

Utjecaj toplinskih gubitaka elektromotora na akustične karakteristike orgulja

Ivanković, Antun

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:139278>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-13**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**UTJECAJ TOPLINSKIH GUBITAKA
ELEKTROMOTORA NA AKUSTIČNE
KARAKTERISTIKE ORGULJA**

Završni rad

Antun Ivanković

Osijek, 2021.

SADRŽAJ

| | |
|--|-----------|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Zadatak završnog rada | 1 |
| 2. ORGULJE OPĆENITO..... | 2 |
| 2.1. Način rada orgulja | 2 |
| 2.2. Dijelovi orgulja | 3 |
| 2.3. Materijalna struktura pojedinih dijelova orgulja..... | 4 |
| 2.4. Podjela i vrste orgulja | 6 |
| 2.4.1. Podjela prema veličini..... | 6 |
| 2.4.2. Podjela prema svrsi | 6 |
| 2.4.3. Podjela prema vrsti trakture | 6 |
| 2.4.4. Podjela prema boji zvuka i obilježjima dispozicije..... | 7 |
| 2.4.5. Primjer klasifikacije orgulja..... | 7 |
| 3. PRIKAZ UTJECAJA TOPLINSKIH GUBITAKA ELEKTROMOTORA NA AKUSTIČNE KARAKTERISTIKE ORGULJA..... | 8 |
| 3.1. Akustične karakteristike..... | 8 |
| 3.1.1. Nastanak tona i podjela svirala | 8 |
| 3.1.2. Visina tona | 9 |
| 3.1.3. Boja tona | 12 |
| 3.2. Gubitci elektromotora i centrifugalnog puhalo..... | 14 |
| 3.3. Utjecaj promjene temperature zraka na orgulje..... | 16 |
| 3.3.1. Utjecaj na visinu i boju tona..... | 16 |
| 3.3.2. Utjecaj na orgulje kao instrument u cjelini | 17 |
| 3.3.3. Utjecaj na male orgulje (pozitive)..... | 17 |
| 4. PREGLED PROVEDENIH MJERENJA I ANALIZA REZULTATA | 18 |
| 4.1. Parametri mjerenja..... | 18 |
| 4.2. Mjerni uređaji i glazbeni instrumenti | 18 |
| 4.2.1. Mjerni uređaji..... | 18 |
| 4.2.2. Analizirani glazbeni instrumenti..... | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3. Rezultati i analiza mjerenja..... | 22 |
| 4.3.1. Mjerenja temperature na sustavu dovoda zraka | 22 |
| 4.3.2. Mjerenje temperature na servisnom izlazu mijeha..... | 24 |
| 4.3.3. Mjerenja temperature u zračnici..... | 25 |
| 4.3.4. Mjerenja temperature okolnog zraka | 26 |
| 4.3.5. Mjerenja promjene visine tona..... | 28 |
| 5. MOGUĆA RJEŠENJA PROBLEMA..... | 32 |
| 5.1. Toplinska izolacija sustava dovoda zraka..... | 33 |
| 5.2. Prisilno hlađenje sustava dovoda zraka | 33 |
| 5.2.1. Ugradnja ventilatora u kućište | 33 |
| 5.2.2. Ugradnja hladnjaka | 34 |
| 5.3. Primjena odvojnog elektromotora s vanjske strane kućišta | 34 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 36 |

1. UVOD

Glazbeni instrument orgulje utjelovljuju dosege raznih obrtnih zanimanja, ali i dosege moderne tehnologije. U glazbenoj teoriji nije jednoznačno određeno pripadaju li orgulje instrumentima s tipkama ili puhačkim instrumentima, ali u svrhu pisanja ovog rada govorit će se o orguljama kao puhačkom instrumentu.

Zrak potreban za stvaranje tona je kroz povijest bio osiguravan na razne načine, kao što su ručno pumpanje remenjem ili nožno pumpanje polugom, a s razvojem elektroenergetike i elektromotora rad stroja zamjenjuje ljudski rad. Uvođenjem elektromotora omogućen je pouzdaniji rad orgulja, no zbog načina rada elektromotora pojavljuje se problem njegovog utjecaja na ostatak instrumenta.

Ovaj rad bavi se utjecajem toplinskih gubitaka elektromotora na ostatak instrumenta, s naglaskom na promjenu akustičnih karakteristika. Analizirajući rezultate mjerenja na dva instrumenta daje se pregled utjecaja toplinskih gubitaka elektromotora na akustične karakteristike orgulja te se predlaže moguće rješenje problema.

Struktura ovog rada je sljedeća:

- objašnjene su orgulje kao instrument: kako funkcioniraju, od kojih dijelova i materijala se sastoje, koje su najčešće podjele
- dana je teorijska podloga rada: definirane su akustične karakteristike, objašnjeno je porijeklo gubitaka elektromotora, utvrđeni su utjecaji promjene temperature na orgulje
- prezentirani su i analizirani rezultati praktičnih mjerenja na dva instrumenta
- predložena su i analizirana moguća rješenja problema.

1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada je objasniti način rada orgulja i predstaviti materijale koji se koriste u gradnji. Također, potrebno je izvršiti mjerenja promjene temperature na karakterističnim dijelovima orgulja te promjenu visine tona, mjerenja obraditi i analizirati, te staviti u vezu toplinske gubitke elektromotora i promjenu u akustičnim karakteristikama. Na kraju rada potrebno je predložiti moguća rješenja problema.

2. ORGULJE OPĆENITO

Orgulje su instrument od posebnog umjetničkog i kulturološkog značenja. Na njima je moguće izvoditi glazbu skoro svih glazbenih razdoblja, a služe kao solo instrument ili kao pratnja glazbenim sastavima i zborovima. Izrazito su kompleksni spoj raznih elemenata čija je krajnja svrha proizvodnja tona.

2.1. Način rada orgulja

Inženjerski najpraktičnije objašnjenje orgulja je da su one sustav sa zadatkom obrade, skladištenja, upravljanja i korištenja energije. Promatrajući tijek energije u tom sustavu, najlakše se objašnjava način rada orgulja.

Tijek energije u sustavu orgulja je sljedeći:

1. Početna energija u sustav ulazi kao električna energija koja pokreće elektromotor spojen na centrifugalno puhalo. U povijesti je početna energija osiguravana mišićnom snagom gazitelja mijeha. Medij energije postaje zrak kao fluid koji se upuhuje u mijeh.
2. Energija se zatim obrađuje i skladišti. Ovaj korak događa se u mijehu orgulja. Obrada podrazumijeva tlačenje zraka utezima na stropu mijeha koji se onda pod određenim tlakom skladišti u mijehu. Zrak potom ispunjava zračne kanale i zračnice.
3. Energija je potom upravljana naredbama orguljaša. Sviraonik orgulja, za kojim sjedi orguljaš, trakturom je spojen sa zračnicama.
4. Konačno, energija se koristi na način da se stlačeni zrak u zračnicama propusti kroz ventil (koji je otvoren naredbom sa sviraonika) u sviralu. U svirali zrak titra na točno određen način i nastaje zvuk.

Opisani način rada vrijedi za sve vrste orgulja, neovisno o njihovoj veličini. S porastom veličine orgulja raste i potrebna količina energije (zraka) kao i broj potrebnih komponenti za osiguravanje zadovoljavajućeg rada instrumenta.

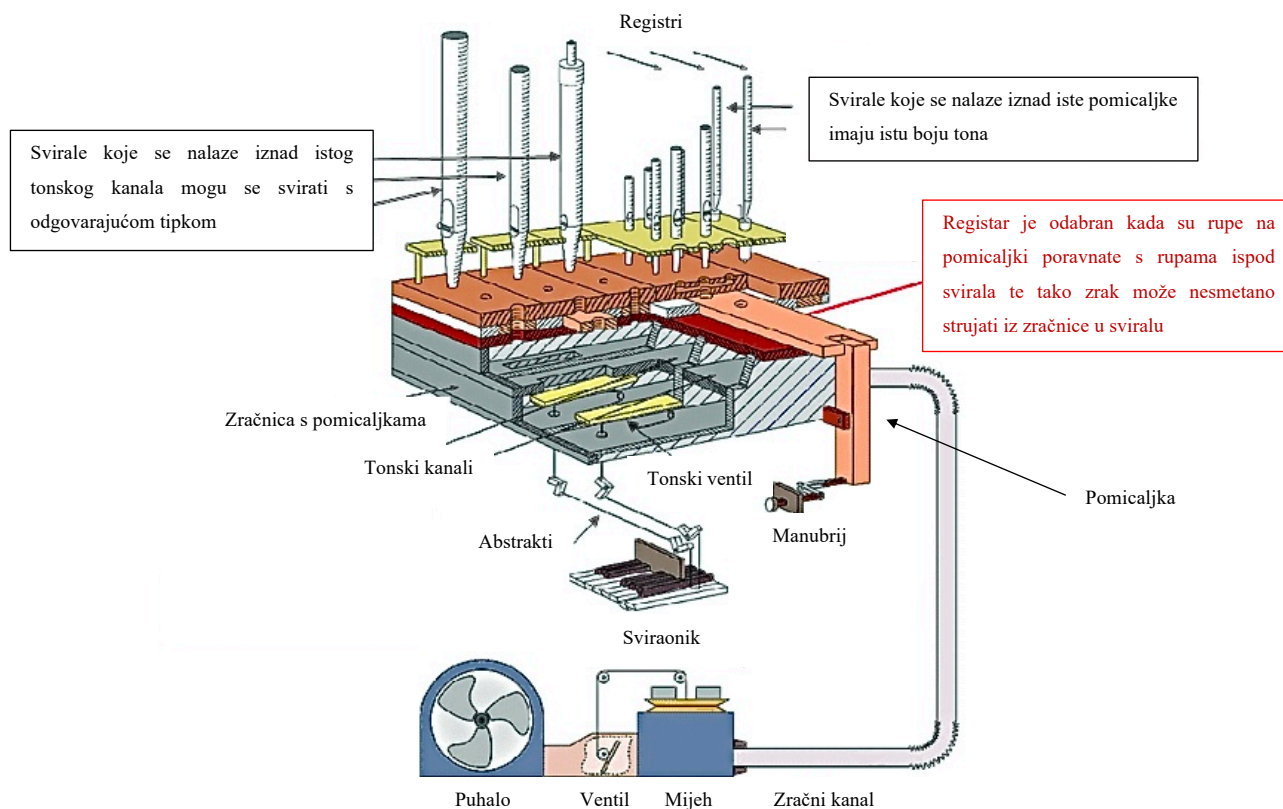
2.2. Dijelovi orgulja

Na temelju opisanog načina rada orgulja kao sustava energije mogu se raspoznati najvažniji dijelovi orgulja: sustav dovoda zraka, mijeh, naprave i svirale.

- Sustav dovoda zraka osigurava zrak za pokretanje instrumenta i proizvodnju zvuka. Može biti izveden kao set remenja na povlačenje, poluge na utiskivanje ili elektromotor spojen na centrifugalno puhalo. Elektromotoru spojenom na centrifugalno puhalo prethodili su crpeći mjehovi pogonjeni parnim strojem, petrolejskim motorom, vodenim motorom i plinskim motorom [1].
- Mijeh služi za skladištenje zraka pod tlakom (spremišni mijeh) i za regulaciju tlaka zraka unutar orgulja (regulacijski mijeh). U slučaju da se zrak ne dovodi pualom, postoji još i crpeći mijeh.
- Pod naprave se ubrajaju: sviraonik, traktura i zračnice [1].
 - Sviraonik se sastoji od: manuala, pedala, manubrija i ostalih elemenata.
 - Manual je dio sviraonika s klavijaturom koju orguljaš prebire rukama.
 - Pedal je dio sviraonika s klavijaturom koju orguljaš prebire nogama.
 - Manubriji su pločice koje se na razne načine kontroliraju rukom, a služe za odabir registara i nekih drugih dijelova orgulja.
 - Traktura predstavlja spoj sviraonika i zračnica. Služi za prijenos naredbi od orguljaša do ventila u zračnici unutar orgulja.
 - Zračnica je područje ispod svirala ispunjeno stlačenim zrakom s ventilima ispod svake svirale.
- Svirale proizvode tonove određenih visina i boja prilikom prolaska zraka kroz njih. Postoje labijalne i jezične svirale. Svirale su organizirane u registre koji predstavljaju skup svirala iste boje zvuka, a međusobno različitih visina tona.

Orgulje imaju još mnogo drugih dijelova, ali zbog preglednosti rada kratko su objašnjeni samo oni najbitniji za nastanak tona.

Sažet prikaz dijelova mehaničkih orgulja sa zračnicom s pomicaljkama prikazan je na slici 2.1. Više o dijelovima i načinu funkcioniranja ove vrste zračnice nalazi se u [1].



Slika 2.1. Skica dijelova mehaničkih orgulja [2]

2.3. Materijalna struktura pojedinih dijelova orgulja

U orguljama se nalazi mnogo materijala, govoreći i kvantitativno i kvalitativno. Odabir materijala u orguljama uvjetovan je svrhom elementa u koji se pojedini materijal ugrađuje.

Tri najzastupljenije vrste materijala u orguljama su: drvo, metal i koža. Njihov pregled i funkcija u orguljama prikazani su u tablici 2.1. Općenito se može reći da je:

- drvo korišteno zbog svoje čvrstoće
- metal korišten zbog mogućnosti lakog oblikovanja u razne oblike
- koža korištena zbog svoje elastičnosti.

Tablica 2.1. Pregled i funkcija drva, metala i kože u orguljama [3, 4]

| DRVO | METAL | KOŽA |
|--|--------------------|---------------------------------|
| ariš – zračnice | bakar (Cu) | goveđa |
| bor – zračnice, abstrakti | cink (Zn) | svinjska |
| bukva – obloge tipaka manuala | kositar (Sn) | janjeća |
| cedar – svirale | olovo (Pb) | ovčja |
| egzote – obloge tipaka manuala | željezo (Fe) | |
| hrast – gazišta tipaka pedala | mesing (CuZn) | – oblaganje ventila, brtvilo za |
| javor – svirna mehanika, svirale | CuSn | kliznice, brtvilo na spojevima |
| kruškovina – obloge tipaka manuala | SnPb | zračnih kanala, oblaganje |
| orah – zračnice | | mehaničkih dijelova, pregibi |
| ploča vlaknatica srednje gustoće – svirale | – svirale, opruge, | na mjehovima, membrane i |
| smreka – kućište, zračnice, svirale, | kondukti | mješčići pneumatske trakture |
| mjehovi, zračni kanali, tipke | | |
| šimšir – obloge tipaka manuala | | |
| šperploča – kućište | | |

Uz ove tri osnovne vrste materijala, prema [3, 4], u orguljama se koriste i:

- kosti: goveđi rog, slonova kljova
- umjetni materijali: bakelit, gumirano platno, plastika, pertinax, polipel
- ljepila razne vrste
- kitovi za drvo i metal
- maziva za drvo i metal
- zaštitne kemikalije za drvo i metal
- zvučno - izolacijska spužva
- papir.

