

# Električna otpornost kvazikristala d-AlCoNi u smjeru periodične osi

---

**Guerieri, Marino**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, University of Split, Faculty of science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:166:524410>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-04**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Science](#)



Sveučilište u Splitu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Marino Guerieri

**Električna otpornost kvazikristala  $d$ -AlCoNi u  
smjeru periodične osi**

Završni rad

Mentor: prof. dr. sc. Ante Bilušić

Split, rujan 2016.

## **Zahvala**

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Anti Bilušiću te kolegici Kristini Latinčić na pomoći u radu s programskim paketom LabVIEW.

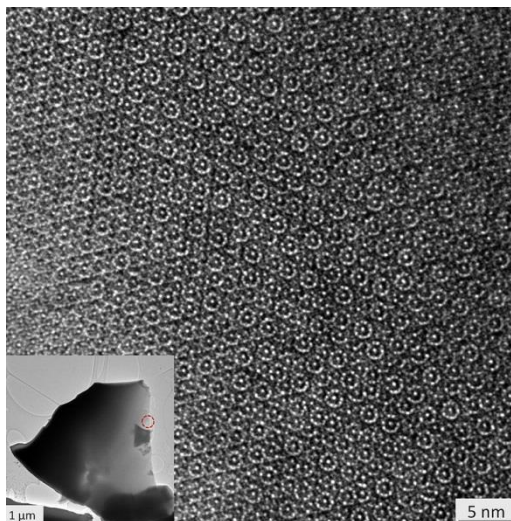
# Sadržaj

<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Teorijska osnova</b> .....	3
2.1. Kvizikristali .....	3
2.2. Ohmov zakon i električna otpornost .....	5
2.3. Kvizikristal <i>d</i> -AlCoNi .....	7
<b>3. Provedba eksperimenta</b> .....	9
3.1. Priprema uzorka .....	9
3.2. Princip mjerenja i mjerni uređaji .....	11
3.3. Obrada mjernih rezultata .....	14
<b>4. Rezultati</b> .....	15
<b>5. Zaključak</b> .....	18
<b>Literatura</b> .....	20

# 1. Uvod

Tvari u prirodi možemo svrstavati u različite kategorije ovisno o svojstvima koja razmatramo. Tako primjerice tvari prema agregatnom stanju možemo dijeliti na krute, tekuće i plinove, ili pak na para-, dija- i fero-magnete ukoliko nas zanimaju magnetska svojstva. Što se tiče strukture tvari, tvari smo navikli svrstavati na amorfne, one čija je struktura neuređena, kaotična odnosno nepravilna, te kristale, koji imaju uređenu strukturu u smislu da se ona sastoji od osnovnih jedinke (kristalne rešetke) koje se prostorno periodički ponavljaju u svim smjerovima.

U ovom radu će se pozornost obratiti na materijale koji su relativno nedavno otkriveni, a koji ne spadaju ni u jednu od tih prethodno definiranih kategorija. Oni se zovu kvazikristali, a njihova struktura je takva da iako jest dugosežno uređena, ipak nije periodična na način koji shvaćamo kristalnu rešetku; translacijska simetrija u sva tri smjera kod takvih materijala ne postoji; primjer je na slici 1.1. Dublje objašnjenje kvazikristala se nalazi u potpoglavlju 2.1. Kvazikristali. Glavno pitanje koje se postavlja u vezi materijala s kvazikristalnom strukturom je hoće li takva struktura dovesti do nekakvih novih fizikalnih pojava, kvalitativno različitih od onih koje smo do sada imali prilike uočiti s kristalnom i amorfnom materijom, ili su fizikalna svojstva kvazikristala posljedica kompleksne uređenosti koja nije direktno vezana za kvaziperiodičnost.



Slika 1.1. Mikroskopska slika mikronske granule prirodno prisutnog kvazikristala  $A_{171}Ni_{24}Fe_5$ . Kvazikristal posjeduje rotacijsku simetriju desetog reda [1]

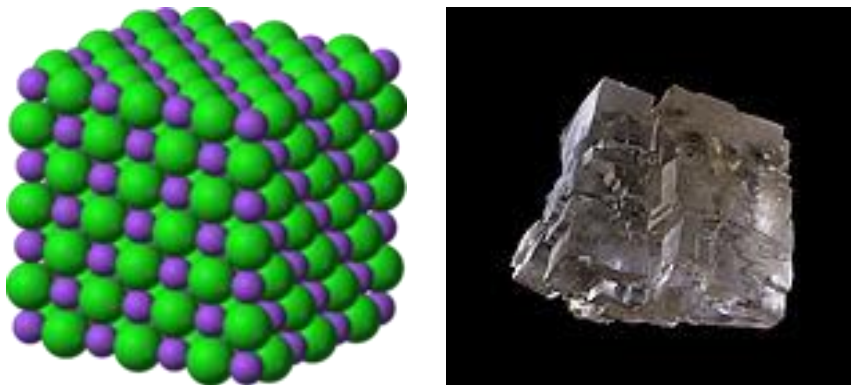
U ovom radu će se razmotriti dekagonalni kvazikristal  $d\text{-AlCoNi}$ ; dekagonalni znači da posjeduje rotacijsku simetriju desetog reda. Prednost dekagonalnih kvazikristala, u odnosu na one koji posjeduju rotacijsku simetriju nekog drugog reda, je u tome da se njihova struktura sastoji od dvodimenzionalnih kvazikristalnih ravnina periodično poslaganih u smjeru okomitom na tu kvazikristalnu ravninu, što znači da se na istom uzroku mogu usporediti svojstva u periodičnom i kvazikristalnim smjerovima. Dodatna prednost je i u tome da se maksoskopski dekagonalni kvazikristali mogu sintetizirati koristeći iste metode kao i „obični“ kristali.

Svojstvo koje u ovom radu promatramo jest temperaturna ovisnost električne otpornosti uzroka  $d\text{-AlCoNi}$  u periodičnom smjeru. Metoda mjerenja električnog otpora uzoraka je već razvijena te je opisana u poglavlju 3. Dosadašnja mjerenja na temperaturama od 2 do 340K su pokazala da električna otpornost ima metalni karakter; po redu veličine i temperaturnoj ovisnosti [2]. Cilj ovog rada je izmjeriti električnu otpornost na temperaturama višima od sobne te je usporediti s dosadašnjim rezultatima.

## 2. Teorijski uvod

### 2.1. Kvazikristali

Prije definicije i razmatranja kvazikristala, vratit ćemo se na pojam kristala. Na taj način će biti jasnije zašto je otkriće kvazikristala predstavljalo veliku stepenicu u našem razumijevanju čvrste materije. Definicija kristala je „čvrsti materijal čiji su sastavni dijelovi (atomi, molekule ili ioni) poredani u visoko uređenu mikroskopsku strukturu – kristalnu rešetku – koja se prostorno širi u svim smjerovima“. Primjera kristala u prirodi imamo mnogo; iz svakodnevnog života nam je vjerojatno najbliži natrijev klorid (kuhinjska sol), prikazana na slici 2.1. [3].

