

# Termoakustički generator električne energije

---

**Pavičić, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2010**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:221561>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-02**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Josip Pavičić

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

## DIPLOMSKI RAD

Mentor

Doc.dr. sc. Mihajlo Firak

Josip Pavičić

Zagreb, 2010.

## **Izjava**

Izjavljujem da sam diplomski rad radio samostalno.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. M. Firaku na korisnim diskusijama i sugestijama tokom izrade rada. Zahvaljujem također i laborantu M. Šulentiću na izradi pojedinih dijelova uređaja.

U Zagrebu 10.05.2010.

Josip Pavičić

## Sažetak

Zadatak ovog diplomskog rada bio je eksperimentalnim putem istražiti utjecaj određenih konstrukcijskih rješenja i fizikalnih veličina raspoloživog prototipa termoakustičkog generatora električne energije na efikasnost konverzije toplinske u električnu energiju.

Rad je podijeljen na tri bitna dijela: teorijski, eksperimentalni i zaključak. U teorijskom dijelu su objašnjeni povijest i osnovni principi termoakustičkih uređaja, u eksperimentalnom je detaljno opisan trenutno raspoloživi prototip u Laboratoriju za energetska postrojenja fakulteta, priprema, izvedba i rezultati mjerenja s komentarima, a u zaključku su osim rezultata dane i smjernice za daljnji rad. Kao bitni rezultati ovdje se izdvajaju relativno niske startne temperature (80 °C u verziji s keramičkim poroznim elementom i vodenim hlađenjem i 150 °C u verziji s keramičkim poroznim elementom i zračnim hlađenjem) koje omogućavaju korištenje ne samo niskokonzentrirane sunčeve energije nego i otpadne topline za pogon uređaja i smjernice za poboljšanje efikasnosti konverzije mehaničke energije u električnu energiju u korištenom linearnom alternatoru.

**Ključne riječi:** termoakustika, termoakustički generator, sunčeva energija, otpadna toplina, električna energija

## Sadržaj

Popis slika .....	3
Popis oznaka.....	5
1. Uvod.....	9
2. Teorijski dio .....	10
2.1 Povijest.....	10
2.2 Dosadašnja tehnička ostvarenja.....	11
2.3 Manifestacije termoakustike.....	11
2.4 Načela termoakustičkih oscilacija.....	12
2.5 Termoakustički motor .....	13
2.6 Termoakustička toplinska pumpa.....	14
2.7 Parametri i geometrija uređaja koji utječu na efikasnost procesa .....	15
2.7.1 Akustička frekvencija i duljina rezonantne cijevi .....	15
2.7.2 Srednji tlak .....	17
2.7.3 Radni plin .....	17
2.7.4 Materijal poroznog elementa.....	17
2.7.5 Geometrija poroznog elementa .....	18
2.7.6 Izmjenjivači topline.....	19
2.7.6.1 Odvođenje topline .....	19
2.7.6.2 Dovođenje topline .....	20
2.7.7 Linearni alternator .....	20
3. Eksperimentalni dio.....	22
3.1 Plan mjerenja.....	22
3.1.1 Opis eksperimentalnog uređaja .....	22
3.1.1.1 Sklop.....	22
3.1.1.2 Osnovne komponente .....	23
3.1.1.2.1 Radni medij .....	23
3.1.1.2.2 Prihvat ulazne energije .....	23
3.1.1.2.3 Porozni element.....	24
3.1.1.2.4 Hladnjak .....	25
3.1.1.2.5 Rezonantna cijev .....	26
3.1.1.2.6 Rezonantna šupljina .....	26
3.1.1.2.7 Linearni alternator .....	27
3.1.2 Pripremni radovi prije početka mjerenja.....	28
3.1.2.1 Postolje .....	29
3.1.2.2 Električni grijač .....	29
3.1.2.2.1 Izrada električnog grijača.....	29
3.1.2.2.2 Mjerenje karakteristika električnog grijača.....	30
3.1.3 Opis mjernih uređaja i shema spajanja mjerne centrale .....	33
3.2 Mjerenja.....	35
3.2.1 Mjerenje frekvencije i razine zvuka termoakustičkog uređaja.....	35
3.2.2 Mjerenje vlastite kružne frekvencije linearnog alternatora.....	37
3.2.3 Određivanje utjecaja duljine L2 na izlazni napon.....	37
3.2.4 Određivanje optimalne duljine rezonantne cijevi.....	38
3.2.5 Mjerenje ovisnosti izlaznog napona o ulaznoj snazi.....	39
3.2.6 Mjerenje dinamičkih karakteristika, pokretanje i zaustavljanje.....	40
uređaja sa zračnim hlađenjem i keramičkim poroznim elementom.....	40
3.2.7 Mjerenje karakteristika uređaja u stacionarnom stanju sa zračnim.....	41
hlađenjem i keramičkim poroznim elementom.....	41

3.2.8 Mjerenje dinamičkih karakteristika, pokretanje i zaustavljanje.....	43
uređaja s vodenim hlađenjem i keramičkim poroznim elementom.....	43
3.2.9 Mjerenje karakteristika uređaja u stacionarnom stanju s vodenim .....	44
hlađenjem i keramičkim poroznim elementom .....	44
3.2.10 Mjerenje dinamičkih karakteristika, pokretanje i zaustavljanje.....	46
uređaja sa zračnim hlađenjem i žičanim poroznim elementom .....	46
3.2.11 Mjerenje karakteristika uređaja u stacionarnom stanju sa zračnim.....	47
hlađenjem i žičanim poroznim elementom .....	47
3.2.12 Mjerenje karakteristika uređaja uz podizanje srednjeg tlaka radnog .....	49
plina .....	49
3.2.13 Mjerenje karakteristika uređaja kod dovođenja topline .....	51
koncentriranim sunčevim zračenjem.....	51
3.2.14 Temperature po oplošju termoakustičkog generatora .....	52
4. Zaključak .....	54
Literatura .....	55

## Popis slika

Slika 1. Rijkeova i Sondhausova cijev .....	10
Slika 2. Presjek i tokovi rada i topline SETAC-a.....	11
Slika 3. Porozni elementi .....	12
Slika 4. Pojednostavljeni desnokretni termoakustički ciklus .....	13
Slika 5. Pojednostavljeni lijevokretni termoakustički ciklus .....	14
Slika 6. Raspored tlaka i brzine u rezonantnoj cijevi termoakustičkog hladnjaka.....	16
Slika 7. Materijali za izradu poroznog elementa.....	18
Slika 8. Rottova funkcija za različite tipove poroznog elementa.....	18
Slika 9. Geometrijske karakteristike poroznog elementa.....	19
Slika 10. Princip rada linearnog alternatora .....	21
Slika 11a. Sklopni crtež termoakustičkog generatora .....	22
Slika 11b. Termoakustički generator u laboratoriju.....	23
Slika 12. Prihvatnik ulazne energije.....	23
Slika 13. Keramički porozni element.....	24
Slika 14. Žičani porozni element.....	25
Slika 15a. Zračni hladnjak.....	25
Slika 15b. Vodeni hladnjak.....	26
Slika 16. Rezonantna šupljina .....	26
Slika 17. Linearni alternator.....	27
Slika 18. Presjek zavojnice linearnog alternatora .....	28
Slika 19. Magnet korišten u linearnom alternatoru (mjere u mm).....	28
Slika 20. Postolje.....	29
Slika 21. Električni grijač.....	30
Slika 22. Mjerenje karakteristika električnog grijača.....	31
Slika 23. Ovisnost struje kroz grijač o naponu dovedenom na njegove krajeve.....	31
Slika 24. Ovisnost temperature grijače žice o naponu dovedenom na krajeve grijača .....	32
Slika 25. Snaga grijača u ovisnosti o naponu na njegovim krajevima.....	32
Slika 26. Ovisnost otpora grijače žice o njenoj temperaturi .....	33
Slika 27. Shema spajanja mjerne opreme.....	34
Slika 28. Mjesta na kojima se mjere temperature .....	35
Slika 29. Shema spajanja kod mjerenja frekvencije i razine zvuka .....	36
Slika 30. Rezultati mjerenja frekvencije i razine zvuka termoakustičkog uređaja .....	36
Slika 31. Oblik i spektralna analiza signala dobivenog slobodnim vibriranjem linearnog alternatora.....	37
Slika 32. Utjecaj duljine $L_2$ na izlazni napon $U_i$ .....	38
Slika 33. Utjecaj promjene duljine rezonantne cijevi $L$ na izlazni napon $U_i$ i frekvenciju $F_i$ .	38
Slika 34. Naponski signal $U_a$ dobiven na linearnom alternatoru .....	39
Slika 35. Ovisnost izlaznog napona $U_i$ i frekvencije $F_i$ o snazi grijača $P_g$ .....	39
Slika 36. Prikaz amplitude izlaznog napona $U_i$ tijekom pokretanja i zaustavljanja uređaja sa zračnim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom.....	40
Slika 37. Prikaz temperatura tijekom pokretanja i zaustavljanja uređaja sa zračnim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom.....	41
Slika 38. Prikaz amplitude izlaznog napona $U_i$ tijekom pokretanja i stacionarnog rada uređaja sa zračnim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom.....	42
Slika 39. Prikaz temperature tijekom pokretanja i stacionarnog rada uređaja sa zračnim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom.....	42
Slika 40. Prikaz amplitude izlaznog napona $U_i$ tijekom pokretanja i zaustavljanja uređaja s vodenim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom.....	43



Slika 41. Prikaz temperatura tijekom pokretanja i zaustavljanja uređaja s vodenim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom.....	44
Slika 42. Prikaz amplitude izlaznog napona $U_i$ tijekom pokretanja i stacionarnog rada uređaja s vodenim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom .....	45
Slika 43. Prikaz temperatura tijekom pokretanja i stacionarnog rada uređaja s vodenim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom.....	45
Slika 44. Prikaz amplitude izlaznog napona $U_i$ tijekom pokretanja i zaustavljanja uređaja sa zračnim hladnjakom i žičanim poroznim elementom .....	46
Slika 45. Prikaz temperatura tijekom pokretanja i zaustavljanja rada uređaja sa zračnim hladnjakom i žičanim poroznim elementom .....	47
Slika 46. Prikaz amplitude izlaznog napona $U_i$ tijekom pokretanja i stacionarnog rada uređaja sa zračnim hladnjakom i žičanim poroznim elementom .....	48
Slika 47. Prikaz temperatura tijekom pokretanja i stacionarnog rada uređaja sa zračnim hladnjakom i žičanim poroznim elementom .....	48
Slika 48. Signal sa senzora tlaka .....	49
Slika 49. Povećanje tlaka u ispitnom uređaju .....	50
Slika 50. Amplituda napona $U_i$ tijekom promjene tlaka radnog medija .....	50
Slika 51. Termoakustički generator u radu sa koncentriranim sunčevim zračenjem.....	51
Slika 52. Amplituda napona $U_i$ tijekom rada sa dovođenjem topline koncentriranim sunčevim zračenjem .....	51
Slika 53. Temperature tijekom rada sa dovođenjem topline koncentriranim sunčevim zračenjem .....	52
Slika 54. Mjerna mjesta temperatura na oplošju termoakustičkog generatora.....	52

## Popis oznaka

$D_s$ ,	m	- Promjer poroznog elementa
$X_s$ ,	m	- Udaljenost poroznog elementa od stijenke
$L_s$ ,	m	- Duljina poroznog elementa
$2y_0$ ,	m	- Razmak između stijenki poroznog elementa
$F_i$ ,	Hz	- Frekvencija izlaznog napona
$L_3$	m	- Duljina vidljiva iz Slike 11a.
$U_g$ ,	V	- Napon na električnom grijaču
$P_g$ ,	W	- Snaga električnog grijača
$I_g$ ,	A	- Struja kroz električni grijač
$T_g$ ,	°C	- Temperatura na električnom grijaču
$R_g$ ,	$\Omega$	- Otpor električnog grijača
$F_z$ ,	Hz	- Frekvencija zvuka
$L_a$ ,	dB	- Razina zvuka
$U_i$ ,	V	- Amplituda napona na linearnom alternatoru
$U_a$ ,	V	- Naponski signal iz linearnog alternatora
$p(x,t)$ ,	Pa	- Tlak na položaju x u vremenu t
$p_m$ ,	Pa	- Srednji tlak radnog medija
$p_1$ ,	Pa	- Amplituda oscilacija tlaka
$e$ ,	-	- Baza prirodnog logaritma
$\omega$ ,	Hz	- Kružna frekvencija akustičkih oscilacija
$\delta_k$ ,	m	- Dubina toplinskog prodiranja

$a$ ,	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	- Koeficijent temperaturne vodljivosti
$\lambda$ ,	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	- Koeficijent toplinske vodljivosti
$\rho$ ,	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	- Gustoća radnog medija
$c_p$ ,	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	- Specifični toplinski kapacitet
$\pi$ ,	-	- Ludolfov broj
$Q_H$ ,	J	- Dovedena toplina kružnom procesu
$Q_C$ ,	J	- Odvedena toplina od kružnog procesa
$W$ ,	J	- Mehanički rad kružnog procesa
$\eta$ ,	-	- Termodinamički stupanj iskoristivosti
$T_C$ ,	°C	- Temperatura rashladnog toplinskog spremnika
$T_H$ ,	°C	- Temperatura ogrjevnog toplinskog spremnika
$\eta_{\text{ref}}$ ,	-	- Termodinamički stupanj iskoristivosti hladnjaka
$\eta_{\text{hp}}$ ,	-	- Termodinamički stupanj iskoristivosti grijalice
$\eta_C$ ,	-	- Termodinamički stupanj iskoristivosti Carnotovog procesa
$\eta_R$ ,	-	- Relativni stupanj iskoristivosti
$c$ ,	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	- Brzina zvučnog vala u radnom mediju
$f$ ,	Hz	- Akustička frekvencija
$\kappa$ ,	-	- Izentropski eksponent
$R_m$ ,	$\frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$	- Molarna plinska konstanta
$T$ ,	K	- Termodinamička temperatura
$M$ ,	-	- Molarna masa plina

$r_h$ ,	m	- Hidraulički radijus
$\gamma$ ,	m	- Amplituda pomaka čestica radnog medija na mjestu hladnjaka
$u_h$ ,	$\frac{m}{s}$	- Amplituda brzine čestica radnog medija na mjestu hladnjaka
$U$ ,	V	- Napon induciran u vodiču
$v$ ,	$\frac{m}{s}$	- Relativna brzina između vodiča i magneta
$B$ ,	T	- Gustoća magnetskog polja
$l$ ,	m	- Duljina vodiča
$\alpha$ ,	rad	- Kut između smjera gibanja vodiča i smjera magnetskog polja
$N$ ,	-	- Broj zavoja zavojnice
$\phi$ ,	Wb	- Magnetski tok
$t$ ,	s	- Vrijeme
$L$ ,	m	- Duljina rezonantne cijevi vidljiva iz Slike 11a.
$L2$ ,	m	- Geometrijska karakteristika termoakustičkog generatora vidljiva iz Slike 11a.
$L3$ ,	m	- Geometrijska karakteristika termoakustičkog generatora vidljiva iz Slike 11a.
$Dg$ ,	m	- Promjer grijaće žice
$T1$ ,	°C	- Temperatura vidljiva is Slika 27. i 28.
$T2$ ,	°C	- Temperatura vidljiva is Slika 27. i 28.
$T3$ ,	°C	- Temperatura vidljiva is Slika 27. i 28.
$T4$ ,	°C	- Temperatura vidljiva is Slika 27. i 28.
$T5$ ,	°C	- Temperatura okolišnog zraka
$Lg$ ,	m	- Duljina žice grijača

$R_p$ ,	$\Omega$	- Specifični otpor kantala
$R_s$ ,	$\Omega$	- Otpor mjernog otpornika za mjerenje struje
$p_r$ ,	Pa	- Tlak u rezonantnoj šupljini
$U_s$ ,	V	- Pad napona na mjernom otporniku
$p_{ref}$ ,	Pa	- Referentna amplituda oscilacija tlaka
$p_s$ ,	PSI	- tlak mjeren senzorom tlaka izražen u PSI
$p_{sp}$ ,	Pa	- tlak mjeren senzorom tlaka izražen u paskalima
$U_r$ ,	V	- napon dobiven sa senzora tlaka
$U_{min}$ ,	V	- minimalni napon koji daje senzor tlaka

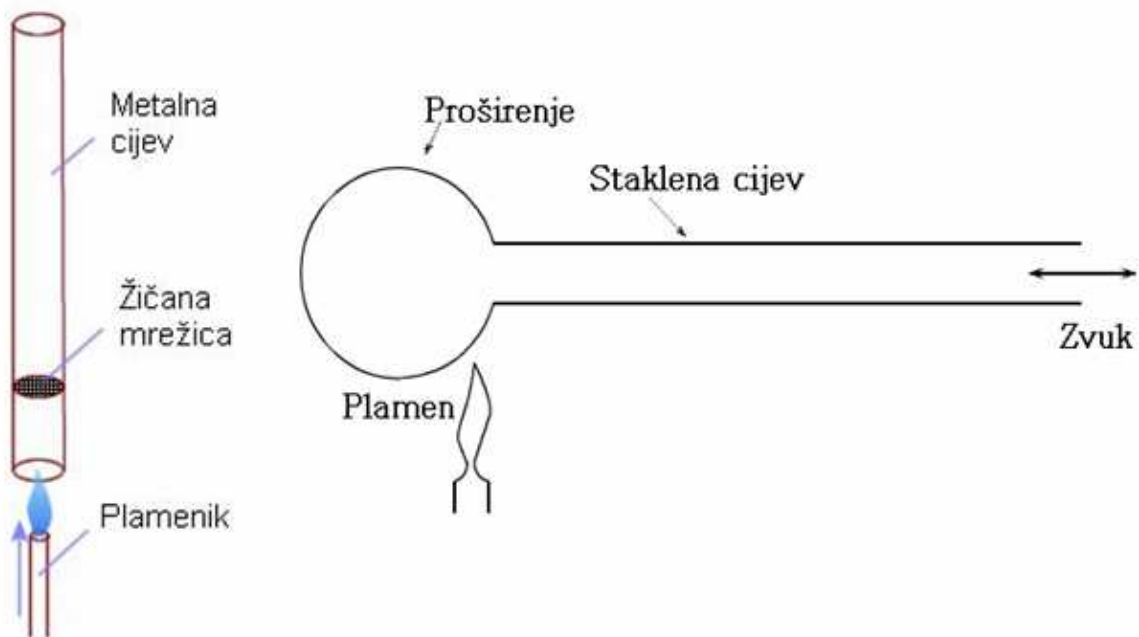
## 1. Uvod

Akustika je znanstvena disciplina koja proučava pojave vezane uz nastanak i djelovanje zvuka. Zvuk nastaje titranjem čestica fluida oko ravnotežnog položaja. Titranje čestica uzrokuje oscilaciju tlaka, gustoće, temperature i volumena oko ravnotežnog položaja. Termoakustički efekt je proces pretvorbe toplinske energije u energiju zvuka i obrnuto uz pomoć navedenih oscilacija. Termoakustičke uređaje karakterizira jednostavna konstrukcija i mali broj pokretnih dijelova dok je matematički opis njihova rada vrlo složen. Termoakustički generator na kojemu su obavljani eksperimenti napravljen je u Laboratoriju za energetska postrojenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje radi proučavanja ovog relativno novog i neistraženog područja. U ovom radu se eksperimentalnim putem istražilo kako određene fizikalne veličine i konstrukcijska rješenja djeluju na pretvorbu toplinske energije u električnu.

## 2. Teorijski dio

### 2.1 Povijest

Termoakustičke oscilacije poznate su više od dva stoljeća. Byron Higgins 1777. godine primjećuje i proučava akustične oscilacije u dugačkim cijevima grijanim vodikovim plamenom. Tada je ta pojava nazvana pjevajućom vatrom. Godine 1859. Rijke otkriva pojavljivanje snažnih akustičnih oscilacija kada ugrišanu žičanu mrežicu postavi u cijev zatvorenu na jednom kraju; također primjećuje da su oscilacije jače ako je mrežica postavljena na jednoj četvrtini duljine cijevi. 1850. godine Sondhaus eksperimentalno proučava pojavu koju staklari primjećuju već stoljećima - kada vruću staklenu bocu hlade u

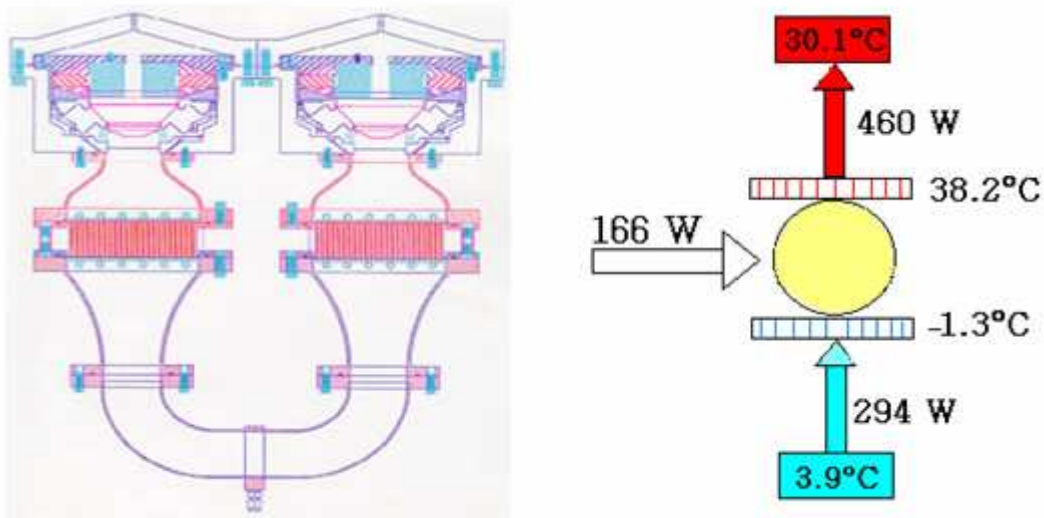


**Slika 1. Rijkeova i Sondhausova cijev**

vodi pojavljuje se zvuk. Godine 1896. Lord Rayleigh objašnjava Sondhausov efekt i daje definiciju termoakustičkih oscilacija: „Ako se zraku dovodi toplina u trenutku najvećeg zgušnjavanja ili odvodi u trenutku najvećeg razrijeđenja, pojavljuju se vibracije.“ Iz definicije je vidljivo da je Rayleigh ispravno povezoao termoakustiku s dovođenjem topline i promjenom gustoće. Još jedan oblik Sondhaus-ovih oscilacija primjećen je u kriogenim spremnicima. Taconis primjećuje spontane oscilacije kada uranja cijev sa zatvorenim jednim krajem u tekući helij. Formalna teoretska proučavanja termoakustike počinju 1949. godine Kramerovim analiziranjem Taconisovih oscilacija. 1969. godine Rott nastavlja Kramerov rad i daje linearnu teoriju termoakustike. Obuhvatan pregled poznatih znanja iz termoakustike objavljuje 1988. godine G. W. Swift u svojoj knjizi Termoakustiki motori [1].