2.4. Podjela i vrste orgulja

Najčešća podjela orgulja je prema: veličini, svrsi, vrsti trakture, boji zvuka i obilježjima dispozicije. Postoje još i podjele s obzirom na vrijeme gradnje i s obzirom na nacionalnu graditeljsku školu.

2.4.1. Podjela prema veličini

Orgulje se prema veličini dijele u tri kategorije:

- male orgulje - s jednim ili dva manuala i s opcionalnim pedalom te s do 15 registara
- srednje orgulje - s dva ili tri manuala i pedalom te s do 40 registara
- velike orgulje - s tri ili više manuala i pedalom te više od 40 registara.

2.4.2. Podjela prema svrsi

Orgulje se prema svrsi dijele u tri kategorije:

- liturgijske orgulje - glavna svrha im je praćenje liturgijskih slavlja u crkvama
- koncertne orgulje - glavna svrha im je održavanje solo koncerata i praćenje drugih instrumenata
- univerzalne orgulje – mogu služiti i u liturgijske i u koncertne svrhe.

2.4.3. Podjela prema vrsti trakture

Orgulje se prema vrsti trakture dijele u četiri kategorije:

- mehaničke orgulje - za prijenos naredbi koriste međusobno spojene abstrakte (najčešće u obliku tankih drvenih letvica)
- pneumatske orgulje – za prijenos naredbi koriste zrak koji se propušta kroz cjevčice
- električne orgulje – za prijenos naredbi koriste električne impulse u vodičima
- kombinacije: elektro – pneumatske, elektro – mehaničke.

Električne orgulje se ne smiju zamijeniti za digitalne orgulje. Digitalne orgulje zvuk stvaraju digitalnom sintetizacijom zvuka, dok su električne orgulje one koje posjeduju stvarne svirale čiji se ventili kontroliraju električnim impulsima.

2.4.4. Podjela prema boji zvuka i obilježjima dispozicije

Prema ovoj podjeli razlikuju se: antičke, srednjovjekovne, renesansne, barokne, klasične, romantične, neobarokne i neoromantične. Za potrebe ovog rada nije potrebno razlikovati orgulje po ovoj podjeli.

2.4.5. Primjer klasifikacije orgulja

Za lakše razumijevanje podjela orgulja, u nastavku će biti klasificirane orgulje Konkatedralne župne crkve svetih Petra i Pavla apostola u Osijeku.

Orgulje su djelo austrijskog orguljara Hansa Maurachera. Prvi put su zasvirale 1933. godine. Sviraonik se sastoji od tri manuala s pedalom, a ukupno imaju 63 registra [5]. Prvotna traktura je bila elektro – pneumatska, a u sklopu zadnje restauracije instrumenta traktura je promijenjena u električnu.

Ove orgulje klasificirale bi se kao: velike, univerzalne, električne, neobarokne.



Slika 2.2. Orgulje Konkatedralne župne crkve sv. Petra i Pavla ap., Osijek [5]

3. PRIKAZ UTJECAJA TOPLINSKIH GUBITAKA ELEKTROMOTORA NA AKUSTIČNE KARAKTERISTIKE ORGULJA

U ovom poglavlju definirane su akustične karakteristike, napravljen je pregled toplinskih gubitaka elektromotora i centrifugalnog puhala, te je pojašnjen utjecaj promjene temperature na orgulje.

3.1. Akustične karakteristike

Akustične karakteristike orgulja govore o zvukovnim karakteristikama tonova koje su orgulje sposobne proizvesti. Akustične karakteristike moguće je odrediti koristeći numeričke [6] i empirijske tehnike, a u ovom radu bit će određivane empirijskom tehnikom snimanja mjernim uređajem. U nastavku je objašnjen način nastanka tona za obje vrste svirala u orguljama te su definirane i primjerima mjerenja pojašnjene promatrane akustične karakteristike svirala.

3.1.1. Nastanak tona i podjela svirala

Preduvjet nastanka tona u svirali je ujednačena i neprekinuta opskrba svirale zrakom pod određenim tlakom. U slučaju da je dotok zraka nestabilan ili se nasumično prekida, svirala neće imati zadovoljavajuće akustične karakteristike ili ton neće nastati. Ujednačena i neprekinuta opskrba svirale zrakom postiže se odgovarajućim projektiranjem sustava dovoda zraka, mijeha, zračnih kanala i zračnica. Više o utjecaju odabira vrste zračnica na nastanak tona pročitati u [7].

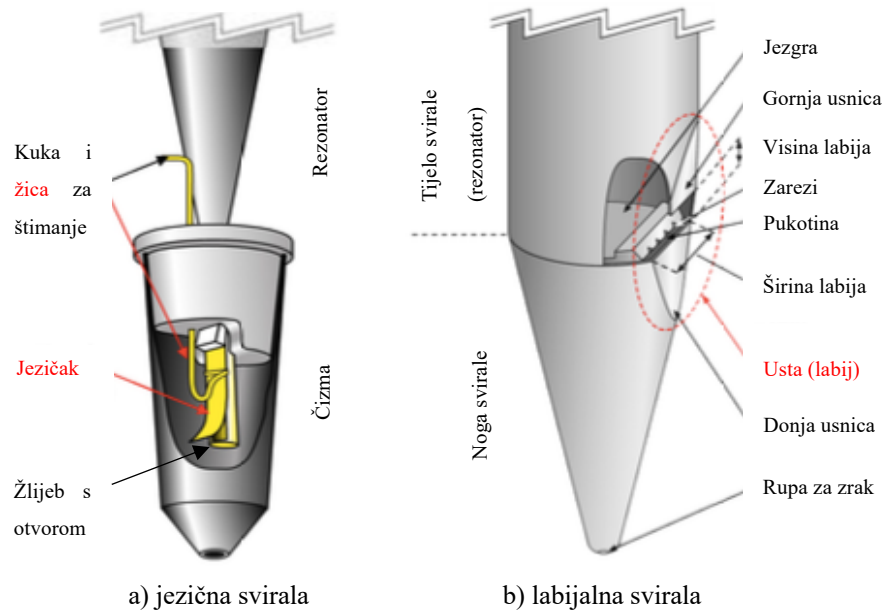
Svirale orgulja dijele se na labijalne i jezične svirale.

Ton labijalnih svirala nastaje uslijed razbijanja struje zraka na gornjoj usnici koji potom naizmjenice struji izvan i unutar svirale stvarajući u tijelu svirale longitudinalne valove koje ljudsko uho percipira kao zvuk. Labijalne svirale mogu biti otvorene ili zatvorene, ali način nastanka tona je jednak.

Ton jezičnih svirala nastaje uslijed titranja jezička u žlijebu svirale. Jezičak može biti slobodan ili udarajući, ali način nastanka tona je jednak.

Više o načinu nastajanja tona svirala nalazi se u [1].

Izgled jezične i labijalne svirale prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. Prikaz dijelova svirala: a) jezične i b) labijalne svirale [2]

3.1.2. Visina tona

Brzina širenja valova zvuka jednaka je umnošku valne duljine λ [m] i frekvencije f [Hz] [8].

$$v = \lambda * f, \text{ m/s} \quad (3.1.)$$

Za otvorene labijalne svirale vrijedi da pola valne duljine λ [m] ispunjava cijelu sviralu (promatrajući od labija do otvorenog kraja) duljine l [m] [1].

$$l = 2 * \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}, \text{ m} \quad (3.2.)$$

Kombinacijom jednadžbi (3.1.) i (3.2.) dobiva se ovisnost visine tona otvorene labijalne svirale f_0 [Hz] o brzini širenja valova zvuka u zraku i o duljini svirale.

$$f_0 = \frac{v}{2 * l}, \text{ Hz} \quad (3.3.)$$

Za zatvorene labijalne svirale vrijedi da četvrt valne duljine λ [m] ispunjava cijelu sviralu (promatrajući od labija do zatvorenog kraja, tj. čepa svirale) duljine l [m] [1].

$$l = \frac{\lambda}{4}, \text{ m} \quad (3.4.)$$

Kombinacijom jednadžbi (3.1.) i (3.4.) dobiva se ovisnost visine tona zatvorene labijalne svirale f_z [Hz] o brzini širenja valova zvuka u zraku v i o duljini svirale.

$$f_z = \frac{v}{4 * l}, \text{ Hz} \quad (3.5.)$$

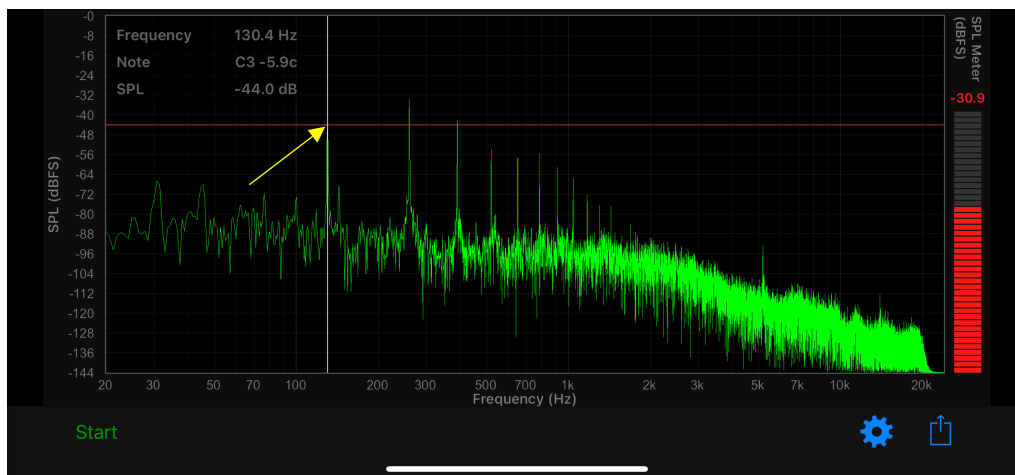
Visina tona jezičnih svirala kompleksnije je određena i bit će opisno izvedena. „Broj titraja (visina tona) ovisi o elastičnosti materijala i o dimenzijama jezičca (duljina, širina i debljina limene pruge). Deblji jezičac daje viši ton, nego tanki. (...) Dulji jezičac daje dublji ton, nego kratki.“ [1] Na visinu tona utječe i duljina rezonatora [1].

Postupak mijenjanja visine tona svirale koju vrši orguljar naziva se štimanje ili ugađanje.

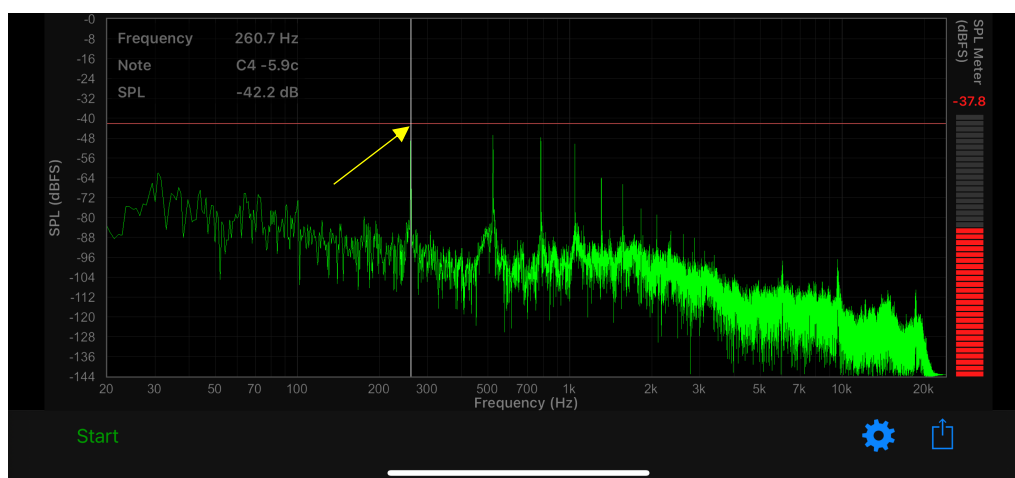
Visinu tona moguće je vizualno predočiti snimanjem tona zvučnim spektrometrom. Za snimanje je korištena mobilna aplikacija „Audio Spectrum“, autor Pawel Krzywdzinski, na mobilnom uređaju iPhone Xs Max. Aplikacija funkcionira na principu stvarnovremenske brze Fourierove analize [9]. Snimanje je izvršeno u Franjevačkoj crkvi svetog Križa u Osijeku dana 25. lipnja 2021. godine.

Snimani su tonovi c mali i $c1$ koji u glazbenoj teoriji označuju interval *oktava*. Oktava označuje razmak između dva tona „za sedam dijatonskih stupnjeva glazbene ljestvice“ [10], a u pogledu frekvencije tonova označuje dvostruko veću ili dvostruko manju frekvenciju od frekvencije promatranog tona.

Snimanje je izvršeno na registru Principal 8' koji se sastoji od otvorenih metalnih cilindričnih svirala. Svirala tona c mali dvostruko je duža od svirale tona $c1$.



Slika 3.2. Spektralna analiza tona c mali registra Principal 8'



Slika 3.3. Spektralna analiza tona c1 registra Principal 8'

Na zapisu zaslona zvučnog spektrometra označene su osnovne frekvencije promatranih tonova. Vidljivo je da je visina tona c mali 130,4 Hz (žuta strelica na slici 3.2.), dok je visina tona c1 260,7 Hz (žuta strelica na slici 3.3.). Zbog dvostruko veće frekvencije tona c1 naprema tonu c mali, ton c1 percipiramo da je za oktavu „viši“.

Može se zaključiti da što je svirala kraća, odnosno što je frekvencija tona veća, to se zvuk svirale percipira „višim“.

3.1.3. Boja tona

Boja tona labijalnih svirala određena je menzutom promatrane svirale. Menzura označuje „...odnos duljine i promjera svirale, kao i širine i visine labija, ...“ [1].