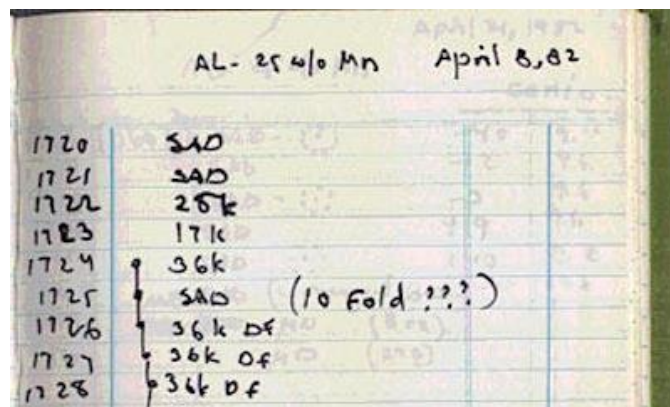


Slika 2.1. Mikroskopska struktura natrijevog klorida (NaCl; lijevo). Natrijevi ioni su ljubičasto obojeni; klor je zeleno obojen. Atomi su poslagani u kubičnu kristalnu rešetku. Makroskopski (~16 cm) kristal natrijevog klorida prikazan je lijevo. Pravi kutevi među ravninama su posljedica kubne simetrije kristalne rešetke [3].

Definicija  $n$ -tog reda rotacijske simetrije jest da da se izgled nekakvog oblika ne mijenja kada se oblik zarotira  $360^\circ/n$  stupnjeva [4].

Sama definicija kristala kao takvog nameće uvjet na rotacijske simetrije koje kristal smije zadovoljavati; kristali mogu imati samo rotacijske simetrije drugog, trećeg, četvrtog i šestog reda (invarijantnost na rotaciju za  $180^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ). Često korištena metoda za promatranje kristala je raspršivanje X-zraka na uzorku kristala. Tako dobivene slike (difraktogrami), pokazuju oštre i diskretne svijetle točke te je vidljiva periodičnost strukture. [3]

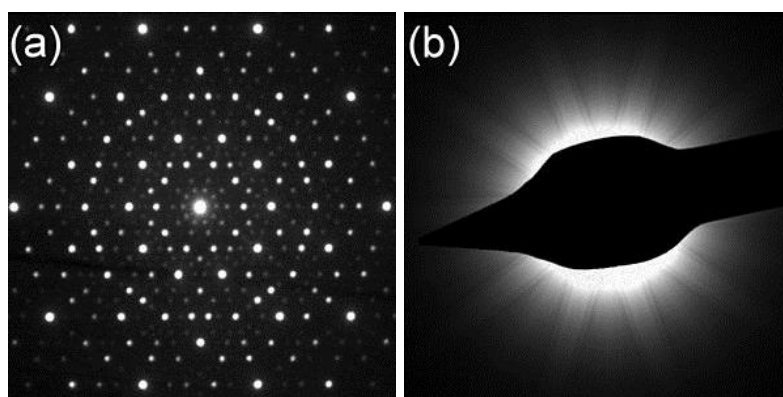
Godina 1984. prvi put su objavljeni rezultati o otkriću materije koja, iako posjeduje diskretni difrakcijski dijagram, ipak nije periodična. Takvo otkriće izazvalo je čuđenje Dana Schechtmana, izraelskog znanstvenika koji je taj materijal prvi uspio sintetizirati. U svojoj bilježnici on izražava čuđenje nad rezultatom koji je dobio. [5]



Slika 2.2. Schechtmanova bilježnica. Otkriće strukture koja ima rotacijsku simetriju desetog reda popraćeno je s čuđenjem. Primjetiti datum u gornjem desnom uglu; službeno je otkriće kvazikristala objavljeno čak 2 godine kasnije [5].

Otkriće kvazikristala promijenilo je prethodno shvaćanje da svaka dugosežno uređena materija nužno mora biti kristalne strukture, odnosno imati 3 osi translacijske simetrije. Kvazikristal, stoga, možemo definirati kao strukturu koja je dugosežno uređena (vidljivo kroz oštre difrakcijske maksimume), kontinuirano popunjava dostupan prostor, ali nije periodična te ima rotacijsku simetriju petog, osmog, desetog ili dvanaestog reda. Matematički egzaktnije bilo bi reći da je to struktura koja se ne može opisati modulacijom neke osnovne strukture ili superpozicijom jedne ili više podstrukture. [1]

Kvazikristale imenujemo prema redu rotacijske simetrije; stoga možemo govoriti redom o ikozaedarskim (6), okto- (8), deka- (10) i dodekagonalnim (12).



Slika 2.3. Elektronska difrakcije na uzorku prirodno prisutnog  $Al_{71}Ni_{24}Fe_5$  dekadagonalnog kvazikristala (prikaznog na slici 1.1), u smjeru okomitom na kvaziperiodične ravnine [1].



Dekagonalni kvazikristali su specifični po svojoj strukturi u tome da se sastoje od kvaziperiodičnih ravnina (2D kvazikristali) koje se periodično ponavljaju u smjeru okomitom na kvaziperiodične ravnine. Također, dobivaju se već postojećim metodama sinteze kristala, što olakšava njihovu izradu. Prednost takve strukture je da se na istom uzorku mogu vršiti mjerenja u svih 11 smjerova: deset kvazikristalnih i jednom periodičnom [2].

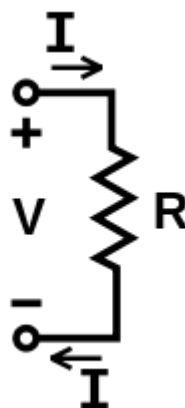
## 2.2. Ohmov zakon i električna otpornost

U ovom radu se vrši mjerenje električne otpornosti uzorka materijala. U nastavku slijedi objašnjenje osnovnih fizikalnih koncepata na kojima se eksperiment temelji; Ohmov zakon i električna otpornost materijala.

Ohmov zakon govori da je struja  $I$  koja prolazi između dvije točke vodiča direktno proporcionalna padu napona  $U$  između te dvije točke. Uvodeći konstantu proporcionalnosti, otpor  $R$ , Ohmov zakon glasi:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (1)$$

Jedinica za električni otpor je  $\Omega$  („Ohm“) [6]. Shematski prikaz otpornika  $R$  kroz koji prolazi struja  $I$  te vlada napon  $U$  se nalazi na slici 2.3.



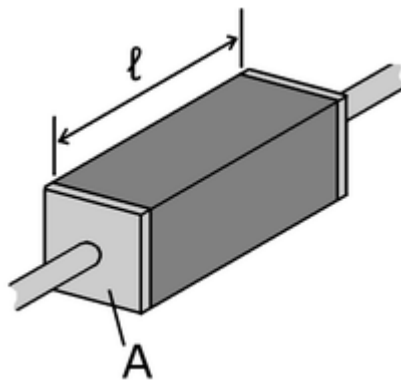
Slika 2.3.  $V(U)$ ,  $I$  i  $R$ , parametri Ohmovog zakona. Struja  $I$  uslijed razlike potencijala  $U$  teče kroz otpor  $R$ . [6]

Električni otpor nije svojstvo materijala; uzorci veće duljine te manjeg poprečnog presjeka imaju veći električni otpor. Imajući to na umu, definira se svojstvo zvano električna otpornost.

