

Razvoj programske podrške za ispitni postav zračnog tunela

Zorić, Vito

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:117049>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Vito Zorić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Tomislav Staroveški, dipl. ing.

Student:

Vito Zorić

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Ovim putem želim se zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima za podršku i motivaciju za vrijeme čitavog trajanja studija.

Posebno se želim zahvaliti svom mentoru doc.dr.sc. Tomislavu Staroveškom na uloženom trudu, vremenu i strpljenju tijekom izrade ovog rada.

Vito Zorić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: 1 -07- 2022	Prilog:
Klasa: 602-14/22-6/1	
Ur. broj: 15-1703-22- ZIC	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: VITO ZORIĆ Mat. br.: 0035202314

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Razvoj programske podrške za ispitni postav zračnog tunela

Naslov rada na engleskom jeziku: Development of wind tunnel control system support software

Opis zadatka:

Katedra za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje uključena je u je projekt revitalizacije zračnog tunela dostupnog na Zavodu za aeronautiku Fakulteta prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. U sklopu dosadašnjih aktivnosti realiziran je dvo-osni rotacijski prigon koji omogućuje preciznu i dinamičku orijentaciju ispitnog tunela unutar mjerne sekcije tunela. Također je realiziran i odgovarajući upravljački sustav zasnovan na programskoj podršci otvorene arhitekture (LinuxCNC). U cilju cjelovite realizacije ispitnog postava, postojeći upravljački sustav je potrebno nadograditi dostupnim dinamometrom te napisati odgovarajuću programsku podršku za korisničko sučelje.

Stoga je u radu potrebno:

1. Opisati postojeći ispitni postav.
2. Nadograditi ispitni postav ugradnjom dostupnog dinamometra.
3. Napisati programsku podršku za korisničko sučelje.
4. Testirati sustav.
5. Dati zaključke rada.

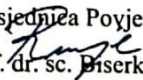
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao: 
doc. dr. sc. Tomislav Staroveški

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS KRATICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. OPIS ISPITNOG POSTAVA ZRAČNOG TUNELA.....	2
2.1. Pogonski elementi ispitnog postava zračnog tunela	4
2.2. Postolje ispitnog postava zračnog tunela	6
2.3. Integracija dinamometra	7
2.3.1. Povezivanje dinamometra s upravljačkom jedinicom	10
2.3.2. Ugradnja dinamometra.....	11
2.4. Analiza leta zrakoplova.....	12
2.5. Simuliranje leta zrakoplova na ispitnom postavu	14
3. LinuxCNC	16
3.1. Hardverski apstrakcijski sloj.....	16
3.2. Arhitektura LinuxCNC softvera.....	18
3.2.1. Kontroler gibanja	18
3.2.2. Diskretni I/O kontroler.....	19
3.2.3. Koordinirajući modul.....	20
3.3. Grafička sučelja LinuxCNC sustava	20
3.3.1. Grafičko sučelje Axis.....	21
3.3.2. Grafičko sučelje Touchy	22
3.3.3. Grafičko sučelje Gscreen	23
3.3.4. Grafičko sučelje Gmoccapy	23
3.4. Program za izradu korisničkih sučelja GladeVCP	24
4. IZRADA I OPIS GRAFIČKOG KORISNIČKOG SUČELJA	27
4.1. Elementi korisničkog sučelja	28
4.1.1. Elementi gornjeg dijela korisničkog sučelja	28
4.1.2. Elementi donjeg dijela sučelja	31
4.2. Programska podrška	35
4.3. Testiranje korisničkog sučelja.....	35
5. ZAKLJUČAK.....	40
LITERATURA.....	41

POPIS SLIKA

Slika 1.	CAD model ispitnog postava zračnog tunela	2
Slika 2.	Shema upravljanja ispitnim postavom zračnog tunela	3
Slika 3.	Servomotor osi A s pripadajućom karakteristikom [1]	4
Slika 4.	Servomotor osi B s pripadajućom karakteristikom [1]	4
Slika 5.	Reduktor GSN130-10K-SV [1]	6
Slika 6.	Reduktor GSN200-10K-SV [1]	6
Slika 7.	Postolje s prikazom rotacijskih osi ispitnog postava	7
Slika 8.	Mjerna ćelija Mini27 Titanium [3]	8
Slika 9.	Wheatstoneov most [5]	9
Slika 10.	Tenzometri dinamometra [6]	9
Slika 11.	Način spajanja dinamometra Mini27 Titanium [8]	11
Slika 12.	Ugradnja dinamometra unutar makete zrakoplova	12
Slika 13.	Aerodinamički koordinatni sustav [9]	13
Slika 14.	Simuliranje skretanja modela zrakoplova	14
Slika 15.	Blok dijagram arhitekture LinuxCNC sustava [12]	18
Slika 16.	Grafičko sučelje Axis [13]	21
Slika 17.	Grafičko sučelje Touchy [13]	22
Slika 18.	Grafičko sučelje Gscreen [13]	23
Slika 19.	Grafičko sučelje Gmoccapy [13]	23
Slika 20.	Razvojno okruženje Glade	24
Slika 21.	Sučelje integrirano u Axis s desne strane	25
Slika 22.	Sučelje integrirano u Axis kao kartica	26
Slika 23.	Grafičko korisničko sučelje ispitnog postava	27
Slika 24.	Element sučelja za pokretanje programa	29
Slika 25.	Indikatorski element sučelja	29
Slika 26.	Element sučelja za prikaz pozicija rotacijskih osi	29
Slika 27.	Element za prikaz parametra zraka	30
Slika 28.	Element za odabir načina upravljanja	30
Slika 29.	Element za kontrolu zapisivanja mjerenih veličina	31
Slika 30.	Element za postavke programa	31
Slika 31.	Kartica za ručno upravljanje	32
Slika 32.	Kartica za automatsko upravljanje	32
Slika 33.	Kartica za MDI upravljanje	33
Slika 34.	Kartica za prikaz iznosa mjerenih veličina dinamometra	33
Slika 35.	Kartica za grafički prikaz mjerenih komponenti sila	34
Slika 36.	Kartica za grafički prikaz mjerenih komponenti momenata	34
Slika 37.	Pokretanje testiranja automatskog načina rada	36
Slika 38.	Prikaz iznosa mjerenih veličina	37
Slika 39.	Grafički prikaz iznosa mjerenih sila	38
Slika 40.	Grafički prikaz iznosa mjerenih momenata	38
Slika 41.	Generirani zapis izmjerenih parametara	39

POPIS TABLICA

Tablica 1. Specifikacije odabranih servomotora [1]	5
Tablica 2. Mjerne karakteristike dinamometra Mini27 Titanium [3]	10
Tablica 3. Fizičke specifikacije dinamometra Mini27 Titanium [3].....	10

POPIS KRATICA

CAD	Computer-Aided Design
EMC	Enhanced Machine Controller
EtherCAT	Ethernet for Control Automation Technology
FIFO	First In, First Out
GUI	Graphical User Interface
GladeVCP	Glade Virtual Control Panel
HAL	Hardware Abstraction Layer
MPG	Manual Pulse Generator
NML	Neutral Messaging Language
PID	Proportional-Integral-Derivative
PLC	Programmable Logical Controller
PoE	Power over Ethernet

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
x	-	Koordinatna os letjelice
y	-	Koordinatna os letjelice
z	-	Koordinatna os letjelice
x_A	-	Koordinatna os aerodinamičkog koordinatnog sustava
y_A	-	Koordinatna os aerodinamičkog koordinatnog sustava
z_A	-	Koordinatna os aerodinamičkog koordinatnog sustava
α	°	Kut propinjanja letjelice
β	°	Kut klizanja letjelice
F_x	N	Komponenta sile u smjeru x osi
F_y	N	Komponenta sile u smjeru y osi
F_z	N	Komponenta sile u smjeru z osi
M_x	Nm	Komponenta momenta u smjeru x osi
M_y	Nm	Komponenta momenta u smjeru y osi
M_z	Nm	Komponenta momenta u smjeru z osi
R	-	Matrica rezultata mjerenja
ϕ	%	Relativna vlažnost zraka
V	m/s	Brzina strujanja zraka
A_{pos}	°	Pozicija zakretne osi A
B_{pos}	°	Pozicija zakretne osi B

SAŽETAK

U sklopu diplomskog rada, proveden je projekt revitalizacije postojećeg zračnog tunela. Naglasak je stavljen na razvoj grafičkog korisničkog sučelja kojim će se omogućiti upravljanje ispitnim postavom, čija je zadaća precizno orijentiranje modela letjelice unutar mjerne sekcije zračnog tunela. U sklopu ispitnog postava ugrađen je dinamometar pomoću kojeg se dobivaju izmjerene komponente opterećenja na modelu letjelice uslijed djelovanja strujanja zraka. Grafičko korisničko sučelje koristit će se i za prikaz te pohranjivanje komponenti opterećenja. Upravljački sustav otvorene arhitekture LinuxCNC koristi se za realizaciju grafičkog korisničkog sučelja te za ostvarivanje rotacijskih gibanja.

Ključne riječi: zračni tunel, model letjelice, dinamometar, LinuxCNC

SUMMARY

In this thesis, a revitalization project of the existing air tunnel was carried out. The focus was on the development of the graphical user interface which will enable the control of the testbed, whose task is the accurately orienting aircraft model within the measuring section of the air tunnel. A dynamometer shall be installed as part of the testbed, which is used to obtain load data on the aircraft model. The graphical user interface will be also used for display and storage of the loads components. The LinuxCNC open architecture control system is used to implement the graphical user interface and to realize rotary motions.

Key words: air tunnel, aircraft model, dynamometer, LinuxCNC

1. UVOD

U svrhu ispitivanja aerodinamičkih svojstava umanjenog modela letjelica, koristi se zračni tunel unutar kojeg je ugrađen ispitni postav zračnog tunela. Ispitivanje se provodi na umanjenim modelima letjelica zbog veličine stvarnih letjelica. Kada bi se provodilo ispitivanje stvarne letjelice, bio bi potreban izrazito velik zračni tunel za čiji bi rad bila potrebna enormna količina energije.