## 2.2 Dosadašnja tehnička ostvarenja

Prvi praktični termoakustički uređaji razvijeni su ranih osamdesetih na LANL (Los Alamos National Laboratory). Tada počinje veliko zanimanje istraživača za termoakustiku kao novi oblik toplinskih motora i pumpi. Većina termoakustičkih uređaja napravljena je na LANL, NPS (Naval Postgraduate School) i Pennsylvania State University. Dva primjera termoakustičkih hladnjaka izrađena su na NPS-u, jedan od njih je nazvan STAR (The Space Thermoacoustic Refrigerator), a drugi SETAC (Shipboard Electronics Thermoacoustic Cooler). STAR ima mogućnost pumpati 4 W topline i može načiniti temperaturnu razliku od



Slika 2. Presjek i tokovi rada i topline SETAC-a

osamdeset Kelvina. Godine 1992. STAR je lansiran na svemirskoj letjelici Discovery. SETAC je instaliran na vojni brod USS Deyo gdje je testiran na hlađenju elektroničkih sklopova radara, rashladna snaga mu iznosi do 400 W ovisno o temperaturnoj razlici. Većina truda na LANL-u ulaže se u razvoj velikih termoakustičkih motora koji služe za pogon električnih generatora i hladnjaka za hlađenje zemnog plina. Jedan takav primjer je TADOPT (Thermoacoustic Driven Orifice Pulse Tube Refrigeration), jedinstven uređaj koji ima mogućnost postizanja kriogenih temperatura (115K) bez pokretnih dijelova. Rashladna snaga mu iznosi 2 kW.

## 2.3 Manifestacije termoakustike

Termoakustičke uređaje moguće je podijeliti kao i ostale toplinske strojeve na lijevokretne i desnokretne. Desnokretnim uređajima dovodimo toplinu. Dio dovedene topline pretvara se u mehaničku energiju, dok se preostali dio topline odvodi preko izmjenjivača. Dobivena mehanička energija ima oblik akustičkih oscilacija koje je moguće u linearnom alternatoru pretvoriti u električnu energiju, ili mogu biti korištene za pogon lijevokretnog termoakustičkog uređaja. Ljevokretnim termoakustičkim uređajima dovodi se mehanička energija u obliku akustičkih oscilacija preko zvučnika, klipnog mehanizma ili desnokretnog termoakustičkog uređaja. Mehanička energija izaziva prijenos topline s hladnog izmjenjivača na topli, što je osnova za termoakustički hladnjak ili dizalicu topline.



## 2.4 Načela termoakustičkih oscilacija

Akustika je znanstvena disciplina koja proučava pojave vezane uz nastanak i djelovanje mehaničkih vibracija (zvuka) u plinovima i kapljevinama. Zvuk predstavlja oscilacije tlaka u stlačivim medijima. Uz oscilacije tlaka dolazi i do oscilacija volumena, gustoće, temperature i položaja čestica medija. Kod stojnih valova tlak i pomak čestice su u fazi, valni brijeg ne putuje prostorom, ali mu se amplituda mijenja u vremenu. Kod putujućih valova čestice se stalno gibaju pomalo u jednom smjeru.

Oscilacije tlaka u stojnom valu određene frekvencije mogu se matematički prikazati u kompleksnom obliku kao:

$$p(x,t) = p_m + \text{Re} \left[ p_1(x) \cdot e^{i\omega t} \right] \quad (1)$$

$p_m$  - srednji tlak,

Re - označava realni dio kompleksnog broja,

$p_1$  - amplituda oscilacija tlaka,

$\omega = 2\pi f$  - kružna frekvencija akustičkih oscilacija.

f – frekvencija akustičkih oscilacija

Termoakustika proučava one pojave u kojima je prijenos topline između plina i graničnih stijenki relevantan. Putujući lijevo–desno plin se komprimira odnosno ekspandira, tijekom kompresije temperatura mu raste, a tijekom ekspanzije temperatura mu pada. U blizini stijenke izmjenjuje se toplina između čestica plina i stijenke. Smjer toplinskog toka ovisi o lokalnim temperaturama.



**Slika 3. Porozni elementi**

Osnovni dio termoakustičkog uređaja je porozni element (Slika 3), on se sastoji od niza kanalića koji osiguravaju malu udaljenost stijenke od svake čestice plina. Toplinski tok prenesen s poroznog elementa na čestice plina i obrnuto ovisi o udaljenosti čestice od poroznog elementa. Čestice koje su jako blizu poroznom elementu izotermno izmjenjuju toplinu s njim i na čitavom putu imaju jednaku temperaturu kao i porozni element. Čestice koje su jako udaljene od poroznog elementa ne izmjenjuju toplinu direktno s njim nego ih

zvučni val adijabatski komprimira i ekspandira. Bitnu ulogu imaju čestice koje su udaljene toliko da toplina prodire do njih, a nisu izotermne s poroznim elementom.

Ta udaljenost se naziva dubina toplinskog prodiranja  $\delta_k$  i definira se:

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \quad (2)$$

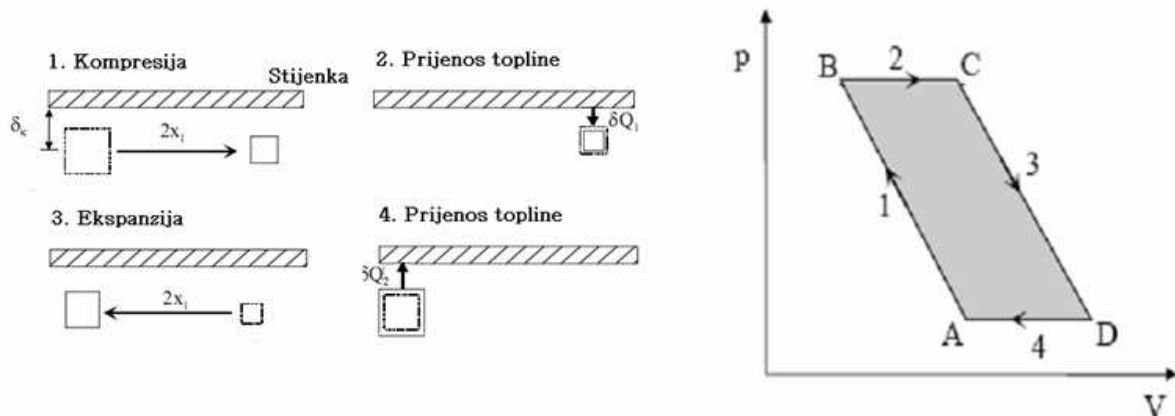
gdje je

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (3)$$

Ova udaljenost se može predočiti kao udaljenost na koju toplina može difundirati u vremenu  $\frac{2\pi}{\omega}$ . Presjek pojedinog kanala poroznog elementa treba biti proporcionalan dubini toplinskog prodiranja tako da svaka čestica fluida ima stijenku u svojoj blizini. Pojedina čestica fluida prenosi toplinu na udaljenosti reda veličine milimetra te ju „predaje“ sljedećoj čestici, tako da prijenos topline ide po principu „lanca“. Na krajevima poroznog elementa nalaze se izmjenjivači topline koji dovode, odnosno odvođe toplinu (Slika 6).

## 2.5 Termoakustički motor

Kada se na poroznom elementu stvori temperaturni gradijent tako da se na jednom njegovom kraju dovodi toplina  $Q_H$ , a na drugom kraju odvođi  $Q_C$ , dolazi do stvaranja i održavanja akustičkih oscilacija na sljedeći način:



**Slika 4. Pojednostavljeni desnokretni termoakustički ciklus**

1. Zvučni val komprimira česticu i pomiče ju u zonu više temperature stijenke, uslijed kompresije dolazi do porasta temperature
2. Ako je temperaturni gradijent duž stijenke dovoljno velik, komprimirana čestica povišene temperature preuzima toplinu od još toplije stijenke
3. Zvučni val pomiče česticu u zonu manje temperature stijenke, pri tom pomaku čestici se povećava volumen i pada temperatura
4. Čestica predaje toplinu hladnijoj stijenci na početnom položaju i time završava ciklus

Dovođenje topline komprimiranoj čestici, što povećava njenu temperaturu, i odvođenje topline od ekspanzirane čestice, što smanjuje njenu temperaturu, ima isti učinak koji bi imao jači zvučni val. Na taj način veliki temperaturni gradijent duž stijenke podržava odnosno pojačava zvučne valove.

Opisani termodinamički ciklus odgovara Stirlingovom ciklusu, akustički val preuzima ulogu oba klipa Stirlingova motora. Na taj način moguće je stvarati i pojačavati zvučne valove koji predstavljaju jedan oblik mehaničke energije.

Dobiveni rad:

$$W = Q_H - Q_C \quad (3)$$

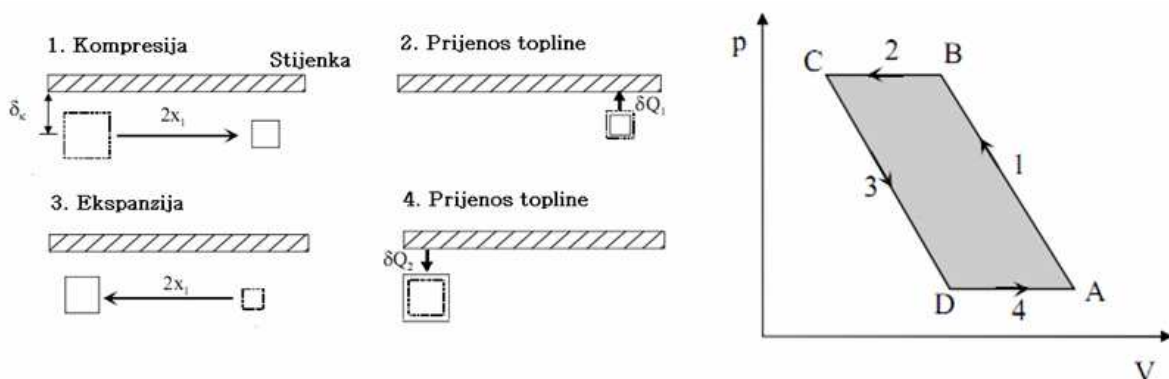
Termodinamički stupanj iskoristivosti:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} \quad (4)$$

## 2.6 Termoakustička toplinska pumpa

Zadatak toplinske pumpe je odvesti toplinu  $Q_C$  s toplinskog spremnika niže temperature  $T_C$ , i dovesti toplinu  $Q_H$  na toplinski spremnik više temperature  $T_H$ . Da bi se ostvario ovaj proces potrebno je dovoditi mehanički rad  $W$ . Hladnjaci i grijalice imaju različite zadatke. Zadatak hladnjaka je održavanje nekog prostora na temperaturi ispod okolišne temperature, dok grijalice održavaju prostor na temperaturi većoj od okolišne.

Termoakustička toplinska pumpa se sastoji od jednakih dijelova kao i motor, jedina razlika je u tome što se ovom uređaju dovodi mehanička energija u obliku akustičkih valova, a na stijenci poroznog elementa nastaje temperaturni gradijent.



Slika 5. Pojednostavljeni lijevokretni termoakustički ciklus

1. Zvučni val komprimira i pomiče česticu, uslijed kompresije dolazi do porasta temperature
2. Čestica predaje toplinu stijenci
3. Zvučni val ekspanzira i pomiče česticu na početni položaj, pri tome dolazi do pada temperature

4. Čestica preuzima toplinu sa stijenke i time završava ciklus

Dovedena toplina grijanom prostoru:

$$Q_H = Q_C + W \quad (5)$$

Termodinamički stupanj iskoristivosti hladnjaka:

$$\eta_{\text{ref}} = \frac{Q_C}{W} \quad (6)$$

Termodinamički stupanj iskoristivosti grijalice:

$$\eta_{\text{hp}} = \frac{Q_H}{W} \quad (7)$$

Radi jednostavnijeg vredenovanja dobrote procesa prikladno je uvesti relativni stupanj iskoristivosti u odnosu na iskoristivost Carnotovog procesa.

Stupanj iskoristivosti Carnotovog procesa:

$$\eta_C = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (8)$$

Relativni stupanj iskoristivosti:

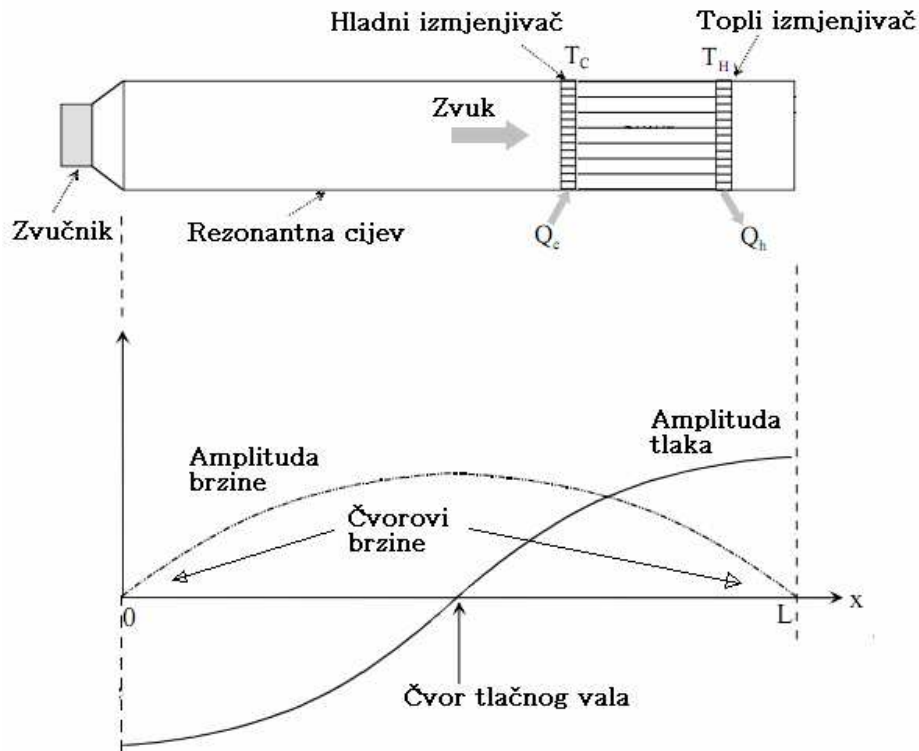
$$\eta_R = \frac{\eta}{\eta_C} \quad (9)$$

Prototipni uređaji razvijeni u LANL-u imaju relativne stupnjeve iskoristivosti do 30%.

## ***2.7 Parametri i geometrija uređaja koji utječu na efikasnost procesa***

### **2.7.1 Akustička frekvencija i duljina rezonantne cijevi**

Frekvencija akustičkog stojnog vala određena je vrstom plina, duljinom rezonantne cijevi i graničnim uvjetima. Duljina rezonantne cijevi može biti jednaka četvrtini ili polovini valne duljine. Ako je rezonantna cijev četvrtinska na jednom njenom kraju se nalazi čvor brzine, a na drugom čvor tlaka. Zatvoreni kraj određuje čvor brzine, dok čvor tlaka mora biti otvoren. Kod rezonantne cijevi duljine pola valne duljine (Slika 6.) oba kraja cijevi su zatvorena što znači da se na krajevima stvaraju čvorovi brzine, a čvor tlaka nalazi se u sredini.



**Slika 6. Raspored tlaka i brzine u rezonantnoj cijevi termoakustičkog hladnjaka**

Odnos između duljine rezonantne cijevi  $L$  i akustičke frekvencije  $f$ :

$$L = \frac{c}{2f} \text{ - za poluvalnu rezonantnu cijev} \quad (10)$$

$$L = \frac{c}{4f} \text{ - za četvrtvalnu rezonantnu cijev} \quad (11)$$

$c$  - predstavlja brzinu zvučnog vala koja je određena jednačinom:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R_m \cdot T}{M}} \quad (12)$$

$\kappa$  - izentropski eksponent

$R_m$  - molarna plinska konstanta

$T$  - termodinamička temperatura

$M$  - molarna masa plina

Gustoća snage termoakustičkih uređaja je proporcionalna akustičkoj frekvenciji, što daje prednost višim frekvencijama, dok s druge strane pretvorba zvučnih valova u mehaničke vibracije zahtijeva niže frekvencije.

Drugi utjecajan faktor na izbor frekvencije je dubina toplinskog prodiranja  $\delta_k$  (jednačina 2) koja je obrnuto proporcionalna drugom korijenu frekvencije, što znači da veće frekvencije zahtijevaju manji razmak između površina poroznog elementa i kompliciraju njegovu izradu.

### 2.7.2 Srednji tlak

Gustoća snage termoakustičnih uređaja proporcionalna je srednjem tlaku  $p_m$ , što znači da uređaj treba raditi na najvećem tlaku koji dopušta čvrstoća konstrukcije. Toplinska dubina prodiranja  $\delta_k$  obrnuto je proporcionalna korijenu srednjeg tlaka, tako da visoki srednji tlak uzrokuje malu dubinu prodiranja, što zahtijeva smanjenje razmaka u poroznom elementu te komplicira njegovu izradu.

### 2.7.3 Radni plin

Termoakustički sustavi obično kao radni plin koriste helij ili mješavinu helija i nekog plemenitog plina, najčešće argona i ksenona. Razlog za takav izbor leži u povećanju gustoće snage što je Swift [1] pokazao bezdimenzijskom analizom. Snaga uređaja proporcionalna je umnošku srednjeg tlaka  $p_m$  i brzine zvuka  $c$ .

S obzirom na to da helij ima najveću brzinu zvuka i temperaturnu vodljivost od svih inertnih plinova nameće se kao logičan izbor.

Povećanje brzine zvuka povećava frekvenciju bez smanjivanja duljine rezonantne cijevi.

$$f = \frac{c}{L} \quad (13)$$

Velika temperaturna vodljivost povećava dubinu toplinskog prodiranja (2) te zahtijeva veće razmake između stijenki poroznog elementa što pojednostavljuje njegovu izradu.

Helij kao radni plin daje termoakustičkim hladnjacima neke prednosti u odnosu na klasične hladnjake:

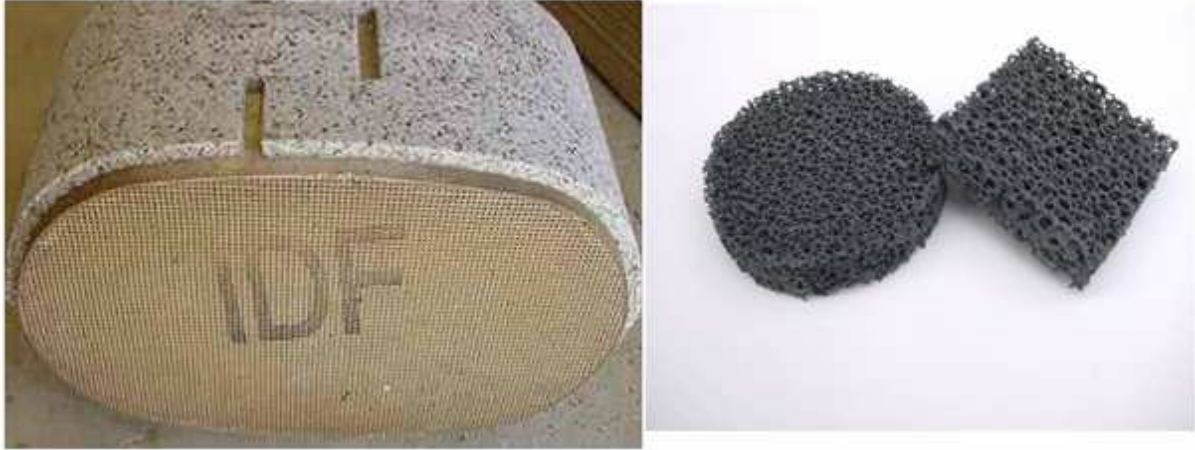
- nema potencijala globalnog zagrijavanja zbog emisije helija
- helij ne uništava ozon
- helij nije otrovan i nije zapaljiv.

### 2.7.4 Materijal poroznog elementa

Provođenje topline kroz porozni element u aksijalnom smjeru ima negativan utjecaj na djelovanje uređaja, tako da treba izabrati materijal sa što manjim koeficijentom vodljivosti topline, dok toplinski kapacitet mora biti veći od toplinskog kapaciteta radnog plina da bi temperatura poroznog elementa bila stacionarna.

Ovisno o namjeni uređaja materijal poroznog elementa mora biti otporan na visoke temperature i mora dobro apsorbirati toplinska zračenja.

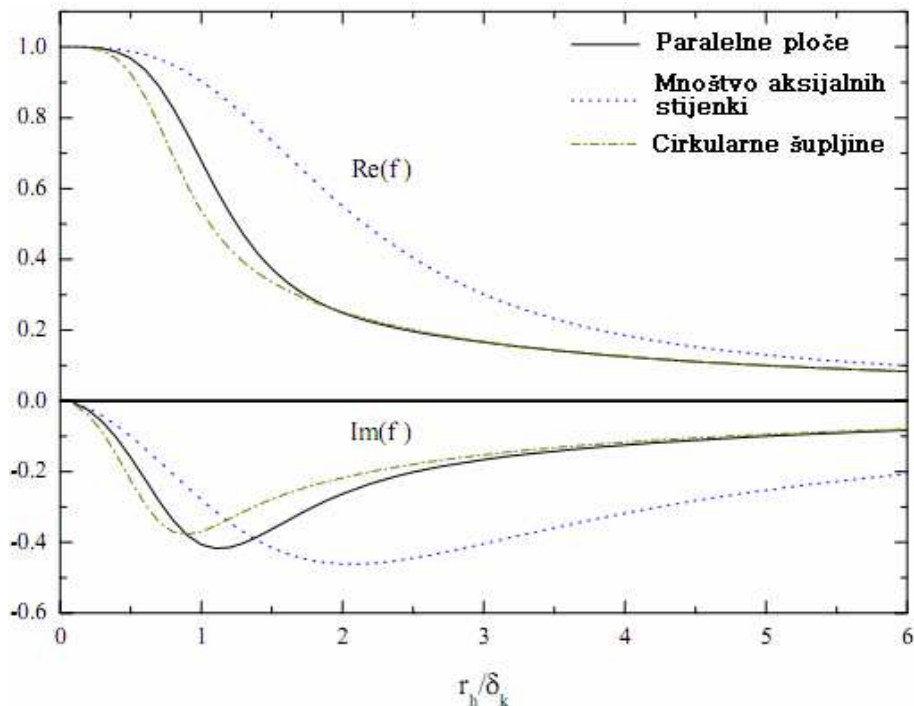
Porozni elementi najčešće se izrađuju od keramičkih materijala, metalnih pjena, nehrđajućeg čelika (Slika 7.), a moguće je koristiti i polimerne materijale kada temperature to dopuštaju.