Električna otpornost je intrinzično svojstvo koje opisuje opiranje materijala prolasku električne struje. Označavamo je grčkim slovom  $\rho$ , SI jedinica za električnu otpornost je  $\Omega\text{m}$ . Definijska formula električne otpornosti, koja vrijedi za homogeni materijal (uzorak) uniformnog poprečnog presjeka s uniformnim tokom električne struje je

$$\rho = R \frac{A}{l}, \quad (2)$$

gdje je  $R$  električni otpor,  $l$  duljina te  $A$  poprečni presjek uzorka [7].



Slika 2.4. Uzorak materijala korištenog za definiciju pojma električne otpornosti. Uzorak je homogen, ima površinu poprečnog presjeka  $A$  te duljinu  $l$ . [7]

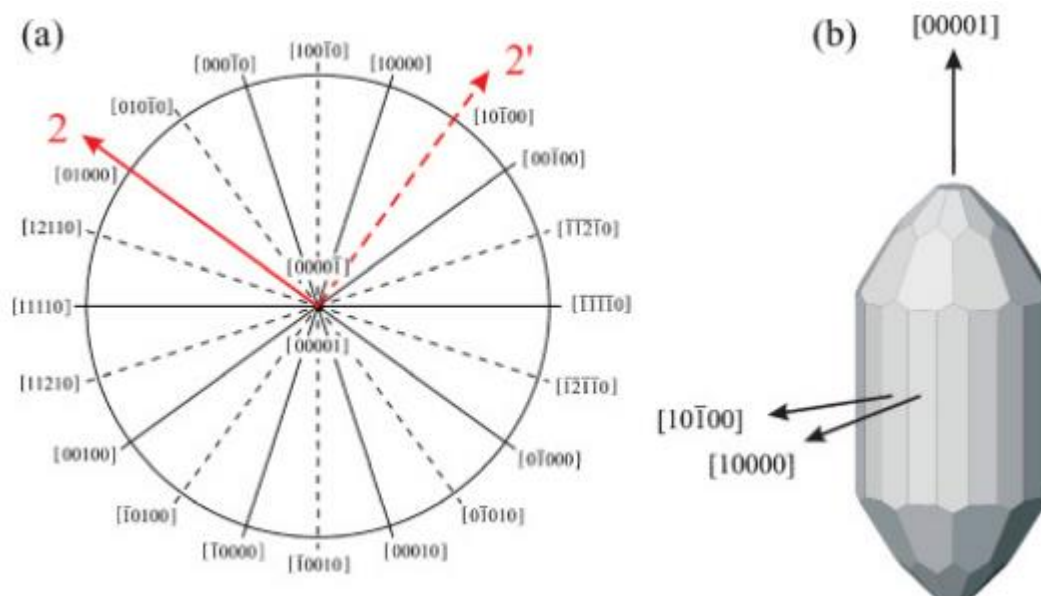
Niska otpornost karakteristična je za materijale koje zovemo vodičima, dok je vrlo visoka električna otpornost karakteristična za izolatore. Primjerice, aluminij, bakar i zlato su često upotrebljavani vodiči kod izrade žica; njihova otpornost je reda veličine  $10^{-8} \Omega\text{m}$  („bolji“ vodiči imaju otpornosti reda  $10^{-7}$  pa čak i do  $10^{-5} \Omega\text{m}$ ) [8], dok se keramike, papir i plastike često koriste kao izolatori, s intervalom otpornosti koji započinje od  $10^9 \Omega\text{m}$ , a proteže se u nekim slučajevima čak i do  $10^{20} \Omega\text{m}$  [9]. Ako se promotri nekakav tipičan slučaj iz prakse, primjerice obična bakrena žica koja je izolirana nekakvom plastikom, razlika u električnim vodljivostima vodiča i izolatora je barem 17 redova veličine!

Stoga, za određivanje električne otpornosti uzorka  $d\text{-AlCoNi}$  pri različitim temperaturama, provesti će se mjerenja više različitih parova napona i struja, odakle se može izračunati otpor pri danoj temperaturi. Dimenzije uzorka su poznate, odnosno mogu se izmjeriti; iz podataka o otporu i dimenzijama može se odrediti električna otpornost uzorka. Međutim, treba voditi

računa o tome kako je predstavljeni model u osnovi pojednostavljen; parametre će biti potrebno izabrati tako da navedene pretpostavke budu sačuvane (primjerice uvjet da struja bude homogena). Detaljna analiza navedenog se nalazi u poglavlju 3. Provedba eksperimenta.

### 2.3. Kvazikristal $d\text{-AlCoNi}$

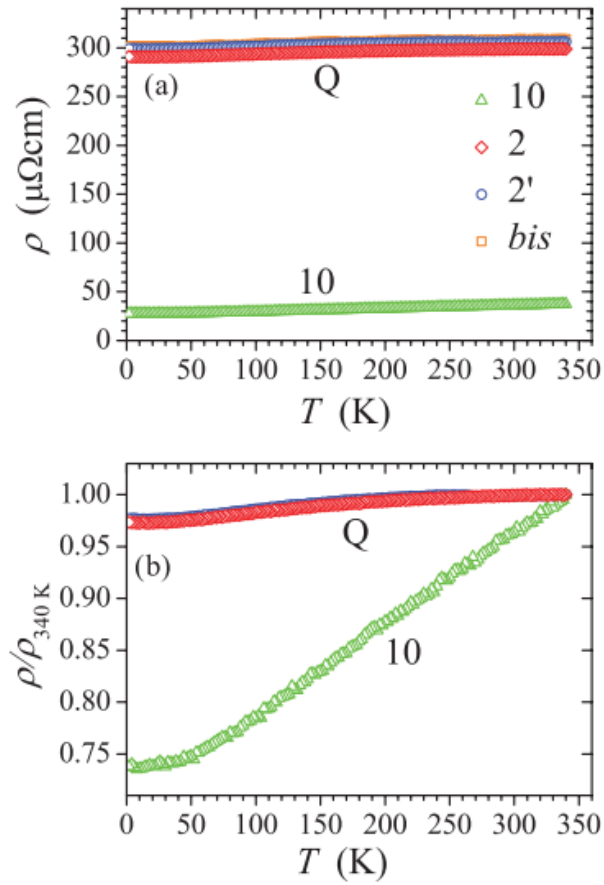
U ovom radu mjerenja će se vršiti nad dekadonalnim kvazikristalom  $d\text{-AlCoNi}$  i to u periodičnom smjeru (smjeru okomitom na kvazikristalne ravnine). Razmatranje će stoga biti ograničeno samo na taj smjer. Na slici 2.5. su prikazani kristalografski smjerovi kvazikristala  $d\text{-AlCoNi}$ .