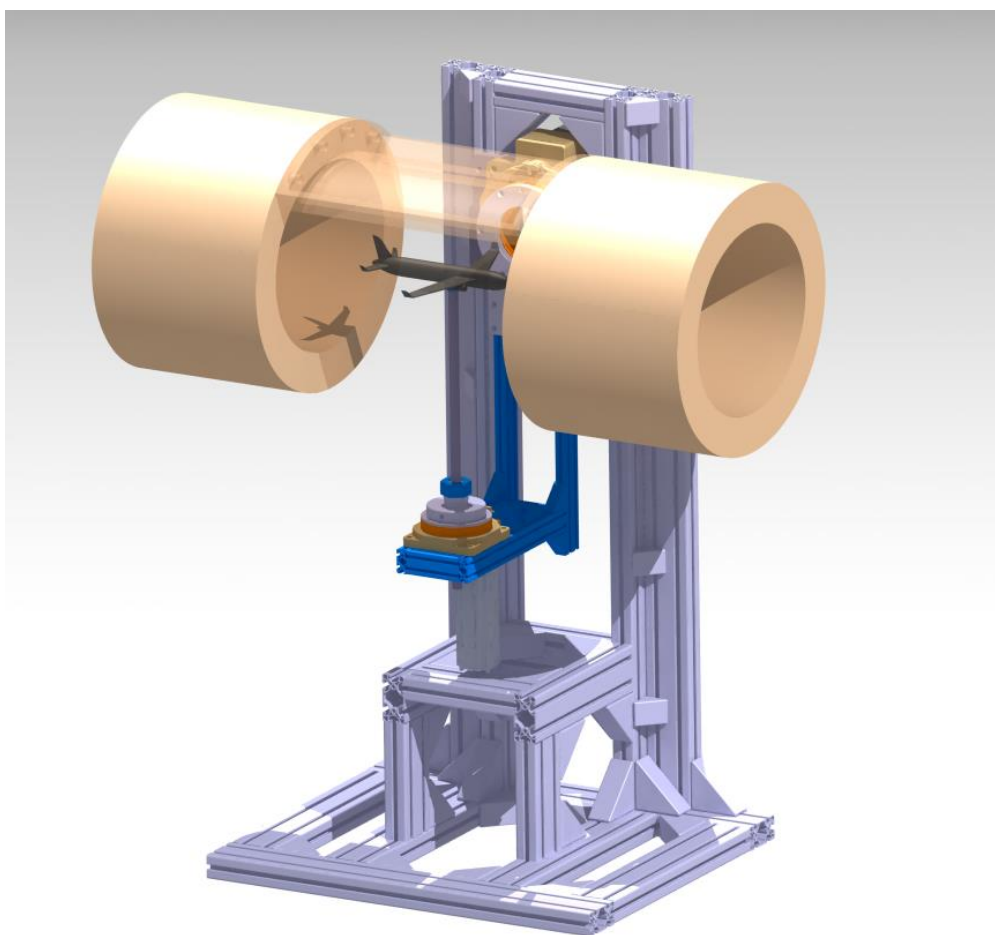
Zadatak ispitnog postava zračnog tunela je omogućavanje simulacije leta prilikom ispitivanja aerodinamičkih svojstava umanjenog modela letjelice. Ispitni postav je zapravo dvoosni rotacijski prigon kojim se omogućava promjena orijentacije modela letjelice unutar mjerne sekcije zračnog tunela. Unutar ispitnog postava ugrađen je dinamometar kojim se mjere komponente opterećenja uslijed djelovanja strujanja zraka na model letjelice.

U prvom dijelu rada opisan je postojeći ispitni postav zračnog tunela, opisane su komponente ispitnog postava te je pokazano očekivano ponašanje simulacije leta modela letjelice. Nakon toga objašnjen je upravljački sustav otvorene arhitekture LinuxCNC kojim se ostvaruje upravljanje rotacijskim prigonima ispitnog postava.

U praktičnom dijelu rada opisana je izrada grafičkog korisničkog sučelja kojim će se korisniku ispitnog postava omogućiti upravljanje posmičnim osima te prikazivanje i pohranjivanje izmjerenih parametara. Također je opisana programska podrška korisničkog sučelja kojom se omogućava rad pojedinih funkcija sučelja te je izvedeno testiranje koje pokazuje izvršavanje zadanih funkcija grafičkog korisničkog sučelja.

2. OPIS ISPITNOG POSTAVA ZRAČNOG TUNELA

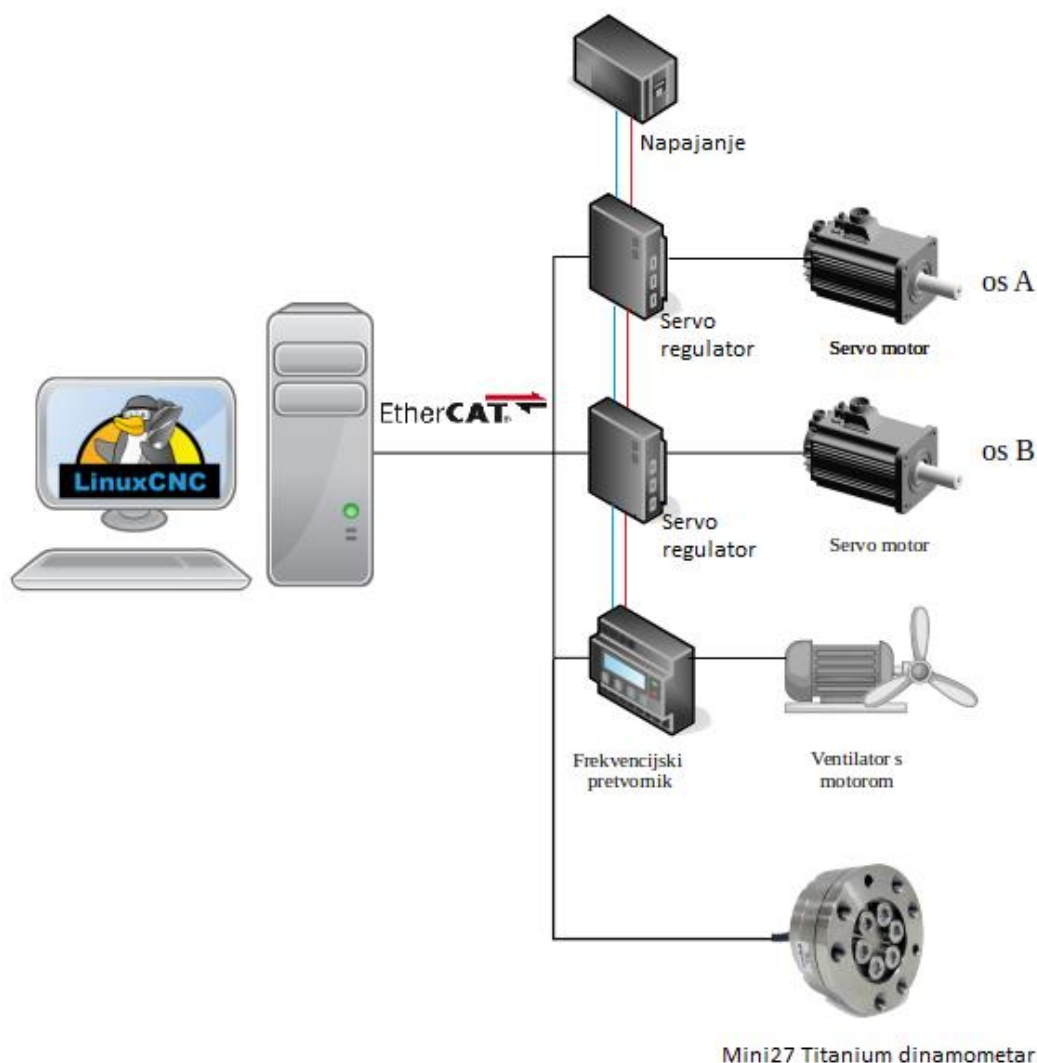
Ispitni postav zračnog tunela projekt je Zavoda za aeronautiku Fakulteta prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. Ideja projekta je razvoj uređaja pomoću kojeg će se određivati iznos opterećenja koja djeluju na umanjeni model zrakoplova prilikom simulacije leta. U tu svrhu koristi se zračni tunel koji pomoću strujanja zraka određene brzine generira opterećenje na umanjeni model zrakoplova. Glavni dio zračnog tunela je presječna sekcija cijevi kroz koju struji zrak određenom brzinom. Strujanje zraka postiže se pomoću propelera pogonjenog elektromotorom za čije se upravljanje koristi frekvencijski pretvornik, kojim se omogućava promjena brzine strujanja zraka.



Slika 1. CAD model ispitnog postava zračnog tunela

Slika 1. prikazuje CAD model ispitnog postava. Ispitni postav ugrađuje se u postojeći zračni tunel. Njegova je namjena pozicioniranje i omogućavanje precizne orijentacije modela zrakoplova unutar mjerne sekcije zračnog tunela, te mjerenje opterećenja koja djeluju na model zrakoplova prilikom ispitivanja. Promjena orijentacije modela zrakoplova vrši se zakretanjem

dvije rotacijske osi ispitnog postava pomoću dva servomotora. Promjenom orijentacije dolazi do promjene aerodinamičke površine što za posljedicu ima promjenu opterećenja na model zrakoplova. Mjerenje opterećenja izvodi se pomoću dinamometra koji će biti smješten unutar tijela modela zrakoplova [1].



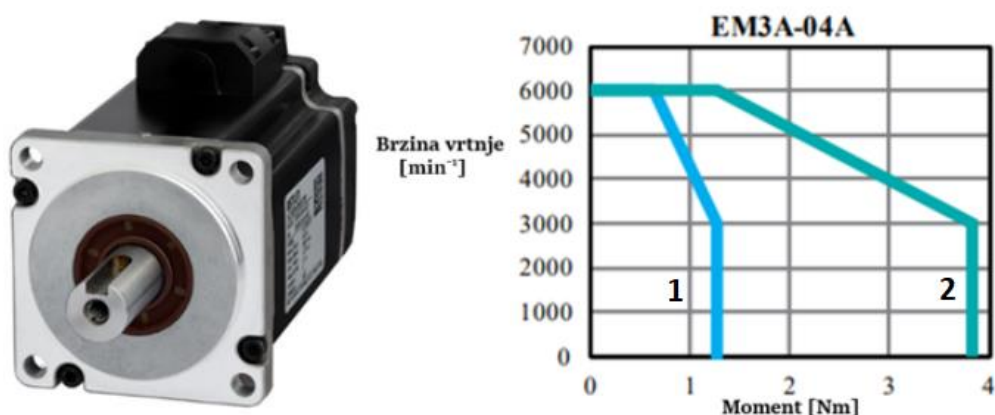
Slika 2. Shema upravljanja ispitnim postavom zračnog tunela

Slika 2. prikazuje pojednostavljenu shemu upravljanja ispitnim postavom zračnog tunela. Za upravljanje ispitnog postava koristi se upravljački softver LinuxCNC, a više o njemu bit će rečeno u daljnjem tekstu. LinuxCNC je povezan sa servo regulatorom pojedinog servomotora i frekvencijskim pretvornikom za upravljanje elektromotorom ventilatora zračnog tunela. Promjena kuta skretanja modela zrakoplova vrši se pomoću servomotora osi A, a promjena kuta propinjanja modela zrakoplova vrši se pomoću servomotora osi B. Pomoću računala se servo

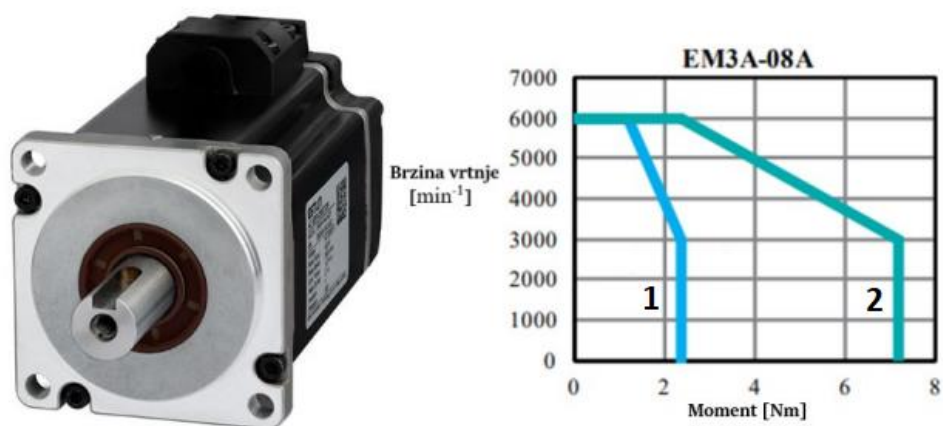
regulatorima šalju podaci o željenoj poziciji i brzini dostizanja željene pozicije te potom servo regulatori šalju odgovarajuće signale servomotorima koji ostvaruju željeno rotacijsko gibanje.