Boja tona jezičnih svirala određena je: širinom i debljinom jezičca, oblikom i dubinom žlijeba, veličinom čizme, te oblikom i dužinom rezonatora [1].

Na boju tona obje vrste svirala utječe i vrsta materijala od kojih se izrađuju.

Postupak mijenjanja boje tona svirale koju vrši orguljar naziva se intoniranje.

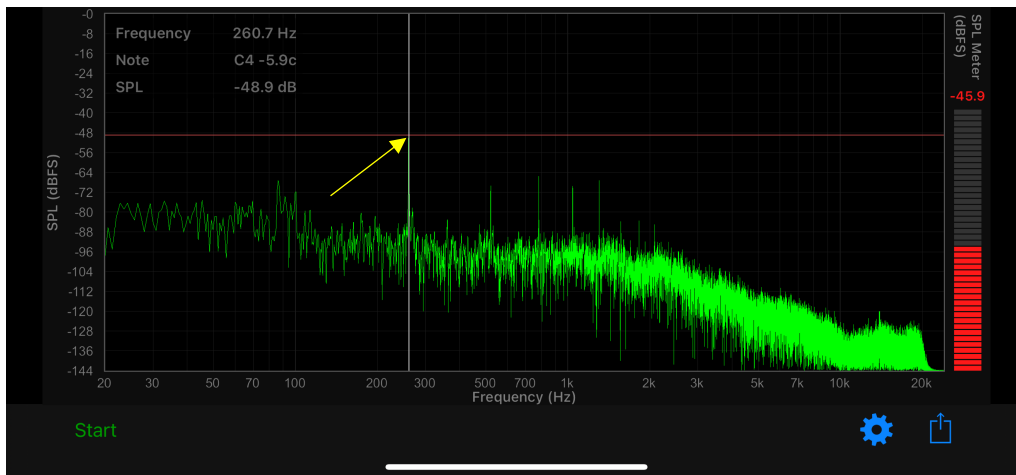
Boju tona moguće je vizualno predočiti snimanjem tona zvučnim spektrometrom. Za snimanje je korištena mobilna aplikacija „Audio Spectrum“, autor Pawel Krzywdzinski, na mobilnom uređaju iPhone Xs Max. Aplikacija funkcionira na principu stvarnovremenske brze Fourierove analize [9]. Snimanje je izvršeno u Franjevačkoj crkvi svetog Križa u Osijeku dana 25. lipnja 2021. godine.

Snimanje je izvršeno na registrima Bariton 8' i Gamba 8' koji se sastoje od otvorenih metalnih cilindričnih svirala. Svirale tonova c1 iste su duljine na oba registra.

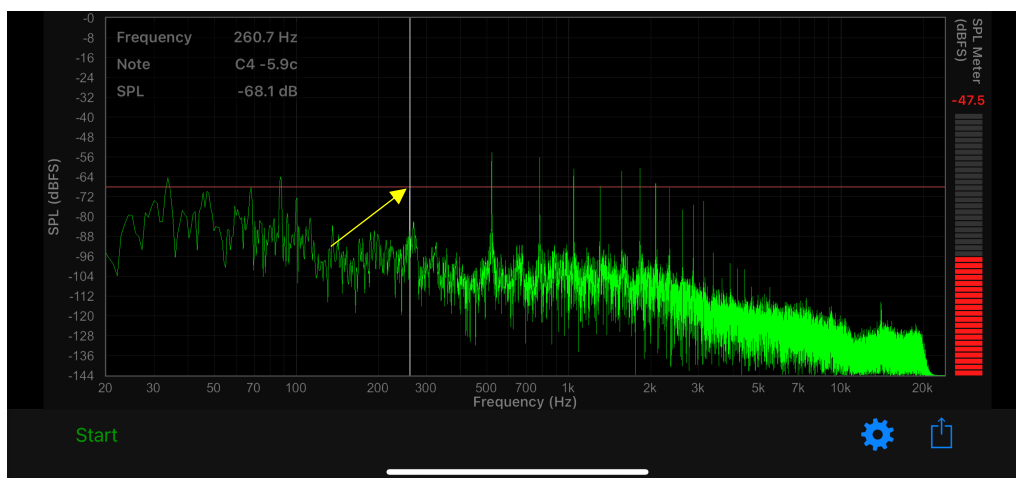
Ovi registri su odabrani jer svirale registra Bariton 8' zvuče „mekše“ i „obljije“, a svirale registra Gamba 8' zvuče „oštrije“ i „nazalnije“. Tome su razlog različite menzure svirala, gdje su svirale registra Bariton 8' šire menzure, a svirale registra Gamba 8' uže menzure. Razlika u menzurama vidljiva je na slici 3.4.



Slika 3.4. Pogled u unutrašnjost orgulja Franjevačke crkve svetog Križa u Osijeku [5]



Slika 3.5. Spektralna analiza tona c1 registra Bariton 8'



Slika 3.6. Spektralna analiza tona c1 registra Gamba 8'

Na zapisu zaslona zvučnog spektrometra označene su osnovne frekvencije promatranih tonova. Vidljivo je da su visine tonova jednake, odnosno obje iznose 260,7 Hz (žute strelice na slici 3.5. i slici 3.6.). Svirale percipiramo da su iste visine tona, ali se razlikuju u boji tona.

Zbog različitih menzura, različiti su udjeli i jačine viših harmonika osnovne frekvencije u ukupnom tonu koji proizvodi svirala. Viši harmonici osnovne frekvencije određuju percepciju boje tona.

Na zapisu zaslona za registar Bariton 8' (slika 3.5.), gledajući desno od strelice koja označuje osnovnu frekvenciju, primjećuje se sedam viših harmonika.

Na zapisu zaslona za registar Gamba 8' (slika 3.6.), gledajući desno od strelice koja označuje osnovnu frekvenciju, primjećuje se četrnaest viših harmonika.

Može se zaključiti da svirale široke menzure imaju manji broj viših harmonika i zvuče oblim zvukom, dok svirale uske menzure imaju veći broj viših harmonika i zvuče oštrim zvukom.

3.2. Gubitci elektromotora i centrifugalnog puhala

„Iznos gubitaka na pojedinim elementima elektromotora ovisi o principu rada, izvedbi elektromotora, snazi motora, opterećenju i okolini elektromotora.“ [11] Gubitci elektromotora primarno nastaju uslijed protjecanja struje namotima statora te se računaju na sljedeći način:

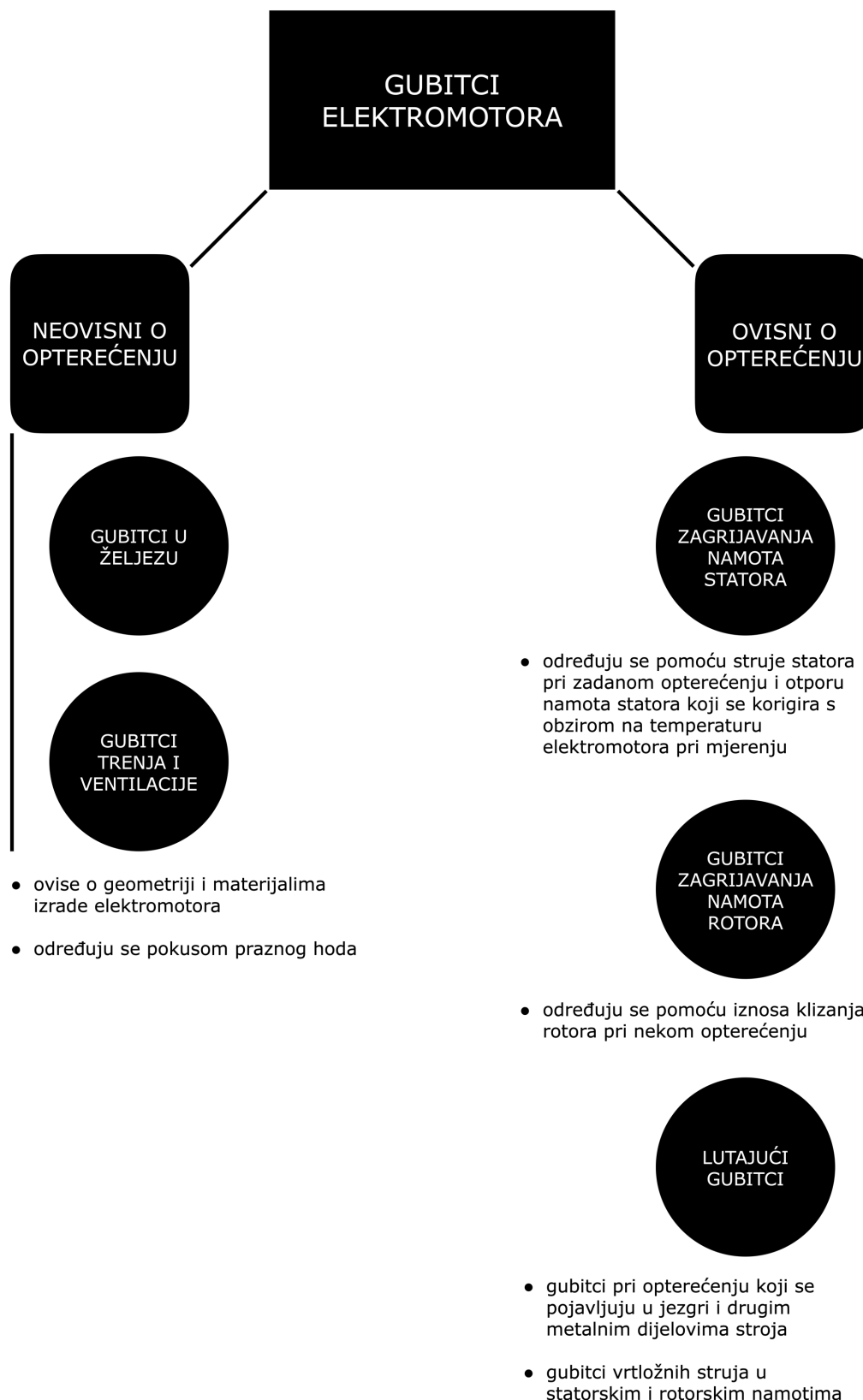
$$P = R * I^2, W \quad (3.6.)$$

gdje je R [Ω] otpor namota statora korigiran s obzirom na temperaturu elektromotora pri mjerenju, a I [A] struja statora pri zadanom opterećenju.

Gubitci zagrijavanja namota statora kod elektromotora malih snaga iznose oko 50% ukupnih gubitaka, a kod elektromotora velikih snaga oko 25% ukupnih gubitaka [11].

Na slici 3.7. prikazana je podjela gubitaka elektromotora ovisno o opterećenju pri radu elektromotora. Za pojedine vrste gubitaka navedeno je o čemu ovise, kako se određuju i što ih čini.

Gubitci centrifugalnog puhala sastoje se od toplinskih gubitaka trenja osovine i toplinskih gubitaka uslijed trenja zraka preko lopatica puhala. Ovisni su o opterećenju, odnosno povećavaju se s povećanjem broja okretaja osovine puhala u minuti. Elektromotori u orguljama okreću centrifugalno puhalo brzinom od 1400 ili 2800 okretaja u minuti [1]. Gubitci centrifugalnog puhala su zanemarivo mali naprema gubiticima elektromotora.



Slika 3.7. Sažet prikaz gubitaka elektromotora s pripadajućim objašnjenjima

3.3. Utjecaj promjene temperature zraka na orgulje

3.3.1. Utjecaj na visinu i boju tona

Promjena visine tona može se računati kao promjena u centima. Centi su mjera omjera dvije frekvencije koja se računa na sljedeći način [12]:

$$J = 1200 * \frac{\log \frac{f_2}{f_1}}{\log 2}, \text{ centi} \quad (3.7.)$$

S obzirom da je u poglavlju 3.1.2. jednadžbama (3.3.) i (3.5.) pokazana ovisnost frekvencije f [Hz] tona o duljini svirale l [m] i brzini strujanja zraka v [m/s], ukupna promjena visine tona labijalnih svirala I promatrat će se na sljedeći način [13]:

$$I = I_L + I_T, \text{ centi} \quad (3.8.)$$

gdje je I_L promjena visine tona u centima uslijed širenja (produljenja) materijala od kojeg je svirala izrađena, a I_T je promjena visine tona u centima uslijed promjene brzine strujanja zraka. S povećanjem temperature, I_L snižava, a I_T povećava visinu tona.

U svrhu ovog rada promatrat će se utjecaj promjene temperature zraka na visinu tona otvorenih metalnih labijalnih svirala, a zbog nemogućnosti preciznog mjerenja produljenja svirala, koeficijent I_L neće se uzimati u obzir. Ovo zanemarenje je dopušteno i prema [13] gdje je pokazano da koeficijent I_L značajno ne utječe na ukupnu promjenu visine tona (za promjenu temperature od 10 K, koeficijent I_L iznosi -0,4 centi, a koeficijent I_T +29,05 centi [13]).

Koeficijent I_T računa se na sljedeći način [13]:

$$I_T = \frac{1200}{\log_{10} 2} * \log_{10} \frac{\sqrt{T_a + \Delta T}}{\sqrt{T_a}}, \text{ centi} \quad (3.9.)$$

gdje je T_a apsolutna temperatura okolnog zraka u Kelvinima, a ΔT promjena temperature zraka naprema temperaturi T_a .

Prema [13], promjena temperature zraka ne utječe na boju tona.

3.3.2. Utjecaj na orgulje kao instrument u cjelini

Promjenu temperature zraka prati i promjena u njegovoj vlažnosti koja jednako tako loše utječe na instrument [14]. Najčešći uzrok promjene temperature i vlažnosti u crkvama su, uz promjene godišnjih doba, različiti sustavi grijanja. Postoje razni priručnici [14, 15] koji se bave upravo temom utjecaja sustava grijanja u crkvama na orgulje. Općenito pravilo je da se „izvori grijanja nikad ne postavljaju ispod ili vrlo blizu orgulja“ [15].

Promjene u temperaturi i vlazi zraka mogu prouzročiti pukotine u drvenim elementima, isušivanje i pucanje kožnih elemenata, zapinjanje pokretnih dijelova te još mnogo drugih problema specifičnih za svake orgulje posebno.