Slika 2.5. Kristalografski smjerovi kvazikristala  $d\text{-AlCoNi}$ . Prikazano je 10 različitih pravaca unutar kvazikristalnih ravnina te pravac okomit na kvazikristalne ravnine  $[00001]$  [Bobnar].

Uzorak  $d\text{-AlCoNi}$  korišten u ovom eksperimentu izrezan je tako da je uzdužna os u smjeru pravca  $[00001]$ .

Dosadašnja mjerenja električne otpornosti u periodičnom smjeru pokazala su da ista ima karakter tipičan za metale, po redu veličine ( $10^{-7} \Omega\text{m}$ ) i temperaturnom koeficijentu otpora koji je pozitivan (PTC). Relativno povećanje otpornosti između temperatura od 2 i 340 K iznosilo je 26%. Na temperaturi od 340 K električna otpornost iznosi  $36 \mu\Omega\text{cm}$ . Ovisnost otpornosti o temperaturi iznad niskotemperaturne zone je linearna [2]. Graf je prikazan na slici 2.6.



Slika 2.6. Temperaturna ovisnost električne otpornosti  $\rho(T)$  dekaonalnog kvazikristala  $d\text{-AlCoNi}$ . Pravac s oznakom „10“ predstavlja periodični smjer. Gornji graf predstavlja apsolutnu vrijednost električne otpornosti u ovisnosti o temperaturi, dok je donji graf skaliran na njezinu vrijednost na 340 K [2].

### 3. Provedba eksperimenta

U ovom poglavlju će detaljno biti opisana metoda i eksperimentalni aparat koji smo koristili. Metoda mjerenja električnog otpora putem računala koristeći programski paket LabView već postoji (pogledati literaturu br. 10) te se ovdje koristi uz manje preinake.

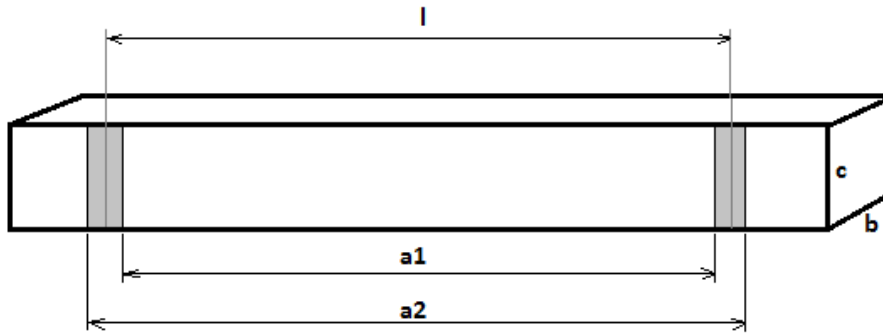
U kratkim crtama; korišteni su strujni izvor, voltmetar te peć u kojem se nalazi uzorak *d*-AlCoNi na koji su spojeni strujni i naponski kontakti. Kontrola instrumenata i peći se provodi putem računala koristeći programski paket LabVIEW. Raspon temperatura na kojima se mjerenje provodi se definira na računalu, kao i svi ostali parametri kojima se upravlja instrumentima i peći. Na željenim temperaturama se provodi snimanje *I-U* karakteristika iz kojih se računa otpor pri danoj temperaturi. Poznavajući dimenzije uzorka, računaju se otpornosti.

Najbitnije je kazati da smo mjerenje otpornosti proveli na temperaturnom rasponu od 30 do 200 °C uz korak od 2 °C.

#### 3.1. Priprema uzorka

Uzorak koji nam je dan na korištenje je približnih dimenzija 2 x 2 x 10 mm. Preciznijim mjerenjem pomičnom mjerkom utvrdili smo da su dimenzije poprečnog presjeka  $(1.95 \pm 0.05) \times (1.75 \pm 0.05 \text{ mm})$ . Preciznije utvrđivanje duljine uzorka nije bitno jer je relevantna duljina ona između naponskih kontakata; više o tome u nastavku.

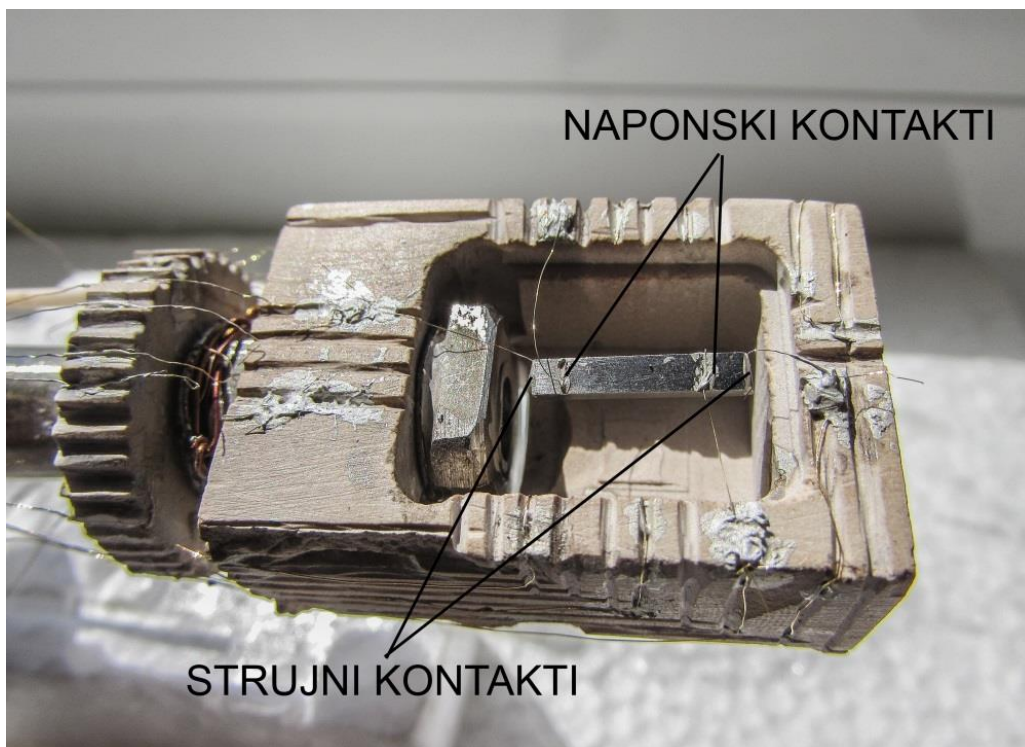
Za mjerenje električnog otpora uzorka koristili smo metodu četiri kontakta. Dvije strujne žice spajaju se na površine okomite na uzdužnu os, dok se dva naponska kontakta spajaju nešto dalje od samih krajeva kako bi ostavili dovoljno prostora da se tok struje kroz presjek homogenizira. Ipak, kontakti se ne smiju previše udaljiti od krajeva, odnosno međusobno previše približiti jer se tada smanjuje razlika potencijala među kontaktima i veći je utjecaj šuma na mjerenje. U skladu s rečenim, tada pri proračunu otpornosti putem izraza (2) ne koristimo duljinu čitavog uzorka već procijenjeni srednji razmak između naponskih kontakata (slika 3.1.). U našem slučaju to je  $6.3 \pm 0.6 \text{ mm}$ . Procijenili smo da je kontakte dovoljno udaljiti cca. 1.5 mm od krajeva. Uzorak se stavlja na nosač te se žice spajaju na predviđena kontakta mjesta.