2.1. Pogonski elementi ispitnog postava zračnog tunela

Pogonski elementi ispitnog postava koriste se za ostvarivanje rotacijskih gibanja pojedine osi. Rotacijska gibanja ostvarena su pomoću dva sinkrona motora s permanentnim magnetima koji su spojeni s reduktorom. U sklopu oba servomotora nalazi se apsolutni enkoder, mehanička kočnica te imaju utor za pero na izlaznom vratilu [1].



Slika 3. Servomotor osi A s pripadajućom karakteristikom [1]



Slika 4. Servomotor osi B s pripadajućom karakteristikom [1]

Na slici 3. i slici 4. prikazani su servomotori rotacijskih osi ispitnog postava. Proizvođač servomotora je tvrtka ESTUN. Pored slika se nalazi momentna karakteristika pojedinog servomotora u odnosu na brzinu vrtnje servomotora. Karakteristika označena brojem 1

predstavlja karakteristiku servomotora prilikom nazivnog opterećenja, a karakteristika označena brojem 2 predstavlja maksimalno dopušteno vršno opterećenje servomotora [1]. Specifikacije odabranih servomotora prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Specifikacije odabranih servomotora [1]

	Jedinica	EM3A-04	EM3A-08
Nazivni napon napajanja	V AC	200	200
Nazivna izlazna snaga	kW	0,4	0,75
Nazivni moment	Nm	1,27	2,39
Maksimalni moment	Nm	3,82	7,16
Nazivna struja	A_{RMS}	2,9	5,1
Maksimalna struja	A_{RMS}	9,2	16,1
Nazivna brzina	min^{-1}	3000	
Maksimalna brzina	min^{-1}	6000	
Moment inercije rotora	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\times 10^{-4}$	0,276	1,07
Masa	kg	1,7	3,2
Nazivni napon kočnice	V DC	24	
Nazivna snaga kočnice	W	7,4	9,6
Nazivni moment kočnice	Nm	1,5	3,2
Tip enkodera	-	23-bitni apsolutni	

Za smanjivanje broja okretaja i povećanje zakretnog momenta servomotora koriste se reduktori. Pomoću njih se omogućava i jednostavan način montiranja ostalih dijelova konstrukcije jer se na pogonskoj strani reduktora nalaze provrti za pričvršćivanje ostalih elemenata sustava. Reduktore proizvodi tvrtka GIGA Precision koja je specijalizirana za proizvodnju prijenosnika [1].



Prijenosni omjer	1:10
Maksimalni zakretni moment	32 N·m
Maksimalna brzina	250 min ⁻¹
Maksimalno aksijalno opterećenje	2000 N
Točnost pozicioniranja	≅ 1 min
Ponovljivost	±5 s (0,001°)
Masa	2,5 kg

Slika 5. Reduktor GSN130-10K-SV [1]



Prijenosni omjer	1:10
Maksimalni zakretni moment	65 N·m
Maksimalna brzina	250 min ⁻¹
Maksimalno aksijalno opterećenje	4000 N
Točnost pozicioniranja	≅ 1 min
Ponovljivost	±5 s (0,001°)
Masa	8,2 kg

Slika 6. Reduktor GSN200-10K-SV [1]

Oba reduktora karakteriziraju isti prijenosni omjer, maksimalna brzina vrtnje te ponovljivost i točnost pozicioniranja. Reduktor osi B (slika 6.) karakterizira mogućnost prenošenja većeg zakretnog momenta i većeg aksijalnog opterećenja u odnosu na reduktor osi A (slika 5.). Reduktori su izvedeni s provrtima koji će omogućiti postavljanje ožičenja [1].

2.2. Postolje ispitnog postava zračnog tunela

Postolje ispitnog postava zračnog tunela prikazano na slici 7. sastavljeno je od standardiziranih aluminijskih profila međusobno povezanih kutnicima. Korištenjem standardiziranih aluminijskih profila smanjena je potreba za strojnom obradom dijelova postolja. Na stupu postolja nalazi se prigon osi B za koji je pričvršćena konstrukcija na kojoj se nalazi os A [1].



Slika 7. Postolje s prikazom rotacijskih osi ispitnog postava

2.3. Integracija dinamometra

Kako bi se omogućilo mjerenje opterećenja, unutar umanjenog modela zrakoplova potrebno je ugraditi dinamometar.

Potrebno je obratiti pažnju na nekoliko ključnih čimbenika prilikom odabira odgovarajućeg dinamometra. Kako bi se osiguralo adekvatno mjerenje aerodinamičkog opterećenja, potrebno je odabrati dinamometar kojim se može mjeriti svih šest komponenti opterećenja (tri sile i tri momenta). Zatim je bitno znati koliko je mjerno područje, kolike su najveće i najmanje veličine koje dinamometar može mjeriti te koje je najveće preopterećenje koje dinamometar može izdržati. Rezolucija (eng. *resolution*) dinamometra je najmanja promjena mjerene veličine koju dinamometar može detektirati te je ključna pri odabiru dinamometra, posebice u slučaju kada su potrebna finija mjerenja. Uz rezoluciju se često spominje i termin točnost (eng. *accuracy*), mjera koliko je očitavanje dinamometra blisko stvarnoj fizikalnoj vrijednosti [2].

U ovom je slučaju važno i ograničenje dimenzija i mase, s obzirom na to da se koristi umanjen model zrakoplova. Zadnje što je bitno jest kako se podaci očitavaju s dinamometra te kolika se greška generira i kako se kompenzira. Izlaz senzora može biti analogni i digitalni. Analogni signal treba dodatno sklopovlje za obradu signala i otklanjanje pogreški. Kada senzor ima digitalni izlaz, u sklopu njega postoji sklopovlje za obradu signala [2].

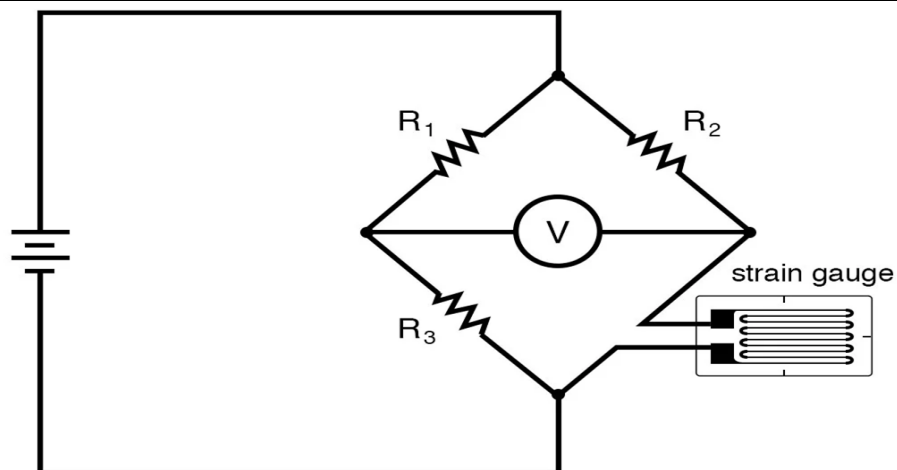


Slika 8. Mjerna ćelija Mini27 Titanium [3]

Korišteni dinamometar je Mini27 Titanium, proizvođača ATI Industrial Automation i prikazan je na slici 8. To je senzor sile i momenta čiji se rad temelji na principu tenzometra (eng. *Strain gauge*).

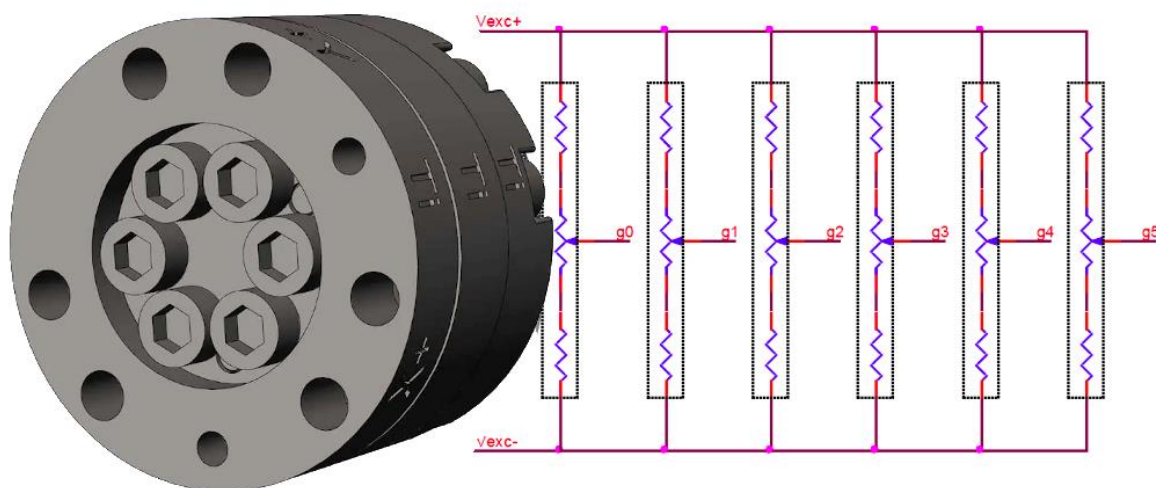
Tenzometar je uređaj čiji se rad temelji na svojstvu piezootpornosti (eng. *Piezoresistive effect*), svojstvu materijala da promjeni električni otpor uslijed mehaničke deformacije. Slika 9. prikazuje najjednostavniji princip spajanja tenzometra. Najčešće se spaja u takozvani Wheatstoneov most zajedno s još tri otpornika. Kada se uslijed mehaničke deformacije promjeni iznos otpora na tenzometru, promijeni se i mjereni napon (označen s V).

Najčešći materijal od kojih su izrađeni tenzometri jest metalna folija. Dinamometar Mini27 Titanium koristi silicijski tenzometar koji omogućava robusnost, manji šum izlaznog signala te se zbog procesa proizvodnje i svojstava silicija može postići manja dimenzija tenzometra [4].



Slika 9. Wheatstoneov most [5]

Mini27 Titanium istovremeno može mjeriti tri komponente sile (F_x, F_y, F_z) i tri komponente momenta (T_x, T_y, T_z), što znači da dinamometar ima šest odvojenih tenzometara koji su prikazani na slici 10. Silicijski tenzometar nalazi se između dva fiksna otpornika, koji zajedno tvore naponsko dijelilo. Kad se promjeni otpor tenzometra, mijenja se i napon na dijelilu [6].



Slika 10. Tenzometri dinamometra [6]

Tablica 2. Mjerne karakteristike dinamometra Mini27 Titanium [3]

Mini27 Titanium		
	Nazivno opterećenje	Rezolucija mjerenja
F_x, F_y	± 80 N	0.06 N
F_z	± 160 N	0.12 N
T_x, T_y	± 4 Nm	0.0015 Nm
T_z	± 2 Nm	0.001 Nm

U tablici 2. prikazani su podaci o mjernom području pojedinih komponenti opterećenja kao i njihove rezolucije.

