*, IEEE Sensors Conferences, pp. 1352-1355, 2008.
- [88] Luo, E.C., Gong, M.Q., Zhou, Y., Liang, J.T., *Experimental Comparison of Mixed-Refrigerant Joule-Thomson Cryocoolers with two types of counterflow Heat Exchanger*, Cryocoolers vol. 10, pp.481-486, 1999.
- [89] Maytal, B.Z., *Flow rate pressure dependence of a fixed orifice Joule-Thomson cryocooler*, Advances in cryogenic engineering, vol. 45, no. I, pp.323-328. 2000.
- [90] Tzabar, N., Lifshiz, I., Kaplansky, A., *Fast cool-down J-T cryocooler to 88K*, Advances in cryogenic engineering, vol. 53B, pp.1025-1032, 2008.
- [91] Tzabar, N., Lifshiz, I., *Development of a miniature fast cool-down J-T cryocooler*, Cryocoolers, vol. 16, pp.473-480, 2008.
- [92] Herrington R.E. and Taylor C.O., *Adjustable-Joule-Thomson cryogenic cooler with downstream thermal compensation*, U.S. Patent 4,028,907, 1977.
- [93] Longworth R.C., *Bimaterial demand flow cryostat*, U.S. Patent 4,152,903, 1979.
- [94] Bonney G.E. and Stubbs D.M., *Design fundamentals of rapid cooldown JT cryostats and sensors*, SPIE-Cryogenic Optical Systems and Instrument, vol. 2227, pp. 98-108, 1994.
- [95] Hong Y.J., Park S.J., Kim H.B., and Choi Y.D., *The cool-down characteristics of a miniature Joule-Thomson refrigerator*, Cryogenics, vol. 46, pp. 391-395, 2006.
- [96] Hong Y.J., Park S.J., Kim H.B., and Choi Y.D., *The behavior of mass flow rate of a Joule-Thomson refrigerator*, Adv. in Cryogenic Engineering, Vol. 51A, Amer. Institute of Physics, Melville, NY, pp. 565-572, 2006.
- [97] Maytal, B.Z., *Open cycle Joule-Thomson cryocooling by mixed coolant*, International Cryocooler Conference, Atlanta, 2008.
- [98] Maytal, B.Z., *Maximizing Run Time of a Fived Orifice Joule Thomson Cryocooler*, Advances in Cryogenic Engineering Vol.49, 2003.
- [99] Crnojević C., *Mehanika fluida*, Mašinski fakultet, Beograd, 2014.
- [100] Crnojević C., *Klasična i uljna hidraulika*, Mašinski fakultet, Beograd, 2013.
- [101] Đorđević D.V., *Dinamika jednodimenzijskih strujanja fluida*, Mašinski fakultet. Beograd, 2005.