Slika 3.1. Shematski prikaz geometrijskih karakteristika uzorka. Zasivljena područja pojednostavljeno prikazuju područje naponskih kontakata. Kao duljina  $l$  pri proračunu otpornosti se uzima udaljenost središta kontakata

$$l = \frac{a_1 + a_2}{2} \pm \frac{|a_1 - a_2|}{2}$$

Korištene su zlatne žice promjera  $50 \mu\text{m}$ , a kontakti su ostvareni srebrnom pastom otpornom na visoke temperature. Pripremljeni uzorak spojen na nosač se nalazi na slici 3.2.



Slika 3.2. Uzorak  $d\text{-AlCoNi}$  montiran na nosač. Na uzorak su spojene dvije struje i dvije naponske žice koje su potom spojene na predviđena kontaktna mjesta na nosaču.

Pripremljeni uzorak na nosaču se potom stavlja u staklenu cijev otpornu na visoke temperature te se umeće u peć, pazeći da uzorak bude na sredini peći. Izvan peći je sobna

temperatura te je bitno da uzorak bude udaljen od otvorenih krajeva. Pretpostavka je da je temperatura koju očitava peč jednaka temperaturi uzorka.

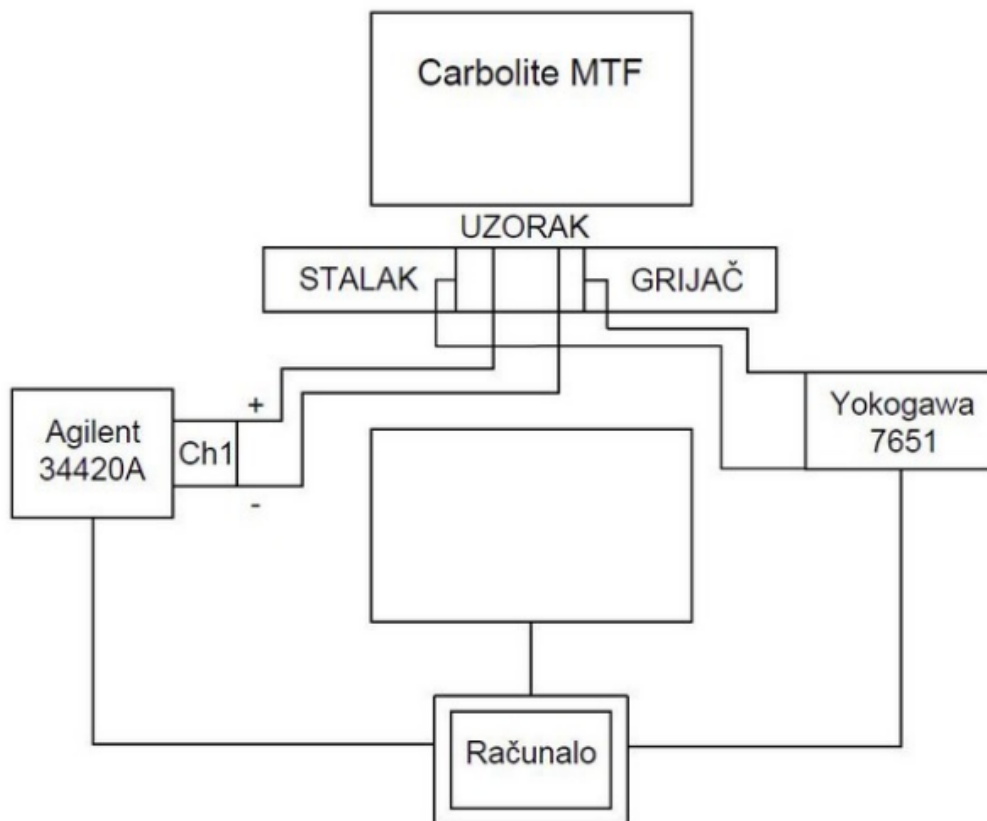
### 3.2. Princip mjerenja i mjerni uređaji



Slika 3.3. Eksperimentalni aparat; korištena je peč/temperaturni kontroler Carbolite MTF, naponski izvor/nano-voltmetar Agilent 34420A te strujni izvor – Yokogawa 7651. Uzorak se nalazi na nosaču unutar staklene cijevi te je umetnut u peč. [10]

Na slici 3.3. je prikazan eksperimentalni aparat. Svim mjernim aparatima se upravlja putem računala koristeći programski paket LabView; korisničko sučelje programa je prikazano na slici 3.5. Unutar LabVIEW-a zadajemo sve parametre eksperimenta; interval temperatura unutar kojeg provodimo mjerenje, promjenu u temperaturi između sukcesivnih mjerenja, brzinu promjene temperature u vremenu, intervale unutar kojih temperaturu smatramo dovoljno preciznom, raspon struja unutar kojih vršimo mjerenja napona, parametre strujnog izvora i voltmetra itd.

Struja se kroz uzorak pušta koristeći strujni izvor Yokogawa 7651, a pad napona se mjeri Agilent 34420A voltmetrom. Zbog korištene metode četiri kontakta, ne trebamo voditi računa o otporu žica kojima se struja dovodi i odvodi do uzorka. Isto tako, pošto voltmetar koji koristimo ima vrlo velik unutrašnji otpor, ne trebamo voditi računa o otporu žica za mjerenje napona. Znači, možemo pretpostaviti da su vrijednosti struja i napona koje instrumenti pokazuju zaista one vrijednosti koje su prisutne na našem uzorku. Shema spajanja mjernog aparata nalazi se na slici 3.4.



Slika 3.4. Shematski prikaz eksperimentalnog aparata. Peć Carbolite MTF regulira temperaturu uzorka, strujni izvor Yokogawa 7651 određuje struju koja teče kroz strujni krug, dok voltmetar Agilent 34420A mjeri pad napona koji se javlja na uzorku. Računalo na kojem je instaliran programski paket LabVIEW kontrolira temperaturu peći, struju koja se pušta kroz krug te bilježi mjerne rezultate [10].

Bitno je napomenuti da je prilikom snimanja  $I-U$  karakteristika potrebno pričekati određeno vrijeme da se vrijednosti struje i napona stabiliziraju prije nego što se napon izmjeri.