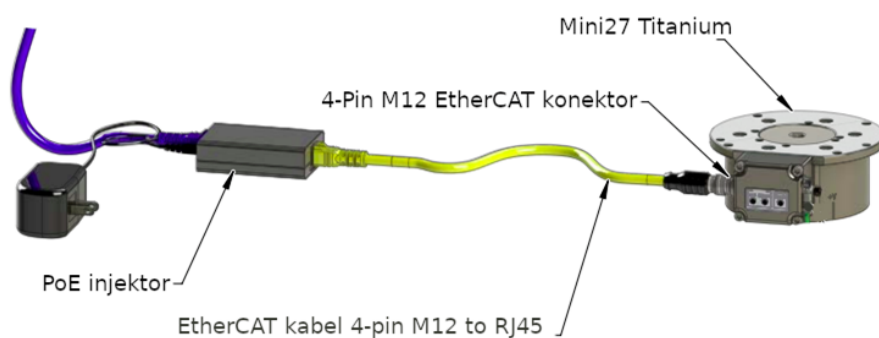
Tablica 3. Fizičke specifikacije dinamometra Mini27 Titanium [3]

Mini27 Titanium	
Masa	0.0334 kg
Promjer	27 mm
Visina	18.2 mm

U tablici 3. prikazane su fizičke specifikacije dinamometra Mini27 Titanium.

2.3.1. Povezivanje dinamometra s upravljačkom jedinicom

Povezivanje izlaznih veličina dinamometra Mini27 Titanium ostvaruje se pomoću EtherCAT mreže. EtherCAT je tehnologija temeljena na industrijskoj Ethernet mreži te je to čini jeftinom i jednostavnom za korištenje na već implementiranim industrijskim sustavima. Razvijena je od strane tvrtke Beckhoff te je već godinama standard u industriji. EtherCAT je tehnologija otvorenog tipa. Brzina prijenosa podataka može biti od 100 Mbit/s do 10 Gbit/s [7].



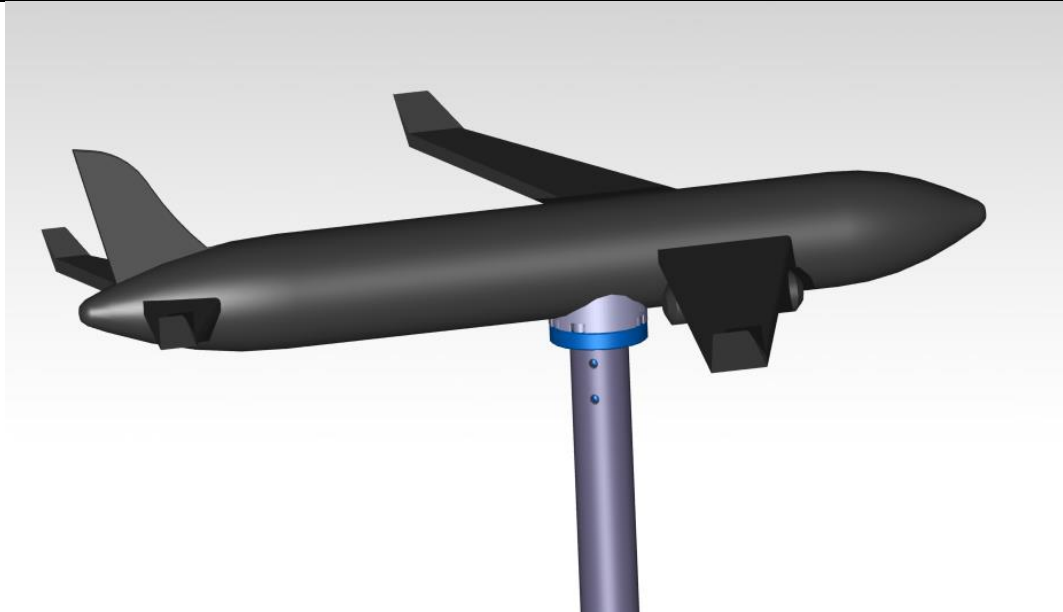
Slika 11. Način spajanja dinamometra Mini27 Titanium [8]

Na slici 11. prikazan je način spajanja dinamometra Mini27 Titanium. Napajanje dinamometra izvedeno je pomoću EtherCAT mreže, PoE (eng. *Power Over Ethernet*) tehnologijom. PoE tehnologija omogućava mrežnim prekidačima da istovremeno prenose napajanje i podatke putem Ethernet mreže [8].

2.3.2. Ugradnja dinamometra

Dinamometar se ugrađuje na vrh vertikalnog potpornja ispitnog postava pomoću prirubnice. Dinamometar je ujedno i fizička veza između potpornja i modela zrakoplova. Cilj ugradnje je pozicioniranje dinamometra unutar samog težišta mase modela letjelice (ili što bliže, koliko je moguće) kako bi sva opterećenja bila svedena na koordinatni sustav letjelice.

Dinamometar se povezuje s prirubnicom pomoću šest vijaka, a prirubnica se povezuje pomoću šest vijaka s vertikalnim potpornjem. Odabrani dinamometar ima konektor izveden u aksijalnom smjeru (postoji izvedba konektora u radijalnom smjeru) kako bi model zrakoplova bio bolje pozicioniran na dinamometar i kako bi se onemogućilo prekidanje ili lom konektora dinamometra prilikom simuliranja leta. Iz tog razloga su prirubnica senzora i vertikalni potporanj izvedeni kao šuplji elementi kako bi se kroz njih mogao provući kabel dinamometra.



Slika 12. Ugradnja dinamometra unutar makete zrakoplova

Na slici 12. prikazan je CAD model zrakoplova u čijem se težištu nalazi dinamometar. Na dinamometru se nalaze oznake pozitivnih smjerova pojedinih osi kako bi bio ugrađen na odgovarajući način. Povezivanje modela zrakoplova sa senzorom ostvaruje se pomoću šest vijaka s gornje strane makete zrakoplova. Model zrakoplova može se izraditi aditivnom tehnologijom pomoću 3D pisača, a prilikom izrade makete potrebno je obratiti pozornost na omogućavanje povezivanja makete s dinamometrom na odgovarajući način.

2.4. Analiza leta zrakoplova

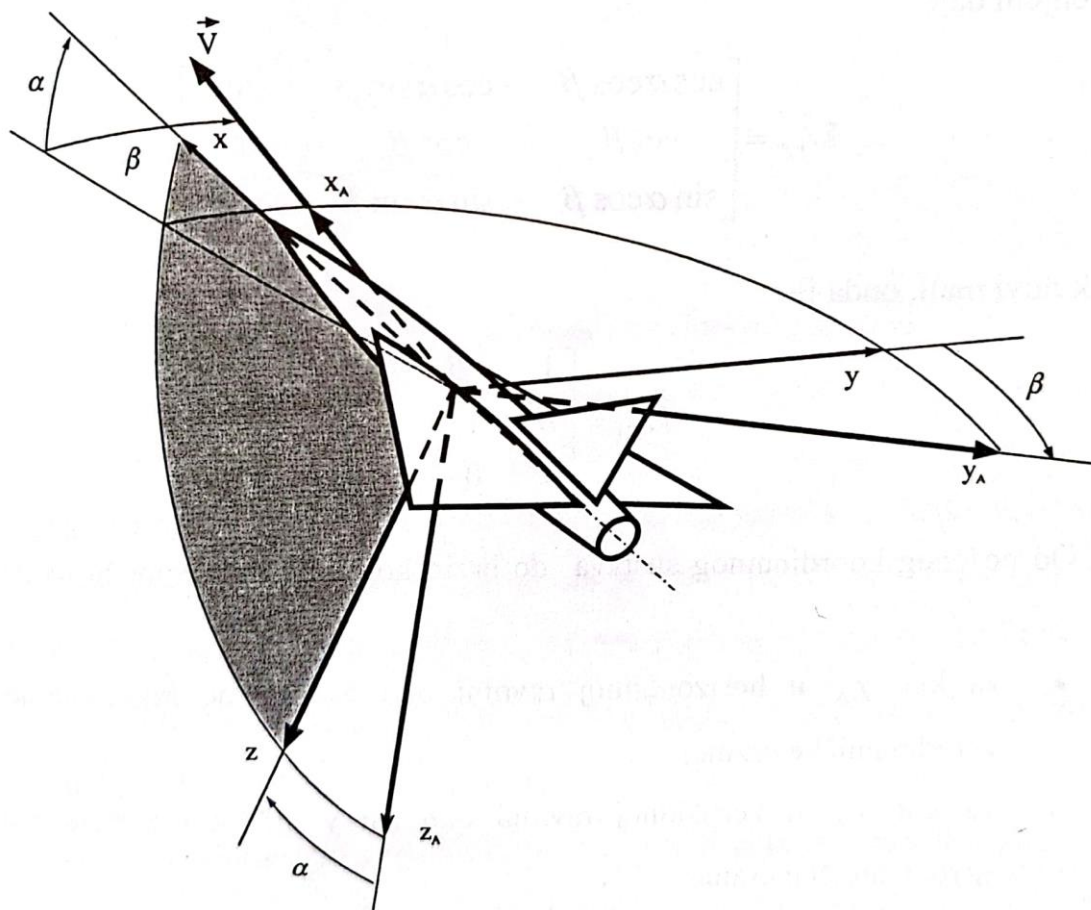
Kako bi se realno simulirao let stvarnog zrakoplova potrebno je analizirati sve moguće kretnje i manevre koje zrakoplov čini prilikom leta. Analiza se vrši usporedbom međusobnih odnosa koordinatnih sustava zrakoplova. Postoji više koordinatnih sustava koji se proučavaju, ali za ovo razmatranje uzima se u obzir samo dva: koordinatni sustav same letjelice i aerodinamički koordinatni sustav [9].

Koordinatni sustav letjelice kruto je vezan za zrakoplov čije je težište ishodište tog koordinatnog sustava (ukoliko nije drugačije određeno). Definira se pomoću x , y , i z osi. Os x paralelna je s uzdužnom osi letjelice u smjeru leta, os z je usmjerena prema dolje, a os y je okomita na uzdužnu os letjelice (okomita je na ravninu simetrije) [9].

Ishodište aerodinamičkog koordinatnog sustava također je težište letjelice, a definira se pomoću x_A , y_A i z_A osi. Usmjerenje x_A osi podudara se s aerodinamičkom brzinom, os z_A nalazi

se u ravnini simetrije letjelice i okomita je na smjer aerodinamičke brzine, a os y_A proizlazi definiranjem prethodne dvije osi [9].

Aerodinamička brzina je vektor koji je definiran putanjom i brzinom letjelice. Smjer aerodinamičke brzine definiran je željenom putanjom letjelice i ne mora se uvijek podudarati s uzdužnom osi letjelice x , osim u slučaju pravocrtnog gibanja. Polijetanjem ili prizemljivanjem (propinjanjem) zrakoplova dolazi do povećanja ili smanjenja napadnog kuta (kuta propinjanja) α između osi x i osi x_A u ravnini simetrije letjelice. Zakretanjem zrakoplova oko vertikalne osi z dolazi do povećanja ili smanjenja (ovisno o smjeru zakretanja) kuta skretanja (klizanja) β između osi x i osi x_A u ravnini okomitoj na ravninu simetrije letjelice. Na slici 13. prikazani su napadni kut α i kut klizanja β [9].