Slika 7. Materijali za izradu poroznog elementa

### 2.7.5 Geometrija poroznog elementa

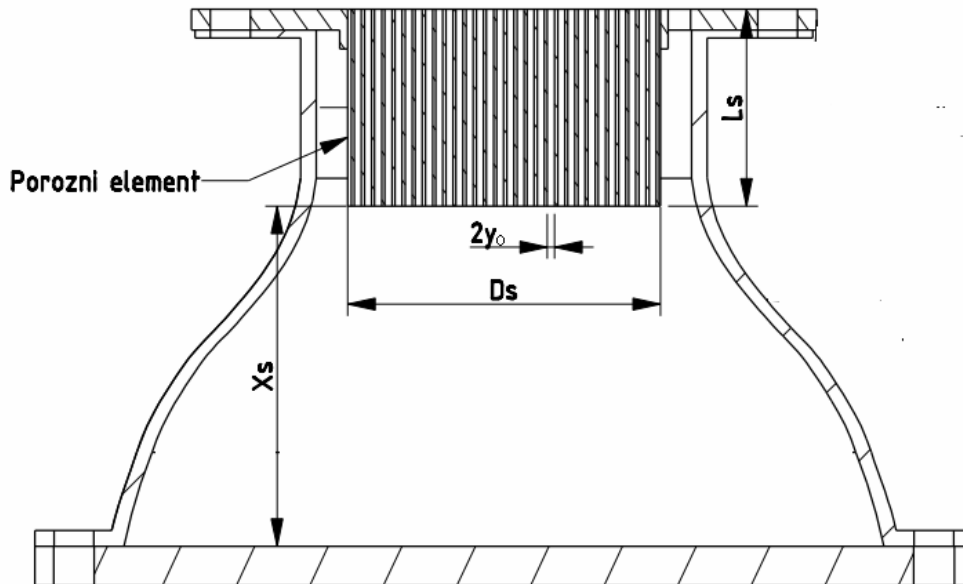
Porozni elementi mogu imati kanale različitih geometrija, najčešće su to paralelne ploče, cirkularne ili nepravilne šupljine. Za određene geometrije postoje grafički prikazi Rottovih funkcija (Slika 8.) [2]. Ova funkcija prikazuje energetski tok u smjeru širenja valova u odnosu na omjer hidrauličkog radijusa  $r_h$  i dubine toplinskog prodiranja  $\delta_k$ . Hidraulički radijus definiran je kao četiri omjera između poprečnog presjeka i opsega kanala. Snaga uređaja proporcionalna je apsolutnoj vrijednosti imaginarnog dijela Rottove funkcije.



Slika 8. Rottova funkcija za različite tipove poroznog elementa

Bitan utjecaj na rad uređaja ima pozicija poroznog elementa ( $X_s$ ) u odnosu na čvorove brzine i tlaka. Ako se porozni element nalazi na čvoru brzine, tada nema pomaka čestica i zbog toga

nije moguće prenositi toplinu i pojačavati akustičke vibracije. Druga krajnost je smještaj poroznog elementa u čvor tlaka. Na ovoj poziciji pomak čestica je maksimalan, ali izostaje kompresija i ekspanzija čestica, što opet uzrokuje izostanak prijenosa topline i akustičkih vibracija. Idealno mjesto za smještaj poroznog elementa je polovica udaljenosti između čvorova tlaka i brzine.



Slika 9. Geometrijske karakteristike poroznog elementa

### 2.7.6 Izmjenjivači topline

Izmjenjivači topline su neophodni da bi se dovodio i odvodio toplinski tok na porozni element i s njega. Dizajn izmjenjivača topline ima bitnu ulogu u radu termoakustičkog uređaja. Dosad je napravljeno malo istraživanja u području izmjene topline u oscilirajućim strujanjima sa srednjom brzinom nula, tako da ne postoji praktični inženjerski proračun potrebnih izmjenjivača.

#### 2.7.6.1 Odvođenje topline

Oscilirajući radni medij predaje toplinu unutarnjem dijelu izmjenjivača. Promjer unutarnjeg izmjenjivača je određen promjerom rezonantnog kućišta, razmak između kanala sličan je razmaku u poroznom elementu i definira ga dubina toplinskog prodiranja. Debljina izmjenjivača u smjeru strujanja treba biti jednaka dvostrukoj amplitudi pomaka čestica  $\gamma$  (14).

$$\gamma = \frac{u_h}{\omega} \quad (14)$$

$u_h$  - amplituda brzine na mjestu hladnjaka

$\gamma$  - amplituda pomaka na mjestu hladnjaka



Unutarnji dio izmjenjivača stvara otpore strujanju radnog medija što uzrokuje pad tlaka i gubitak mehaničke energije. Konstrukcija mora osigurati strujanje sa što manjim padom tlaka u aksijalnom smjeru i maksimalnim prijenosom topline u radijalnom smjeru.

Postoji nekoliko različitih rješenja odvođenja topline sa unutarnjeg dijela izmjenjivača:

1. Kondukcijom na rebra koja toplinu predaju okolišnom zraku
2. Strujanjem rashladne tekućine oko i/ili kroz unutarnji dio izmjenjivača
3. Plinskim diodama se uspostavi strujanje radnog medija izvan uređaja te se nakon hlađenja taj medij uvodi natrag. Plinske diode imaju svojstvo da u jednom smjeru imaju mali otpor strujanja, a u suprotnom smjeru veliki. Zbog osciliranja položaja čestica, u plinskim diodama se stvara komponenta strujanja u jednom smjeru koja omogućava protok radnog medija kroz vanjski izmjenjivač topline.

### 2.7.6.2 Dovodjenje topline

Ako je toplinski spremnik plin ili kapljevina toplinu je moguće dovoditi uređajima koji su opisani u poglavlju 2.7.6.1 Odvođenje topline.. U slučaju da se toplina dovodi koncentriranim sunčevim zračenjem tada je potrebno postaviti u procesu topliju stranu poroznog elementa u fokus zrcala.

### 2.7.7 Linearni alternator

Linearni alternator je uređaj koji pravocrtne mehaničke vibracije pretvara u električnu energiju.

Ako vodič i magnetsko polje imaju relativnu brzinu između sebe, u vodiču se stvara elektromotorna sila, odnosno napon na njegovim krajevima. Relativno gibanje između vodiča i magnetskog polja moguće je ostvariti na jedan od načina:

- pravocrtnim gibanjem vodiča u magnetskom polju
- pravocrtnim gibanjem magneta s obzirom na vodič
- rotacijom vodiča u magnetskom polju
- rotacijom magnetskog polja s obzirom na vodič
- promjenom struje u zavojnici smještenoj u blizini vodiča.

Za elektromagnetsku indukciju može se reći da je pojava u kojoj se mehanička energija pretvara u električnu uz pomoć magnetskog polja. Prema Faradayevom zakonu indukcije elektromotorna sila odnosno napon  $U$  induciran u vodiču duljine  $l$  koji se giba relativnom brzinom  $v$  u odnosu na magnetsko polje gustoće  $B$ , iznosi:

$$U = v \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (15)$$

$\alpha$  - kut između smjera gibanja vodiča i smjera magnetskog polja

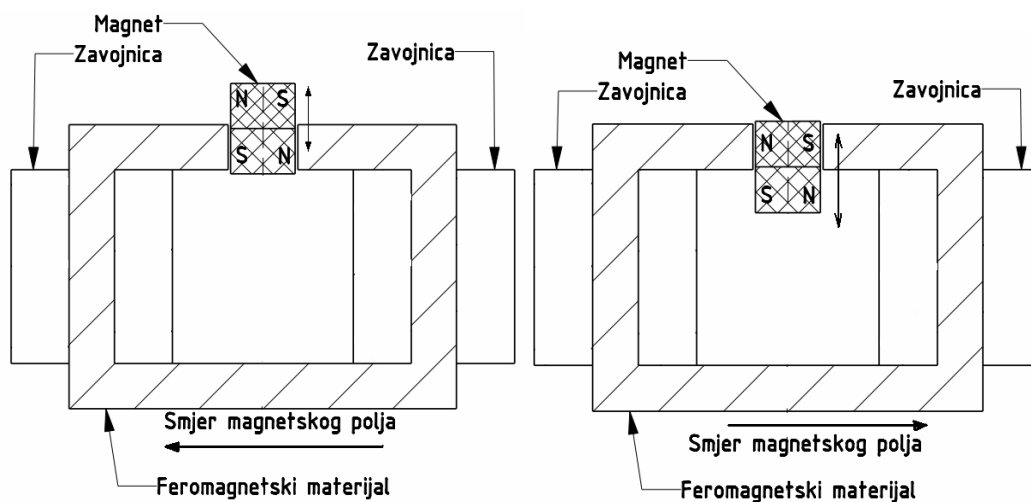
Ako se umjesto ravnog vodiča koristi zavojnica sa  $N$  zavoja u magnetskom toku  $\phi$  tada izraz za inducirani napon glasi:

$$U = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (16)$$

Kod linearnog alternatora postoje tri mogućnosti promjene magnetskog polja u vodiču - moguće je gibati magnete, vodiče ili prekidati magnetsko polje materijalom male

permeabilnosti. Najčešća izvedba je s pokretnim magnetima unutar zavojnice. Magneti se gibaju zato što su dio vibracijskog sustava kojeg pobuđuju zvučni valovi.

Da bi se dobili maksimalni mogući pomaci magneta, vlastita kružna frekvencija vibracijskog sustava linearnog alternatora treba biti usklađena s frekvencijom zvuka koji se proizvodi u termoakustičkom uređaju. Na Slici 10. je prikazan princip rada linearnog alternatora s pomičnim magnetima koji su dio vibracijskog sustava. Amplituda pomaka magneta mora biti tolika da se smjer magnetskog polja mijenja za  $180^\circ$  pri svakom titraju.



**Slika 10. Princip rada linearnog alternatora**

Linearni alternatori u dobro usklađenim sustavima imaju stupanj iskoristivosti pretvorbe akustičke energije u električnu do 80% [4].

### 3. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio rada izvodi se u Laboratoriju za energetska postrojenja. Na prototipni termoakustički generator razvijen i izrađen u laboratoriju spaja se mjerna oprema. Cilj mjerenja je utvrditi posljedice promjena komponenti uređaja i nabrojanih fizikalnih veličina na pretvorbu toplinske energije u električnu.

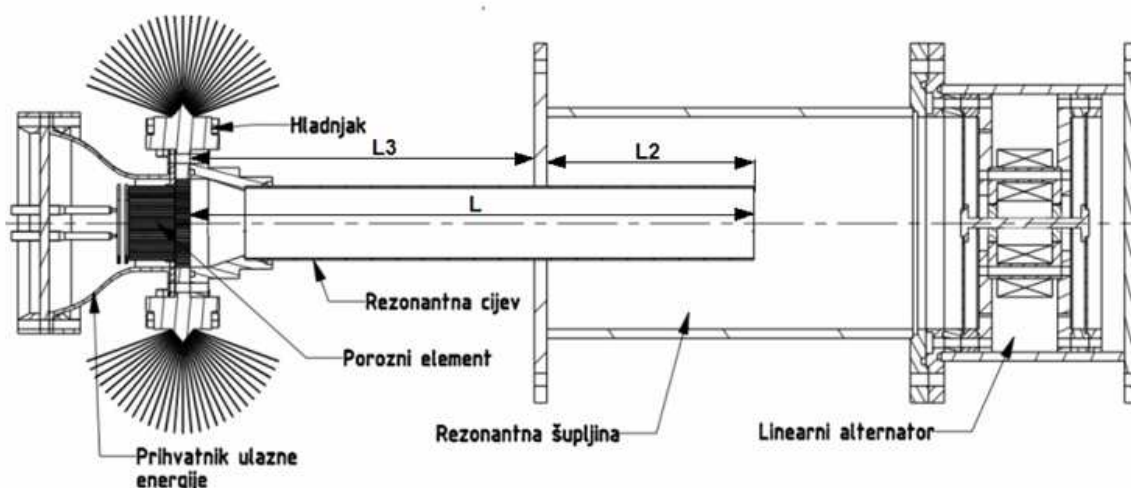
#### 3.1 Plan mjerenja

Mjerenja su podijeljena u nekoliko koraka:

1. Odvajanje linearnog alternatora od termoakustičkog uređaja i mjerenje karakteristika stvorenog zvuka. Promjena duljine rezonantne cijevi i promatranje utjecaja
2. Mjerenje frekvencije slobodnih vibracija linearnog alternatora
3. Sklapanje termoakustičkog generatora, ugradnja električnog grijača te mjerenje ovisnosti izlaznog napona o duljini rezonantne cijevi. Nakon pronalaska optimalne duljine sva ostala mjerenja izvode se s tom cijevi
4. Mjerenje dinamičkih i kvazistacionarnih karakteristika s radnim medijem na atmosferskom tlaku
5. Mjerenje dinamičkih i kvazistacionarnih karakteristika s radnim medijem na povišenom tlaku
6. Zamjena električnog grijača i njegovih nosača s prozirnim staklom te mjerenje karakteristika uređaja kod dovođenja topline koncentriranim sunčevim zračenjem.

#### 3.1.1 Opis eksperimentalnog uređaja

##### 3.1.1.1 Sklop



Slika 11a. Sklopni crtež termoakustičkog generatora



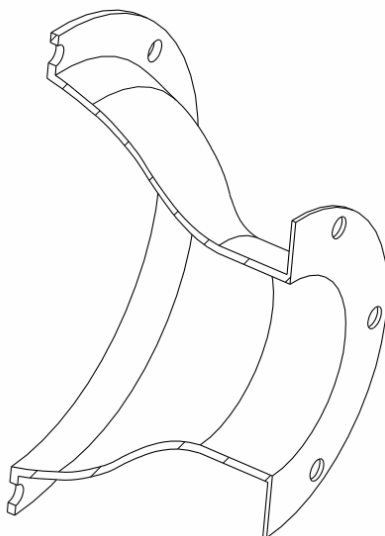
**Slika 11b. Termoakustički generator u laboratoriju**

### **3.1.1.2 Osnovne komponente**

#### **3.1.1.2.1 Radni medij**

Za radni plin na ispitnom uređaju koristi se zrak, razlog za taj izbor je dostupnost i potreba za referentnim podacima prema kojima bi se naknadno moglo ispitati djelovanje promjene radnog plina u smislu izloženog u odjeljku 2.7.3.

#### **3.1.1.2.2 Prihvat ulazne energije**



**Slika 12. Prihvatnik ulazne energije**

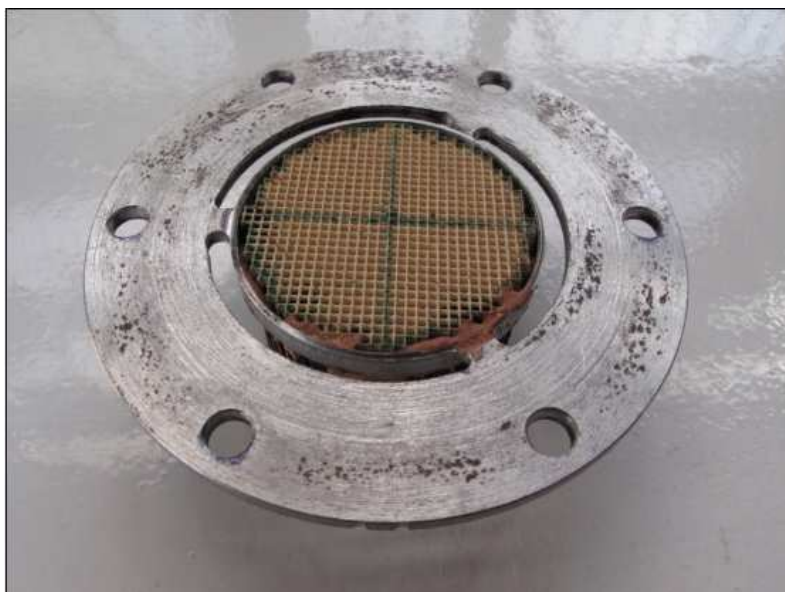
Toplina se dovodi putem električnog grijača ili koncentriranim sunčevim zračenjem. Električni grijač je izrađen od kantal žice promjera 1,5 mm i duljine 1,2 m (Slika 21.). Postavljen je tako da predaje toplinu zračenjem i konvekcijom na porozni element. Snagu grijača moguće je mijenjati putem reguliranog izvora istosmjerne struje u rasponu od 0 do 300 W.

U slučaju dovođenja topline koncentriranim sunčevim zračenjem koristi se konkavno zrcalo promjera 300 mm i maksimalne snage 300 W koja ovisi o intenzitetu ulaznog zračenja. Zrcalo je moguće rotirati oko dvije osi i translirati u dva smjera tako da se fokus dovede na površinu poroznog elementa. Temperatura u fokusu može iznositi do 850 °C. Prihvatnik ulazne energije izrađen je od aluminijskog lima. U slučaju potrebe postoji alternativna izvedba s ugrađenim rebrima na vanjskom djelu prihvatnika radi boljeg hlađenja i zadržavanja refleksijskih svojstava unutarnje površine.

### 3.1.1.2.3 Porozni element

Na ispitnom uređaju korištena su dva različita porozna elementa.

Prvi porozni element (Slika 13.) izrađen je izrezivanjem keramičkog materijala koji se koristi u katalizatorima ispušnih plinova automobila. On se sastoji od velikog broja



**Slika 13. Keramički porozni element**

paralelnih pravilnih kanala, razmak između stijenki kanala iznosi 0.9 mm. Iz Slike 8. je vidljivo da za porozni element načinjen od paralelnih ploča idealan omjer hidrauličnog radijusa i dubine toplinskog prodiranja iznosi oko 1,1. Ako se razmak između paralelnih ploča označi sa  $2y_0$ , nakon uvrštavanja u definiciju hidrauličkog radijusa dobije se  $y_0 = 2r_h$ . Da bi se odredio optimalan razmak između ploča poroznog elementa potrebno je u formulu (2) uvrstiti frekvenciju, svojstva radnog plina i srednji tlak. Nakon uvrštavanja srednje vrijednosti frekvencije, atmosferskog tlaka i svojstava radnog plina iz [3] za sobnu temperaturu, dobiva se optimalan razmak između ploča poroznog elementa i on iznosi  $2y_0 = 0,84$  mm što je približno jednako postojećem razmaku.

Drugi porozni element izrađen je izrezivanjem mrežica od nehrđajućeg čelika (Slika 14.).



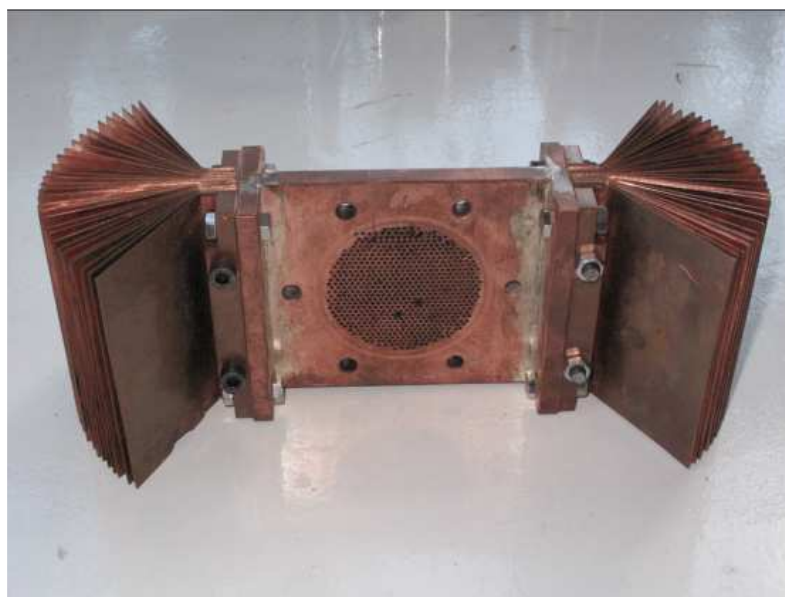
**Slika 14. Žičani porozni element**

Nakon izrezivanja, mrežice su složene jedna na drugu, stisnute i zavezane. Dobivena struktura ima nepravilne kanale. Pad tlaka kod strujanja medija je veći u odnosu na porozni element s pravilnim kanalima.

Kod oba porozna elementa odabrani su materijali otporni na visoke temperature zbog mogućnosti dovođenja topline koncentriranim sunčevim zračenjem na temperaturama većim od 500 °C.

#### ***3.1.1.2.4 Hladnjak***

Na ispitnom uređaju postoji mogućnost postavljanja dva različita hladnjaka, oba imaju slične unutarnje dijelove, koji su izrađeni bušenjem rupica promjera 1,5 mm u bakrenoj ploči debljine 8 i 5 mm respektivno. Na oba hladnjaka toplina se s unutarnjeg dijela kondukcijom prenosi na vanjski dio (Slika 15a.).



**Slika 15a. Zračni hladnjak**

Kod prvog hladnjaka vanjski dio izveden je od bakrenih rebara koja slobodnom konvekcijom predaju toplinu okolišnom zraku.

Drugi hladnjak ima osigurano strujanje vode oko unutarnjeg dijela (Slika 15b.). Promjenom protoka i temperature vode moguće je mijenjati toplinski tok te u kratkom vremenskom roku promijeniti temperaturu unutarnjeg dijela hladnjaka što utječe na rad cijelog uređaja.



**Slika 15b. Vodeni hladnjak**

#### ***3.1.1.2.5 Rezonantna cijev***

Uređaj na kojemu se izvode ispitivanja radi s četvrtinom stojnog vala zbog toga što je jedan kraj rezonantne cijevi otvoren prema rezonantnoj šupljini i linearnom alternatoru. Rezonantna cijev je izrađena od aluminijske cijevi vanjskog promjera 40 mm i debljine stijenke 2 mm. Postoji mogućnost promjene duljine rezonantne cijevi radi prilagodbe frekvencije proizvedenog zvuka vlastitoj kružnoj frekvenciji linearnog alternatora. Promjena duljine je moguća u rasponu od 232 do 785 mm.