Troškovi reparaturnog održavanja puno su veći i postupak je dugotrajniji u usporedbi s troškovima postupka štimanja orgulja, stoga se posebna briga mora voditi o vrijednostima temperature i vlage u prostoru s orguljama. Najjednostavniji i najefikasniji način je vođenje svojevrsnog dnevnika stanja orgulja u kojem orguljaš nakon svakog korištenja orgulja zapisuje temperaturu i vlagu okolnog zraka te kratak opis stanja instrumenta. Vođenjem ove vrste dnevnika omogućeno je predviđanje mogućih periodičnih problema uslijed promjena godišnjih doba, a orguljarima se olakšava određivanje uzroka problema.

3.3.3. Utjecaj na male orgulje (pozitive)

Promatrajući orgulje koje bi se klasificirale kao male, najčešće se govori o malim liturgijskim orguljama i pozitivima. Pozitivi su (najčešće) prijenosne orgulje, izrazito kompaktne građe, koje služe kao pratnja drugim instrumentima.

Zbog svoje kompaktne građe, veličina mijeha i duljina zračnih kanala pozitiva izrazito su mali, a nekad se u potpunosti izostavljaju ili zamjenjuju drugim elementima. Budući da su kućišta elektromotora i centrifugalnog puhala spojena, toplina koju proizvodi elektromotor koji pogoni centrifugalno puhalo direktno se prenosi na svirale.

Potonje orguljarima uzrokuje problem nemogućnosti štimanja orgulja odmah po dolasku, već moraju pričekati oko 15 minuta da elektromotor postigne svoju radnu temperaturu. U kontekstu priprema za koncerte, glazbenicima je svaka minuta bitna i produljeno vrijeme štimanja može prouzrokovati probleme. U slučaju da orguljar zanemari vrijeme potrebno elektromotoru da postigne svoju radnu temperaturu, tijekom izvedbe glazbene skladbe pojavit će se nesklad u visinama tonova orgulja i drugih instrumenata.

4. PREGLED PROVEDENIH MJERENJA I ANALIZA REZULTATA

Ovo poglavlje donosi pregled i analizu rezultata mjerenja na dva instrumenta različitih veličina.

4.1. Parametri mjerenja

Mjereni su sljedeći parametri:

- promjena odstupanja visine tona svirale
- promjena temperature zraka u zračnici
- promjena temperature kućišta sustava dovoda zraka i to na tri mjesta:
 - kućište elektromotora
 - kućište izlazne komore puhala
 - kućište usisne komore puhala
- promjena temperature zraka servisnog izlaza mijeha
- promjena temperature okolnog zraka.

Sva mjerenja nisu rađena na oba instrumenta zbog nepostojanja nekih elemenata ili zbog praktične nemogućnosti mjerenja.

4.2. Mjerni uređaji i glazbeni instrumenti

4.2.1. Mjerni uređaji

Za mjerenja promjena temperature korišteni su sljedeći uređaji:

- beskontaktni infracrveni termometar UX-A-01 (korišten za mjerenja na centrifugalnom puhalu i elektromotoru)
- Bosch senzor temperature, vlage i tlaka BME 280 spojen na programibilnu pločicu Croduino Nova32 (korišten za mjerenja temperature: okolnog zraka, u zračnici i u mijehu).

Za mjerenje odstupanja visine tona korištena je mobilna aplikacija „KeyTuner“ autora TimperLabs LLC na mobilnom uređaju iPhone Xs Max.

Specifikacije svakog pojedinog uređaja nalaze se među priložima ovog rada.

Fotografije mjernih postava, mjernih uređaja i aplikacija prikazane su u nastavku.



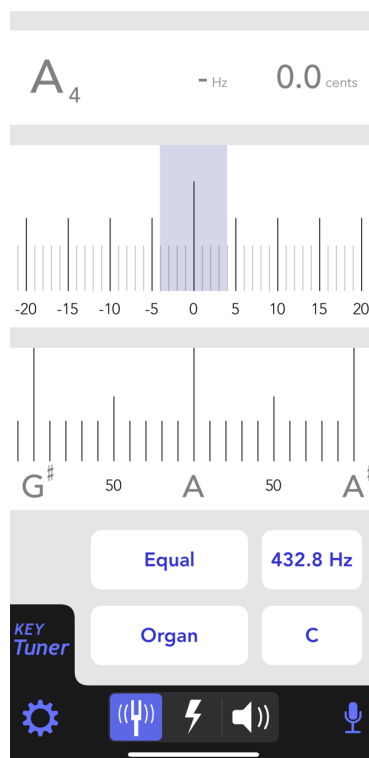
Slika 4.1. Mjerni postav za mjerenje temperature zraka servisnog izlaza mijeha



Slika 4.2. Mjerni postav za mjerenje temperature kućišta sustava dovoda zraka



Slika 4.3. Mjerni postav za mjerenje temperature zraka u zračnici



Slika 4.4. Izgled aplikacije KeyTuner s označenim rasponom tolerancije visine tona prilikom štimanja (plavo polje na skali) iznosa ± 4 centi

4.2.2. Analizirani glazbeni instrumenti

Mjerenja su izvršena na dva instrumenta:

1. orgulje Franjevačke crkve svetog Križa (Trg Vatroslava Lisinskog 3, Osijek)
2. pozitiv Svećeničkog doma (Zagrebačka ulica 3, Varaždin).

Specifikacije instrumenata, uz pripadajuće fotografije instrumenata, nalaze se među prilogima ovog rada. Podatci natpisnih pločica elektromotora i centrifugalnog puhala također se nalaze među prilogima ovog rada, a osnovni tehnički podatci elektromotora prikazani su tablicama u nastavku.

Tablica 4.1. Podatci s natpisne pločice elektromotora orgulja u Osijeku

| | |
|---------------------------|---------------|
| Proizvođač i broj motora: | Ventus, 26073 |
| Napon [V]: | 230 |
| Struja [A]: | 1,5 |
| Frekvencija [Hz]: | 50 |
| Broj faza: | 1 |
| Snaga [KS]: | 0,45 |
| Brzina [o/min]: | 2800 |

Tablica 4.2. Podatci s natpisne pločice elektromotora pozitiva u Varaždinu

| | |
|----------------------------------|------------------------|
| Proizvođač i godina proizvodnje: | Valter Daminato, 2010. |
| Napon [V]: | 230 |
| Struja [A]: | 0,57 |
| Frekvencija [Hz]: | 50 |
| Broj faza: | 1 |
| Snaga [KS]: | 0,18 |
| Brzina [o/min]: | 2800 |

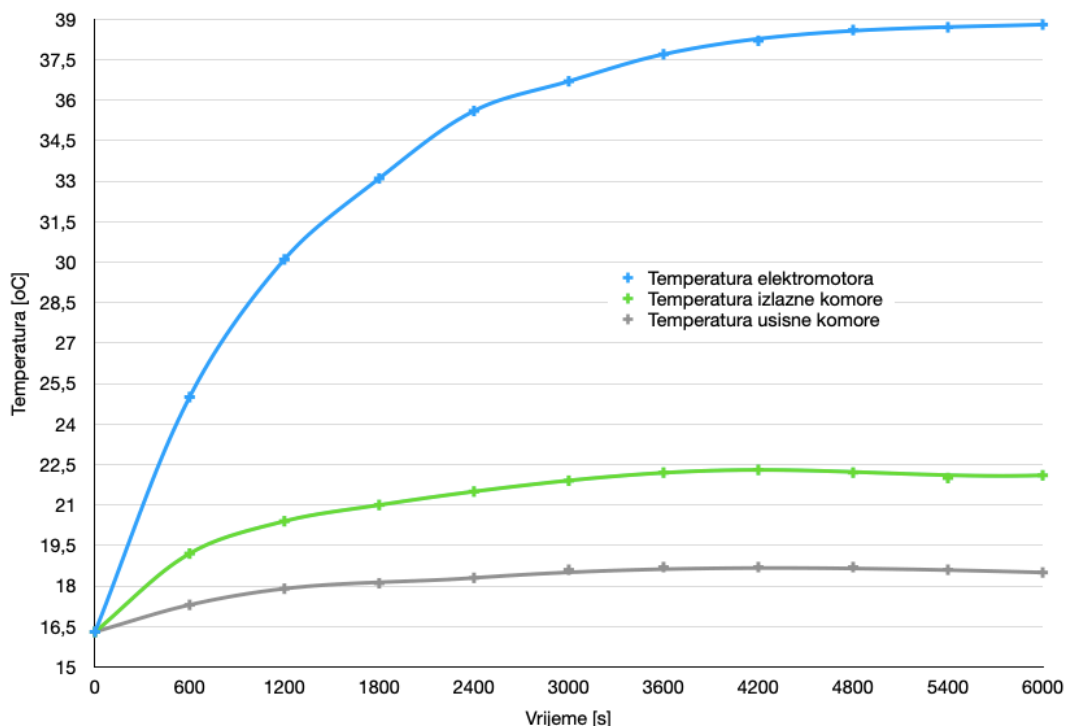
4.3. Rezultati i analiza mjerenja

U ovom poglavlju grafički su prezentirani rezultati mjerenja uz pripadajuća objašnjenja. Numerički rezultati mjerenja nalaze se među priložima ovog rada.

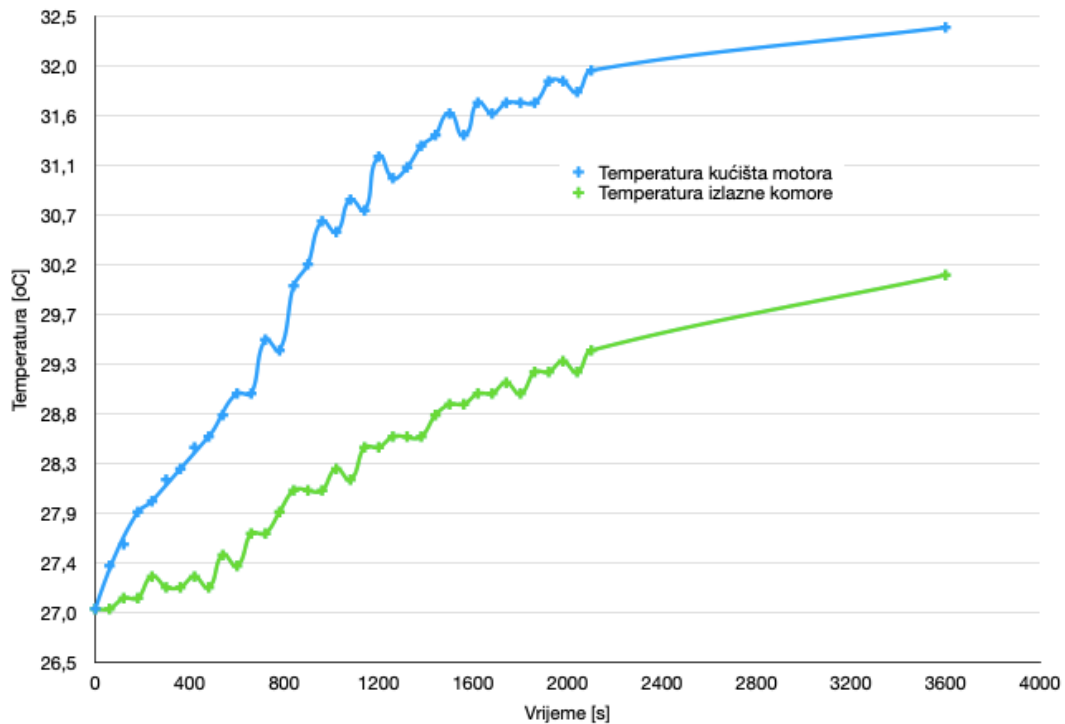
4.3.1. Mjerenja temperature na sustavu dovoda zraka

Sustav dovoda zraka neizostavan je dio orgulja, a jedan dio tog sustava je elektromotor. Orgulje Franjevačke crkve u Osijeku posjeduju 2,5 puta snažniji elektromotor od pozitiva Svećeničkog doma u Varaždinu, no i zauzimaju puno više volumena u prostoru. Također, elektromotor s puhalom orgulja u Osijeku izdvojen je u kutiju izvan kućišta orgulja, dok se u pozitivu u Varaždinu nalazi ispod zračnice u donjem središnjem dijelu kućišta. Za prikaz toplinskih gubitaka elektromotora mjerena je promjena temperature na kućištima sustava dovoda zraka.

Rezultati provedenih mjerenja promjene temperature na pojedinim dijelovima analiziranih sustava dovoda zraka prikazani su na slikama 4.5 i 4.6.



Slika 4.5. Grafički prikaz rezultata mjerenja promjene temperature kućišta sustava dovoda zraka u ovisnosti o vremenu na orguljama u Osijeku



Slika 4.6. Grafički prikaz rezultata mjerenja promjene temperature kućišta sustava dovoda zraka u ovisnosti o vremenu na pozitivu u Varaždinu

Elementi sustava dovoda zraka spojeni su na oba instrumenta tako da se toplina elektromotora prenosi na komore puhalu preko zajedničkog metalnog kućišta. Ovaj efekt najbolje se uočava na slikama 4.5. i 4.6. gdje krivulju temperature kućišta elektromotora „prate“ krivulje temperature komora centrifugalnog puhalu.

Razlika između konačne temperature kućišta elektromotora i konačne temperature kućišta izlazne komore puhalu znatno je manja u slučaju pozitivu u Varaždinu (17°C na orguljama u Osijeku naprema 2,2°C na pozitivu u Varaždinu), a razlog tomu je kompaktnija građa kućišta.

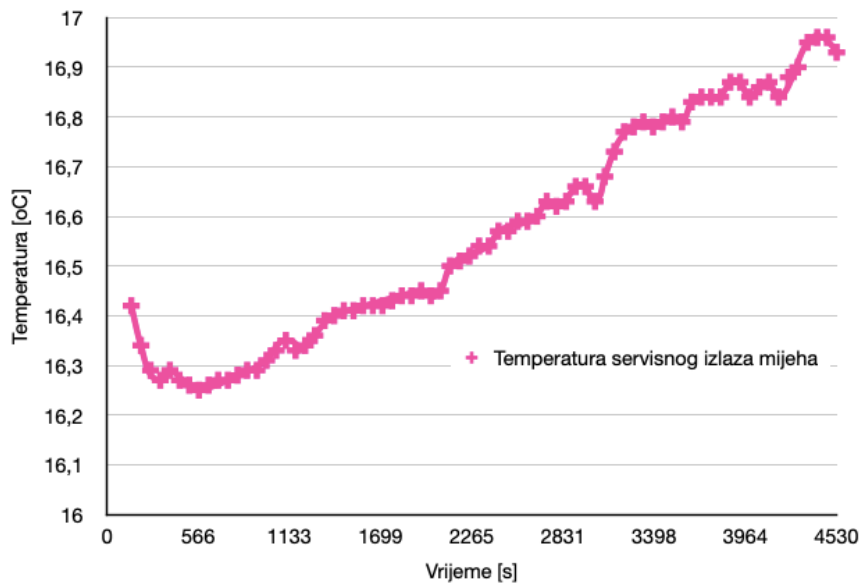
Temperature komora puhalu niže su od temperature kućišta elektromotora jer se dio topline prenosi na zrak koje puhalo upuhuje.