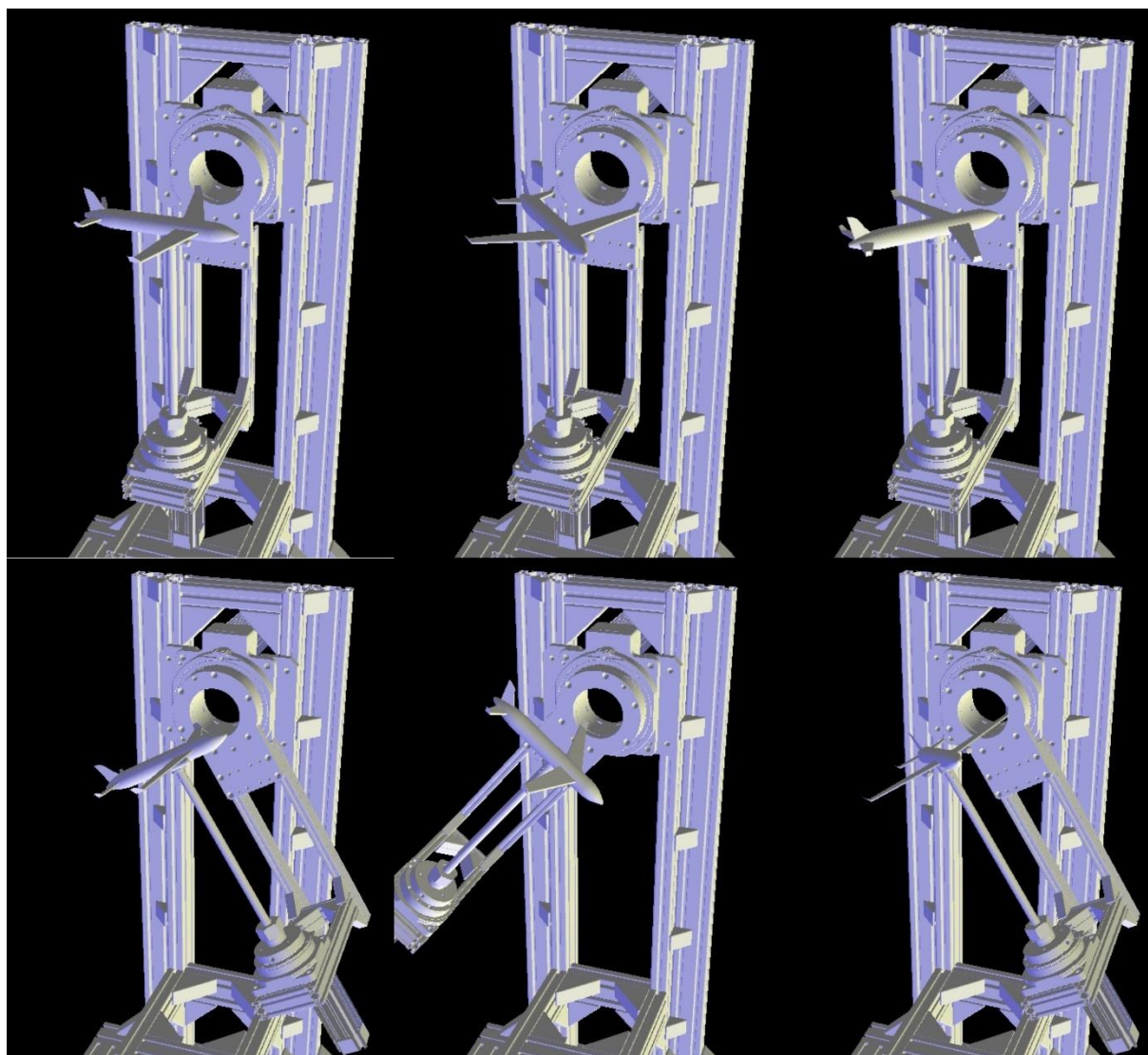
Slika 13. Aerodinamički koordinatni sustav [9]

Zrakoplov također može izvoditi manevar valjanja, odnosno rotaciju oko svoje uzdužne osi. Ispitni postav ne sadržava rotacijsku os koja bi maketi omogućavala valjanje te se simulacija leta izvodi samo prilikom skretanja i propinjanja zrakoplova.

2.5. Simuliranje leta zrakoplova na ispitnom postavu

Rotacijom posmičnih rotacijskih prigona ispitnog postava zračnog tunela dolazi do promjene kuta propinjanja i/ili kuta skretanja modela zrakoplova. Kut propinjanja mijenja se pomoću rotacijskog prigona A, a kut skretanja mijenja se pomoću rotacijskog prigona B. Uslijed djelovanja strujanja zraka dolazi do pojave opterećenja na modelu zrakoplova te se opterećenje prenosi na dinamometar koji mjeri iznos šest komponenti opterećenja (tri sile i tri momenta).

Na model se primjenjuje princip relativnog gibanja, što znači da model miruje (osim što se zakreće), a zrak oko modela se giba određenom brzinom. Princip relativnog gibanja je potpuno reverzibilan pa nema razlike u odnosu na stvarno gibanje zrakoplova gdje se zrakoplov giba, a okolni zrak miruje [9].



Slika 14. Simuliranje skretanja modela zrakoplova

Na slici 14. prikazano je simuliranje promjene orijentacije modela zrakoplova unutar programa LinuxCNC. Na slici se može primijetiti da zakretanjem pojedine osi ispitnog postava dolazi do promjene orijentacije modela zrakoplova. Prva slika u gornjem redu prikazuje model zrakoplova u referentnom položaju, a iduće slike u gornjem redu prikazuju simulaciju skretanja modela zrakoplova (mijenjanje kuta skretanja). Dvije slike u donjem redu prikazuju simulaciju uzlijetanja i slijetanja modela zrakoplova (mijenjanje kuta propinjanja), a zadnja slika u donjem redu predstavlja kombinaciju uzlijetanja i skretanja modela zrakoplova.

3. LinuxCNC

Za upravljanje posmičnih prigona ispitnog postava koristi se upravljački softver LinuxCNC. Radi se o besplatnom softveru otvorenog koda koji se pokreće pomoću operacijskog sustava Linux. Softver se prvenstveno koristi za numeričko upravljanje alatnih strojeva kao što su tokarilice, glodalice i roboti, ali i za modernizaciju zastarjelih i ručno upravljanih strojeva. Njime se može istovremeno upravljati s najviše devet posmičnih osi alatnog stroja. Također se može koristiti za bilo koji stroj ili uređaj pri čijoj se eksploataciji zahtjeva precizna kontrola gibanja i pozicioniranja te je stoga idealan za upravljanje posmičnim prigonima ispitnog postava zračnog tunela [10].

Karakteristika LinuxCNC softvera je fleksibilnost i modularnost, što znači mogućnost jednostavne modifikacije te nadogradnje ovisno o zahtjevima koji se postavljaju za određene namjene i konfiguracije stroja [10].

LinuxCNC pogodan je za upravljanje ispitnim postavom jer omogućuje obradu podataka u stvarnom vremenu. Rad u stvarnom vremenu odlika je operacijskog sustava koja osigurava stroge vremenske zahtjeve sustava te tako omogućava da se procesi izvršavaju neometano i neovisno o drugim procesima operacijskog sustava. To se postiže cikličkim izvršavanjem zadataka u diskretnim vremenskim intervalima po prioritetima izvršavanja, s tim da je prioritet procesa koji rade u stvarnom vremenu viši od standardnih procesa operacijskog sustava. Rad u stvarnom vremenu koristi se za kontrolu gibanja i pozicioniranja rotacijskih osi ispitnog postava zračnog tunela gdje je potrebna precizna regulacija i sinkronizacija posmičnih prigona [10].

Jedna od prednosti korištenja LinuxCNC softvera je mogućnost izrade vlastitog korisničkog sučelja. Ono se može prilagoditi ovisno o namjeni korištenja softvera kako bi operateru bilo olakšano upravljanje i očitavanje određenih podataka. U poglavlju 4. bit će detaljno opisana izrada grafičkog korisničkog sučelja za ispitni postav zračnog tunela.

3.1. Hardverski apstrakcijski sloj

Hardverski apstrakcijski sloj (eng. Hardware Abstraction Layer, HAL) dio je LinuxCNC sustava. Najjednostavnije rečeno, HAL je sustav koji omogućava spajanje više različitih gradivnih blokova kako bi se pomoću njih dobio funkcionalni kompleksniji sustav [11].

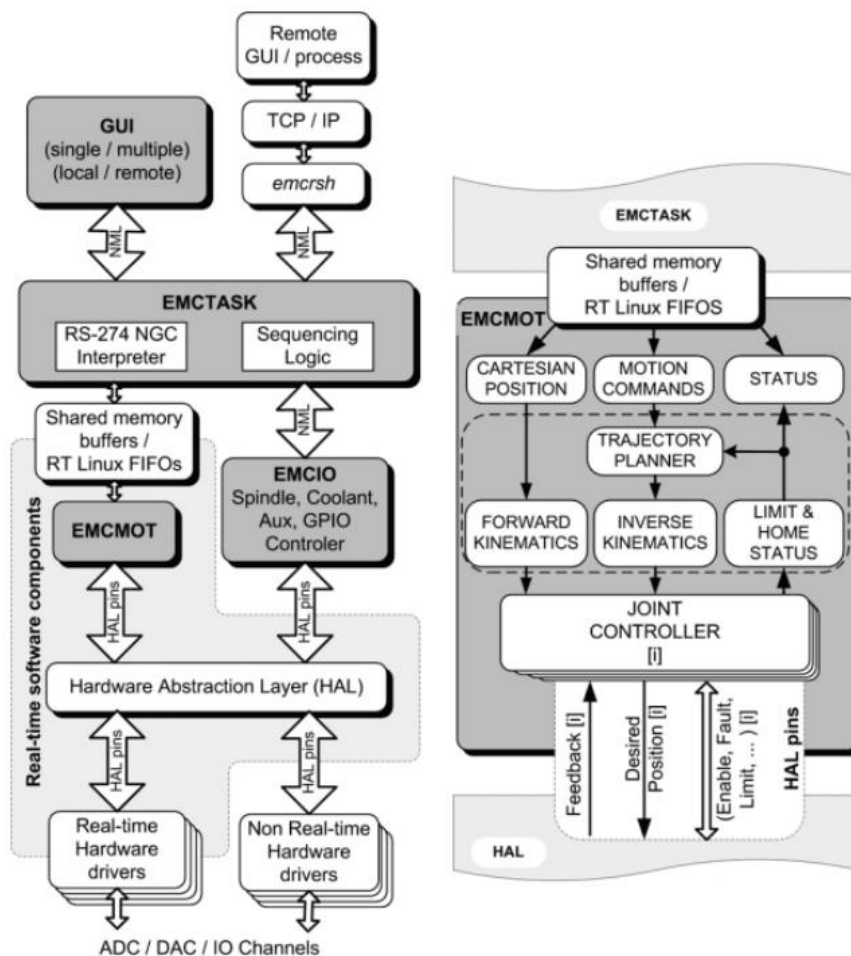
Inicijalno je dizajniran po principima spajanja fizičkih komponenti elektroničkog sklopovlja kako bi se omogućilo intuitivnije spajanje LinuxCNC-a s raznim sklopovljem, te je tako većina HAL modula zapravo upravljački program fizičkog sklopovlja. HAL se

hijerarhijski nalazi između upravljačkih modula LinuxCNC-a i fizičkog sklopovlja te među njima omogućava prijenos podataka u stvarnom vremenu. Također omogućava prijenos podataka u stvarnom vremenu između pojedinih komponenti LinuxCNC sustava. HAL je dinamički konfigurabilan te tako omogućava krajnjem korisniku da brzo i jednostavno prilagodi sustav za svoju primjenu. Korisnik koji kreira HAL datoteku ne mora biti nužno svjestan detaljne konfiguracije pojedine komponente, već na njih može gledati kao na tzv. crne kutije (eng. *black box*) gdje je zadaća povezati izlazne priključke pojedinih komponenti [11].