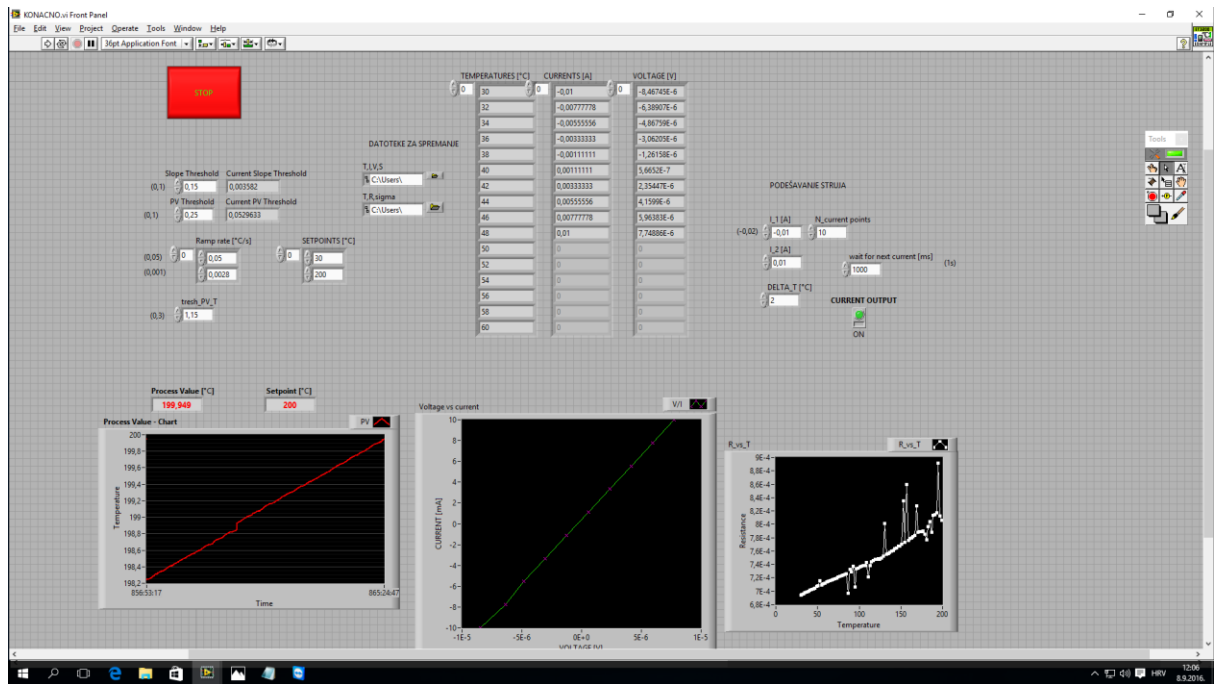
Sada kada su objašnjeni svi sastavni dijelovi, razmotriti će se kako sustav radi kao cjelina.

Nakon što je uzorak pripremljen i montiran, svi instrumenti priključeni i računalo s programskim paketom LabVIEW spremno, potrebno je zadati parametre unutar programa i započeti mjerenje. Parametri se nalaze na korisničkom sučelju LabVIEW programa (slika 3.5.).

Parametri koji se zadaju su početna i konačna temperatura uzorka (SETPOINTS), promjena temperature od mjerenja do mjerenja (DELTA\_T), brzina kojom peć dostiže početnu temperaturu te brzina kojom temperatura raste između početne i konačne temperature (Ramp rate), početna tolerancija na temperaturu (tresh\_PV\_T), tolerancija na temperaturu (PV Threshold) , najveća negativnu struju koja se pušta kroz uzorak ( $I_{-1}$ ), najveća pozitivna struju koja se pušta kroz uzorak ( $I_{+2}$ ), broj različitih ekvidistantnih struja između zadanih granica  $I_1$  ( $I_{-1}$ ) i  $I_2$  ( $I_{+2}$ ; N\_current\_points) te vrijeme čekanja između sukcesivnih mjerenja struje (wait for next current). Lista vrijednosti svih parametara koje su se koristili u ovom eksperimentu se nalazi u Prilogu 1.

Vrijednosti parametara koje utječu na brzinu izvođenja mjerenja su uglavnom iskustveno određene na način da se čitavo mjerenje završi u razumnom vremenskom roku, ali da sustav ostane stabilan, a temperatura unutar željenih tolerancija. Glavna mana eksperimentalnog aparata koji smo koristili je ta da peć nema ugrađeno hlađenje te da se uz to vrlo sporo hladi. Stoga je bilo ključno odrediti optimalnu brzinu povećanja temperature u peći kako bi se temperatura mogla efektivno stabilizirati.

Jednom kada se mjerenje pokrene, korisničko sučelje programa nastavlja davati informacije o tijeku mjerenja putem grafa temperature peći u vremenu te grafa izmjerenih otpora. Program sve izmjerene vrijednosti bilježi u tekstualne datoteke koje se kasnije koriste za daljnju obradu podataka. Nad  $I-U$  karakteristikama program provodi linearnu regresiju te računa vrijednost otpora i standardnu devijaciju te navedene podatke također bilježi u tekstualnu datoteku. Više o obradi mjernih rezultata u nastavku.



Slika 3.5. Korisničko sučelje LabVIEW programa za mjerenje ovisnosti otpora o temperaturi. Screenshot je uzet na kraju mjerenja električne otpornosti kvazikristala  $d\text{-AlCoNi}$  čiji su rezultati prikazani u ovome radu; primjerice,  $R(T)$  graf (na slici: „R\_vs\_T“) odražava vrijednosti otpora koje su izmjerene

### 3.3. Obrada mjernih rezultata

Kao što je već spomenuto, na svakoj temperaturi snima se  $I$ - $U$  karakteristika kvazikristala. Dobijamo niz parova napona i struja, te iz Ohmovog zakona primjenjujući linearnu regresiju dolazimo do vrijednosti otpora na toj temperaturi.

Ohmov zakon zapisujemo u obliku

$$U = R I$$

koji je prikladan za linearnu regresiju; to je pravac  $y = ax$ , gdje je  $x = I$ ,  $y = u$ ,  $a = R$ . Tada je iznos koeficijenta  $a$  odnosno otpora  $R$

$$a = R = \frac{\overline{xy}}{\overline{x^2}}$$

a pogreška  $\sigma_R$  je

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{N} \left( \frac{\overline{y^2}}{\overline{x^2}} - a^2 \right)}$$

Poznavajući dimenzije uzorka i koristeći izraz (2) dolazimo do vrijednosti električne otpornosti (vidjeti sliku 3.1. na kojoj su prikazane geometrijske karakteristike uzorka). Pritom pri računanju pogreške površine i otpornosti koristimo izraz za pogrešku izvedene veličine