- [102] Hanjalić K., *Dinamika stišljivog fluida*, Svetlost, Sarajevo, 1978.
- [103] Đorđević D.V., M.D.Pavlović, M.P.Milinović, *Primenjena dinamika gasova*, Mašinski fakultet, Beograd, 1998.
- [104] Voronjec K., N.Obradović, *Mehanika fluida*, Građevinska knjiga, Beograd, 1976.
- [105] Šašić M., *Transport fluida cevima*, Mašinski fakultet, Beograd, 1987.
- [106] Benedict P.R., N.A.Carlucci, S.D.Swetz, *Flow losses in Abrupt Enlargements and Contractions*, Journal of Engineering For Power, ASME Series A, Vol.88, pp.73-81, 1966.
- [107] Voronin F.S., *Effect of contraction on the friction coefficient in a turbulent gas flow*, Inzh. Fiz. Zh., vol. 2, pp. 81-85. 1959.
- [108] Marjanović P., V.D.Đorđević, *O nekim lokalnim gubicima energije pri strujanju stišljivog fluida*, Simpozijum – Savremeni problemi mehanike fluida, pp. 162-173, Beograd, 1992.
- [109] Zucrow J.M., J.D.Hoffman, *Gas Dynamics*, Volume I, School of Mechanical Engineering of Purdue University, John Wiley and Sons, 1976.
- [110] Meir B.G., *Fundamentals of Compressible Fluid Mechanics*, Minneapolis, 2006.
- [111] Shapiro H.A., *The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow*, Vol.I, Ronald Press, New York, 1953.
- [112] Shapiro H.A., *The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow*, Vol.II, Ronald Press, New York, 1954.
- [113] Katsuhiko O., *Discrete time control system*, Second edition, University of Minnesota, Prentice Hall International, USA 1995.
- [114] Šekara B.T., M. R. Mataušek, *PID Controller Tuning Based on the Classification of Stable, Integrating and Unstable Processes in a Parameter Plane*, Frontiers in Advanced Control Systems, Ed. G.L.O. Serra, 2012.
- [115] Astrom J. K., T. Hagglund, *Advanced PID Control*, Lund University, Sweden, 2006.
- [116] Astrom J. K., R.M. Murray, *Feedback systems*, Princeton University Press, Sweden, 2009.
- [117] Astrom J. K., T. Hagglund, *PID Controllers:Theory, Design and Tuning*, Second edition, Instrument Society of America, USA 1995.
- [118] Šekara B.T., M. R. Mataušek, *Classification of dynamic processes and PID controller tuning in a parameter plane*, Journal of process control, pp. 620-626, 2011.
- [119] Marčetić D., *Mikroprocesorsko upravljanje energetskim pretvaračima*, FTN Novi Sad, 2014.
- [120] Stojić R. M., *Kontinualni sistemi automatskog upravljanja*, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [121] Liu T., F. Gao, *Enhanced IMC design of load disturbance rejection for integrating and unstable processes with slow dynamics*, ISA Transactions, pp. 239-248, USA 2011.
- [122] Liu T., W. Zhang, D. Gu, *Analytical design of two-degree-of-freedom control scheme for open-loop unstable processes with time delay*, Journal of Process Control, pp. 559-572, 2005.
- [123] Katsuhiko O., *Modern control engineering*, Third edition, University of Minnesota, Prentice Hall International, USA 1997.
- [124] Mataušek R.M., T.B.Šekara, *PID controller frequency-domain tuning for stable, integrating and unstable processes, including dead-time*, Journal of Process Control, pp. 17-27, 2011.
- [125] Šekara B.T., M. R. Mataušek, *Optimization of PID Controller Based on Maximization of the Proportional Gain Under Constraints on Robustness and Sensitivity to Measurement Noise*, IEEE transactions on automatic control, pp.184-189, 2009.
- [126] Wang G.Q., Z.Zhang, K.J.Astrom, L.S.Chek, *Guaranteed dominant pole placement with PID controllers*, Journal of Process Control, pp. 349-352, 2009.
- [127] Šekara B.T., M.R. Mataušek, *Revisiting the Ziegler–Nichols process dynamics characterization*, Journal of Process Control, pp. 360-363, 2010.
- [128] Shamsuzzoha M., M. Lee, *IMC-PID Controller Design for Improved Disturbance Rejection of Time-Delayed Processes*, Ind. Eng. Chem. Res., pp. 2077-2091, 2007.
- [129] Lee M., *Enhanced disturbance rejection for open loop unstable processes with time delay*, ISA Transactions, pp. 237-244, USA 2009.
- [130] Šekara B.T., M.B.Trifunović, V.Govedarica, *Frequency Domain Design of a Complex Controller under Constraints on Robustness and Sensitivity to Measurement Noise*, Electronics, pp. 40-44, 2011.



## **Biografija**

Ime i prezime: Aleksandar Sićović

Datum rođenja: 17.03.1971.

Mesto rođenja: Beograd, Srbija

Porodično stanje: Oženjen, dvoje dece

### **Školovanje:**

1977.-1985. Osnovna škola u Beogradu

1985.-1989. Arhitektonsko-tehnička škola u Beogradu

1990.-1998. Studije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Prištini,

odsek za Termotehniku i Termoenergetiku

diplomski rad "Dinamika sistema sa čistim vremenskim kašnjenjem" - mentor prof.

D.Lj.Debeljković - ocena 10

1998.-2006. Magistarske studije na Mašinskom fakultetu u Beogradu

magistarski rad "Dinamička analiza procesa sa raspodeljenim parametrima -

matematičko modeliranje i simulacija kotlovnih isparivača"- mentor prof.

D.Lj.Debeljković - ocena 10

1989.-1990. Redovni vojni rok

Strani jezici: engleski, nemački

### **Kretanje u poslu:**

1998.-2004. "Univerzal" AD - Beograd ("Uniteh - fabrika kompresora" AD - Smederevo)

2004.-2006. "Termoelektro"AD -Beograd (projektovanje, montaža, održavanje termoenergetskih sistema)

2004.-2006. "Sigmaprojekt"AD-Beograd (projektovanje, montaža, održavanje termotehničkih sistema)

2006.-2010. "Le-tehnika" - Kranj (razvoj i istraživanje kriogenih sistema)

2011.-2012. "Kovinotehna"-Kranj (projektovanje-konstruisanje, montaža metalnih konstrukcija)

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а \_\_\_\_\_

број индекса \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

**Потпис докторанда**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора \_\_\_\_\_

Број индекса \_\_\_\_\_

Студијски програм \_\_\_\_\_

Наслов рада \_\_\_\_\_

Ментор \_\_\_\_\_

Потписани/а \_\_\_\_\_

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис докторанда**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

---

---

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

**Потпис докторанда**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.