Koncepti HAL-a mogu se svrstati u slijedeće pojmove:

1. Komponenta – dio softvera sa definiranim ulazima, izlazima i ponašanjem koji može biti instaliran, ali s potrebnim međusobnim povezivanjem
2. Parametar – konfiguracijske vrijednosti koje trebaju biti podešene za pojedinu komponentu. Korisnik može podesiti ulazne parametre, a promatrati izlazne parametre
3. Pin – softverski prikaz hardverskih priključnica. Svi HAL pinovi imaju ime koje se koristi za njihovo međusobno povezivanje
4. Fizički pin – HAL pin koji je spojen na fizičko sklopovlje
5. Signal – predstavlja softversku verziju žice i služi za povezivanje pinova
6. Tip - pinovi i signali su određenog tipa podatka te se spajaju samo istovjetni pinovi. Postoje četiri moguća tipa podataka:
 - a. bit – prikazuje vrijednosti 0 ili 1
 - b. float – prikazuje vrijednosti realnih brojeva
 - c. u32 – prikazuje pozitivne cjelobrojne vrijednosti između 0 i 4294967295
 - d. s32 – prikazuje cjelobrojne vrijednosti između -2147483648 i 2147483647
7. Funkcija – dio koda kojim se odrađuje neka funkcionalnost
8. Nit izvođenja – lista funkcija koja se izvršava u specifičnim intervalima kao dio zadatka u stvarnom vremenu [11]

3.2. Arhitektura LinuxCNC softvera



Slika 15. Blok dijagram arhitekture LinuxCNC sustava [12]

Arhitektura LinuxCNC softvera (prikazana na slici 15.) može se podijeliti na četiri glavne komponente:

1. Kontroler gibanja (eng. *Motion controller*, EMCOT)
2. Diskretni I/O kontroler (eng. *Discrete I/O controller*, EMCIO)
3. Koordinirajući modul (eng. *Task coordinating module*, EMCTASK)
4. Moduli za prikaz korisničkog sučelja [12]

3.2.1. Kontroler gibanja

EMCOT dio je arhitekture LinuxCNC sustava koji se izvršava u stvarnom vremenu. Njegova je uloga određivanje plana putanje gibanja te je odgovoran za izračune vezane za

inverznu i direktnu kinematiku, planiranje trajektorije i računanje referenci pozicija pojedinih osi [12].

Komunikacija između EMCOT-a i komponenti nižeg stupnja u hijerarhijskoj strukturi odvija se pomoću HAL sloja. Komunikacija s koordinirajućim modulom odvija se preko međuspremnik zajedničke memorije ili preko FIFO međuspremnik [12].

Rad EMCOT-a temelji se na uzorkovanju trenutnih položaja upravljanih osi. Trenutni položaj pojedine osi uzima s enkodera osi te šalje izračunatu interpolaciju regulatoru pozicije. Ovisno o primjeni i konfiguraciji, preko regulatora pozicije mogu se dobivati i povratni signali pozicije. Pri početnom postavljanju parametara koristi se konfiguracijska datoteka u .ini formatu. U njoj se definiraju karakteristike (linearne ili rotacijske) i broj posmičnih osi, iznosi pojačanja regulacijskih petlji, definiranje kinematske strukture stroja, definiranje mjernih jedinica te određivanje trajanja ciklusa kao što su planiranje trajektorija i definiranja drugih parametara sustava [12].

Koračnim motorima upravlja se po principu otvorene petlje tako da se šalju signali smjera i koraka. Servomotorima se upravlja po principu zatvorene petlje, koristeći PID regulatore čiji su kompenzacijski algoritmi izvedeni u HAL sloju [12].

3.2.2. Diskretni I/O kontroler

EMCIO komponenta služi za upravljanje svim logičkim funkcijama stroja koje ne sudjeluju u kontroli pozicioniranja posmičnih osi. EMCIO se koristi za upravljanje pomoćnim funkcijama kao što su izmjena alata, upravljanje brzinom vrtnje glavnog vretena, upravljanje sustavom za podmazivanje i hlađenje i drugo [12].

Komunikacija između EMCIO-a i komponenata nižeg stupnja u hijerarhijskoj strukturi odvija se pomoću HAL sloja. Komunikacija s koordinirajućim modulom odvija se preko NML (eng. *Neutral Messaging Language*) poruka. NML poruke općenito služe za komunikaciju između modula koji se ne izvršavaju u stvarnom vremenu [12].

Konfiguracija EMCIO-a se vrši preko jedne ili više konfiguracijskih (HAL) datoteka, gdje svaka opisuje ulazno-izlazno sučelje za neku primjenu ili podsustav. U konfiguracijskim datotekama postoje različite deklaracije HAL modela i signala u ovisnosti o primjeni. Sve su konfiguracijske datoteke uključene u glavnu konfiguracijsku datoteku koja se čita prilikom pokretanja sustava [12].

LinuxCNC sadrži velik broj unaprijed konfiguriranih datoteka koje se, ovisno o primjeni, mogu dodatno modificirati, korištenjem *Comp* alata za pisanje, prevođenje i instalaciju HAL modula ili preko programabilnog logičkog kontrolera (PLC). PLC je HAL modul koji se konfigurira na početku postavljanja sustava korištenjem posebnog grafičkog korisničkog sučelja *ClassicLadder*, koji podešava podsustav koristeći ljestvičaste dijagrame [12].

3.2.3. Koordinirajući modul

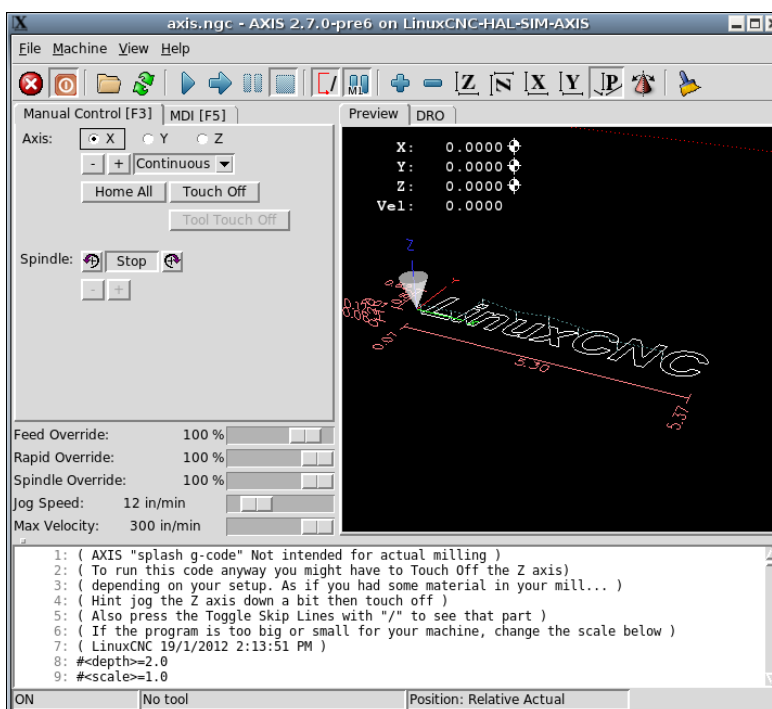
EMCTASK se hijerarhijski nalazi između grafičkog korisničkog sučelja (koje mu je nadređeno) te EMCMOT i EMCIO komponenti (koje su mu podređene). Služi za koordinaciju te interpretaciju programskog koda. Modul prati trenutno stanje EMCMOT i EMCIO komponenti te u skladu s tim koordinira daljnjim naredbama. EMCTASK prima G kod preko korisničkog sučelja ili nekim drugim načinom te ga prevodi u NML poruke koje prosljeđuje na podređene komponente (EMCIO), grafičku korisničku podršku ili ih šalje natrag samome sebi [12].

3.3. Grafička sučelja LinuxCNC sustava

Grafičko korisničko sučelje ili GUI (eng. *graphical user interface*) služi za interakciju čovjeka s računalom putem grafičkih elemenata, tekstualnih poruka i obavijesti. Zamjenjuje pisanje tekstualnih naredbi i čini korištenje računala pristupačnije korisniku.

LinuxCNC standardno dolazi s više mogućih korisničkih sučelja. Odabir odgovarajućeg korisničkog sučelja ovisi o vrsti i namjeni stroja na kojem se sučelje koristi te o mogućnostima zaslona. Standardna grafička sučelja koja se koriste su Axis, Touchy, Gscreen i Gmoccapy. Axis sučelje je najnaprednije sučelje, a razlike u odnosu na ostala sučelja su u primjeni i drugačije postavljenom grafičkom izgledu pojedinog sučelja. Odabir pojedinog sučelja vrši se upisom imena pojedinog sučelja u INI datoteci u odjeljku.

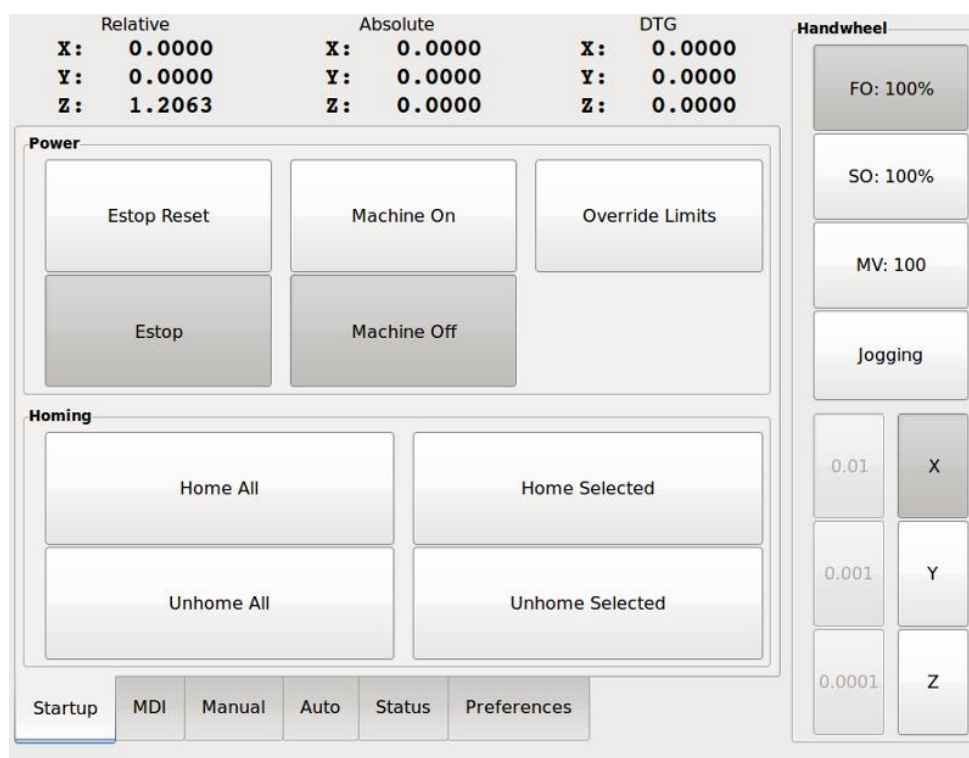
3.3.1. Grafičko sučelje Axis



Slika 16. Grafičko sučelje Axis [13]

Grafičko sučelje Axis osnovno je sučelje LinuxCNC programa te je prikazano na slici 16. Sadrži alatnu traku na kojoj se nalaze alati za izvođenje različitih radnji kao što su pokretanje stroja, učitavanje G koda, pokretanje, pauziranje i zaustavljanje radnog programa stroja. Također sadržava i kartice pomoću kojih se može odabrati ručna kontrola rada stroja ili MDI rad stroja (ručno unošenje G koda). Sučelje sadrži i klizalice pomoću kojih se mogu mijenjati parametri obrade, odnosno brzine pojedinih osi. Prikazan je i grafički prikaz putanje alata učitano G koda te se pokretanjem programa jasno vidi kretanje vrha alata. Na dnu sučelja nalazi se prikaz učitano G koda. Za korištenje grafičkog sučelja Axis potrebni su miš i tipkovnica [14].