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \sigma_i \right)^2}$$

Površina  $A$  i otpornost  $\varrho$  te njihove pripadne pogreške  $\sigma_A$  i  $\sigma_\varrho$  stoga su

$$A = bc,$$

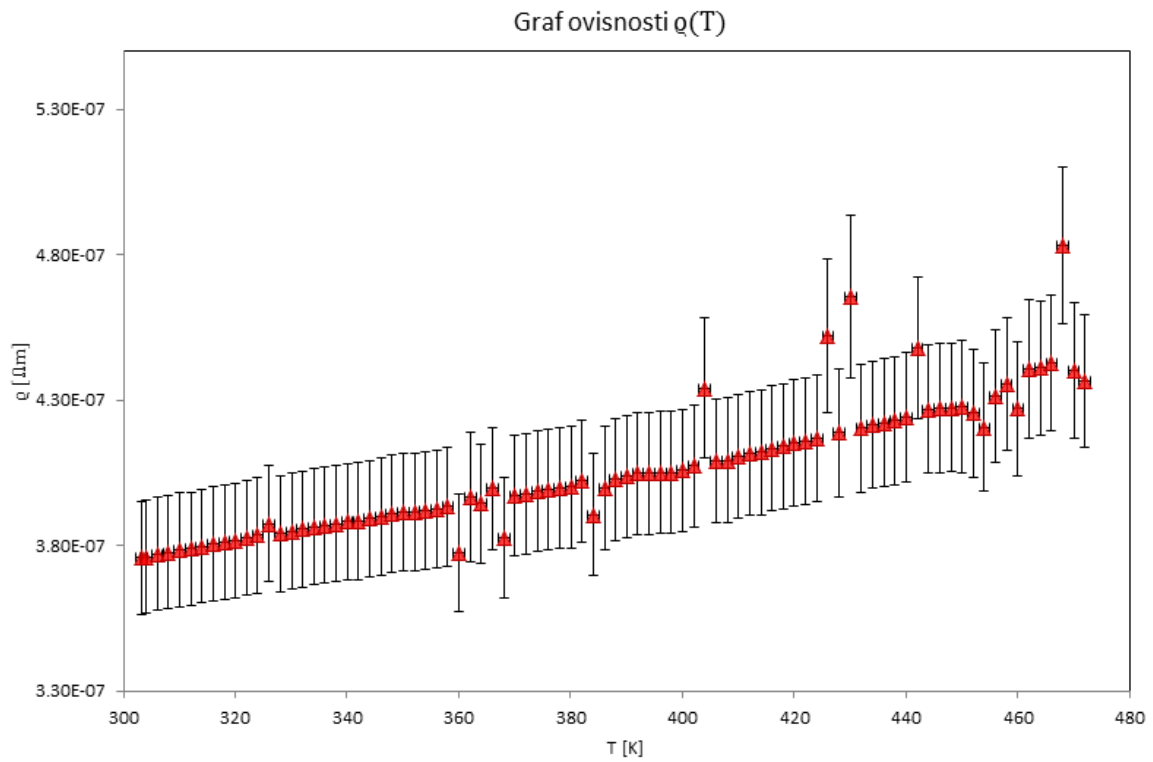
$$\sigma_A = \sqrt{(c\sigma_B)^2 + (b\sigma_C)^2},$$

$$\varrho = R \frac{A}{l},$$

$$\sigma_\varrho = \sqrt{\left( \frac{A}{l} \sigma_B \right)^2 + \left( \frac{R}{l} \sigma_A \right)^2 + \left( \frac{RA}{l^2} \sigma_l \right)^2}.$$

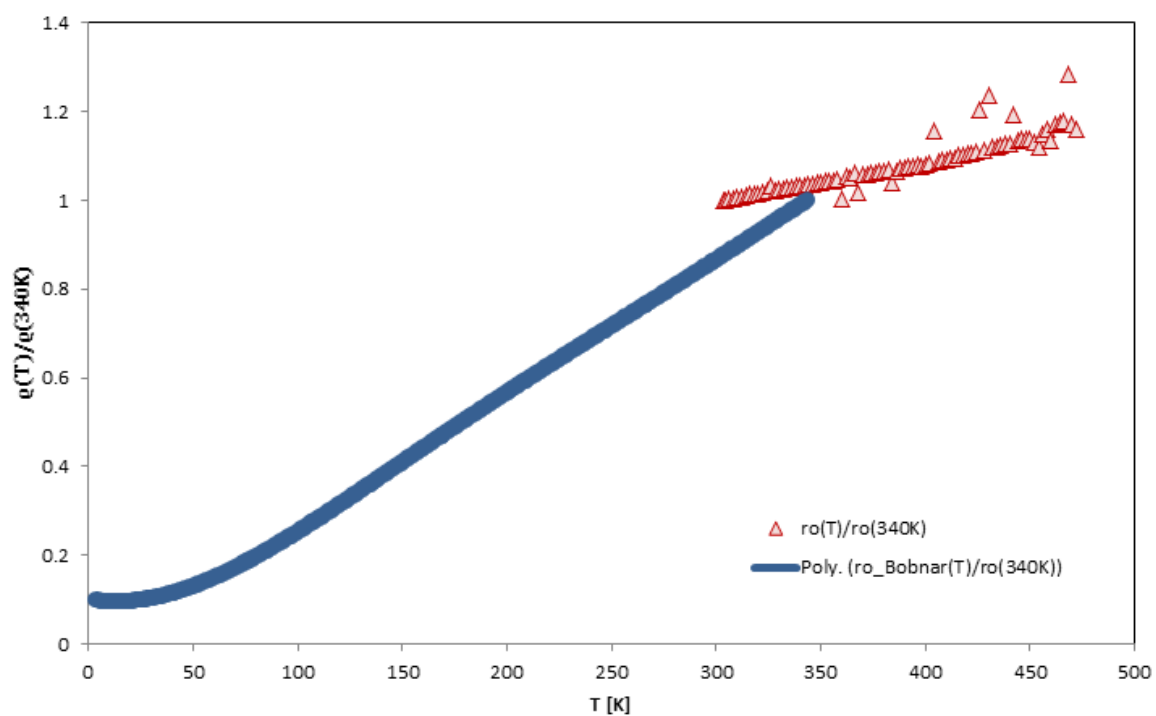
## 4. Rezultati

Rezultati mjerenja električne otpornosti uzorka  $d$ -AlCoNi u ovisnosti o temperaturi su prikazani na slici 4.1.



Slika 4.1. Eksperimentalno dobiveni graf ovisnosti električne otpornosti o temperaturi za kvazikristal  $d$ -AlCoNi u periodičnom smjeru. Odstupanja pojedinih točaka su objašnjena u poglavlju 4. Zaključak.

Graf ovisnosti  $\rho(T)/\rho(340K)$



Slika 4.2. Graf električne otpornosti  $d\text{-AlCoNi}$  u ovisnosti o temperaturi skaliran na vrijednost otpornosti na 340K. Plava linija predstavlja dosadašnja mjerenja te je dobivena interpolacijom polinoma kroz točke dobivene digitizacijom grafa iz [2] koristeći alat WebPlotDigitizer [11]. Crvena linija predstavlja rezultate ovog rada.

## 5. Zaključak

Dosadašnja mjerenja temperaturne ovisnosti električne otpornosti kvazikristala d-AlCoNi su ukazivala na njezin metalni karakter; linearno povećanje otpora koje počinje na temperaturama nešto iznad apsolutne nule te red veličine električne otpornosti koji je tipičan za metale [2]. Rezultati eksperimenta koji je proveden u ovome radu ukazuju da navedeno generalno vrijedi i na temperaturama iznad sobne.