Na slici 4.6. ne postoji krivulja temperature usisne komore puhalu (siva krivulja na slici 4.5.) jer zbog manjka prostora nije ugrađena u pozitiv.

4.3.2. Mjerenje temperature na servisnom izlazu mijeha

Orgulje većeg volumena kućišta posjeduju mijeh kao zasebni element unutar kućišta. U tom je slučaju mijeh prvi element orgulja (osim zračnih kanala) koji prima zrak iz sustava dovoda zraka. Mijeh na svom kućištu posjeduje servisni izlaz koji služi za mjerenje tlaka zraka unutar mijeha, a u svrhu ovog rada poslužio je za mjerenje promjene temperature zraka unutar mijeha.

Rezultat provedenog mjerenja promjene temperature zraka na servisnom izlazu mijeha orgulja u Osijeku prikazan je na slici 4.7.



Slika 4.7. Grafički prikaz rezultata mjerenja promjene temperature zraka na servisnom izlazu mijeha u ovisnosti o vremenu na orguljama u Osijeku

Na krivulji prikazanoj na slici 4.7. primjećuje se početno kratko hlađenje zraka koje uzrokuje usis zraka s poda prostora koji je hladniji od zraka na visini 1 m od poda (visina s koje su mjerene temperature okolnog zraka). Nakon početnog pada, krivulja raste s nekoliko propada uslijed veće potražnje za zrakom (orgulje su bile svirane tijekom mjerenja). Uzrok propada krivulje oko 3000. sekunde mjerenja je uslijed uključivanja svih dostupnih registara orgulja.

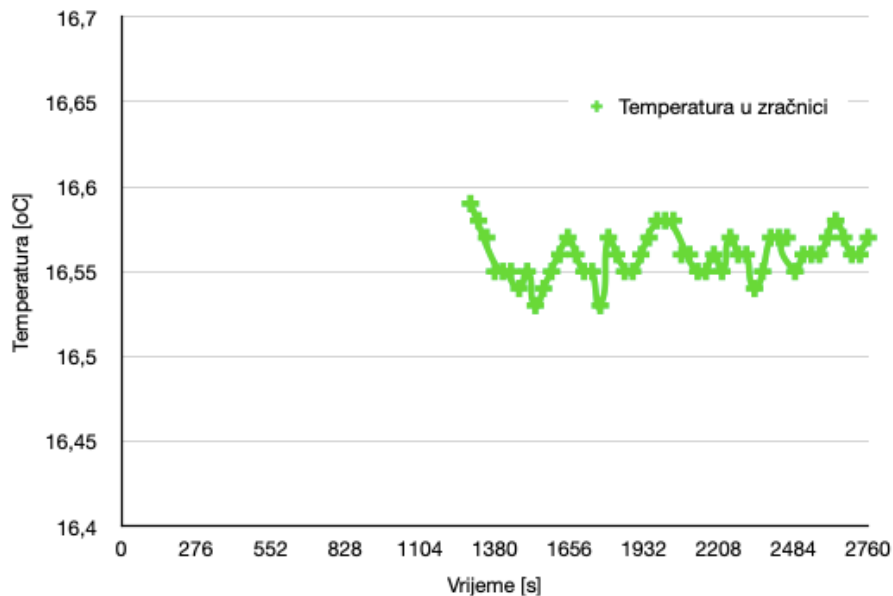
Mjerenje temperature zraka na servisnom izlazu mijeha nije bilo moguće izvršiti na pozitivu u Varaždinu jer u pozitivu ne postoji mijeh kao zasebni element. Zračnica pozitivna ima ulogu mijeha putem ugrađene pomične membrane kojom se regulira tlak zraka.

4.3.3. Mjerenja temperature u zračnici

Temperatura zraka u zračnici može se pretpostaviti da će biti približno jednaka temperaturi zraka koji će nakon otvaranja ventila u zračnici početi strujati kroz sviralu.

Promjena ove temperature od važnog je značaja za ovaj rad jer se njenim uspoređivanjem s temperaturom okolnog zraka dobiva uvid u očekivanu promjenu visine tona.

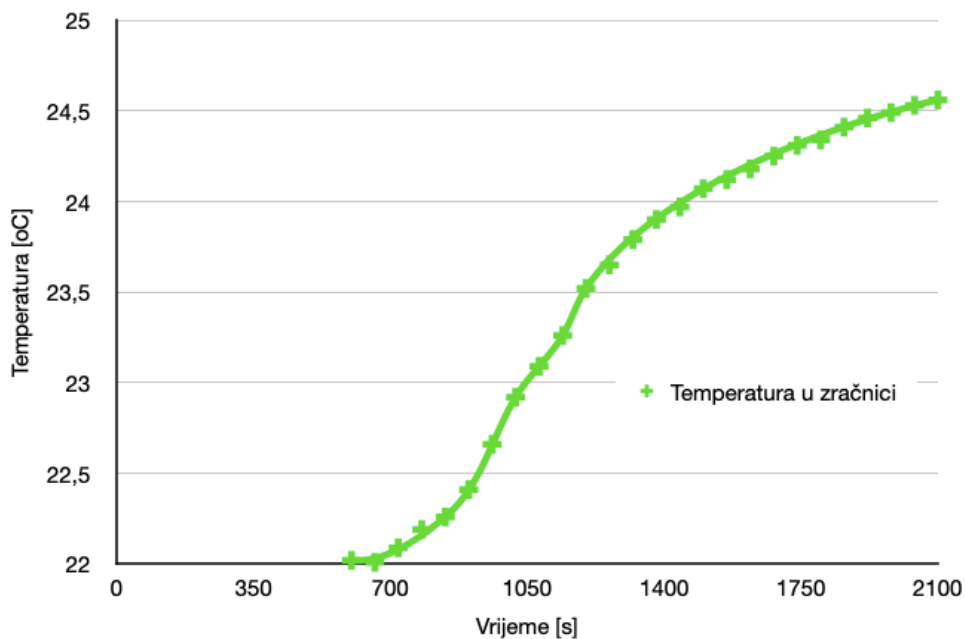
Rezultat provedenog mjerenja promjene temperature zraka u zračnici orgulja u Osijeku prikazan je na slici 4.8.



Slika 4.8. Grafički prikaz rezultata mjerenja promjene temperature zraka u zračnici u ovisnosti o vremenu na orguljama u Osijeku

Temperatura zraka u zračnici se u slučaju orgulja u Osijeku zanemarivo malo mijenjala. Razlog tomu su brojni, dugi i promjerom široki drveni zračni kanali unutar kućišta orgulja u Osijeku koji dovode zrak iz mijeha, a pritom se dio topline kroz njih disipira u okolni zrak.

Rezultat provedenog mjerenja promjene temperature zraka u zračnici pozitiva u Varaždinu prikazan je na slici 4.9.



Slika 4.9. Grafički prikaz rezultata mjerenja promjene temperature zraka u zračnici u ovisnosti o vremenu na pozitivu u Varaždinu

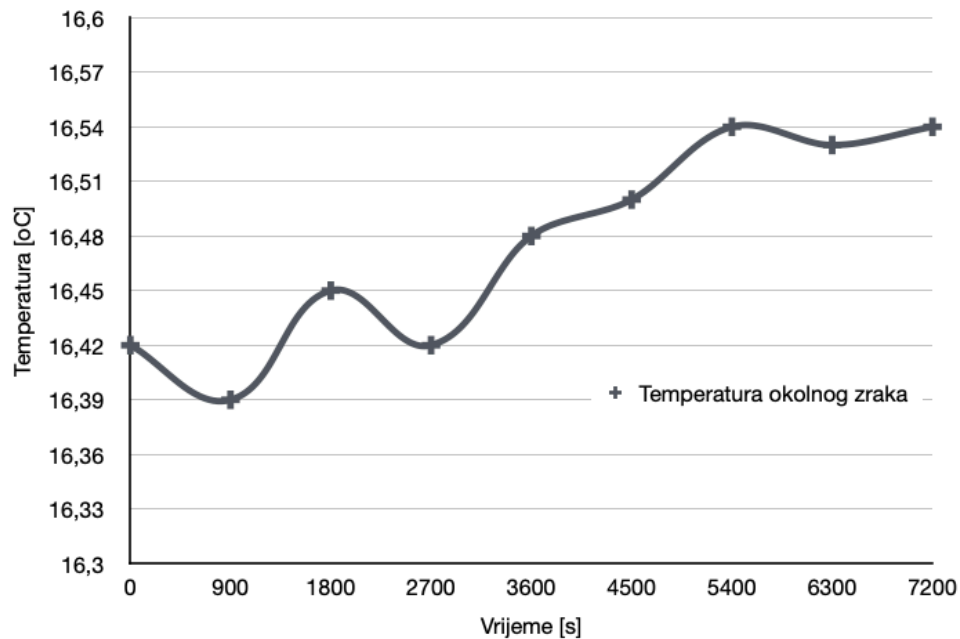
Temperatura zraka u zračnici je u slučaju pozitiva u Varaždinu značajno i brzo rasla. Zračni kanali unutar pozitiva su vrlo kratki i promjerom uski zbog čega se toplina ne može disipirati u okolinu u količini kao što je to moguće u slučaju orgulja u Osijeku.

4.3.4. Mjerenja temperature okolnog zraka

Tijekom promatranja utjecaja toplinskih gubitaka elektromotora na visinu tona svirala, ne smije se zanemariti mogući utjecaj tih istih toplinskih gubitaka na zrak u okolini instrumenta. Potrebno je mjerenjem provjeriti postoji li pozitivna povratna veza uslijed koje toplinski gubici elektromotora značajno zagrijavaju okolni zrak koji se potom dodatno zagrijava prolaskom kroz sustav dovoda zraka.

Promjena ove temperature od važnog je značaja za ovaj rad jer se njenim uspoređivanjem s temperaturom zraka u zračnici dobiva uvid u očekivanu promjenu visine tona.

Rezultat provedenog mjerenja promjene temperature okolnog zraka orgulja u Osijeku prikazan je na slici 4.10.



Slika 4.10. Grafički prikaz rezultata mjerenja promjene temperature okolnog zraka u ovisnosti o vremenu na orguljama u Osijeku

Iz rezultata mjerenja vidljivo je da se temperatura okolnog zraka značajno ne mijenja. Razlog tomu je značajno veći volumen prostora, odnosno zraka, u okolini instrumenta.

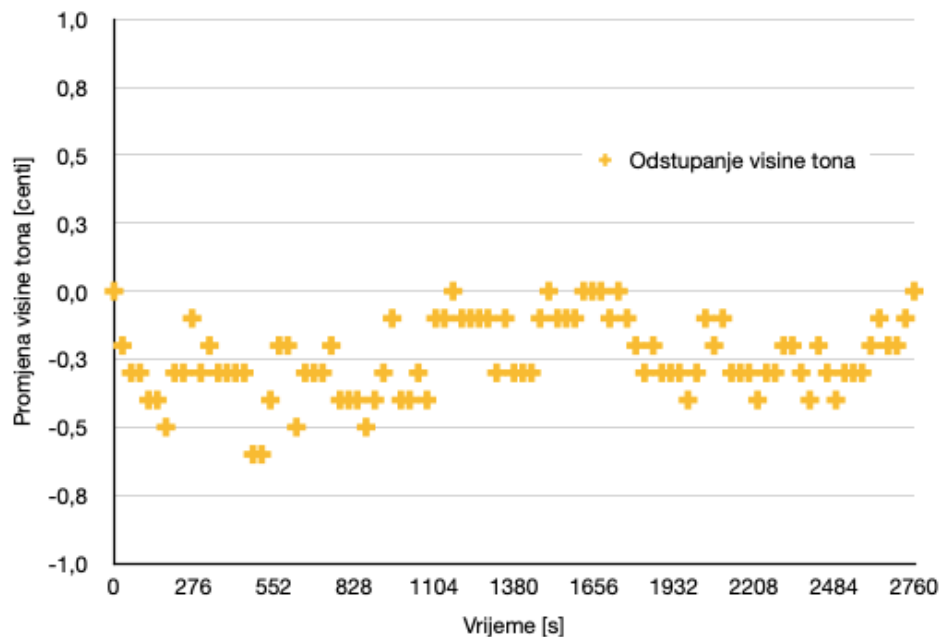
Mjerenje temperature okolnog zraka na pozitivu u Varaždinu izvršeno je samo na početku mjerenja i iznosila je 22,61°C.

Analizom rezultata prikazanih na slikama 4.6. i 4.9. te usporedbom početnih temperatura okolnog zraka, primjećuje se odstupanje početne temperature sustava dovoda zraka i temperature okolnog zraka u slučaju pozitivu u Varaždinu za 4,39°C. Uzrok ovoj razlici temperatura je štimanje pozitivu uoči mjerenja. Od završetka štimanja i početka mjerenja proteklo je više od sat vremena, ali elektromotor i kućište sustava dovoda zraka se nisu stigli ohladiti na temperaturu okolnog zraka.

4.3.5. Mjerenja promjene visine tona

U slučaju da se toplinski gubitci elektromotora predani zraku koji se upuhuje u orgulje nisu u dovoljnoj mjeri disipirali u okolni zrak do dolaska u zračnicu, toplina zraka prenosi se na svirale mijenjajući im visinu tona. Promjena visine tona događa se postupno od trenutka pokretanja elektromotora do trenutka u kojem je elektromotor postigao svoju radnu temperaturu i u kojem se višak topline prenio na sve zahvaćene elemente orgulja.

Rezultat provedenog mjerenja promjene visine tona orgulja u Osijeku prikazan je na slici 4.11.