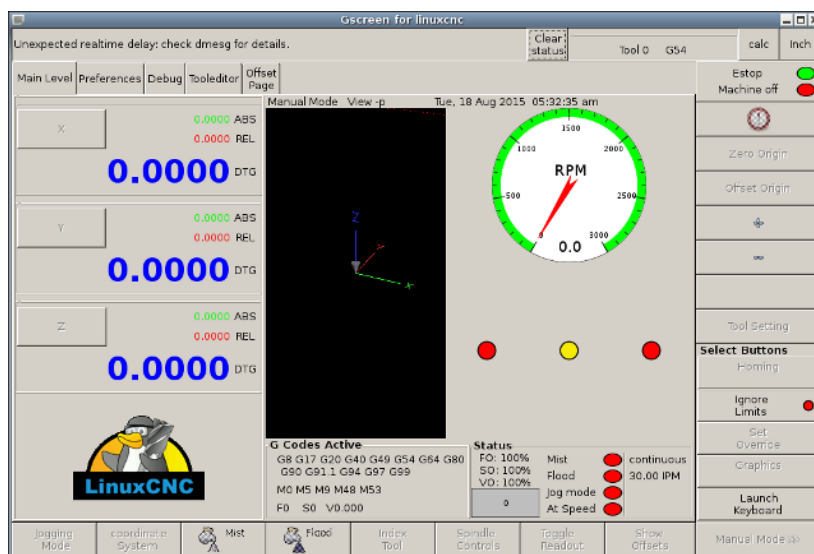
3.3.2. Grafičko sučelje Touchy



Slika 17. Grafičko sučelje Touchy [13]

Na slici 17. prikazano je grafičko sučelje Touchy. Namijenjeno je za upotrebu na zaslonima osjetljivim na dodir stoga ne zahtjeva upotrebu miša i tipkovnice. Za pomoćno upravljanje se može koristiti ručni generator impulsa (MPG), prekidači i tipkala. Funkcionalnost sučelja je slična kao i za Axis sučelje, ali je radi bolje preglednosti jednostavniji pristup pojedinim komponentama sučelja [15].

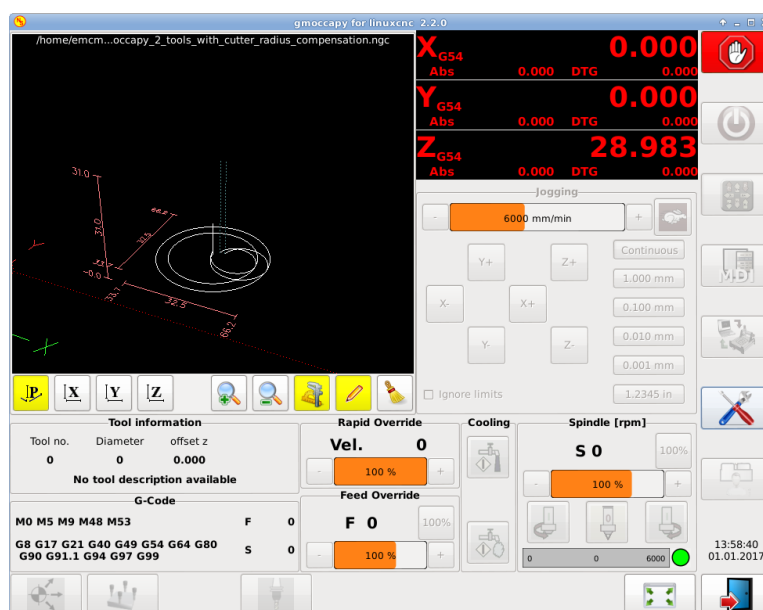
3.3.3. Grafičko sučelje Gscreen



Slika 18. Grafičko sučelje Gscreen [13]

Na slici 18. prikazano je grafičko sučelje Gscreen. Karakteristika ovog grafičkog sučelja je mogućnost potpune prilagodbe izgleda i funkcionalnosti zaslona ovisno o zahtjevima korisnika. Za prilagodbu se koristi razvojno okruženje Glade o kojem će se više reći u narednim poglavljima. Glade omogućava dodavanje raznih tipki, klizača, skala i indikatora unutar samog sučelja [16].

3.3.4. Grafičko sučelje Gmoccapy

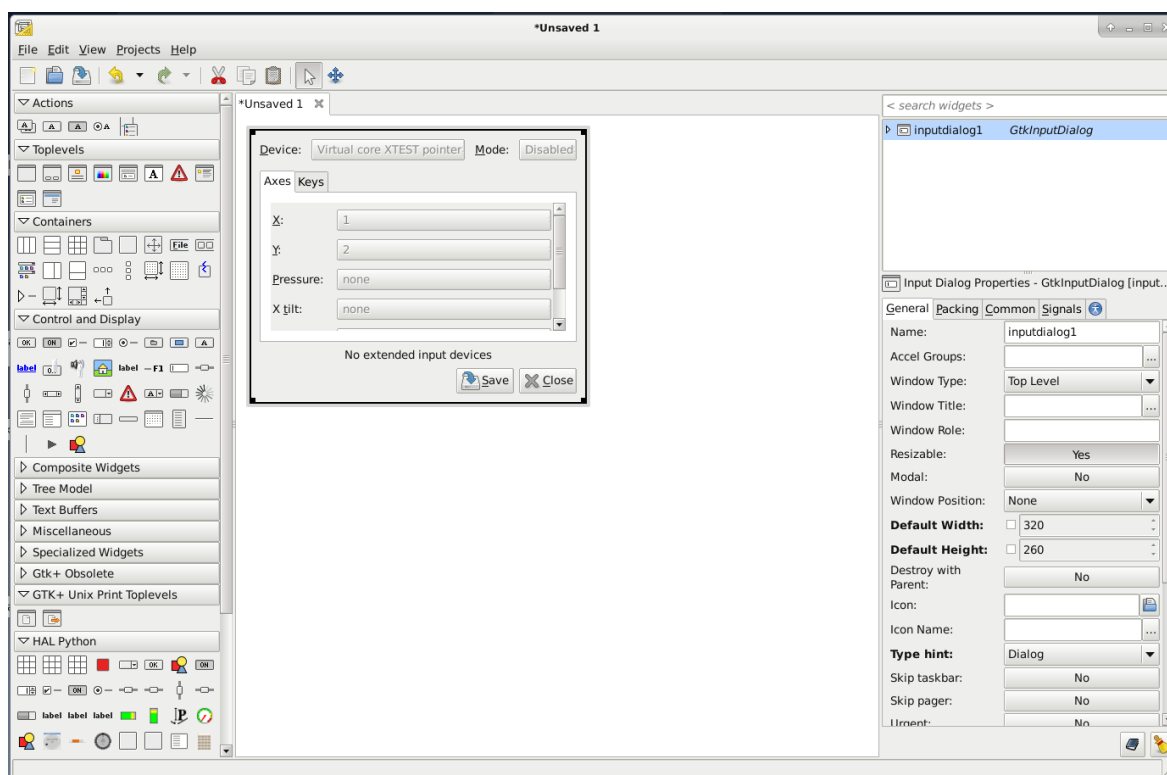


Slika 19. Grafičko sučelje Gmoccapy [13]

Na slici 19. prikazano je grafičko sučelje Gmoccapy. Namijenjeno je za korištenje na zaslonima osjetljivim na dodir, ali se mogu koristiti miš i tipkovnica. Unutar sučelja ugrađen je izbornik kojim se omogućava prilagodba sučelja ovisno o zahtjevima primjene [17].

3.4. Program za izradu korisničkih sučelja GladeVCP

GladeVCP (*Glade Virtual Control Panel*) je komponenta LinuxCNC sustava koja omogućava izradu i dodavanje novog grafičkog korisničkog sučelja. Njome se također kreiraju ulazni i izlazni HAL pinovi pomoću kojih se novo grafičko sučelje povezuje s LinuxCNC sustavom. Za kreiranje samostalnih grafičkih sučelja koristi se razvojno okruženje Glade. U njemu se nalazi veliki skup raznih elemenata pomoću kojih se izrađuje grafičko sučelje [18].