#### ***3.1.1.2.6 Rezonantna šupljina***



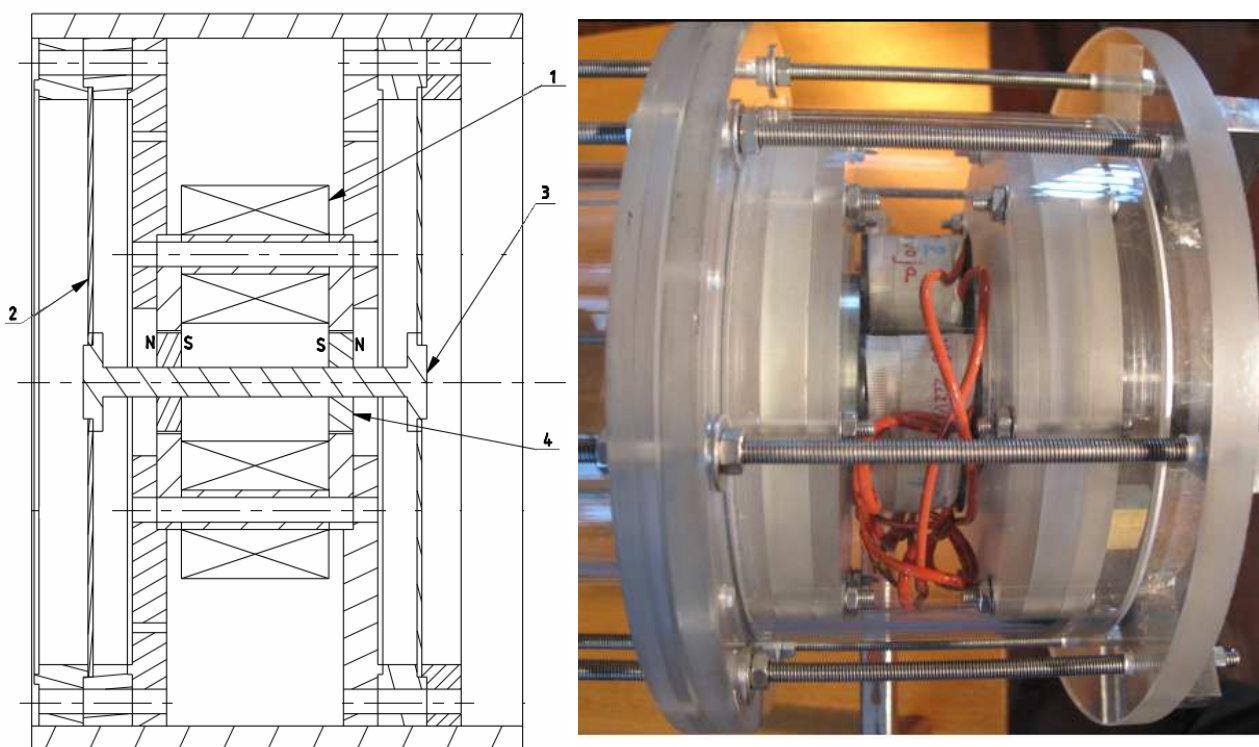
**Slika 16. Rezonantna šupljina**

Rezonantna šupljina (Slika 16.) ima oblik valjka, omeđena je s komadom cijevi od pleksiglasa. Unutarnji promjer iznosi 115 mm, a duljina 200 mm. Rezonantne šupljine mogu imati različite oblike (kugla, krnji stožac ili neko nepravilno tijelo), u ovom radu nije bilo mogućnosti mijenjati oblik i dimenzije rezonantne šupljine tako da je njen utjecaj ostao neistražen.

### 3.1.1.2.7 Linearni alternator

Oscilacije tlaka uzrokovane zvukom dobivenim u termoakustičkom uređaju stvaraju promjenjivu silu na membranu. Membrana je pričvršćena na osovinu koja nosi magnete. Kada dođe do pojave oscilacija tlaka na membrani ona se počne oscilatorno gibati i to gibanje prenosi na magnete. Gibanje magneta mijenja magnetsko polje u zavojnicama i dolazi do stvaranja napona na njihovim krajevima.

Osnovni dijelovi i konstrukcija linearnog alternatora prikazani su na Slici 17.



**Slika 17. Linearni alternator**

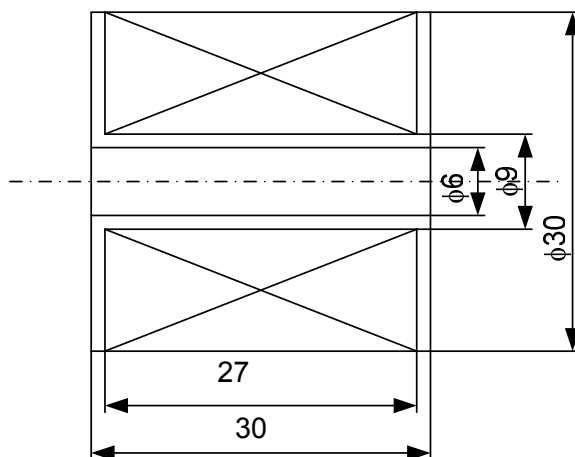
Korišteni linearni alternator ima mogućnost mjerenja aksijalnog pomaka koji u ovom radu nije bio registriran mjernom centralom kao ostale mjerne veličine. Međutim, određenom jednostavnom metodom utvrđeno je da pomak iznosi (u opisanim eksperimentalnim uvjetima) oko  $\pm 0,35$  mm. Tako mali pomaci i relativno velika debljina žice korištenih zavojnica objašnjavaju male vrijednosti izmjenjenog izlaznog napona. Ista stvar je i s izmjenjenom izlaznom strujom kratkog spoja koja je iznosila oko 1 mA. Zbog toga se efikasnost primjene pojedinih alternativnih komponenti testirala jedino mjerenjem amplitude izlaznog napona, a ne razvijenom električnom snagom na eventualno priključenom omskom trošilu.

1 Zavojnica – napravljena je od bakrene žice promjera 1 mm i ima 220 zavoja.

Unutar linearnog alternatora postavljene su četiri jednake zavojnice i

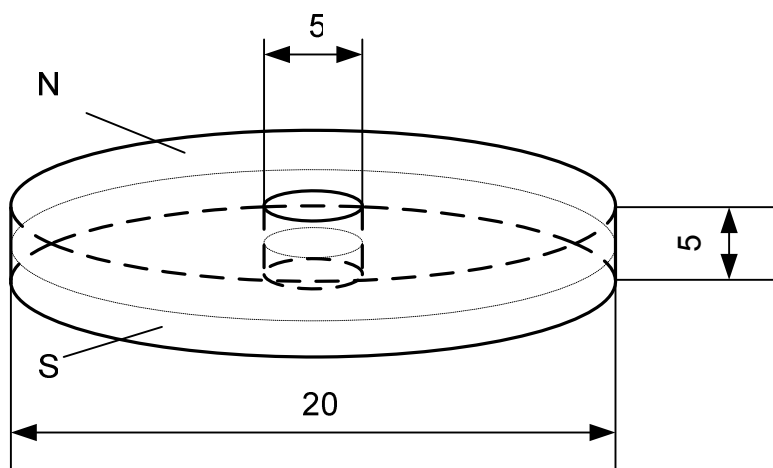


spojene serijski. Dimenzije zavojnice vidljive su na Slici 18.



**Slika 18. Presjek zavojnice linearnog alternatora (mjere u mm)**

- 2 Membrana – napravljena je tako da je CD-disk pričvršćen u sredini za osovinu, a izvana za kućište. U ovom vibracijskom sustavu membrana koja prihvaća tlak ima i ulogu opruge.
- 3 Osovina – uloga osovine je povezivanje magneta s membranom koja prihvaća tlak i centriranje magneta.
- 4 Magnet – u ovom uređaju koriste se stalni neodimijski magneti. Dimenzije magneta prikazane su na Slici 19.



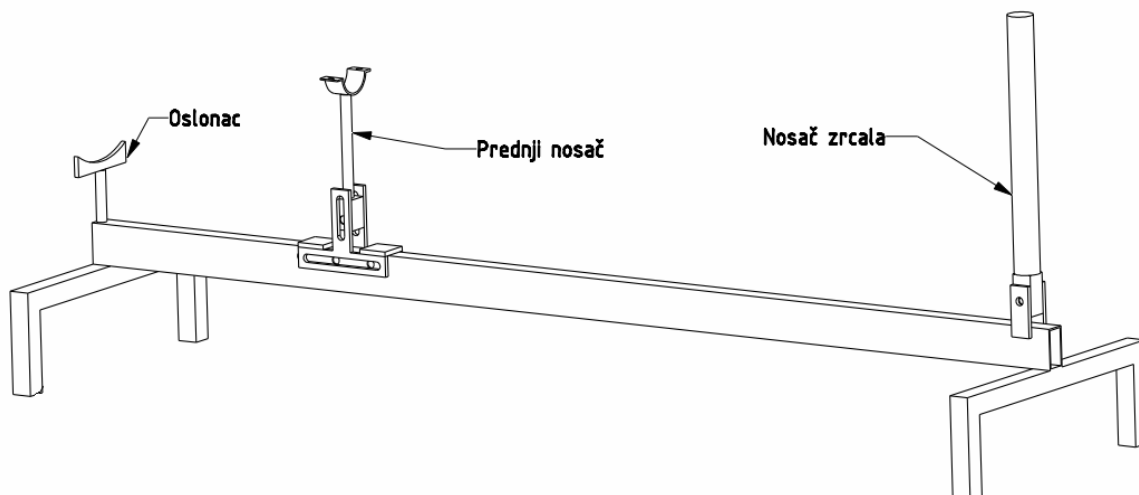
**Slika 19. Magnet korišten u linearnom alternatoru (mjere u mm)**

### 3.1.2 Pripremni radovi prije početka mjerenja

Na početku eksperimentalnog dijela ovog rada bilo je potrebno sklopiti uređaj iz postojećih komponenti. Nakon sklapanja pokazalo se da je potrebno napraviti postolje na kojemu će uređaj i dio mjerne opreme stabilno stajati. Ovo postolje nosi uređaj na laboratorijskom stolu, ali i na konstrukciji koja osigurava praćenje sunca.

### 3.1.2.1 Postolje

Postolje treba biti takvo da nosi kompletan uređaj i omogućuje jednostavno pomicanje određenih dijelova. Prilikom rada na suncu mora postojati mogućnost pomicanja ogledala i prihvatnika ulazne energije radi dovođenja fokusa na prednju površinu poroznog elementa.



Slika 20. Postolje

Prednji nosač je napravljen tako da se na njega postavi i učvrsti rezonantna cijev, moguće ga je translirati u dva smjera i rotirati oko jedne osi, na taj se način porozni element može zadržati u fokusu i nakon promjene duljine rezonantne cijevi. Nosač zrcala omogućuje zrcalu rotaciju oko dvije osi i promjenu položaja fokusa.

### 3.1.2.2 Električni grijač

Uređaj na kojemu se izvode ispitivanja predviđen je da radi uz dovođenje topline sunčevim zračenjem preko konkavnog zrcala. Zbog potrebe za većim brojem mjerenja u istim uvjetima i želje za neovisnosti o meteorološkim uvjetima razvijen je i ugrađen električni grijač.

#### 3.1.2.2.1 Izrada električnog grijača

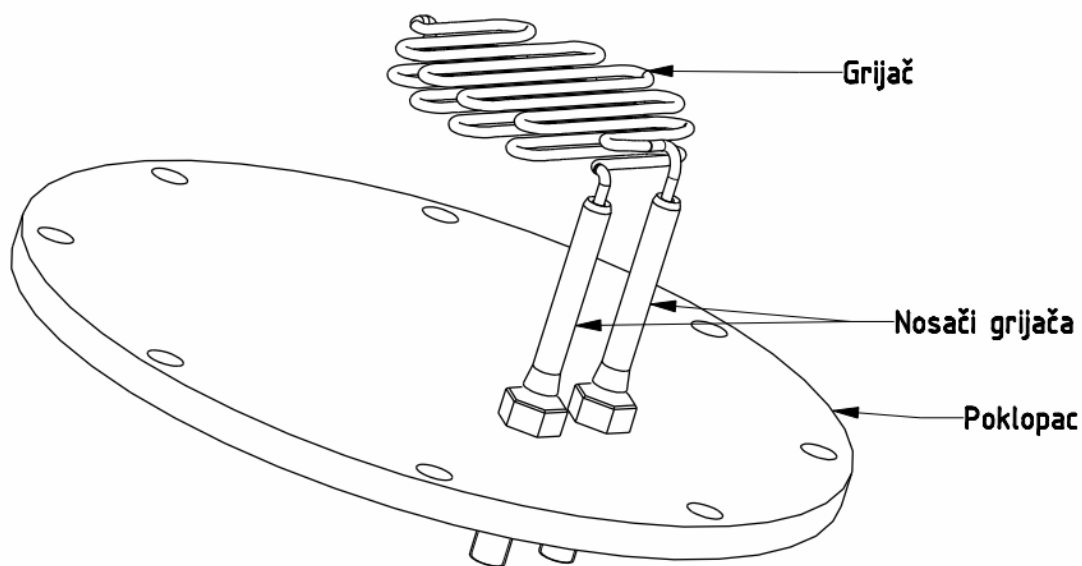
Potrebno je načiniti električni grijač maksimalne snage 300 W, da bi se mogla dovesti toplina koja se dovodi zrcalom. Ukupni promjer grijača je ograničen prihvatnikom ulazne energije i ne smije prelaziti 42 mm. Poželjno je da debljina grijača bude što manja tako da se što više energije preda poroznom elementu i smanje gubici topline na okolinu. Za napajanje grijača koristi se regulirani izvor istosmjerne struje. Maksimalna struja koju izvor može dati iznosi dvadeset ampera. Nakon uvrštavanja potrebne snage i maksimalne struje kroz grijač u izraz (17) dobije se potreban električni otpor grijača od 0,75 ohma.

$$R_g = \frac{P_g}{I_g^2} \quad (17)$$

Idući korak u izradi grijača je odabir grijaćeg tijela koje se može oblikovati da odgovara raspoloživom prostoru i ima potreban električni otpor. Pretraživanjem ponude električne opreme pronađena je žica načinjena od kantala, promjera  $D_g = 1.5 \text{ mm}$ . Podatak o specifičnom otporu kantala pronađen je u [5] i iznosi  $R_p = 0,39 \frac{\Omega}{m \cdot \text{mm}^2}$ . Uvrštavanjem poznatih podataka u izraz (18) dobije se potrebna duljina grijaće žice i ona iznosi 1,09 m.

$$L_g = \frac{4 \cdot R_g}{R_p \cdot D_g^2 \cdot \pi} \quad (18)$$

Slika 21. prikazuje model grijača izrađen prema prethodno danom proračunu i dimenzijama.



**Slika 21. Električni grijač**

Nosači grijača napravljeni su tokarenjem nehrđajućeg čelika. Na njihovim krajevima napravljene su rupe u koje su uvedeni te tvrdo zalemljeni krajevi grijaće žice. Na drugi kraj nosača dovodi se struja iz izvora. Poklopac je napravljen od bakelita, razlog za izbor tog materijala je potreba da se električki odvoje nosači grijača i zadržavanje mehaničkih svojstava na povišenim temperaturama.

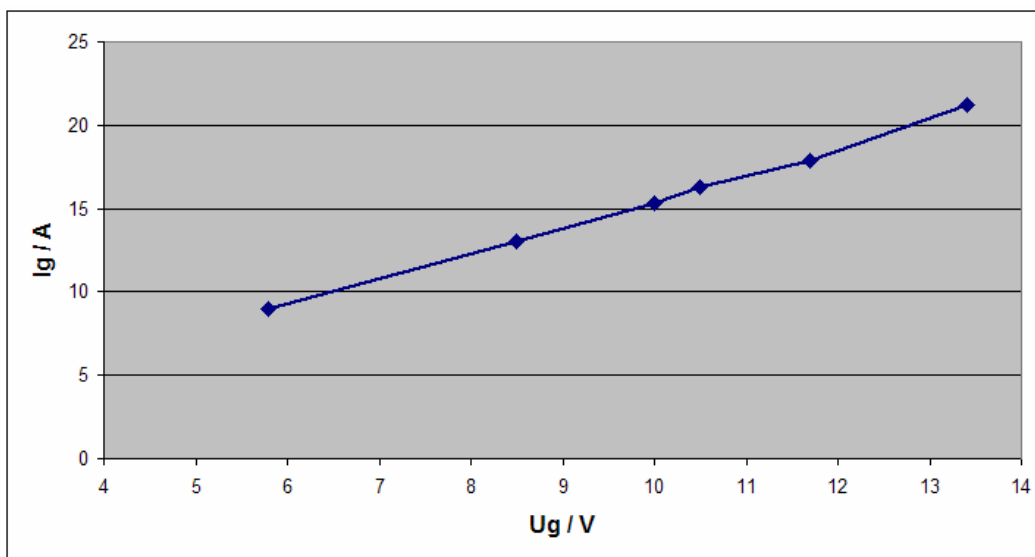
### **3.1.2.2 Mjerenje karakteristika električnog grijača**

Na Slici 22. prikazan je prethodno izrađeni električni grijač sa spojenim napajanjem i postavljenim termoparom za mjerenje temperature stijenke grijaće žice. Na poklopac je pričvršćen materijal koji reflektira toplinska zračenja. Na taj način pokušalo se smanjiti gubitke topline i zadržati temperaturu poklopca što nižom. Prilikom mjerenja jakost struje i napon očitavaju se na električnom izvoru, a temperatura na zaslonu mjernog instrumenta.

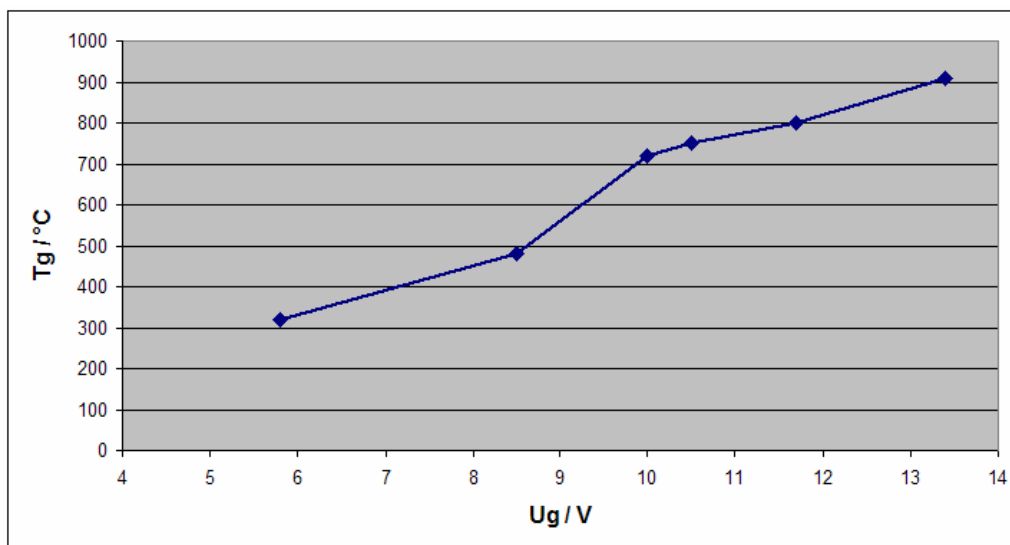


**Slika 22. Mjerenje karakteristika električnog grijača**

Proizvedenu toplinu grijač predaje slobodnom konvekcijom i zračenjem na okolinu. Cilj ovog mjerenja je vidjeti kako promjena temperature grijača utječe na njegova mehanička i električna svojstva te zbog toga temperatura okoline i ostali faktori bitni za prijenos topline nisu praćeni niti se pokušavalo zadržati ih konstantnima. Rezultati mjerenja prikazani su na Slikama 23. i 24.



**Slika 23. Ovisnost struje kroz grijač o naponu dovedenom na njegove krajeve**



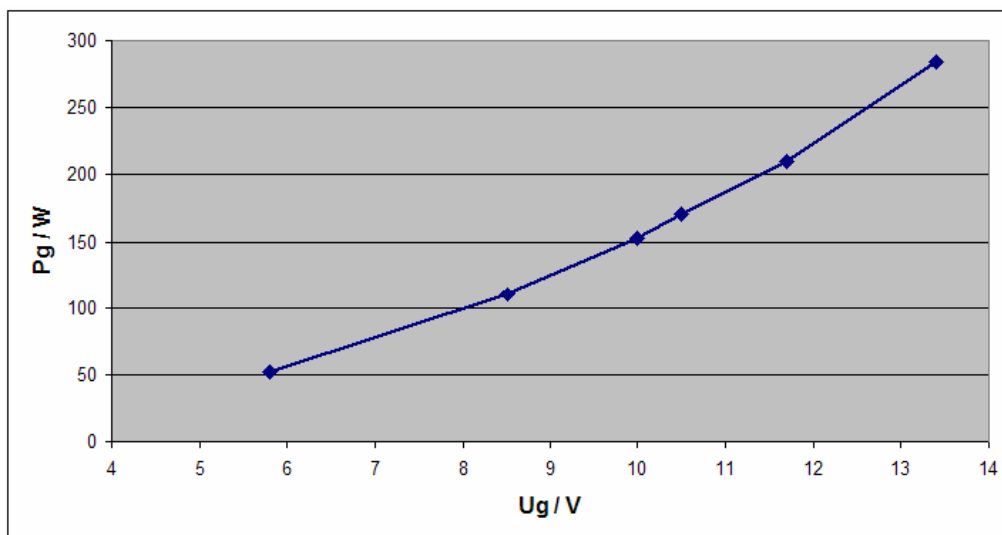
**Slika 24. Ovisnost temperature grijaće žice o naponu dovedenom na krajeve grijača**

Kod povećanja temperature stijenke grijaće žice do 900 °C nisu primijećene deformacije ni progibi koji bi uzrokovali kratko spajanje dijela grijača ili oslanjanje na prihvatnik ulazne energije. Čvrstoća žice ostaje dovoljna da nosi masu grijača tako da dodatni nosači nisu potrebni.

Snaga i otpor grijača dobiveni su uvrštavajući iznose očitane tijekom mjerenja u izraze (19) i (20) te su prikazani na Slikama 25. i 26.