Slika 4.11. Grafički prikaz rezultata mjerenja promjene visine tona u ovisnosti o vremenu na orguljama u Osijeku

Promatrajući odstupanja visine tona na slici 4.11. vidljivo je neznatno odstupanje visine tona orgulja u Osijeku. Potonje je u skladu s očekivanjima koristeći formulu (3.9).

Za orgulje u Osijeku, očekivana promjena temperature u zračnici je:

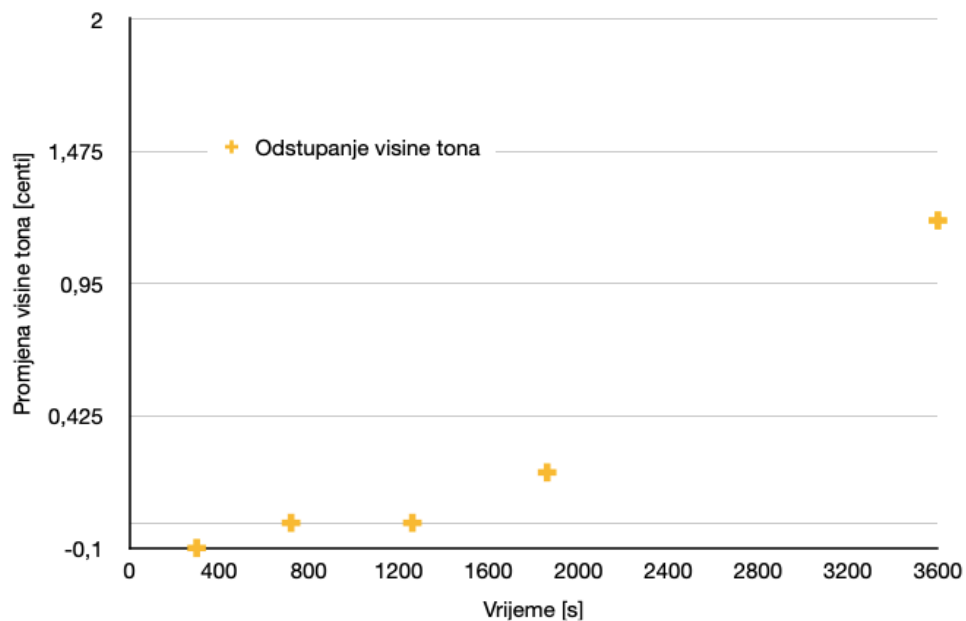
$$\Delta T = T_{max} - T_{početna\ okoliš} = 16,59 - 16,42 = 0,17^{\circ}\text{C} \quad (4.1.)$$

Koristeći formulu (3.9.) dobiva se maksimalno odstupanje visine tona s obzirom na promjenu temperature zraka koji struji kroz sviralu:

$$I_T = \frac{1200}{\log_{10} 2} * \log_{10} \frac{\sqrt{(16,42 + 273,15) + 0,17}}{\sqrt{(16,42 + 273,15)}} = 0,51 \text{ centi} \quad (4.2.)$$

Rezultat je u skladu s rezultatima mjerenja i pokazuje da u slučaju orgulja koje imaju sustav dovoda zraka izdvojen izvan kućišta, koje imaju mijeh i zračnice kao zasebne dijelove, te koje imaju duge i promjerom široke zračne kanale, visina tona će biti pod zanemarivo malim utjecajem toplinskih gubitaka elektromotora.

Rezultat provedenog mjerenja promjene visine tona pozitivna u Varaždinu prikazan je na slici 4.12.



Slika 4.12. Grafički prikaz rezultata mjerenja promjene visine tona u ovisnosti o vremenu na pozitivu u Varaždinu

Promatrajući odstupanja visine tona na slici 4.12. vidljivo je pozitivno povećanje odstupanja visine tona (ton postaje viši) pozitivna u Varaždinu. Potonje je u skladu s očekivanjima koristeći formulu (3.9.).

Za pozitiv u Varaždinu, očekivana promjena temperature u zračnici je:

$$\Delta T = T_{max} - T_{početna\ okoliš} = 24,65 - 22,61 = 2,04^{\circ}\text{C} \quad (4.3.)$$

Koristeći formulu (3.9.) dobiva se maksimalno odstupanje visine tona s obzirom na promjenu temperature zraka koji struji kroz sviralu:

$$I_T = \frac{1200}{\log_{10} 2} * \log_{10} \frac{\sqrt{(22,61 + 273,15) + 2,04}}{\sqrt{(22,61 + 273,15)}} = 5,95 \text{ centi} \quad (4.4.)$$

U mjerenjima je maksimalno odstupanje iznosilo 1,2 centi, što je oko petine maksimalnog odstupanja izračunatog u jednadžbi (4.4.). Razlog ovom nepodudaranju je štimanje instrumenta uoči početka mjerenja koje je „eliminiralo“ očekivano raštimanje uslijed zagrijavanja instrumenta. Potonje kazuje uspješnost štimanja i spremnost instrumenta za izvođenje glazbenih skladbi.

Uzevši u obzir da mjerenje promjene temperature zraka u zračnici nije provedeno tijekom cijelog razdoblja rada elektromotora, maksimalna temperatura korištena u jednadžbi (4.3.) ne predstavlja konačnu temperaturu u zračnici. Obradom rezultata mjerenja moguće je izračunati maksimalnu temperaturu zraka u zračnici koja tada iznosi 25,85°C.

U ovom slučaju vrijedi:

$$\Delta T = T_{max} - T_{početna\ okoliš} = 25,85 - 22,61 = 3,24^{\circ}\text{C} \quad (4.5.)$$

Stoga se i maksimalno odstupanje visine tona povećava:

$$I_T = \frac{1200}{\log_{10} 2} * \log_{10} \frac{\sqrt{(22,61 + 273,15) + 3,24}}{\sqrt{(22,61 + 273,15)}} = 9,43 \text{ centi} \quad (4.6.)$$

Prilikom procesa štimanja, orguljar nastoji postići odstupanje visine tona koje nije veće od 5 centi, stoga odstupanja izračunata u jednadžbama (4.4.) i (4.6.) predstavljaju značajna odstupanja koja bi se trebala korigirati ponovljenim štimanjem.

Rezultati su u skladu s rezultatima mjerenja i pokazuju da u slučaju orgulja (pozitiva) koje nemaju sustav dovoda zraka izdvojen izvan kućišta, koje nemaju mijeh i zračnice kao zasebne dijelove, te koje imaju kratke i promjerom uske zračne kanale, visina tona će biti pod značajnim utjecajem toplinskih gubitaka elektromotora.

5. MOGUĆA RJEŠENJA PROBLEMA

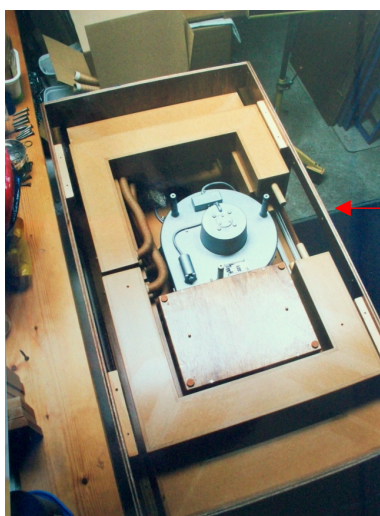
Prema dostupnoj literaturi [15], izvor topline (tj. grijanja) se ne bi trebao nalaziti ispod ili vrlo blizu orgulja. U oba analizirana slučaja odstupilo se od navedenog pravila jer ulogu izvora topline imaju upravo elektromotori koji osiguravaju pogon centrifugalnog puhala. Potrebno je pronaći adekvatno rješenje kako osigurati dovoljno snažnom elektromotoru prostor za rad u neposrednoj blizini orgulja, a da tijekom rada ne utječe na visinu tona orgulja.

Izvedivost navedenih mogućih rješenja analizirat će se na primjeru box - orgulja (pozitiva škrinjice) orguljara Peter Jonesa iz Velike Britanije vidljivog na slici 5.1.



Slika 5.1. Peter Jones za sviraonikom box - orgulja (pozitiva škrinjice) [16]

Komora sa sustavom dovoda zraka nalazi se u donjem dijelu orgulja, a na slici 5.2. vidljivo je kako komora izgleda prilikom servisiranja.



Slika 5.2. Izgled komore sustava dovoda zraka box - orgulja Peter Jonesa [16]

5.1. Toplinska izolacija sustava dovoda zraka

Uvođenje toplinske izolacije je najintuitivnije rješenje, no teško je provedivo u praksi. Promatrajući sliku 5.2. vidljivo je da su elektromotor i puhalo okruženi sa svih strana sa četiri svirale i dovodnim kanalima (cijevima) te nema slobodnog prostora za postavljanje bilo koje vrste izolacije. Također, postavljanjem toplinske izolacije štatile bi se svirale u neposrednoj blizini motora od direktnog zagrijavanja, tj. toplinska izolacija bi smanjila koeficijent I_L (kazuje promjenu visine tona s promjenom duljine svirale) u jednadžbi (3.8.). No, već je pokazano kako koeficijent I_L značajno ne utječe na promjenu visine tona kao što na promjenu visine tona utječe koeficijent I_T (kazuje promjenu visine tona s promjenom temperature zraka koji struji kroz sviralu).

U slučaju postavljanja toplinske izolacije oko elektromotora, toplina koju elektromotor proizvodi teže će se disipirati u okolinu te će se većim intenzitetom prenositi na izlaznu komoru puhalo, odnosno na zrak koji se upuhuje u orgulje. Time se povećava koeficijent I_T koji značajno više utječe na ukupnu promjenu visine tona. Također se povećava opasnost od požara u slučaju toplinskog preopterećenja motora.

Ovime je pokazano da uvođenje toplinske izolacije nije praktično izvedivo zbog manjka prostora i zbog povećanog zagrijavanja elektromotora.

5.2. Prisilno hlađenje sustava dovoda zraka

Uvođenje sustava prisilnog hlađenja u obliku neke vrste rashladnog sustava je sljedeće rješenje koje se nameće. Rashladni sustav moguće je ostvariti pomoću ventilatora ili hladnjaka.

5.2.1. Ugradnja ventilatora u kućište

Promatrajući sliku 5.2. vidljivo je da je ventilator moguće ugraditi na prerezu u kućištu desno od sustava dovoda zraka (crvena strelica na slici 5.2.). Ventilator bi morao biti odabran i postavljen na način da ne proizvodi buku, no postavlja se pitanje: u kojem bi smjeru trebao raditi? Ako ventilator ispuhuje zrak iz komore sustava dovoda zraka, u samoj komori pojavljuje se manjak zraka. Ova situacija može prouzročiti pregrijavanje i elektromotora i ventilatora što povećava opasnost od požara, a i orgulje neće biti opskrbljene s dovoljno zraka. Ako ventilator upuhuje zrak u komoru sustava dovoda zraka,

upuhani zrak bit će zagrijan toplinom elektromotora i upuhan u orgulje, ponovno povećavajući koeficijent I_T .

Ovaj problem je moguće riješiti ako zrak koji upuhuje ventilator struji isključivo preko kućišta elektromotora, a to je moguće ako se ugradi poseban kanal koji obuhvaća isključivo kućište elektromotora. Problem ovog rješenja je što bi taj kanal zauzimao već skućeni prostor u orguljama i ne bi mogao biti prikladne veličine za učinkovito rashlađivanje. U slučaju požara na elektromotoru, dovod okolišnog zraka bi razbukvalo požar.

Ovime je pokazano da uvođenje ventilatora kao načina hlađenja nije praktično izvedivo zbog manjka prostora i zbog opasnosti od nastanka požara.

5.2.2. Ugradnja hladnjaka

Uvođenjem hladnjaka problem zagrijavanja elektromotora vjerojatno bi bio riješen, no njegovom ugradnjom se u orgulje uvodi još jedan komplicirani uređaj koji zauzima prostor, zahtijeva dodatno održavanje i moguće je da se pokvari uslijed dugotrajnog korištenja. Također bi se moralo osigurati prikladno hlađenje izmjenjivača topline hladnjaka i morao bi se uvesti automatizirani sustav praćenja topline elektromotora. Cijena orgulja narasla bi za cijenu hladnjaka.

Ovime je pokazano da uvođenje hladnjaka kao načina hlađenja nije praktično izvedivo zbog manjka prostora te zbog povećanja kompleksnosti instrumenta, njegove cijene i potrebnog održavanja.

5.3. Primjena odvojivog elektromotora s vanjske strane kućišta

Sva prethodna rješenja polaze od pretpostavke da su kućište elektromotora i kućište puhala tvornički nerazdvojivo povezani. Ako se napravi obrat ove pretpostavke, dolazi se do lako izvedivog i za orgulje najpogodnijeg rješenja problema.

Kućište elektromotora i kućište puhala trebaju biti odvojivi jedno od drugoga te se na jednostavan način moraju moći spajati. Na ideju ovog rješenja došlo se promatrajući štapne miksera (primjer vidljiv na slici 5.3.) koji se sastoje od dva dijela: drške s elektromotorom i nastavcima za različite potrebe. Tako bi se puhalo pozicioniralo s unutarnje strane kućišta, a elektromotor bi se nalazio s vanjske strane kućišta.



Slika 5.3. Bosch štapni mikser CleverMixx 400 W [17]

Način spajanja elektromotora i puhala izvelo bi se primjenom krute spojke.

Prednosti predloženog rješenja su mnoge:

- oslobodio bi se prostor unutar orgulja za veličinu elektromotora
- kućište puhala položeno paralelno uz stranu kućišta, a ne uz dno, oslobodilo bi prostor za dodatne elemente orgulja te bi omogućilo drugačiji razmještaj elemenata
- u slučaju kvara elektromotora samo bi njega trebalo mijenjati (isto vrijedi i u slučaju kvara puhala)
- toplina elektromotora mogla bi se nesmetano disipirati u okolinu, ne utječući na zagrijavanje unutarnjih dijelova orgulja (koeficijent I_L) niti na zagrijavanje kućišta puhala i posljedično zraka koji se upuhuje u orgulje (koeficijent I_T)
- orgulje bi prilikom transporta bile lakše prenosive
- vrsta elektromotora (priključak na mrežu, snaga, broj faza) mogao bi biti promjenjiv, dok bi puhalo bilo isto.

Nedostatci ovog rješenja su neprilagođenost trenutno izgrađenih orgulja ovom rješenju, odnosno već izgrađene orgulje bi trebale biti prerađivane specijalno za ovo rješenje, te bi elektromotor smješten izvan kućišta potencijalno narušavao estetski doživljaj instrumenta.