Međutim, postoji kvantitativno neslaganje između našeg eksperimenta i dosadašnjih mjerenja u temperaturnom području koje je zajedničko za oba eksperimenta (303 do 340 K). Iako su vrijednosti el. otpornosti bliske po iznosu u tom području, vidljivo je da naša krivulja ne slijedi dosadašnji trend, već da se „nagib pravca“ mijenja, odnosno smanjuje; u našem mjerenju el. otpornost sporije raste s temperaturom. S druge strane, vidljivo je iz 4.1. da su naša mjerenja konzistentna te da nema većih odstupanja od linearnog trenda. Vjerojatni uzrok je nehomogenost temperature duž uzorka radi specifične montaže uzorka (vidjeti sliku 3.2. s fotografijom montiranog uzorka) koji, osim preko žica, nije u fizičkom kontaktu sa tijelom nosača, što nameće potrebu za ili drugačijom načinom montaže uzorka ili čak izradom novoga nosača uzoraka.

Na slici 4.1. se može uočiti da na najvišim temperaturama postoji nekoliko točaka koje vidno odudaraju od linearnog trenda; vrlo mali broj s obzirom na ukupan broj mjernih točaka. Takva odstupanja očito nisu slučajne prirode pošto su sva pozitivna. Pošto je temperaturna fluktuacija koja bi uzrokovala toliku promjenu otpornosti praktično nemoguća s aparaturom koju smo koristili, nije moguće da te mjerne točke odražavaju stvarnu otpornost. Isto tako, strujni izvor i voltmetar su vrlo precizni i točni instrumenti te nije moguće da se tako veliko odstupanje pojavi zbog tolerancije mjerenja. Moguće je da su pogreške u mjerenju uzrokovane time da vrijeme stabilizacije struje (opisano u potpoglavlju 3.2. Princip mjerenja i mjerni uređaji) nije bilo dovoljno dugo te da su zbog toga pojedina mjerenja struja i napona izvršena u neravnotežnom stanju. Pošto smo vrijeme od 1 sekunde koje smo koristili kao navedeni parametar odabrali pri niskim temperaturama (sobnoj), moguće je da je na višim temperaturama u određenim slučajevima potrebno duže vrijeme čekanja. Ponavljanjem eksperimenta ali ovaj put s dužim vremenom čekanja trebalo bi se utvrditi da li je navedeno bilo uzrok pogreški. Preostala mogućnost jest da u samom računalnom programu unutar LabVIEW-a kojim smo vršili mjerenje postoji algoritamska greška koja u kod određene kombinacije parametara mjerenja i temperatura dovodi do krivog izvođenja mjerenja, a koja se nije uočila kod prethodnih korištenja istog programa.

Prilikom pripreme eksperimenta najzahtjevniji dio bio je rad s programskim paketom LabVIEW, odnosno razumijevanje algoritma kojim se mjerenje izvršava te podešavanje parametara mjernih instrumenata unutar programa na način da se mjerenje uspješno izvrši. Iako je samo mjerenje, jednom pokrenuto, vrlo jednostavno s algoritamske strane i ne zahtijeva nikakvu dodatnu interakciju, pokazalo se da je pronalaženje parametara koji će omogućiti da se mjerenje do kraja izvrši (bez prijave pogrešaka) sve samo ne jednostavno. Pri tome se velik broj poteškoća može pripisati peći koja je korištena; pošto peć nema ugrađeno hlađenje te se vrlo sporo hladi prirodnim putem, upravljanje temperaturom je vrlo zahtjevno

te i najmanja varijacija u upravljačkim parametrima ponekad dovodi do toga da se temperatura u peći ne ponaša na željeni način već da u određenom trenutku daleko premaši željenu temperaturu. S druge strane, ciljanje na maksimalnu stabilnost i vrlo strogu toleranciju temperature dovodi do toga da se mjerenje izvršava ekstremno sporo (više dana za mjerenje na jednom uzorku), što zbog vremenskih okvira koje smo imali nije bilo prihvatljivo. Također, značajni problem je bio da program koji smo koristili, a koji je osmišljen unutar diplomskog rada priloženog u literaturi br. 10, napravljen u svrhu izvođenja tada potrebnih mjerenja te nije u potpunosti dokumentiran tako da se osigura da se u budućnosti može ponovo primjenjivati za ista mjerenja, što je bilo dovelo do određenih nejasnoća u vezi točnog značenja pojedinih parametara. Prijedlog je da se program poboljša, odnosno poopći i dokumentira tako da se u nekom eventualnom budućem radu može jednostavnije ponovno koristiti. Sve u svemu, kombinacija neiskustva s programskim paketom LabVIEW, programa koji nije u potpunosti bio dokumentiran i previše osjetljivog upravljanja temperaturom unutar peći dovelo je do toga da nešto što je načelno izgledalo kao vrlo jednostavan eksperiment u praksi zahtijevalo daleko više truda i vremena nego što je to bilo očekivano.

## Literatura

- [1] Quasicrystal, Wikipedia: The Free Encyclopedia, URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Quasicrystal>, pristupljeno 6.9.2016.
- [2] M. Bobnar, P. Jeglič, M. Klanjšek, Z. Jagličić, M. Wencka, P. Popčević, J. Ivkov, D. Stanić, A. Smontara, P. Gille i J. Dolinšek, PHYSICAL REVIEW B 85, 024205 (2012)
- [3] Crystal, Wikipedia: The Free Encyclopedia, URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Crystal>, pristupljeno 6.9.2016.
- [4] Rotational symmetry, Wikipedia: The Free Encyclopedia, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rotational\\_symmetry](https://en.wikipedia.org/wiki/Rotational_symmetry), pristupljeno 6.9.2016.
- [5] Nobel Awarded to Researcher Who Redefined Crystalline, Wired, URL: <https://www.wired.com/2011/10/chemistry-nobel/>, pristupljeno 6.9.2016.
- [6] Ohm's law, Wikipedia: The Free Encyclopedia, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ohm's\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Ohm's_law), pristupljeno 6.9.2016.
- [7] Electrical resistivity and conductivity, Wikipedia: The Free Encyclopedia, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_resistivity\\_and\\_conductivity](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity_and_conductivity), pristupljeno 6.9.2016.
- [8] Resistivity Table, Radio Electronics, URL: <http://www.radio-electronics.com/info/formulae/resistance/resistivity-table.php>, pristupljeno 13.9.2016.
- [9] Electrical insulating materials, National Physics Laboratory, URL: [http://www.kayelaby.npl.co.uk/general\\_physics/2\\_6/2\\_6\\_3.html](http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_6/2_6_3.html), pristupljeno 13.9.2016.
- [10] Ž. Musinov, (2015.), Diplomski rad, „Svojstva električnog otpora katalizatora indij-paladija pri visokim temperatura“, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Splitu
- [11] WebPlotDigitizer: Web based tool to extract data from plots, images, and maps, URL: <http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/>, pristupljeno 6.9.2016.



### **Prilog 1. Vrijednosti parametara LabVIEW programa korištenih prilikom mjerenja**

Slope Treshold	0,15
PV treshold [°C]	0,25
Ramp rate [°C/s]	0,05 / 0,0028
tresh_PV_T [°C]	1,15
SETPOINTS [°C]	30 / 200
I_1 [A]	-0,01
I_2 [A]	0,01
N_current_points	10
wait for next current [ms]	1000
DELTA_T [°C]	2