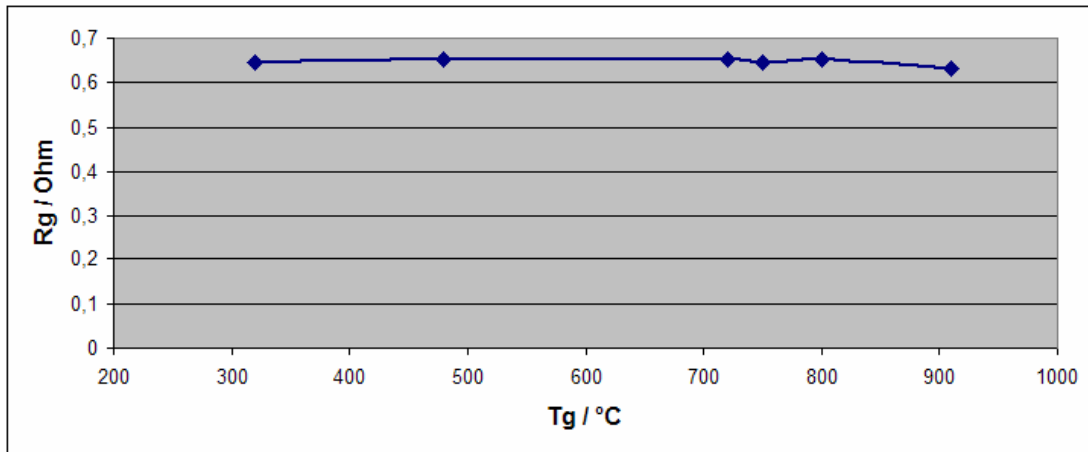
$$P_g = U_g \cdot I_g \quad (19)$$

$$R_g = \frac{U_g}{I_g} \quad (20)$$



**Slika 25. Snaga grijača u ovisnosti o naponu na njegovim krajevima**

Na Slici 25. je vidljivo da se promjenom napona može regulirati toplinska snaga koju grijač predaje okolini.



**Slika 26. Ovisnost otpora grijaće žice o njenoj temperaturi**

Iz Slike 26. se vidi da otpor grijača ostaje približno konstantan kod promjene temperature, što znači da intenzitet hlađenja ne utječe na snagu. Promjenom uvjeta hlađenja mijenja se samo temperatura stijenke grijača, a toplinski tok koji predaje grijač ostaje konstantan.

### 3.1.3 Opis mjernih uređaja i shema spajanja mjerne centrale

U okviru eksperimentalnog dijela rada korištena je sljedeća mjerna oprema:

1. Modularna mjerna centrala

National Instruments CDAQ – 9172

Karakteristike: osam priključaka za module, komunikacija sa računalom preko USB 2.0

2. Moduli za mjernu centralu:

1. NI 9211 – analogni diferencijalni ulazni modul za termopare

Karakteristike: 4 kanala, mjerno područje +/- 80mV, 14 uzoraka u sekundi, 24 Bit-ni analogni digitalni pretvornik

2. NI 9215 – diferencijalni analogni ulazni modul

Karakteristike: 4 kanala, mjerno područje +/- 10V, 100 000 uzoraka u sekundi, 16 Bit-ni analogni digitalni pretvornik

3. NI 9219 – univerzalni analogni ulazni modul

Karakteristike: 4kanala, mjerno područje +/- 60V, 24 Bit-ni analogni digitalni pretvornik

3. Omega Engineering termopar, K – tip zaštićen, neuzemljen, debljina cjevčice 0,6 mm

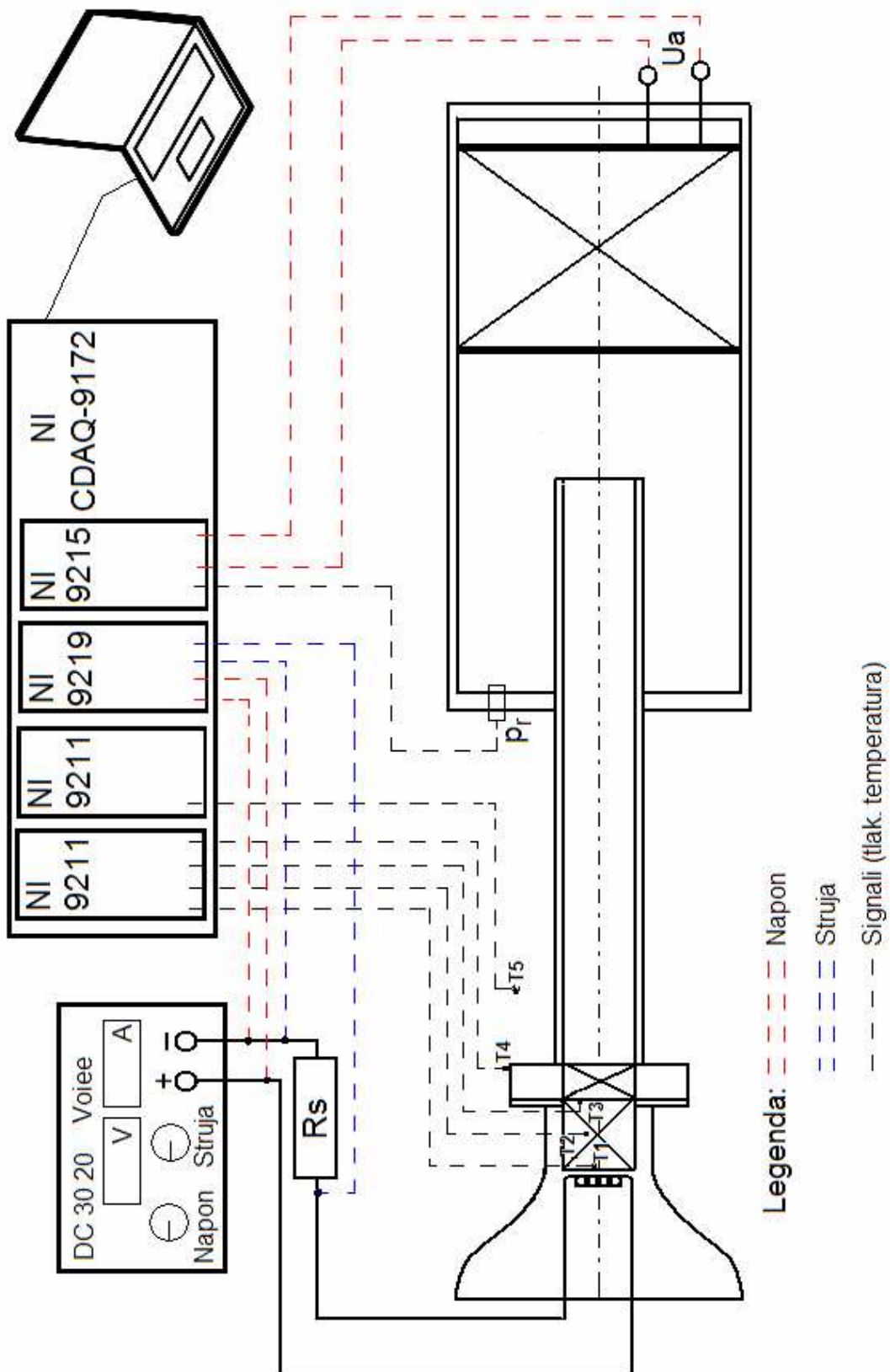
4. Optoelektronički senzor tlaka: Optrand, model D12294

Karakteristike: područje mjerenja tlaka 0-200 psi, osjetljivost kod 25°C 45,49mV/psi, osjetljivost kod 200°C 45,81mV/psi

5. Istosmjerni izvor napajanja: Voiee, model DF3020

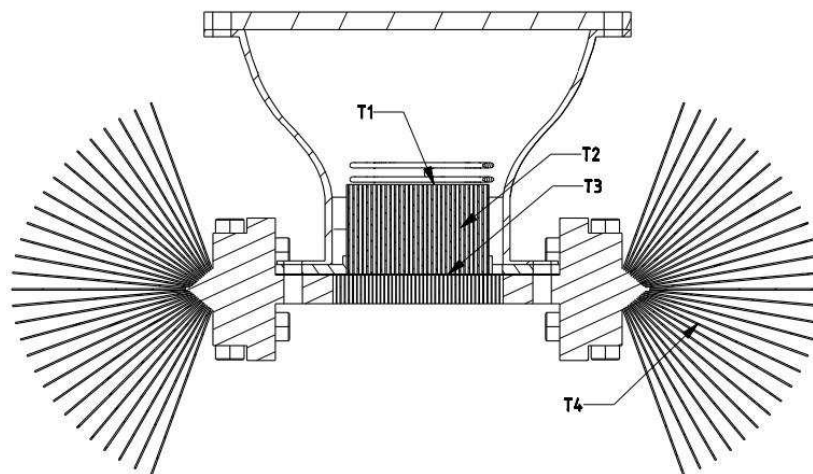
6. Instrument za mjerenje razine zvuka: Dawe D-1405E

7. Osciloskop: AD 3525 FFT Dynamic Signal Analyzer



Slika 27. Shema spajanja mjerne opreme

Položaj termopara detaljno je prikazan na Slici 28.



**Slika 28. Mjesta na kojima se mjere temperature**

Kod mjerenja sa žičanim poroznim elementom temperatura  $T_2$  nije mjerena zbog nemogućnosti provlačenja termopara kroz nepravilne i guste kanale. Prilikom mjerenja s vodenim hladnjakom temperatura  $T_4$  odnosi se na vodu koja izlazi iz hladnjaka.  $T_5$  prikazuje temperaturu zraka u prostoriji.

Struju koja prolazi kroz grijač nije bilo moguće mjeriti direktno u mjernoj centrali jer mjerna centrala prihvaća samo naponske signale. Mjerenje je izvedeno posredno tako da se mjerio pad napona  $U_s$  na mjernom otporniku  $R_s$  kojemu otpor iznosi  $1\text{ m}\Omega$ .

$$I_g = \frac{U_s}{R_s} \quad (21)$$

Nakon uvrštavanja poznatih vrijednosti u jednadžbu (21) dobije se tražena struja kroz grijač. Kod nekih mjerenja opisanih u daljnjem tekstu shema spajanja mjerne opreme razlikuje se od one prikazane na Slici 27. te će na tim mjestima biti dana korištena shema.

## 3.2 Mjerenja

### 3.2.1 Mjerenje frekvencije i razine zvuka termoakustičkog uređaja

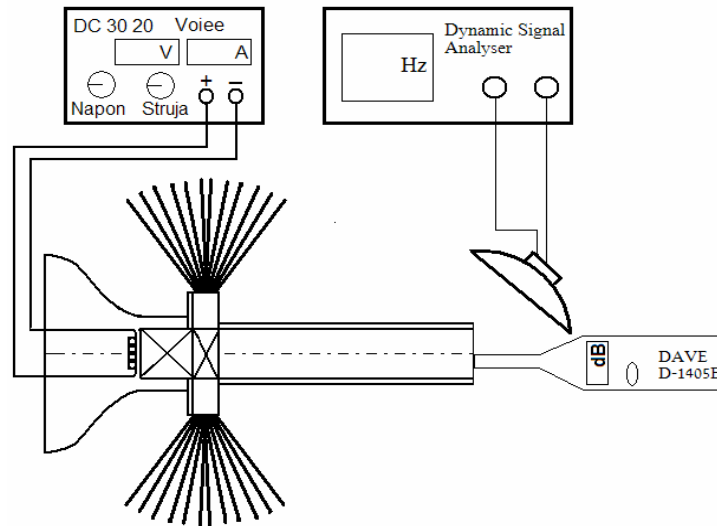
Cilj ovog mjerenja je vidjeti kako se mijenja frekvencija i razina stvorenog zvuka s promjenom duljine rezonantne cijevi. Prije početka mjerenja odvaja se linearni alternator od termoakustičkog uređaja i priprema se jedanaest različitih duljina cijevi  $L$  definiranih Slikom 11. Raspon raspoloživih duljina  $L$  je od 232 do 785 mm. Razina zvuka  $L_a$  u decibelima je definirana prema [6] kao:

$$L_a = 20 \log_{10} \left( \frac{p_1}{p_{\text{ref}}} \right) \quad (22)$$

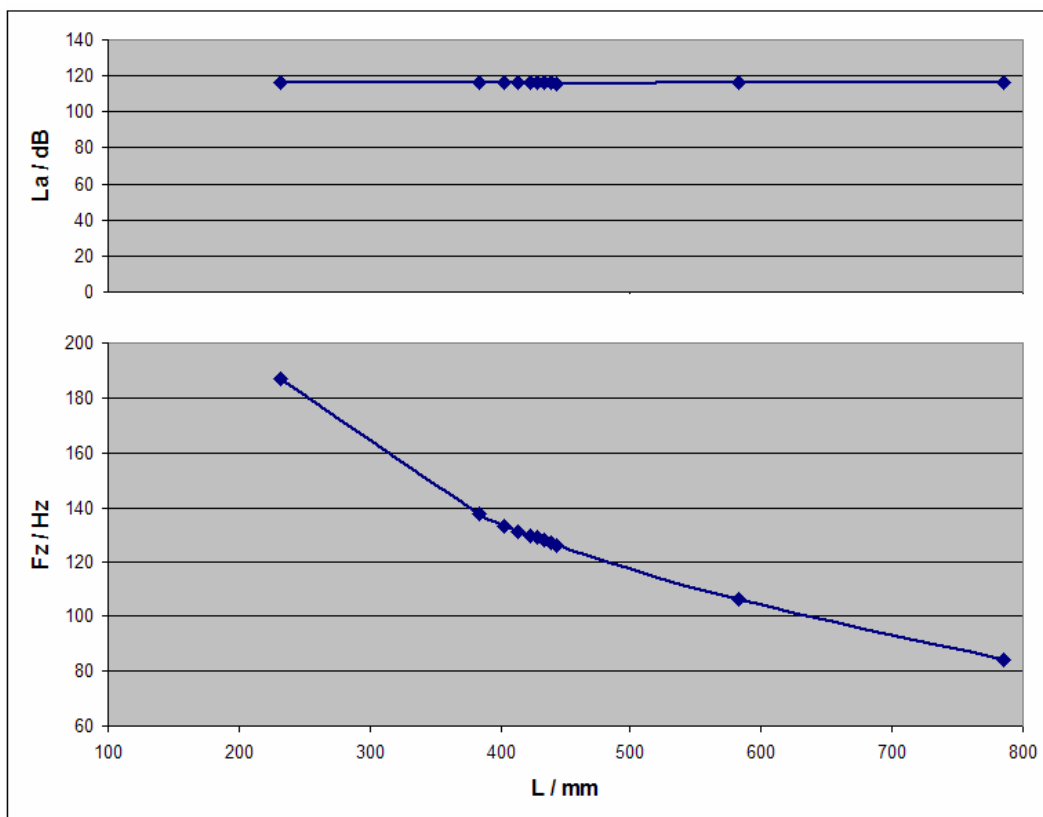


gdje se  $p_1$  odnosi na amplitudu kojom tlak oscilira oko srednjeg tlaka (u ovom slučaju srednji tlak je atmosferski tlak),  $p_{ref}$  je referentna amplituda oscilacija. Referentna amplituda oscilacija za zrak iznosi  $20 \mu\text{Pa}$  što se smatra pragom čujnosti ljudskog uha.

Shema spajanja mjernih uređaja prikazana je na Slici 29., a rezultati mjerenja na Slici 30.



**Slika 29. Shema spajanja kod mjerenja frekvencije i razine zvuka**



**Slika 30. Rezultati mjerenja frekvencije i razine zvuka termoakustičkog uređaja**

Tijekom mjerenja snaga grijača je držana na konstantnom iznosu od 65 W. Mjerenje je pokazalo očekivani pad frekvencije kod povećanja duljine  $L$ . Frekvenciju zvuka  $F_z$  je moguće mijenjati promjenom duljine  $L$  u rasponu od 84 do 187 Hz.

Razina zvuka  $L_a$  zadržavala je konstantnu vrijednost od 119 dB bez obzira na promjene duljine  $L$ . Uvrštavanjem izmjerenih vrijednosti razine zvuka u jednadžbu (22) dobije se amplituda oscilacija tlaka  $p_1$  i ona iznosi 17,83 Pa, što je 0,01783 % od vrijednosti srednjeg tlaka.

### 3.2.2 Mjerenje vlastite kružne frekvencije linearnog alternatora

Prije sklapanja termoakustičkog generatora izmjerena je vlastita kružna frekvencija linearnog alternatora. Mjerenje je izvedeno na način da se laganim udarcem po izdanku za mjerenje pomaka vibracijski sustav pomakne iz ravnotežnog položaja. Nakon toga se na osciloskopu promatra istitravanje frekvencija slobodnih vibracija i njihov spektar frekvencija (Slika 31.).

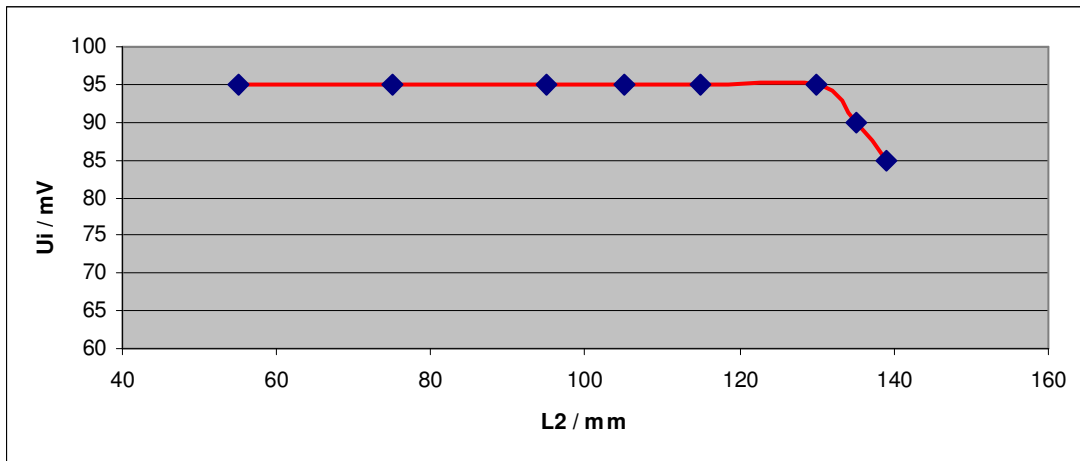


Slika 31. Oblik i spektralna analiza signala dobivenog slobodnim vibriranjem linearnog alternatora

Spektralnom analizom utvrđena je vlastita kružna frekvencija i ona iznosi 127,5 Hz. Oblik signala na Slici 31. otkriva da je prigušenje u sustavu ovisno o amplitudi vibracija. Vidljivo je da signal brže slabi kada su amplitude veće. Razlog tome je vjerovatno u plastičnim membranama koje imaju ulogu opruge u ovom vibracijskom sustavu. Povećanjem deformacija membrana raste trenje u njima, a time i prigušenje.

### 3.2.3 Određivanje utjecaja duljine $L_2$ na izlazni napon

U ovom eksperimentu željelo se vidjeti na koji način promjena duljine  $L_2$  (Slika 11a.) utječe na izlazni napon  $U_i$  te pronaći optimalnu duljinu  $L_2$  koja se više neće mijenjati. Tijekom variranja duljine  $L_2$ , snaga grijača i ukupna duljina reznontne cijevi držane su na konstantnim iznosima od  $P_g = 65$  W, odnosno  $L = 384$  mm. Promjena duljine  $L_2$  nije imala utjecaja na frekvenciju izlaznog napona koja je iznosila  $F_i = 157$  Hz. Na Slici 32. prikazani su rezultati mjerenja.

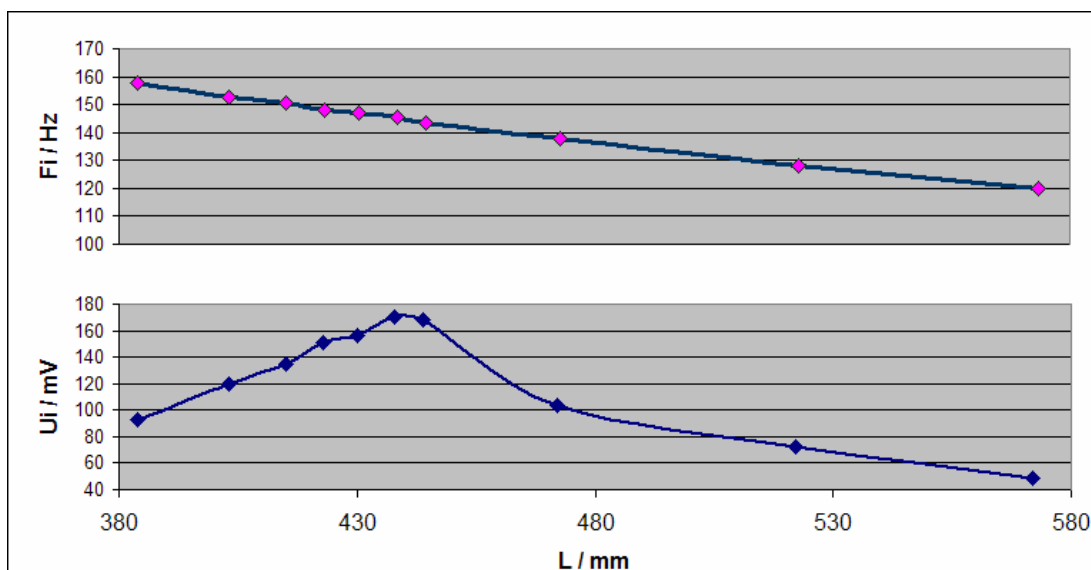


Slika 32. Utjecaj duljine  $L_2$  na izlazni napon  $U_i$

Iz rezultata mjerenja je vidljivo da veliki raspon promjene duljine  $L_2$  nema utjecaja na izlazni napon  $U_i$ . Nakon prelaska granične duljine  $L_2=130$  mm, izlazni napon počne naglo padati. Obzirom da ne postoji odeđena duljina  $L_2$  na kojoj je napon maksimalan, za ostale eksperimente izabire se  $L_2=120$  mm.