Ovime je pokazano da je rješenje u obliku odvojivog elektromotora koji bi bio smješten izvan kućišta najpogodnije rješenje problema utjecaja toplinskih gubitaka elektromotora na akustične karakteristike orgulja.

6. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad, prema postavljenom zadatku, predstavlja nekoliko mogućih rješenja problema utjecaja toplinskih gubitaka elektromotora na akustične karakteristike orgulja. Prijedlozi rješenja utemeljeni su na znanju akustike kao grane fizike, razumijevanju rada elektromotora, te poznavanju materijalne strukture i načina rada pojedinih dijelova orgulja.

Kroz rad su objašnjeni nužni teorijski pojmovi potrebni za predočavanje konteksta problema. Definirane su akustične karakteristike, objašnjeni su izvori nastanka toplinskih gubitaka pri radu elektromotora, te su utvrđeni utjecaji promjene temperature na orgulje.

Prikazani rezultati mjerenja na dva instrumenta pokazali su da veliku ulogu u utjecaju promjene temperature na akustične karakteristike orgulja ima i sama veličina instrumenta, odnosno količina i raspored njegovih dijelova. Rezultati mjerenja su grafički prezentirani i analizirani te se može zaključiti da je utjecaj toplinskih gubitaka elektromotora na akustične karakteristike orgulja izraženiji što su orgulje manjih dimenzija i kompaktnije građe.

Nakon provedenih mjerenja te analize rezultata, predstavljeno je nekoliko mogućih rješenja. Svako rješenje je analizirano kroz utvrđivanje prednosti i nedostataka, a kao najuspješnije rješenje je odabrano rješenje u obliku odvojivog elektromotora s vanjske strane kućišta.

Istraživanje problema utjecaja toplinskih gubitaka elektromotora na akustične karakteristike orgulja i mogućnost ostvarivanja predloženog rješenja treba biti nastavljeno kroz suradnju orguljara i elektroenergetičara na izboru prikladnih materijala i načina izvedbe predloženog rješenja.

LITERATURA

- [1] F. Dugan st., *Glazbeni instrumenti*, Zagreb: Kiklos - krug knjige, 2018.
- [2] A. Angster, P. Rucz, A. Miklós, „Acoustics of Organ Pipes and Future Trends in the Research“, *Acoustics Today*, vol. 13, str. 10 - 18, 2017.
- [3] T. Krobot. „Materijali u orguljama“ Privatni email (11. ožujka 2021.).
- [4] V. Vrbanić, "Instrumenti s tipkama iz fundusa Muzeja Slavonije u Osijeku", *Osječki zbornik*, vol. 35, br. xx, str. 117-132, 2020. [Online]. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/236423>. [Citirano: 13.07.2021.]
- [5] A. Ivanković, „Orgulje konkatedralne župne crkve sv. Petra i Pavla ap. – Osnovne informacije“, *orgos.info*. [Online]. Dostupno na: <https://orgos.info/orgulje-konkatedrala/osnovno>. [Citirano: 29. lipnja 2021.].
- [6] P. Rucz, „Determination of acoustic parameters of organ pipes by means of numerical techniques“, diplomski rad, Budapest University of Technology and Economics - Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Budimpešta, 2009.
- [7] E. Armano, "Prioriteti vezani uz zaštitu povijesnih i spomeničkih orgulja u Hrvatskoj", *Arti musices*, vol.50, br. 1-2, str. 117-184, 2019.
- [8] D. Babić, I. Pletikosa, „Ovisnost brzine zvuka o temperaturi“, *Matematičko - fizički list*, br. 63, str. 24 - 27, 2012./2013.
- [9] P. Krzywdzinski, „Spectrum“, *apple.com*. [Online]. Dostupno na: <https://apps.apple.com/hr/app/audio-spectrum/id861956934>. [Citirano: 25. lipnja 2021.].
- [10] „Oktava“, u *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, [online dokument], 2021. Dostupno na: Hrvatska enciklopedija, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=44955>. [Citirano: 25. lipnja 2021.].
- [11] K. Marković, „Energetska učinkovitost električnih motora“, završni rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2019.
- [12] Tontechink-Rechner-sengpielaudio, „Change of pitch with change of temperature“, *sengpielaudio.com*. [Online]. Dostupno na: <http://sengpielaudio.com/calculator-pitchchange.htm>. [Citirano: 26. lipnja 2021.].
- [13] U. Pisani, „Effect of a Local Temperature Change in an Organ Pipe“, *Acoustica*, vol. 35, str. 132 - 136, 1976.
- [14] American Institute of Organbuilders, *Guidelines for Pipe Organ Temperature Control*, American Institute of Organbuilders, 2006.

- [15] The Institute of British Organ Building IBO, *CHURCH HEATING and the ORGAN*, The Institute of British Organ Building IBO, 2003.
- [16] P. Jones. „Re: Help for my final paper“ Privatni email (11. ožujka 2021.).
- [17] BSH kućanski uređaji d.o.o., „Štapni mikser CleverMixx 400 W Bijela, deep red MSM14000“, *bosch.com*. [Online]. Dostupno na: <https://bosch-home.com/hr/popis-proizvoda/MSM14000>. [Pristupljeno 27. lipnja 2021.].

SAŽETAK

Orgulje kao jedan od najkompleksnijih ljudskih izuma sadrže mnogo elemenata, od kojih je jedan elektromotor koji služi za pokretanje centrifugalnog puhalo. Elektromotor i puhalo zajedno čine sustav dovoda zraka koji je ključan dio instrumenta. Uslijed zagrijavanja elektromotora tijekom rada, toplina s kućišta elektromotora prenosi se na kućište puhalo, a preko puhalo toplina ulazi u instrument. Zbog zagrijavanja zraka mijenja se visina tona svih svirala u orguljama uzrokujući probleme glazbenicima tijekom izvođenja glazbenih skladbi. Za analizu ovog problema korištena su mjerenja izvršena na dva instrumenta različitih veličina. Mjerenja su pokazala da je utjecaj toplinskih gubitaka elektromotora na akustične karakteristike veći što je instrument manjih dimenzija i kompaktnije građe. Na kraju rada predstavljena su moguća rješenja problema kroz analizu prednosti i nedostataka svakog rješenja pojedinačno.

Ključne riječi: akustika, elektromotor, orgulje, toplina

THE EFFECT OF ELECTRIC MOTOR'S HEAT ENERGY LOSSES ON ACOUSTIC PROPERTIES OF PIPE ORGANS

Summary

Pipe organ is one of the most complex human inventions. They are comprised of many elements. One of them is electric motor which is used to power the blower. Electric motor and blower make air supply system, a crucial part of the instrument. During the operation of electric motor, heat energy losses are transferred from the electric motor's case to the blower's case that heats up the air coming into the instrument. Heated air causes pitch change in all of the pipes inside the organ and consequently problems to musician performing music. This problem is observed and analysed using measurements from two differently sized pipe organs. The measurements showed that the effect of electric motor's heat energy losses on acoustic properties are more perceptible on smaller, more compact made instruments. At the end of this work possible solutions to this problem were presented and individually analysed.

Keywords: acoustics, electric motor, heat, pipe organ

ŽIVOTOPIS

Antun Ivanković rođen je 6. lipnja 1999. godine u Osijeku.

Nakon završene Prirodoslovno - matematičke gimnazije u Osijeku upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike i informacijskih tehnologija, smjer elektroenergetika, na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.

Orgulje počinje svirati 2015. godine kao orguljaš samouk. Orguljaš je i koordinator kulturnih aktivnosti Franjevačke crkve i samostana svetog Križa u Osijeku.

2019. godine prvi put organizira aktivnosti u sklopu vlastitog projekta orgulja u Osijeku *orgOS*, koji 2020. godine prerasta u *Projekt i festival orgulja orgOS*. Uz liturgijsku službu orguljaša, nastupa na raznim koncertima i bavi se glazbenom produkcijom.

Potpis autora

PRILOZI

Specifikacije orgulja i natpisna pločica elektromotora orgulja u Osijeku uz pripadajuće fotografije

Tablica P.1.1. Osnovne informacije o orguljama

| | |
|------------------|----------------------|
| Graditelj: | Ferdinand Heferer |
| Godina gradnje: | 1908. |
| Sviraonik: | 1 manual + pedal |
| Broj registara: | 10 |
| Traktura: | pneumatska |
| Volumen orgulja: | 26,65 m ³ |



Slika P.1.1. Pogled na orgulje s oba korpusa, sviraonikom i produžetkom mijeha



Slika P.1.2. Pogled na orgulje s desnim korpusom, produžetkom mijeha, polugom za nožno pumpanje i kutijom sustava dovoda zraka



Slika P.1.3. Pogled u unutrašnjost orgulja sa zračnim kanalima i mjevovima



Slika P.1.4. Pogled na otklopljenu kutiju sustava dovoda zraka sa zvučnom izolacijom, kućištem elektromotora, izlaznom komorom i usisnom komorom

Tablica P.1.2. Podatci s natpisne pločice elektromotora

| | |
|--------------------------------------|---------------|
| Proizvođač i broj motora: | Ventus, 26073 |
| Napon [V]: | 230 |
| Struja [A]: | 1,5 |
| Frekvencija [Hz]: | 50 |
| Broj faza: | 1 |
| Snaga [KS]: | 0,45 |
| Brzina [o/min]: | 2800 |
| Tlak zraka [mm WS]: | 105 |
| Volumen zraka [m ³ /min]: | 8 |

Specifikacije pozitivna i natpisna pločica elektromotora pozitivna u Varaždinu uz pripadajuće fotografije

Tablica P.2.1. Osnovne informacije o pozitivu

| | |
|--------------------|---------------------|
| Graditelj: | Leon Lesar |
| Godina gradnje: | 2019. |
| Sviraonik: | 1 manual |
| Broj registara: | 4 |
| Traktura: | mehanička |
| Volumen pozitivna: | 0,97 m ³ |



Slika P.2.1. Pogled na pozitiv srijeda



Slika P.2.2. Pogled na pozitiv straga s vidljivim manubrijima i manualom



Slika P.2.3. Pogled u unutrašnjost pozitivna sa sviralama i zračnim kanalima



Slika P.2.4. Pogled na zračnicu s pomičnom membranom u ulozi mijeha i komore sustava dovoda zraka s izlaznom komorom i zvučnom izolacijom

Tablica P.2.2. Podatci s natpisne pločice elektromotora

| | |
|--------------------------------------|------------------------|
| Proizvođač i godina proizvodnje: | Valter Daminato, 2010. |
| Napon [V]: | 230 |
| Struja [A]: | 0,57 |
| Frekvencija [Hz]: | 50 |
| Broj faza: | 1 |
| Snaga [KS]: | 0,18 |
| Brzina [o/min]: | 2800 |
| Tlak zraka [mm WS]: | 80 |
| Volumen zraka [m ³ /min]: | 3 |

Specifikacije mjernih uređaja

1. Beskontaktni infracrveni termometar UX-A-01:

- točnost mjerenja:
 - raspon od 35°C do 42°C = $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
 - ostale vrijednosti = $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$

2. Bosch senzor temperature, vlage i tlaka BME 280

- točnost mjerenja:
 - raspon od -40°C do 80°C = $\pm 1^{\circ}\text{C}$
- poveznica: <https://e-radionica.com/hr/bme280-senzor-tlaka-temperature-i-vlage-e-r-made.html>

3. Mobilna aplikacija KeyTuner

- autor: TimperLabs LLC
- verzija aplikacije: 1.8.6
- točnost: $\pm 0,1$ cent
- poveznica: <https://apps.apple.com/hr/app/keytuner/id1328712601>

4. Mobilni uređaj iPhone Xs Max

- proizvođač: Apple Inc.
- godina proizvodnje: 2019.
- operativni sustav: iOS
- verzija operativnog sustava: 14.4
- poveznica: <https://support.apple.com/kb/SP779>

Numerički rezultati mjerenja

Napomena: Nulta sekunda u svim mjerenjima predstavlja trenutak paljenja elektromotora.

1. Mjerenje odstupanja visine tona u ovisnosti o vremenu

Mjerenje izvršio: Antun Ivanković

Lokacija mjerenja: Franjevačka crkva svetog Križa, Trg Vatroslava Lisinskog 3, Osijek

Datum mjerenja: 12. ožujka 2021.

Opis mjerenja: Mjerenje je provedeno tako što su odmah nakon pokretanja elektromotora pritisnute tipke d1 i d3 te je odabran registar Principal 8'. Mobilni uređaj s KeyTuner aplikacijom služio je za očitavanje frekvencije i odstupanje visine tona d1. Poklopac kutije sustava dovoda zraka je bio zatvoren tijekom cijelog mjerenja. Orgulje nisu bile svirane tijekom mjerenja.

| Vrijeme [s] | Odstupanje [centi] | Vrijeme [s] | Odstupanje [centi] | Vrijeme [s] | Odstupanje [centi] | Vrijeme [s] | Odstupanje [centi] |
|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|
| 1 | 0,0 | 720 | -0,3 | 1440 | -0,3 | 2160 | -0,3 |
| 30 | -0,2 | 750 | -0,2 | 1470 | -0,1 | 2190 | -0,3 |
| 60 | -0,3 | 780 | -0,4 | 1500 | 0,0 | 2220 | -0,4 |
| 90 | -0,3 | 810 | -0,4 | 1530 | -0,1 | 2250 | -0,3 |
| 120 | -0,4 | 840 | -0,4 | 1560 | -0,1 | 2280 | -0,3 |
| 150 | -0,4 | 870 | -0,5 | 1590 | -0,1 | 2310 | -0,2 |
| 180 | -0,5 | 900 | -0,4 | 1620 | 0,0 | 2340 | -0,2 |
| 210 | -0,3 | 930 | -0,3 | 1650 | 0,0 | 2370 | -0,3 |
| 240 | -0,3 | 960 | -0,1 | 1680 | 0,0 | 2400 | -0,4 |
| 270 | -0,1 | 990 | -0,4 | 1710 | -0,1 | 2430 | -0,2 |
| 300 | -0,3 | 1020 | -0,4 | 1740 | 0,0 | 2460 | -0,3 |
| 330 | -0,2 | 1050 | -0,3 | 1770 | -0,1 | 2490 | -0,4 |
| 360 | -0,3 | 1080 | -0,4 | 1800 | -0,2 | 2520 | -0,3 |
| 390 | -0,3 | 1110 | -0,1 | 1830 | -0,3 | 2550 | -0,3 |
| 420 | -0,3 | 1140 | -0,1 | 1860 | -0,2 | 2580 | -0,3 |
| 450 | -0,3 | 1170 | 0,0 | 1890 | -0,3 | 2610 | -0,2 |
| 480 | -0,6 | 1200 | -0,1 | 1920 | -0,3 | 2640 | -0,1 |
| 510 | -0,6 | 1230 | -0,1 | 1950 | -0,3 | 2670 | -0,2 |
| 540 | -0,4 | 1260 | -0,1 | 1980 | -0,4 | 2700 | -0,2 |
| 570 | -0,2 | 1290 | -0,1 | 2010 | -0,3 | 2730 | -0,1 |
| 600 | -0,2 | 1320 | -0,3 | 2040 | -0,1 | 2760 | 0,0 |
| 630 | -0,5 | 1350 | -0,1 | 2070 | -0,2 | | |
| 660 | -0,3 | 1380 | -0,3 | 2100 | -0,1 | | |
| 690 | -0,3 | 1410 | -0,3 | 2130 | -0,3 | | |

2. Mjerenje promjene temperature zraka u zračnici u ovisnosti o vremenu

Mjerenje izvršio: Antun Ivanković

Lokacija mjerenja: Franjevačka crkva svetog Križa, Trg Vatroslava Lisinskog 3, Osijek

Datum mjerenja: 12. ožujka 2021.