### 3.2.4 Određivanje optimalne duljine rezonantne cijevi

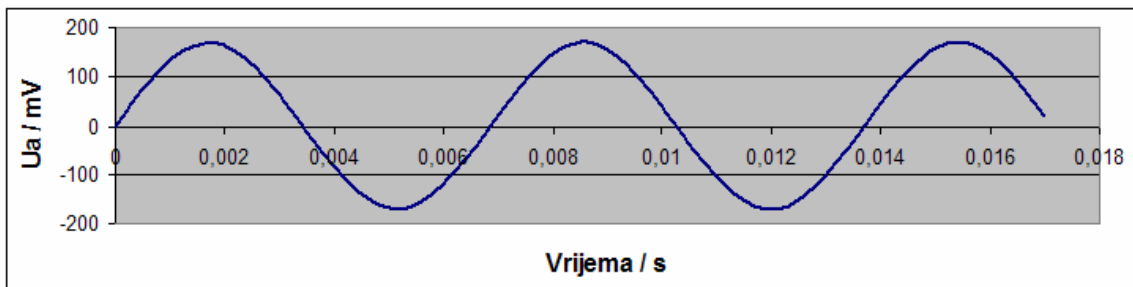
Promjenom duljine rezonantne cijevi mijenja se frekvencija nastalog zvuka. Stvoreni zvuk odnosno oscilacije tlaka stvaraju oscilatornu silu koja uzrokuje i održava vibriranje membrane, osovine i magneta linearnog alternatora. Poznato je da kod prisilnih vibracija raste amplituda pomaka kada se frekvencija uzbude približava vlastitoj kružnoj frekvenciji sustava. Cilj ovog eksperimenta je pronalazak duljine rezonantne cijevi  $L$  na kojoj su amplitude pomaka magneta, a time i amplitude izlaznog napona iz linearnog alternatora maksimalne.



Slika 33. Utjecaj promjene duljine rezonantne cijevi  $L$  na izlazni napon  $U_i$  i frekvenciju  $F_i$

Na Slici 33. prikazani su rezultati mjerenja. Vidljivo je da frekvencija izlaznog napona  $F_i$  opada gotovo linearno s produljenjem cijevi, takav rezultat je u skladu s očekivanjima i izrazom (11). Izlazni napon  $U_i$  raste s produljenjem cijevi, dostiže svoj maksimum i nakon toga pada. Na duljini  $L=438$  mm, vrijednost izlaznog napona je maksimalna i iznosi  $U_i=170$  mV, a frekvencija  $F_i=146$  Hz.

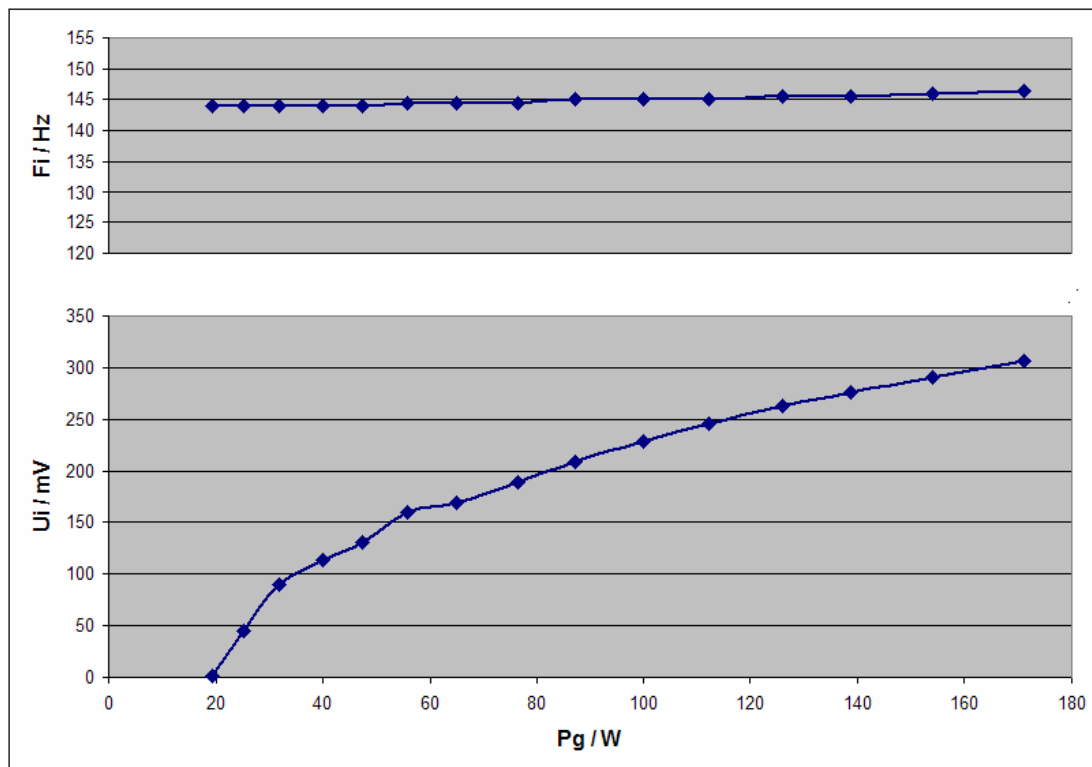
Ovime je pronađena optimalna duljina rezonantne cijevi i ona će biti korištena u svim sljedećim mjerenjima. Na Slici 34. prikazan je izgled naponskog signala dobivenog s linearnog alternatora.



Slika 34. Naponski signal  $U_a$  dobiven na linearnom alternatoru

### 3.2.5 Mjerenje ovisnosti izlaznog napona o ulaznoj snazi

Cilj ovog mjerenja je vidjeti kako se mjenja izlazni napon  $U_i$  kod promjene snage grijača  $P_g$ . Rezultati mjerenja prikazani su na Slici 35.



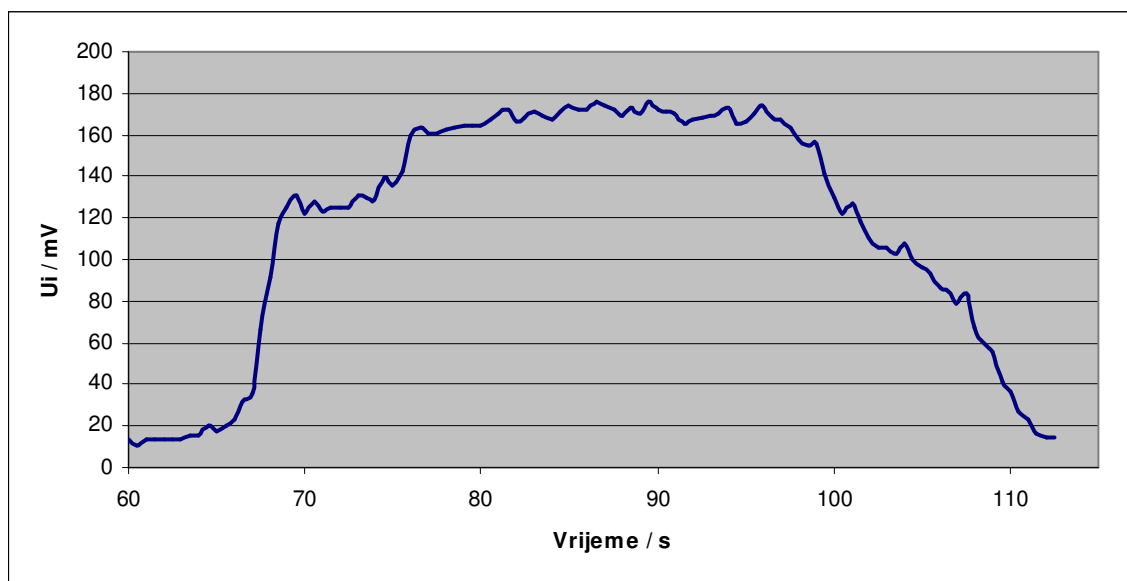
Slika 35. Ovisnost izlaznog napona  $U_i$  i frekvencije  $F_i$  o snazi grijača  $P_g$

Iz Slike 35. je vidljivo da kod porasta ulazne snage raste izlazni napon, što je očekivano. Dijelovi te krivulje slijede pravac, a kompletnoj krivulji nagib se smanjuje, iz toga se zaključuje da se male promjene ulazne snage linearno prenose na izlazni napon. Frekvencija izlaznog napona polagano raste tijekom mjerenja. Zbog konstantnog dovođenja topline dolazi do porasta temperature radnog plina što prema izrazu (12) uzrokuje porast brzine zvuka i prema izrazu (11) povećava frekvenciju stvorenog zvuka. Obzirom da je porast frekvencije izlaznog napona tijekom mjerenja relativno malen, može se reći da je nastao uslijed zagrijavanja radnog medija i da nije povezan s promjenom snage.

### 3.2.6 Mjerenje dinamičkih karakteristika, pokretanje i zaustavljanje

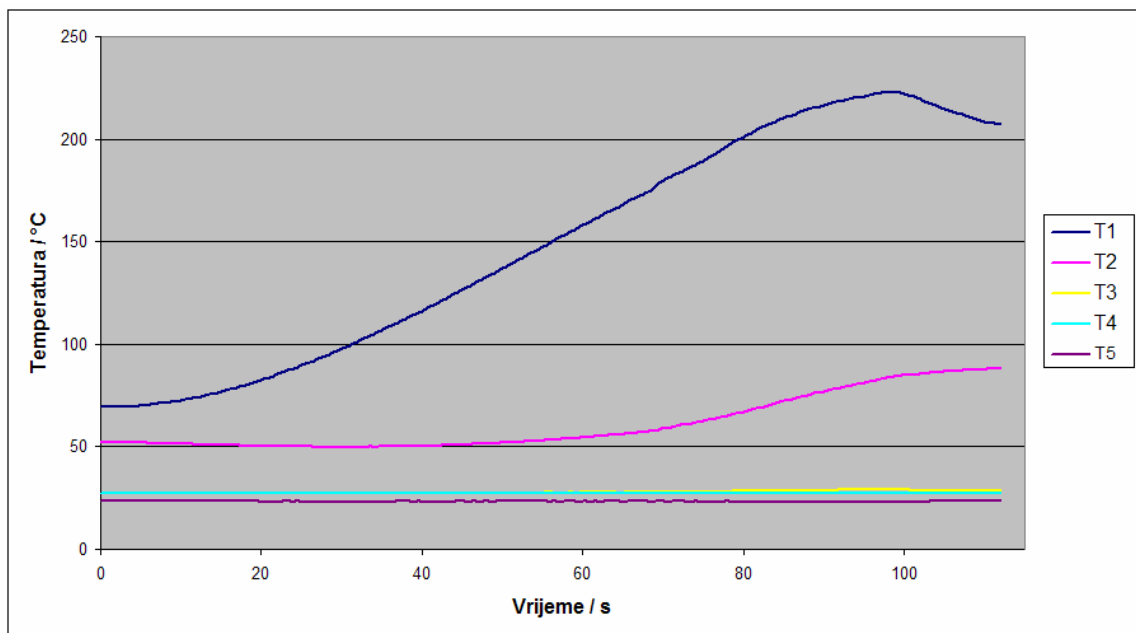
#### uređaja sa zračnim hlađenjem i keramičkim poroznim elementom

Mjerenje je izvedeno tako da je u trenutku uključivanja grijača počelo teći vrijeme snimanja. Nakon devedest pet sekundi isključeno je napajanje grijača. Snaga grijača je bila konstantna i iznosila je 65 W. Na Slici 36. prikazana je amplituda napona na linearnom alternatoru  $U_i$ . Na Slici 37. prikazane su temperature. Mjerna mjesta za temperature vidljiva su na Slici 28.



**Slika 36. Prikaz amplitude izlaznog napona  $U_i$  tijekom pokretanja i zaustavljanja uređaja sa zračnim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom**

Iz Slike 36. je vidljivo da uređaj počinje s radom približno 67 sekundi nakon uključivanja grijača. Postoji vremenski period od dvadesetak sekundi nakon početka rada do dolaska u kvazistacionarno stanje. Vidljivo je da nakon isključenja grijača amplituda napona pada i nakon dvadesetak sekundi u potpunosti iščezava. Tih dvadesetak sekundi uređaj radi s akumuliranom toplinom u grijaču i poroznom elementu.

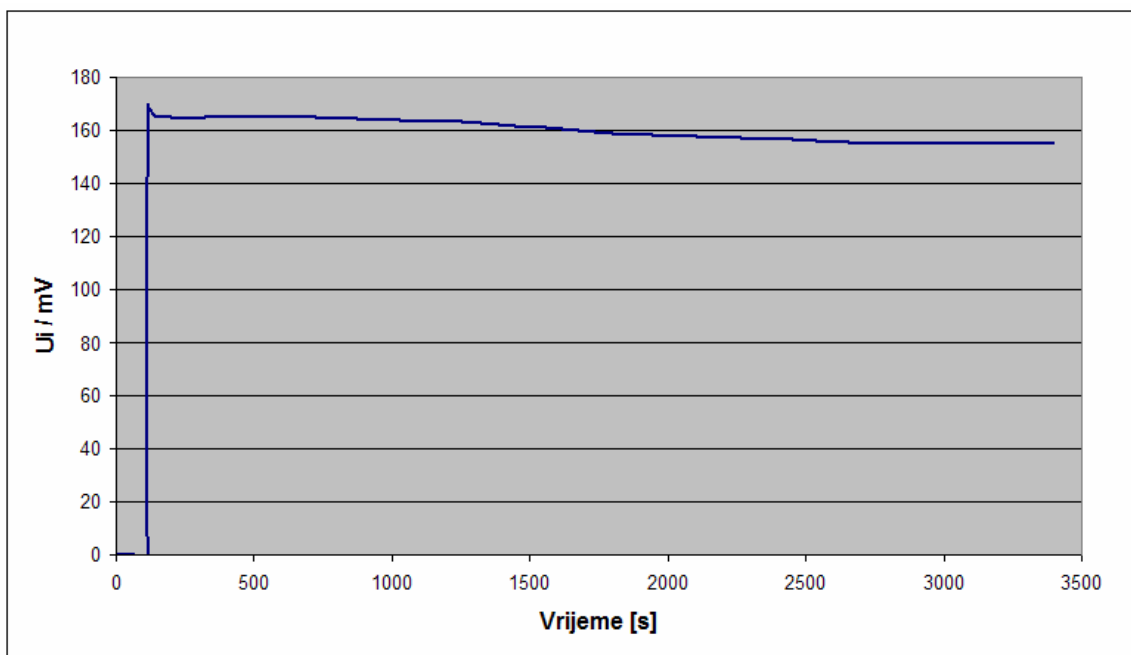


**Slika 37. Prikaz temperatura tijekom pokretanja i zaustavljanja uređaja sa zračnim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom**

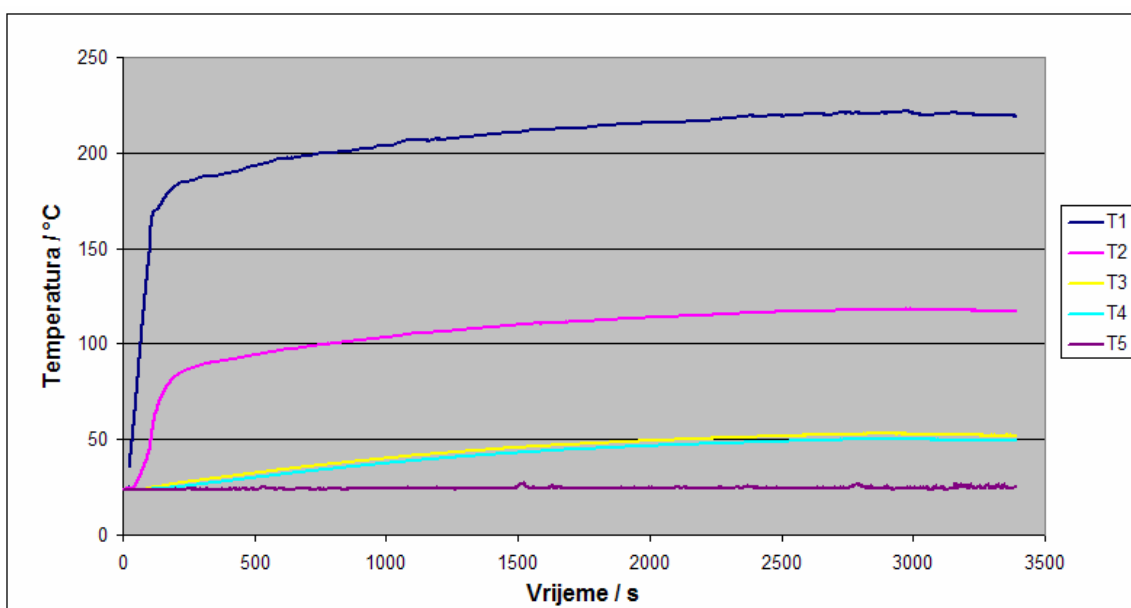
Na Slici 37. može se vidjeti da u trenutku kada uređaj počinje s radom (približno 67 sekundi nakon uključjenja) temperatura na mjestu  $T1$  iznosi približno  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a na mjestu  $T3$  približno  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . U ovoj konfiguraciji potrebna je razlika temperatura od približno  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$  da bi uređaj proradio. Nakon početka rada temperatura  $T1$  usporava svoj rast zbog naglog povećanja odvođenja topline. Do pada temperature dolazi nakon isključenja napajanja grijača. Temperature  $T3$  i  $T4$  gotovo da se nisu mijenjale u ovako kratkom vremenu rada.

### 3.2.7 Mjerenje karakteristika uređaja u stacionarnom stanju sa zračnim hlađenjem i keramičkim poroznim elementom

Mjerenje je izvedeno tako da je u trenutku uključjenja grijača počelo teći vrijeme snimanja. Snimanje je trajalo tri tisuće i četiri stotine sekundi što je bilo dovoljno da sve veličine dođu u stacionarno stanje. Snaga grijača je bila konstantna i iznosila je  $65\text{ W}$ . Na Slici 38. prikazana je amplituda napona na linearnom alternatoru  $U_i$ . Na Slici 39. prikazane su temperature. Mjerna mjesta za temperature vidljiva su na Slici 28.



**Slika 38. Prikaz amplitude izlaznog napona  $U_i$  tijekom pokretanja i stacionarnog rada uređaja sa zračnim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom**



**Slika 39. Prikaz temperature tijekom pokretanja i stacionarnog rada uređaja sa zračnim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom**

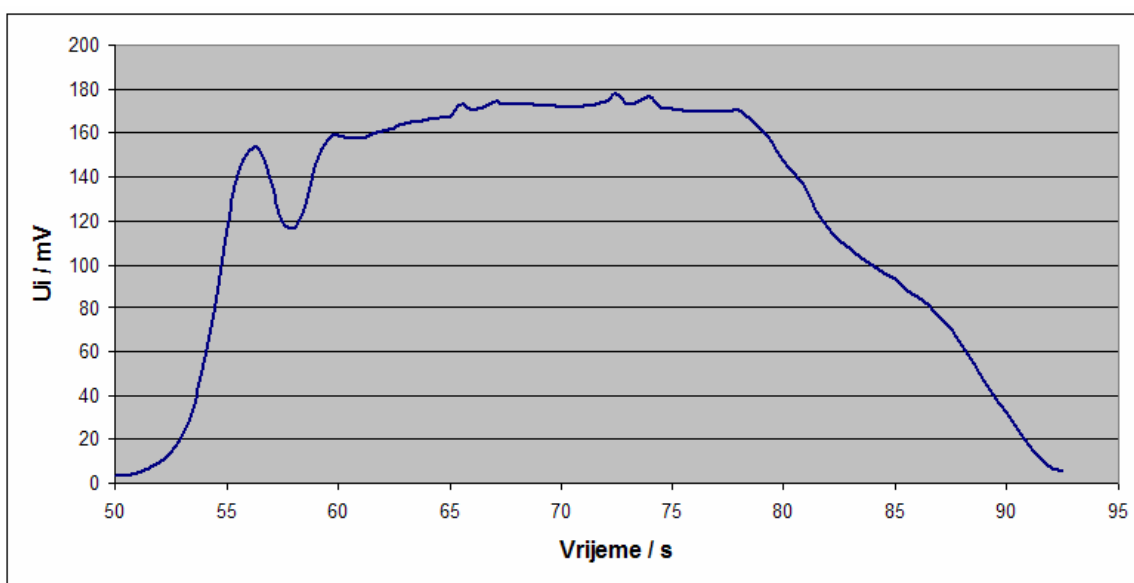
Iz Slika 38. i 39. je vidljivo da je potrebno približno dvije tisuće i osam stotina sekundi za dolazak u potpuno stacionarno stanje. Tijekom rada u nestacionarnom stanju dijelovi uređaja su se progrijavali i sve mjerene temperature su rasle. Za vrijeme porasta temperatura amplituda izlaznog napona  $U_i$  je padala, razlog tome je vjerovatno u smanjivanju omjera između temperature dovođenja i odvođenja topline što prema izrazu (8) uzrokuje smanjivanje maksimalnog mogućeg stupnja iskoristivosti. Amplituda napona se stacionirala na  $U_i = 155$  mV što je približno 8 % manje od početne amplitude. Mala razlika između temperatura T3 i T4 ukazuje na to da hladnjak dobro provodi toplinu iz unutarnjeg dijela na vanjski. Razlika

između temperatura  $T_4$  i  $T_5$  od  $25\text{ }^\circ\text{C}$  pokazuje da konvekcija između rebara hladnjaka i okolnog prostora predstavlja najveći otpor prijenosu topline s radnog medija na okoliš.