Opis mjerenja: Mjerenje je provedeno tako što su odmah nakon pokretanja elektromotora pritisnute tipke d1 i d3 te je odabran registar Principal 8'. Potom je svirala tona d3 izmaknuta iz ležišta te je preko rupe stavljen Bosch senzor za temperaturu, vlagu i tlak zraka. Poklopac kutije sustava dovoda zraka je bio zatvoren tijekom cijelog mjerenja. Orgulje nisu bile svirane tijekom mjerenja.

| Vrijeme [s] | Temperatura [°C] | Vrijeme [s] | Temperatura [°C] |
|-------------|------------------|-------------|------------------|
| 1290 | 16,59 | 2130 | 16,55 |
| 1320 | 16,58 | 2160 | 16,55 |
| 1350 | 16,57 | 2190 | 16,56 |
| 1380 | 16,55 | 2220 | 16,55 |
| 1410 | 16,55 | 2250 | 16,57 |
| 1440 | 16,55 | 2280 | 16,56 |
| 1470 | 16,54 | 2310 | 16,56 |
| 1500 | 16,55 | 2340 | 16,54 |
| 1530 | 16,53 | 2370 | 16,55 |
| 1560 | 16,54 | 2400 | 16,57 |
| 1590 | 16,55 | 2430 | 16,57 |
| 1620 | 16,56 | 2460 | 16,57 |
| 1650 | 16,57 | 2490 | 16,55 |
| 1680 | 16,56 | 2520 | 16,56 |
| 1710 | 16,55 | 2550 | 16,56 |
| 1740 | 16,55 | 2580 | 16,56 |
| 1770 | 16,53 | 2610 | 16,57 |
| 1800 | 16,57 | 2640 | 16,58 |
| 1830 | 16,56 | 2670 | 16,57 |
| 1860 | 16,55 | 2700 | 16,56 |
| 1890 | 16,55 | 2730 | 16,56 |
| 1920 | 16,56 | 2760 | 16,57 |
| 1950 | 16,57 | | |
| 1980 | 16,58 | | |
| 2010 | 16,58 | | |
| 2040 | 16,58 | | |
| 2070 | 16,56 | | |
| 2100 | 16,56 | | |

3. Mjerenje promjene temperature na sustavu dovoda zraka u ovisnosti o vremenu

Mjerenje izvršio: Antun Ivanković

Lokacija mjerenja: Franjevačka crkva svetog Križa, Trg Vatroslava Lisinskog 3, Osijek

Datum mjerenja: 19. prosinca 2020.

Opis mjerenja: Mjerenje je provedeno koristeći beskontaktni infracrveni termometar na kućištu elektromotora, na kućištu izlazne komore puhalo te na kućištu usisne komore puhalo. Poklopac kutije sustava dovoda zraka je bio potpuno uklonjen. Orgulje su bile svirane tijekom mjerenja.

| Vrijeme [s] | Temperatura elektromotora [°C] | Temperatura izlazne komore [°C] | Temperatura usisne komore [°C] |
|-------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 16,3 | 16,3 | 16,3 |
| 600 | 25,0 | 19,2 | 17,3 |
| 1200 | 30,1 | 20,4 | 17,9 |
| 1800 | 33,1 | 21,0 | 18,1 |
| 2400 | 35,6 | 21,5 | 18,3 |
| 3000 | 36,7 | 21,9 | 18,6 |
| 3600 | 37,7 | 22,2 | 18,7 |
| 4200 | 38,2 | 22,3 | 18,7 |
| 4800 | 38,6 | 22,2 | 18,7 |
| 5400 | 38,7 | 22,0 | 18,6 |
| 6000 | 38,8 | 22,1 | 18,5 |

4. Mjerenje promjene temperature zraka na servisnom izlazu mijeha u ovisnosti o vremenu

Mjerenje izvršio: Antun Ivanković

Lokacija mjerenja: Franjevačka crkva svetog Križa, Trg Vatroslava Lisinskog 3, Osijek

Datum mjerenja: 11. prosinca 2020.

Opis mjerenja: Mjerenje je provedeno na servisnom otvoru mijeha, odnosno na otvoru gdje orguljari priključuju mjerni uređaj manometar u svrhu mjerenja tlaka zraka u mijehu. Poklopac kutije sustava dovoda zraka je tijekom mjerenja bio otvoren, a potom u 3000. sekundi u potpunosti zatvoren. Orgulje su bile svirane tijekom mjerenja.

| Vrijeme [s] | Temperatura [°C] | Vrijeme [s] | Temperatura [°C] | Vrijeme [s] | Temperatura [°C] |
|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|
| 150 | 16,42 | 1770 | 16,43 | 3390 | 16,78 |
| 210 | 16,34 | 1830 | 16,44 | 3450 | 16,79 |
| 270 | 16,29 | 1890 | 16,44 | 3510 | 16,80 |
| 330 | 16,27 | 1950 | 16,45 | 3570 | 16,79 |
| 390 | 16,29 | 2010 | 16,44 | 3630 | 16,83 |
| 450 | 16,27 | 2070 | 16,45 | 3690 | 16,84 |
| 510 | 16,26 | 2130 | 16,50 | 3750 | 16,84 |
| 570 | 16,25 | 2190 | 16,51 | 3810 | 16,84 |
| 630 | 16,26 | 2250 | 16,52 | 3870 | 16,87 |
| 690 | 16,27 | 2310 | 16,54 | 3930 | 16,87 |
| 750 | 16,27 | 2370 | 16,54 | 3990 | 16,84 |
| 810 | 16,28 | 2430 | 16,57 | 4050 | 16,86 |
| 870 | 16,29 | 2490 | 16,57 | 4110 | 16,87 |
| 930 | 16,29 | 2550 | 16,59 | 4170 | 16,84 |
| 990 | 16,31 | 2610 | 16,59 | 4230 | 16,88 |
| 1050 | 16,33 | 2670 | 16,60 | 4290 | 16,90 |
| 1110 | 16,35 | 2730 | 16,63 | 4350 | 16,95 |
| 1170 | 16,33 | 2790 | 16,62 | 4410 | 16,96 |
| 1230 | 16,34 | 2850 | 16,63 | 4470 | 16,96 |
| 1290 | 16,36 | 2910 | 16,66 | 4530 | 16,93 |
| 1350 | 16,39 | 2970 | 16,66 | 4530 | 16,93 |
| 1410 | 16,40 | 3030 | 16,63 | | |
| 1470 | 16,41 | 3090 | 16,68 | | |
| 1530 | 16,41 | 3150 | 16,73 | | |
| 1590 | 16,42 | 3210 | 16,77 | | |
| 1650 | 16,42 | 3270 | 16,78 | | |
| 1710 | 16,42 | 3330 | 16,79 | | |

5. Mjerenje promjene temperature okolnog zraka u ovisnosti o vremenu

Mjerenje izvršio: Antun Ivanković

Lokacija mjerenja: Franjevačka crkva svetog Križa, Trg Vatroslava Lisinskog 3, Osijek

Datum mjerenja: 12. prosinca 2020.

Opis mjerenja: Mjerenje je provedeno na korskoj ogradi visine 1 metar. Poklopac kutije sustava dovoda zraka je djelomično uklonjen samo tijekom vršenja mjerenja na sustavu dovoda zraka. Orgulje su bile svirane tijekom mjerenja.

| Vrijeme [s] | Temperatura [°C] |
|-------------|------------------|
| 1 | 16,42 |
| 900 | 16,39 |
| 1800 | 16,45 |
| 2700 | 16,42 |
| 3600 | 16,48 |
| 4500 | 16,50 |
| 5400 | 16,54 |
| 6300 | 16,53 |
| 7200 | 16,54 |

6. Mjerenje odstupanja visine tona u ovisnosti o vremenu

Mjerenje izvršio: Antun Ivanković

Lokacija mjerenja: Svećenički dom, Zagrebačka ulica 3, Varaždin

Datum mjerenja: 24. travnja 2021.

Opis mjerenja: Mjerenje je provedeno tako što su odmah nakon pokretanja elektromotora pritisnute tipke D veliki i F veliki te je odabran registar Octav 2'. Mobilni uređaj s KeyTuner aplikacijom služio je za očitavanje frekvencije i odstupanje visine tona D veliki. Poklopac kutije sustava dovoda zraka je bio otvoren tijekom cijelog mjerenja. Pozitiv nije bio sviran tijekom mjerenja.

| Vrijeme [s] | Odstupanje [centi] |
|-------------|--------------------|
| 300 | -0,1 |
| 720 | 0 |
| 1260 | 0 |
| 1860 | 0,2 |
| 2220 | 0,5 |
| 3600 | 1,2 |

7. Mjerenje promjene temperature zraka u zračnici u ovisnosti o vremenu

Mjerenje izvršio: Antun Ivanković

Lokacija mjerenja: Svećenički dom, Zagrebačka ulica 3, Varaždin

Datum mjerenja: 24. travnja 2021.

Opis mjerenja: Mjerenje je provedeno tako što su odmah nakon pokretanja elektromotora pritisnute tipke D veliki i F veliki te je odabran registar Octav 2'. Potom je svirala tona F veliki izmaknuta iz ležišta te je preko rupe stavljen Bosch senzor temperature, vlage i tlaka zraka. Poklopac kutije sustava dovoda zraka je bio otvoren tijekom cijelog mjerenja. Pozitiv nije bio sviran tijekom mjerenja.

| Vrijeme [s] | Temperatura [°C] |
|-------------|------------------|
| 600 | 22,02 |
| 660 | 22,01 |
| 720 | 22,09 |
| 780 | 22,19 |
| 840 | 22,26 |
| 900 | 22,41 |
| 960 | 22,66 |
| 1020 | 22,92 |
| 1080 | 23,09 |
| 1140 | 23,26 |
| 1200 | 23,52 |
| 1260 | 23,65 |
| 1320 | 23,79 |
| 1380 | 23,90 |
| 1440 | 23,97 |
| 1500 | 24,07 |
| 1560 | 24,12 |
| 1620 | 24,18 |
| 1680 | 24,25 |
| 1740 | 24,31 |
| 1800 | 24,34 |
| 1860 | 24,41 |
| 1920 | 24,46 |
| 1980 | 24,49 |
| 2040 | 24,53 |
| 2100 | 24,56 |
| 2160 | 24,63 |
| 2220 | 24,65 |

8. Mjerenje promjene temperature na sustavu dovoda zraka u ovisnosti o vremenu

Mjerenje izvršio: Antun Ivanković

Lokacija mjerenja: Svećenički dom, Zagrebačka ulica 3, Varaždin

Datum mjerenja: 24. travnja 2021.

Opis mjerenja: Mjerenje je provedeno koristeći beskontaktni infracrveni termometar na kućištu elektromotora te na kućištu izlazne komore puhalo. Poklopac kutije sustava dovoda zraka je bio otvoren tijekom cijelog mjerenja. Pozitiv nije bio sviran tijekom mjerenja.

| Vrijeme [s] | Temperatura kućišta motora [°C] | Temperatura izlazne komore [°C] | Vrijeme [s] | Temperatura kućišta motora [°C] | Temperatura izlazne komore [°C] |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 27,0 | 27,0 | 1800 | 31,7 | 29,0 |
| 60 | 27,4 | 27,0 | 1860 | 31,7 | 29,2 |
| 120 | 27,6 | 27,1 | 1920 | 31,9 | 29,2 |
| 180 | 27,9 | 27,1 | 1980 | 31,9 | 29,3 |
| 240 | 28,0 | 27,3 | 2040 | 31,8 | 29,2 |
| 300 | 28,2 | 27,2 | 2100 | 32,0 | 29,4 |
| 360 | 28,3 | 27,2 | 2160 | 32,1 | 29,3 |
| 420 | 28,5 | 27,3 | 2220 | 32,1 | 29,1 |
| 480 | 28,6 | 27,2 | 3600 | 32,4 | 30,1 |
| 540 | 28,8 | 27,5 | | | |
| 600 | 29,0 | 27,4 | | | |
| 660 | 29,0 | 27,7 | | | |
| 720 | 29,5 | 27,7 | | | |
| 780 | 29,4 | 27,9 | | | |
| 840 | 30,0 | 28,1 | | | |
| 900 | 30,2 | 28,1 | | | |
| 960 | 30,6 | 28,1 | | | |
| 1020 | 30,5 | 28,3 | | | |
| 1080 | 30,8 | 28,2 | | | |
| 1140 | 30,7 | 28,5 | | | |
| 1200 | 31,2 | 28,5 | | | |
| 1260 | 31,0 | 28,6 | | | |
| 1320 | 31,1 | 28,6 | | | |
| 1380 | 31,3 | 28,6 | | | |
| 1440 | 31,4 | 28,8 | | | |
| 1500 | 31,6 | 28,9 | | | |
| 1560 | 31,4 | 28,9 | | | |
| 1620 | 31,7 | 29,0 | | | |
| 1680 | 31,6 | 29,0 | | | |
| 1740 | 31,7 | 29,1 | | | |