### 3.2.8 Mjerenje dinamičkih karakteristika, pokretanje i zaustavljanje

#### uređaja s vodenim hlađenjem i keramičkim poroznim elementom

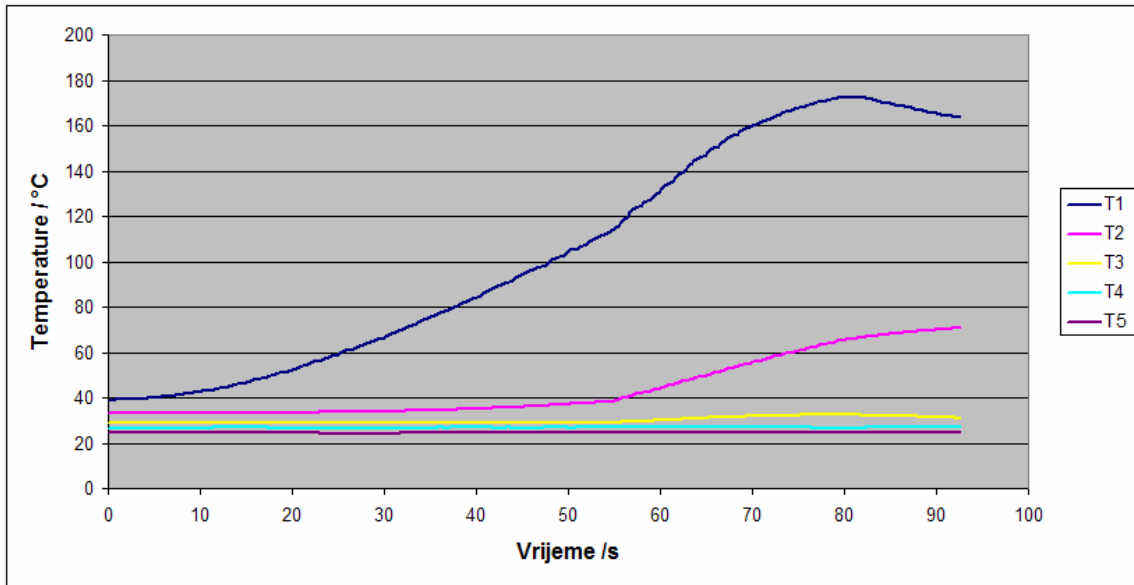
Prije početka mjerenja uređaj je rastavljen te je zamijenjen zračni hladnjak s vodenim. Postavljeni su spremnici rashladne vode, cijevi i ventili za regulaciju protoka. Mjerenje je izvedeno tako da je u trenutku uključivanja grijača počelo teći vrijeme snimanja. Nakon osamdeset sekundi isključeno je napajanje grijača. Snaga grijača je bila konstantna i iznosila je  $65\text{ W}$ . Na Slici 40. prikazana je amplituda napona na linearnom alternatoru  $U_i$ . Na Slici 41 prikazane su temperature. Mjerna mjesta za temperature opisana su u poglavlju 3.1.3.



**Slika 40. Prikaz amplitude izlaznog napona  $U_i$  tijekom pokretanja i zaustavljanja uređaja s vodenim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom**

Iz Slike 40. je vidljivo da uređaj počinje s radom približno 53 sekunde nakon uključivanja grijača. Postoji vremenski period od desetak sekundi nakon početka rada do dolaska u kvazistacionarno stanje. Amplituda napona  $U_i$  kod pokretanja uređaja znatno se razlikuje od one kod zračnog hladnjaka. Vidljivo je da nakon isključenja grijača amplituda napona pada i nakon dvadesetak sekundi u potpunosti iščezava. Tih dvadesetak sekundi uređaj radi s akumuliranom toplinom u grijaču i poroznom elementu.



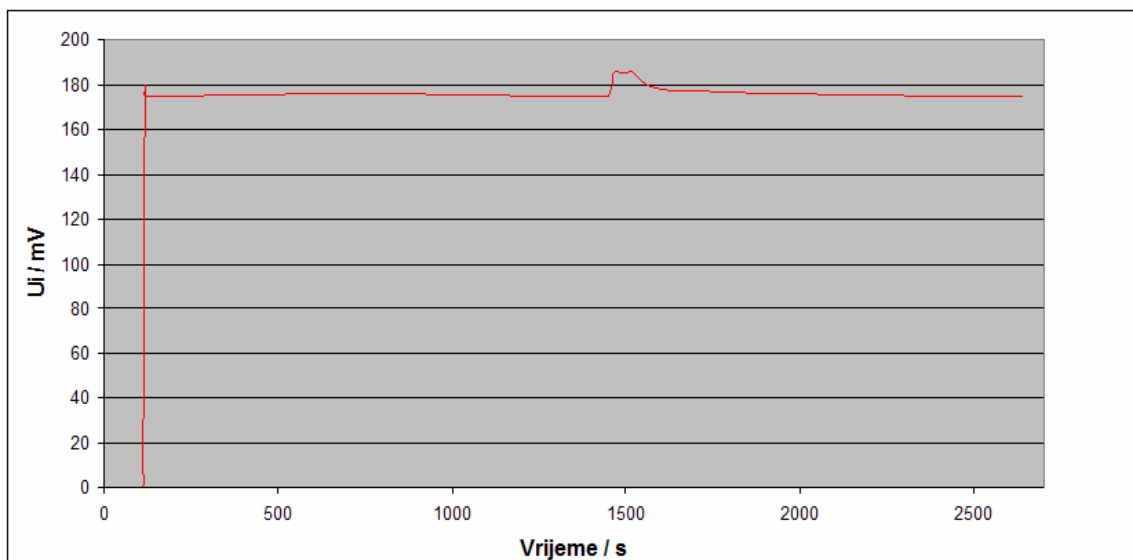


**Slika 41. Prikaz temperatura tijekom pokretanja i zaustavljanja uređaja s vodenim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom**

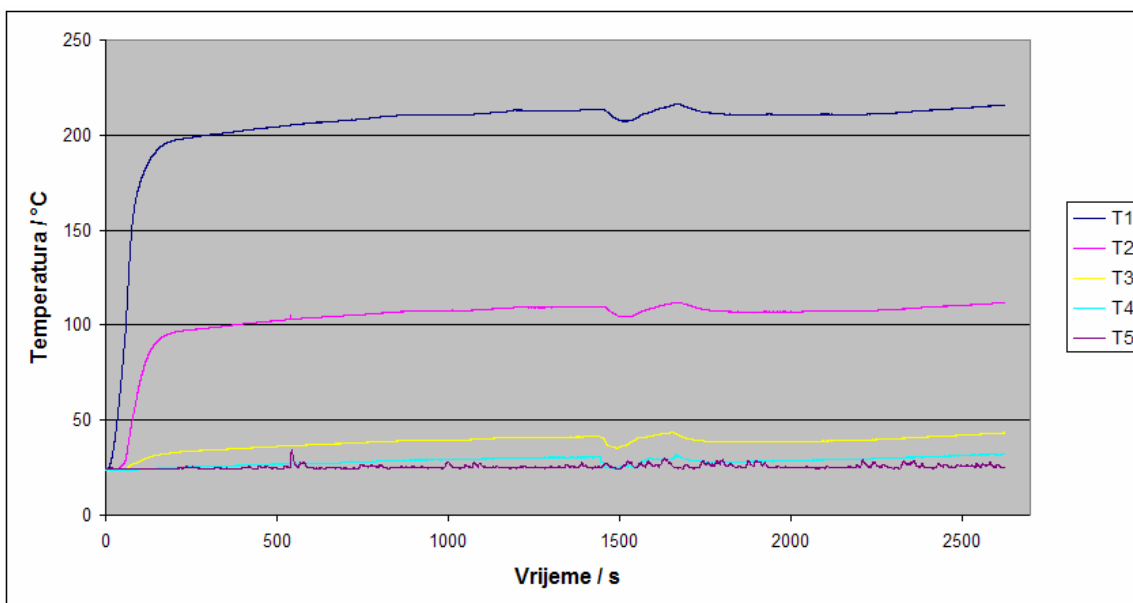
Na Slici 41. može se vidjeti da u trenutku kada uređaj počinje s radom (približno 53 sekunde nakon uključenja grijača) temperatura na mjestu  $T1$  iznosi približno  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a na mjestu  $T3$  približno  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . U ovoj konfiguraciji potrebna je razlika temperatura od približno  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  da bi uređaj proradio što je znatno manje nego kod zračnog hladnjaka. Razlog za tu razliku vjerovatno leži u razlici između unutarnjih dijelova hladnjaka. Do pada temperature dolazi nakon isključenja napajanja grijača. Temperature  $T3$  i  $T4$  gotovo da se nisu mijenjale u ovako kratkom vremenu rada.

### 3.2.9 Mjerenje karakteristika uređaja u stacionarnom stanju s vodenim hlađenjem i keramičkim poroznim elementom

Mjerenje je izvedeno tako da je u trenutku uključenja grijača počelo teći vrijeme snimanja. Snimanje je trajalo dvije tisuće i sedam stotina sekundi što je bilo dovoljno da sve veličine dođu u stacionarno stanje. Snaga grijača je bila konstantna i iznosila je  $65\text{ W}$ . Na Slici 42. prikazana je amplituda napona na linearnom alternatoru  $U_i$ . Na Slici 43. prikazane su temperature. Mjerna mjesta za temperature opisana su u poglavlju 3.1.3.



**Slika 42. Prikaz amplitude izlaznog napona  $U_i$  tijekom pokretanja i stacionarnog rada uređaja s vodenim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom**

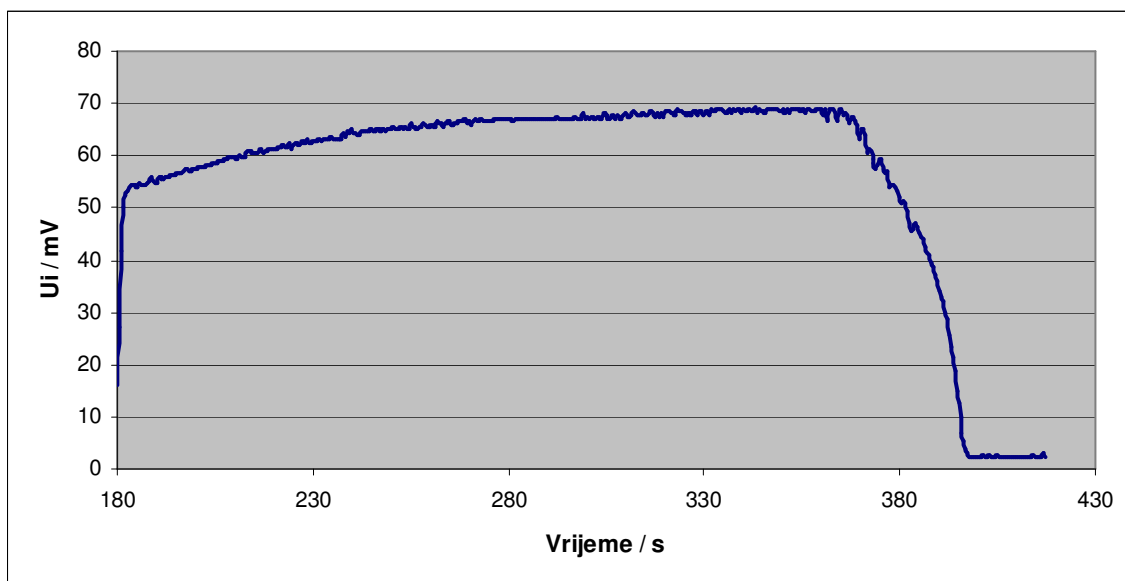


**Slika 43. Prikaz temperatura tijekom pokretanja i stacionarnog rada uređaja s vodenim hladnjakom i keramičkim poroznim elementom**

Zbog manje mase i toplinskog kapaciteta vodenog hladnjaka potrebno je manje vrijeme za dolazak u stacionarno stanje rada nego kod zračnog hladnjaka. Vodeni hladnjak osigurava znatno bolje hlađenje i zbog toga ne dolazi do povećavanja temperature  $T_3$  i padanja amplitude izlaznog napona  $U_i$ . Tijekom eksperimenta temperatura rashladne vode na ulazu u hladnjak bila je približno konstantna. U tisuću četiri stotine pedeset sekundi otvaranjem ventila naglo je povećan protok rashladne vode kroz hladnjak. Nakon pedeset sekundi protok je vraćen u početno stanje. Ova promjena uvjeta hlađenja gotovo trenutno se odrazila na temperature  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  i  $T_4$  koje su se spustile za iznos od približno  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Poboljšani uvjeti hlađenja dovode do povećavanja amplitude izlaznog napona za  $U_i = 9\text{ mV}$  što je poboljšanje za približno  $5\%$ . Ovaj eksperiment jasno pokazuje da hlađenje ima važan utjecaj na efikasnost termoakustičkog generatora.

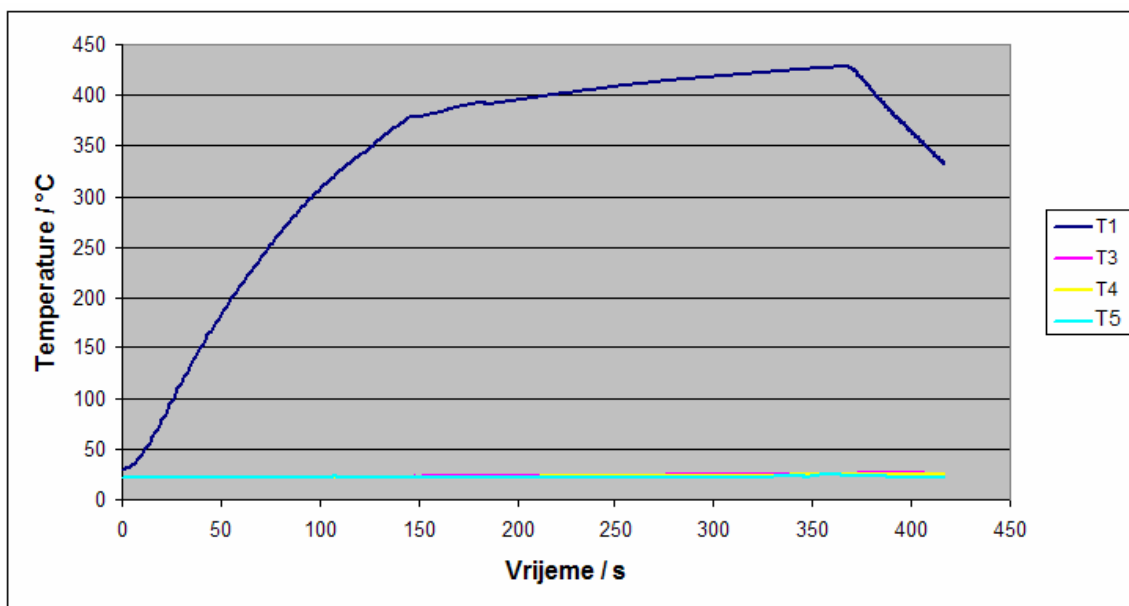
### 3.2.10 Mjerenje dinamičkih karakteristika, pokretanje i zaustavljanje uređaja sa zračnim hlađenjem i žičanim poroznim elementom

Prije početka mjerenja uređaj je rastavljen, vraćen je zračni hladnjak i zamijenjen keramički porozni element sa žičanim. Mjerenje je izvedeno tako da je u trenutku uključivanja grijača počelo teći vrijeme snimanja. Snimanje je trajalo četiri stotine sekundi. Snaga grijača je bila konstantna i iznosila je 65 W. Na Slici 44. prikazana je amplituda napona na linearnom alternatoru  $U_i$ . Na Slici 45. prikazane su temperature. Mjerna mjesta za temperature opisana su u poglavlju 3.1.3.



**Slika 44. Prikaz amplitude izlaznog napona  $U_i$  tijekom pokretanja i zaustavljanja uređaja sa zračnim hladnjakom i žičanim poroznim elementom**

Iz Slike 44. je vidljivo da treba proći stotinu i osamdeset sekundi nakon uključivanja grijača do pojave napona na izlazu. To je gotovo tri puta više nego kod pokretanja s keramičkim poroznim elementom. Početak rada je potpuno drugačiji nego u prijašnjim konfiguracijama, amplituda napona naglo poraste do iznosa od  $U_i = 53$  mV, nakon toga povećanje amplitude se nastavlja znatno sporije. Nakon pedesetak sekundi od pojavljivanja izlaznog napona amplituda prestaje rasti i dolazi do kvazistacionarnog stanja rada. Maksimalna postignuta amplituda iznosi 70 mV, to je više nego dvostruko manje nego u prijašnjim mjerenjima, a snaga grijača nije promijenjena. U tristo sedamdesetoj sekundi isključeno je napajanje grijača što uzrokuje postupno smanjenje amplitude. Potrebno je tridesetak sekundi da uređaj u potpunosti prestane raditi.

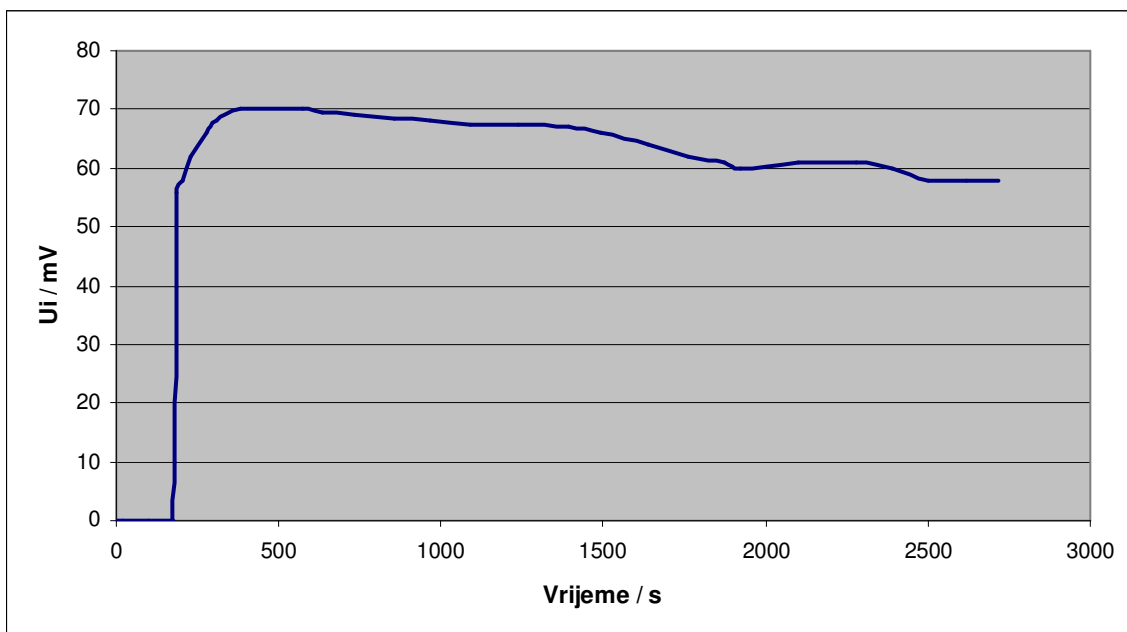


**Slika 45. Prikaz temperatura tijekom pokretanja i zaustavljanja rada uređaja sa zračnim hladnjakom i žičanim poroznim elementom**

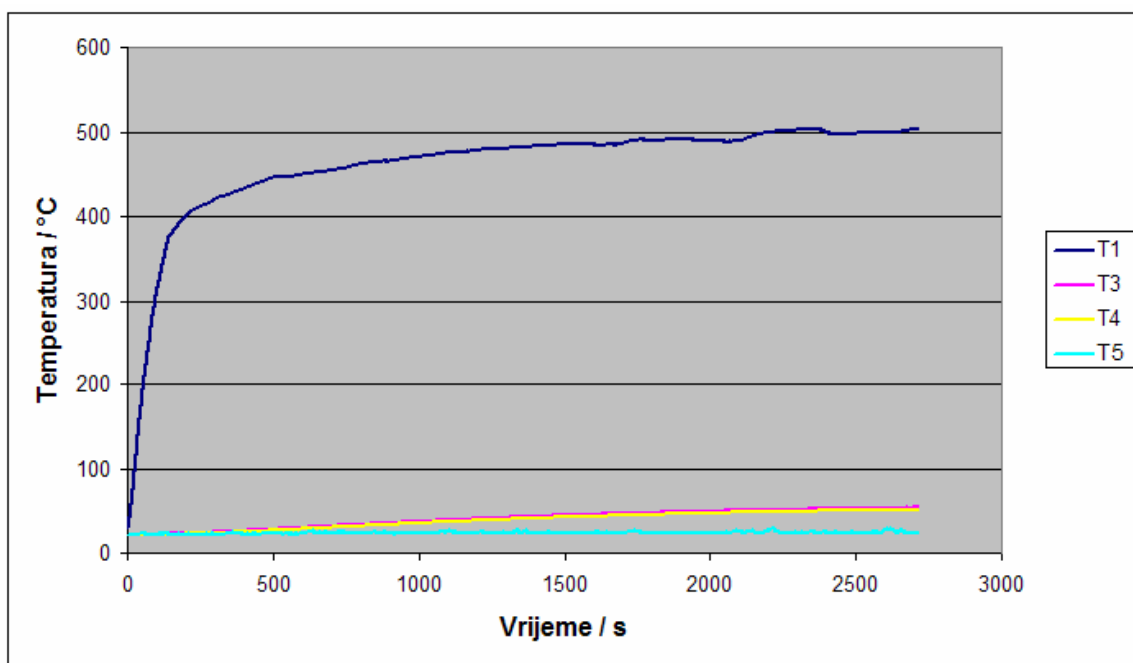
Na Slici 45. može se vidjeti da u trenutku kada uređaj počinje s radom (180 sekundi nakon uključenja grijača) temperatura na mjestu  $T1$  iznosi približno  $390\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a na mjestu  $T3$  približno  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . U ovoj konfiguraciji potrebna je razlika temperatura od približno  $360\text{ }^{\circ}\text{C}$  da bi uređaj proradio što je znatno više nego kod rada sa keramičkim poroznim elementom. U četiri stotine dvadeset sekundi snimanja nije došlo do promjena temperatura  $T3$  i  $T4$  što ukazuje na veću toplinsku tromost žičanog poroznog elementa u odnosu na keramički.

### **3.2.11 Mjerenje karakteristika uređaja u stacionarnom stanju sa zračnim hladenjem i žičanim poroznim elementom**

Mjerenje je izvedeno tako da je u trenutku uključenja grijača počelo teći vrijeme snimanja. Snimanje je trajalo 2740 sekundi što je bilo dovoljno da sve veličine dođu u stacionarno stanje. Snaga grijača je bila konstantna i iznosila je  $65\text{ W}$ . Na Slici 46. prikazana je amplituda napona na linearnom alternatoru  $U_i$ . Na Slici 47. prikazane su temperature. Mjerna mjesta za temperature opisana su u poglavlju 3.1.3



**Slika 46. Prikaz amplitude izlaznog napona  $U_i$  tijekom pokretanja i stacionarnog rada uređaja sa zračnim hladnjakom i žičanim poroznim elementom**



**Slika 47. Prikaz temperatura tijekom pokretanja i stacionarnog rada uređaja sa zračnim hladnjakom i žičanim poroznim elementom**

Amplitude napona su znatno manje nego u prethodnim konfiguracijama i potrebno je dulje vrijeme da se stacioniraju. Za vrijeme progrijavanja uređaja amplitude napona su se smanjivale. Ukupno smanjenje iznosi 12 mV što je približno 17 % od početne vrijednosti. Razlog za smanjivanje amplitude je vjerovatno isti kao i kod rada s keramičkim poroznim elementom. Iz Slike 47. je vidljivo da su temperaturne razlike između  $T_1$  i  $T_3$  u stacionarnom radu oko 450 °C što je za 280 °C više nego u radu s keramičkim poroznim elementom.

### 3.2.12 Mjerenje karakteristika uređaja uz podizanje srednjeg tlaka radnog plina

Konstrukcija uređaja je zamišljena tako da se tijekom rada može podizati srednji tlak radnog medija. Na svim spojevima su osigurane brtve koje sprječavaju strujanje radnog medija. Prilikom prvog pokušaja dizanja srednjeg tlaka primjećeno je da postoji velika propusnost što je onemogućavalo i kratkotrajno podizanje tlaka. Najveći gubici bili su na prirubnicama od pleksiglasa koje zbog svoje male krutosti nisu mogle držati brtvu ravnomjerno pritisnutom. Izradom i ugradnjom čeličnih pojačanja taj problem je riješen. Ponovni pokušaj podizanja tlaka pokazuje da je brtvljenje znatno bolje, ali opet nije potpuno. Ovaj put tlak pada puno sporije što otežava lociranje mjesta propuštanja. Za mjerenje tlaka korišten je senzor opisan u poglavlju 3.1.3 i postavljen prema Slici 11. Naponski signal sa senzora spojen je u mjernu centralu. Iz mjerenog napona tlak se izračunava po izrazu (23) kojeg je dao proizvođač senzora.

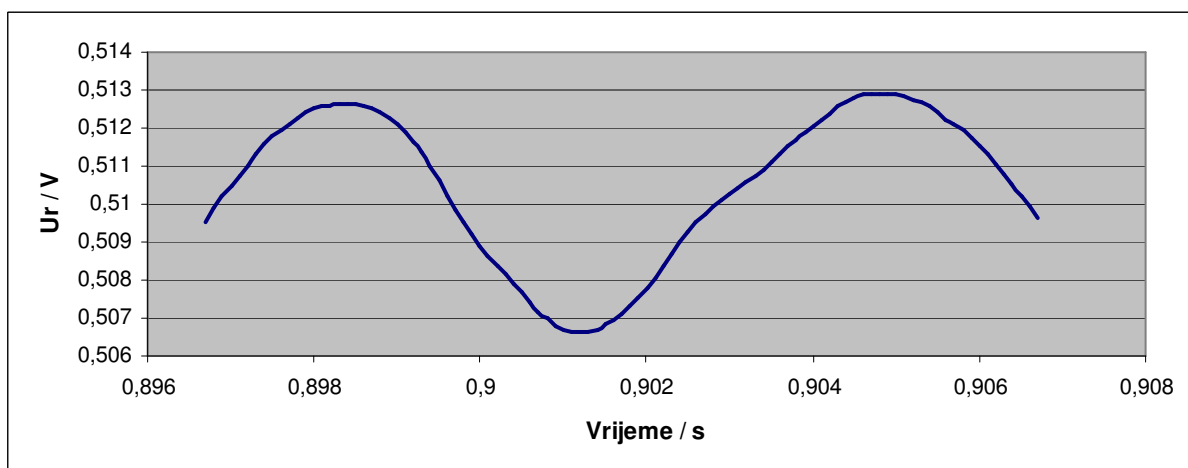
$$p_s = \frac{(U_r - U_{\min})}{S} \quad (23)$$

$p_s$  predstavlja tlak izražen u PSI,  $U_r$  predstavlja napon dobiven sa senzora tlaka,  $U_{\min}$  je minimalni napon koji senzor daje, on iznosi 0,5 V,  $S$  je osjetljivost senzora, ona iznosi 45,49 mV/PSI. Nakon uvrštavanja odnosa između funti po kvadratnom colu (PSI) i paskala (Pa) iz [7] i sređivanja izraza (23) dobiva se izraz (24) koji je korišten u određivanju tlaka.

$$p_{sp} = (U_r - 0,5) \cdot 151567 \quad (24)$$

$p_{sp}$  predstavlja tlak izražen u Pa.

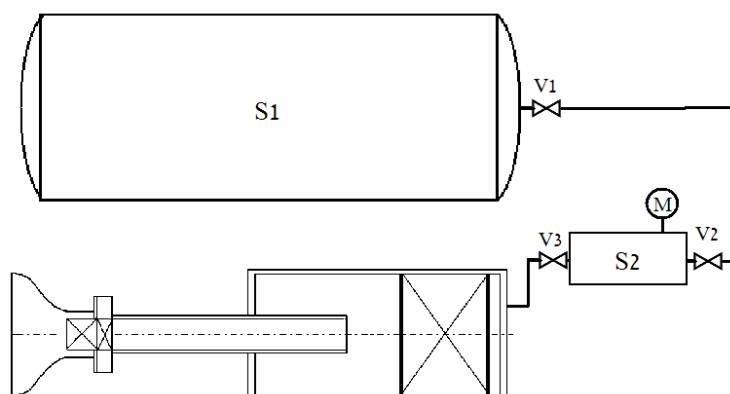
Na slici 48 prikazan je signal sa senzora tlaka za vrijeme kvazistacionarnog rada uređaja sa amplitudom izlaznog napona od 162mV.



Slika 48. Signal sa senzora tlaka

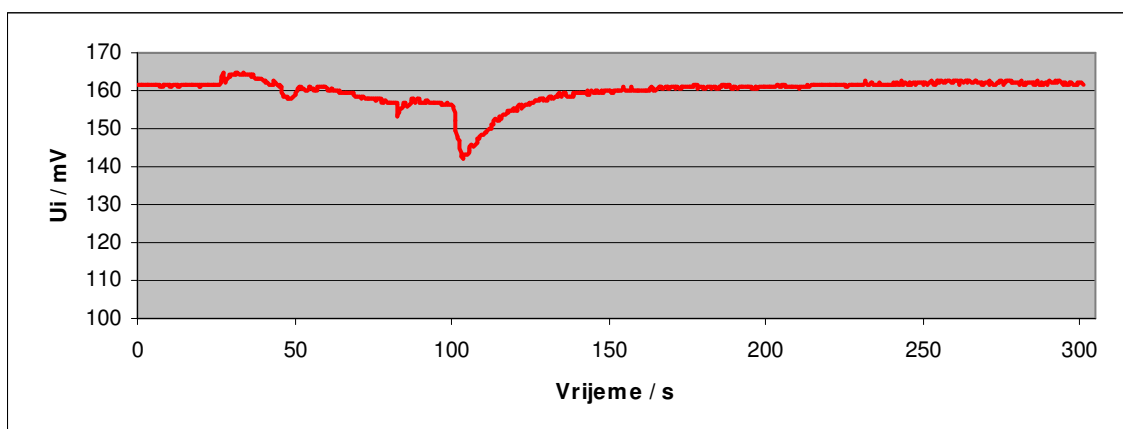
Očitanjem vrhova naponskog signala i njihovim uvrštavanjem u izraz (24) dobiva se raspon oscilacija tlaka. Oduzimanjem srednjeg tlaka i djeljenjem sa 2 dobiva se amplituda oscilacija tlaka i ona približno iznosi 910 Pa.

Slika 49. prikazuje skicu punjenja uređaja zrakom.



**Slika 49. Povećanje tlaka u ispitnom uređaju**

Veliki spremnik S1 napunjen je zrakom na tlaku od približno pet bara, volumen spremnika S1 znatno je veći od volumena spremnika S2 i termoakustičkog generatora. Tijekom cijelog eksperimenta ventil V1 je otvoren. Eksperiment je tekao tako da je uređaj pušten u rad sa snagom na grijачu od 65 W i atmosferskim tlakom. Ventil V3 je otvoren, a V2 zatvoren tako da u spremniku S2 vlada atmosferski tlak. Nakon jednog i pol sata rada zbog stacioniranja svih veličina započeto je podizanje tlaka. Ventil V2 je postupno otvaran dok manometar M nije pokazao 0.4 bar, u tom trenutku zatvoreni su ventili V2 i V3 te je ispitni uređaj ostavljen da se spontano isprazni. Rezultati mjerenja prikazani su na Slici 50.



**Slika 50. Amplituda napona  $U_i$  tijekom promjene tlaka radnog medija**

Trideset sekundi nakon početka snimanja počelo je dizanje tlaka radnog medija, a završeno je u stotoj sekundi. Oscilacije amplitude izlaznog napona u tom periodu vidljive na Slici 50. vjerojatno su nastale zbog povećanja volumena u kojemu se širi zvuk. Nakon zatvaranja ventila V3 tlak u uređaju je bio povišen, a svi ostali parametri jednaki onima prije početka dizanja tlaka. Evidentno je da prilikom spontanog pražnjenja amplituda postupno raste što znači da smanjenje tlaka povećava učinkovitost pretvorbe. Obzirom da konstrukcija uređaja nije dopustila podizanje i zadržavanje povišenog tlaka smatram da djelovanje tlaka nije dovoljno ispitano da bi se dao neki zaključak.

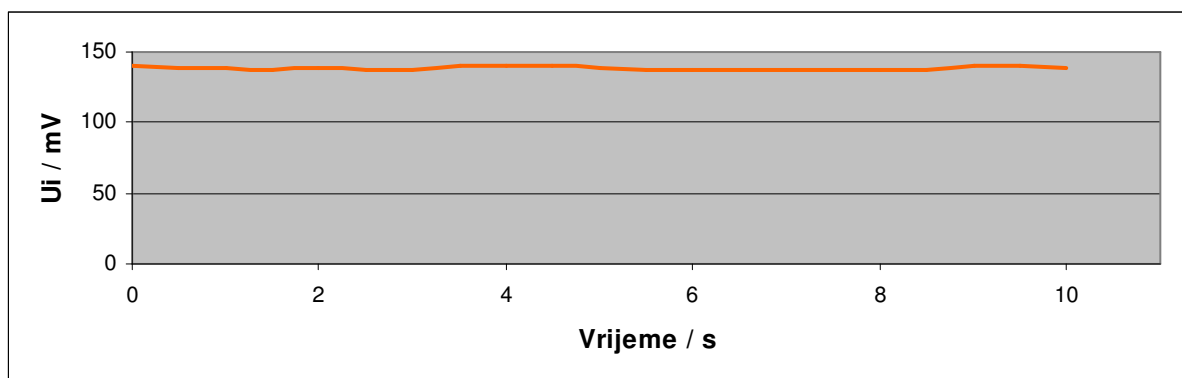
### 3.2.13 Mjerenje karakteristika uređaja kod dovođenja topline koncentriranim sunčevim zračenjem

Da bi se toplina dovođila koncentriranim sunčevim zračenjem potrebno je rastaviti dio uređaja te zamjeniti električni grijač i njegove nosače prozirnim staklom. Za ovo mjerenje odabran je keramički porozni element zbog toga što su prethodna mjerenja pokazala da uređaj radi efikasnije nego sa žičanim. Izabran je zračni hladnjak da se izbjegnu cjevovodi i spremnici rashladne vode.

Termoakustički generator i sva mjerna oprema postavljeni su i spojeni u dvorištu ispred laboratorija (Slika 51). Vremenski uvjeti su bili povoljni, nije bilo oblaka (izmjeren intenzitet globalnog zračenja okomito na ravninu otvora zrcala iznosio je oko  $1000 \text{ W/m}^2$ ). Nakon otkrivanja zrcala podešen je položaj postolja tako da fokus pada na porozni element te je praćen rad uređaja. Rezultati mjerenja prikazani su na Slici 52 i 53.

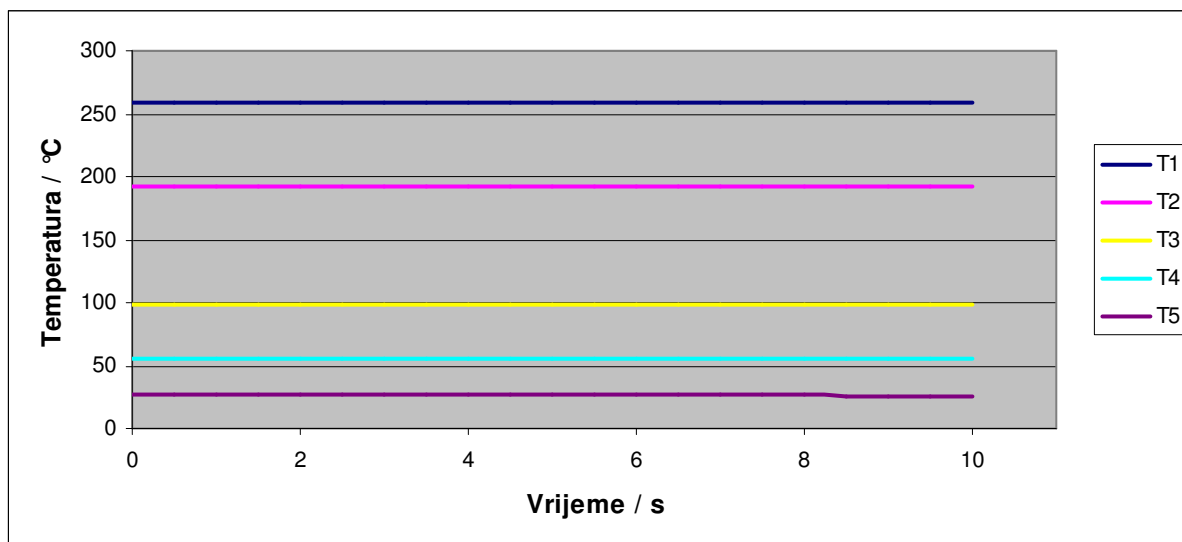


Slika 51. Termoakustički generator u radu sa koncentriranim sunčevim zračenjem



Slika 52. Amplituda napona  $U_i$  tijekom rada sa dovođenjem topline koncentriranim sunčevim zračenjem





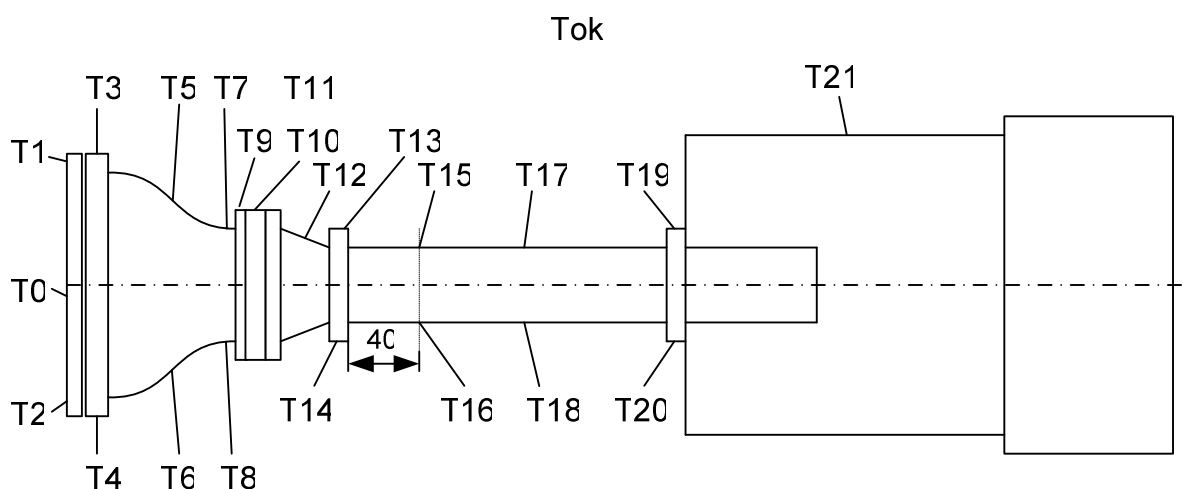
**Slika 53. Temperature tijekom rada sa dovođenjem topline koncentriranim sunčevim zračenjem**

Snaga koju zrcalo predaje uređaju iznosi približno 300 W. Iz Slike 52 je vidljivo da amplituda napona  $U_i$  iznosi oko 140 mV, što je za 20 mV manje nego kod rada sa električnim grijačem i ulaznom snagom od 65 W. Razlog smanjivanja vjerovatno je u lošem pozicioniranju fokusa u odnosu na porozni element. Iz Slike 53 je vidljivo da temperaturna razlika na poroznom elementu iznosi približno 160 °C što je za 10 °C manje nego u istoj konfiguraciji uređaja i dovođenja topline grijačem.

Mjerenja «na suncu» pokazuju opću sličnost s mjerenjima u laboratoriju (električni grijač) što dokazuje korektan rad i konstrukciju prihvatnika svjetlosti.

### 3.2.14 Temperature po oplošju termoakustičkog generatora

Mjerenje temperature izvedeno je u stacionarnom radu sa snagom grijača od 65 W. Na Slici 54 prikazana su mjesta na kojima se mjerila temperatura, a u Tablici 1 izmjerene vrijednosti.



**Slika 54. Mjerna mjesta temperatura na oplošju termoakustičkog generatora**

Tablica 1. Temperature po vanjskom oplošju termoakustičkog generatora

<b>Temperatura</b>	<b>°C</b>
Tok temp. okoline	21
T0 temp. ploče koja nosi grijač (sredina)	112
T1 temp. ploče ali iznad aluminijske prirubnice	76
T2 temp. ploče ali iznad aluminijske prirubnice	68
T3 temp. aluminijske (al.) prirubnice	81
T4 temp. al. prirubnice	73
T5 temp. al. prihvatnika	78
T6 temp. al. prihvatnika	62
T7 temp. al. prihvatnika uz razrezanu prirubnicu	72
T8 temp. al. prihvatnika uz razrezanu prirubnicu	62
T9 temp. razrezane prirubnice	64
T10 temp. hladnjaka (gornja površina)	58
T11 temp. na slobodnom kraju rebra hladnjaka	55
T12 temp. al. konusa na gornjoj površini	57
T13 temp. al. prirubnice na gornjoj površini	53
T14 temp. al. prirubnice na donjoj površini	51
T15 temp. al. rez. cijevi na gornjoj površini 40 mm od prirubn. konusa	46
T16 temp. al. rez. cijevi na donjoj površini 40 mm od prirubn. konusa	45
T17 temp. rezonantne al. cijevi na gornjoj površini	37
T18 temp. rezonantne al. cijevi na donjoj površini	36
T19 temp. al. prirubnice uz rezonantnu šupljinu (na gornjoj površini)	31
T20 temp. al. prirubnice uz rezonantnu šupljinu (na donjoj površini)	29
T21 temp. pleksiglasa rezonantne šupljine	23

Iz izmjerenih temperatura moguće je izračunati toplinske gubitke konvekcijom na okolinu. Temperature na drugim mjestima mogu se pretpostaviti na temelju navedenih u tablici.

## 4 Zaključak

Predmet je diplomskog rada bilo eksperimentalno ispitivanje solarnog termoakustičkog generatora električne energije ulazne snage reda veličine 100 W.

Ispitivanja su imala za cilj određivanje opće uspješnosti ranije izrađenog prototipa, ali i kroz mjerenja s alternativnim izvedbama pojedinih komponenti odrediti smjernice za daljnji razvoj cijelog uređaja.

Iako je uređaj konstruiran da može izdržati pretlak radnog medija do 0,5 bar (naime dio glavnih dijelova izrađen je od pleksiglasa, dakle osigurava se prozirnost uređaja koja je potrebna za demonstracijske svrhe) gotovo sva mjerenja izvršena su na tlaku okoline. Razlog tome su u manjoj mjeri bili problemi brtvljenja na povišenom tlaku, ali još više izostanak očekivanog značajnijeg pozitivnog utjecaja povišenog tlaka radnog medija na izlazni napon linearnog alternatora u promatranom području tlaka. U tom smislu jedan je od prvih zaključaka da nova verzija uređaja treba biti konstruirana za tlakove od najmanje 10 bara.

Jačina zvuka proizvedenog konverzijom toplinske energije grijača kod snage grijanja od 65 W (ova snaga praktički je jednaka u svim mjerenjima osim onom kad se dovodi koncentrirana sunčeva energija) iznosi 120 dB. Odgovarajući zvučni tlak iznosi 18 Pa.

Eksperimentalnim putem određena je dužina rezonantne cijevi koja u sklopu s ostalim komponentama omogućava da linearni alternator radi u području bliskom svojoj vlastitoj frekvenciji – kada daje najveći izlazni napon. Tako se može reći da ovaj uređaj radi na frekvenciji od 146 Hz bez obzira na intenzitet grijanja (bilo električnim grijačem bilo koncentriranjem sunčeve energije).

Pojava zvučnih valova registrirana je već kod temperaturne razlike na poroznom elementu od 80 °C za slučaj kombinacije keramičkog poroznog elementa i vodenog hlađenja. Za slučaj kombinacije keramičkog elementa i zračnog hlađenja termoakustički proces započeo je kod temperaturne razlike od 180 °C. Sve to ukazuje na mogućnost korištenja širokog kruga izvora otpadne topline za proizvodnju električne energije.

Alternativno testiranje dva različita tipa poroznog elementa (keramičkog i žičanog) u ovakvoj prototipnoj varijanti pokazuje bržu reakciju keramičkog poroznog elementa. To znači da bi on bio pogodniji za primjenu u slučaju korištenja intermitentne sunčeve energije.

Korišteni linearni alternator ima mogućnost mjerenja aksijalnog pomaka koja u ovom radu nije bila registrirana mjernom centralom kao ostale mjerne veličine. Međutim, određenom jednostavnom metodom utvrđeno je da pomak iznosi (u opisanim eksperimentalnim uvjetima) oko +/- 0,35 mm. Tako mali pomaci i relativno velika debljina žice korištenih zavojnica objašnjavaju male vrijednosti izmjerenog izlaznog napona. Budući da se istovremeno alternator kočio dinamometrom koji je pokazao silu kod koje pomak dolazi na nulu reda veličine 10 N, slijedi da se alternator mora u potpunosti rekonstruirati. Njegova sadašnja iskoristivost je gotovo nikakva, a mogućnosti za poboljšanja su jasne i jednostavno izvedive. To je i glavni zadatak u budućem razvoju ovog uređaja.

## Literatura

- [1] Swift, G.W., Thermoacoustic engines, Acoustical Society of America, 1988.
- [2] Tijani M.E.H., Loudspeaker-driven thermo-acoustic refrigeration, PhD Thesis, Unpublished, Eindhoven University of Technology, 2001.
- [3] Toplinske tablice FSB
- [4] Corey, J.A. & Spoor P.S., Integration of resonant electric power conversion with thermoacoustic engines and coolers, članak
- [5] <http://www.kanthal.com/>
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/Sound\\_pressure#Sound\\_pressure\\_level](http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure#Sound_pressure_level)
- [7] Kraut, B., Krautov strojarski priručnik, Axiom, d.o.o., Zagreb, 1997.