Slika 20. Razvojno okruženje Glade

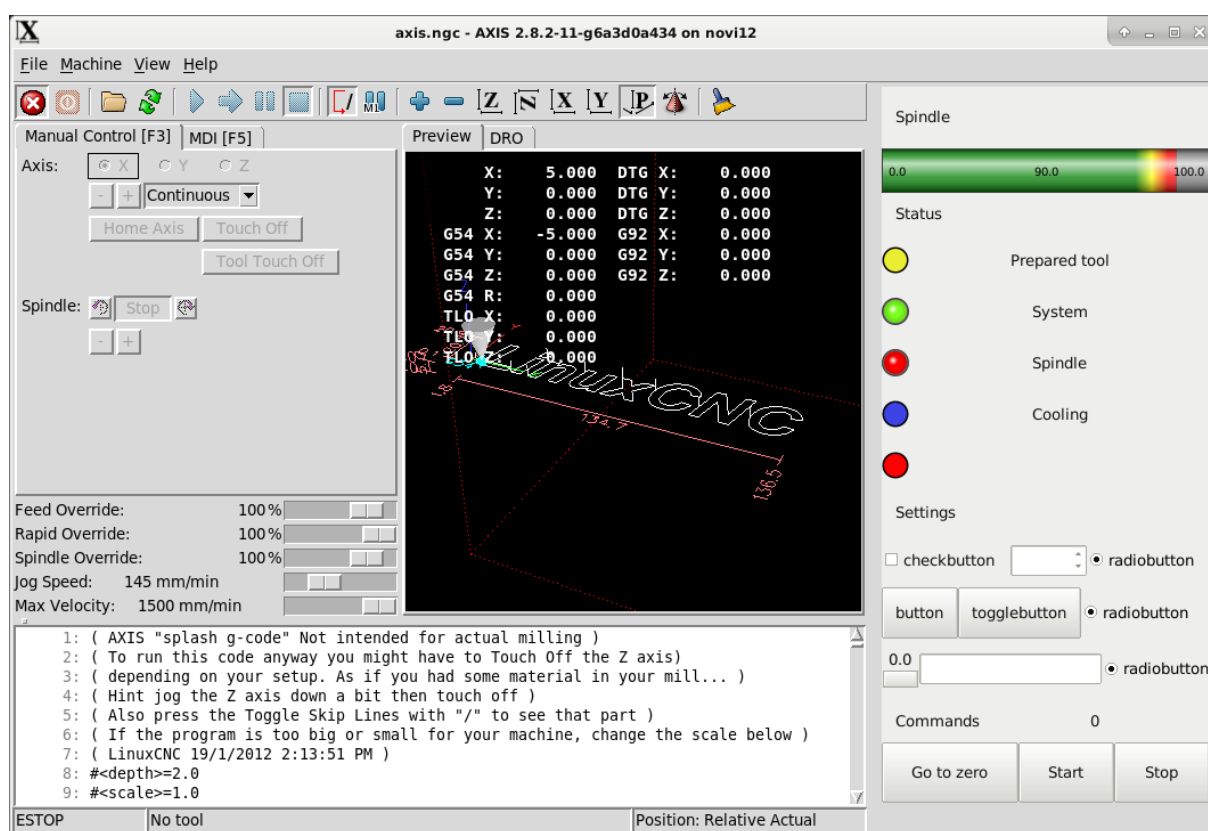
Slika 20. prikazuje razvojno okruženje Glade. Na lijevoj strani sučelja Glade nalazi se alatna traka s prikazom mogućih elemenata pomoću kojih se kreira vlastito korisničko sučelje. S desne strane sučelja programa nalaze se postavke pomoću kojih se može mijenjati svojstva pojedinog elementa sučelja. U postavkama se definiraju i funkcije koje se pozivaju uključivanjem pojedinog elementa sustava. Sučelje se izrađuje tako da se iz alatne trake izvlače odgovarajući elementi budućeg sučelja te se stavljaju na prozor u sredini sučelja u kojem se

nalazi prethodno formirana mreža sastavljena od stupaca, redaka i tablica. Mrežom se definira pozicija i raspored pojedinog elementa sučelja.

Grafičko korisničko sučelje izrađeno u okruženju Glade može se prikazivati na tri različita načina ovisno o načinu integriranja u LinuxCNC sustav:

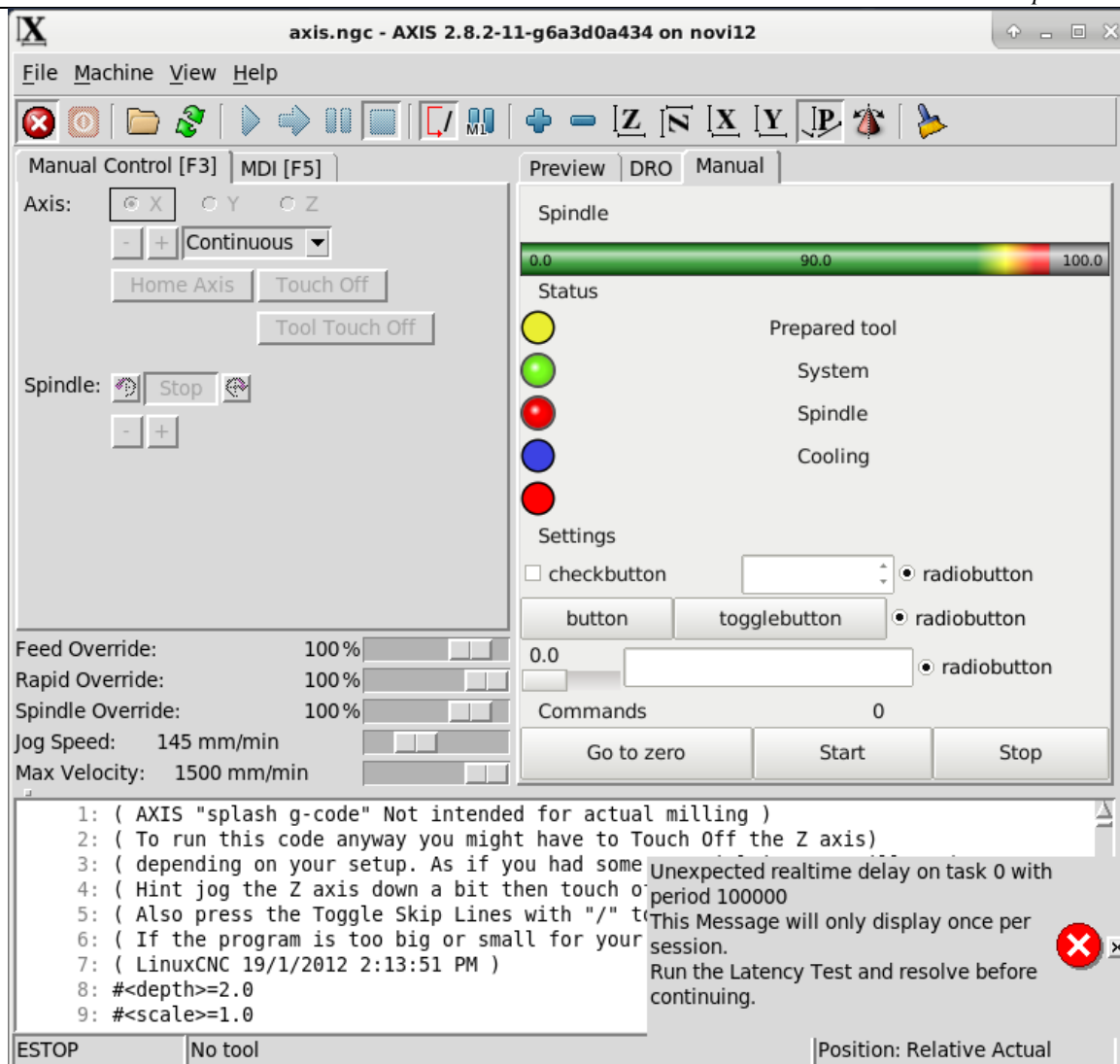
- integrirano u Axis sučelje desno od osnovnog sučelja
- integrirano u Axis, Touchy, Gscreen ili Gmoccapy kao kartica
- prikaz kao samostalno sučelje koje funkcionira bez prisutnosti standardnog sučelja

[18]



Slika 21. Sučelje integrirano u Axis s desne strane

Slika 21. prikazuje korisničko sučelje Axis u kojeg je integrirano dodatno korisničko sučelje s desne strane. Dodatno korisničko sučelje je izrađeno u razvojnom okruženju Glade, a na njemu su prikazane upravljačke komande, parametri obrade i indikatori. Prednost integracije u sučelje Axis s je mogućnost prilagodbe sučelja specifičnostima razmatranog stroja.



Slika 22. Sučelje integrirano u Axis kao kartica

Slika 22. prikazuje dodatno korisničko sučelje integrirano u sučelje Axis kao kartica. Dodatno sučelje je identično sučelju na slici 21., osim što je ugrađeno u sučelje Axis na drugačiji način.

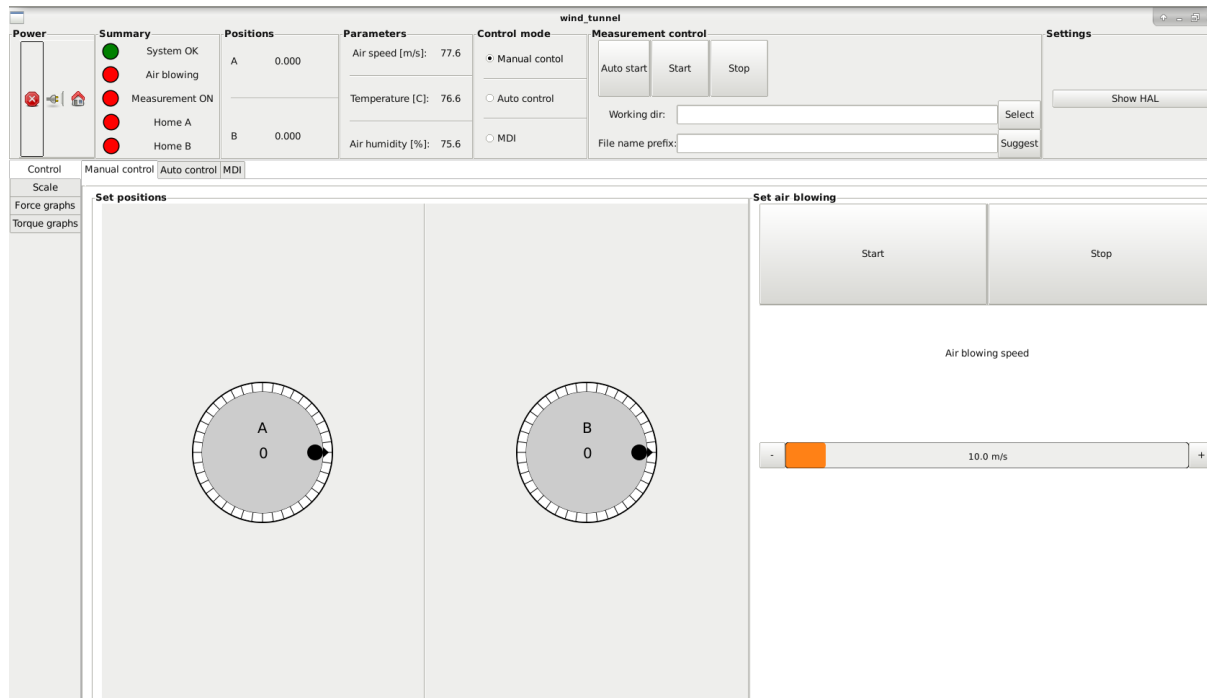
4. IZRADA I OPIS GRAFIČKOG KORISNIČKOG SUČELJA

Kako bi se korisniku ispitnog postava zračnog tunela omogućilo upravljanje potrebno je obratiti pozornost na zahtjeve koje grafičko korisničko sučelje treba izvršavati. Općenito se zahtjevi postavljaju ovisno o načinu i namjeni rada pojedinog sustava.

Glavni zahtjevi koji se postavljaju za korisničko sučelje ispitnog postava zračnog tunela su:

- mogućnost ručnog podešavanja parametra simulacije (pozicije osi i brzina strujanja zraka)
- mogućnost pokretanja simulacije pomoću unaprijed napisanog G koda
- mogućnost pokretanja simulacije ručnim unošenjem G koda liniju po liniju
- mogućnost praćenja mjerenih veličina
- mogućnost zapisivanja mjerenih veličina

Elemente grafičkog korisničkog sučelja potrebno je kreirati na način da zadovoljavaju glavne, ali i dodatne zahtjeve kao što su prikazivanje pozicija obje osi, indikacije rada pojedinih funkcija programa, mogućnost odabira načina izvršavanja rada programa te mogućnost konfiguriranja postavki programa.



Slika 23. Grafičko korisničko sučelje ispitnog postava

Grafičko korisničko sučelje prikazano na slici 23. sastoji se od nepromjenjivog gornjeg dijela i promjenjivog donjeg dijela koji se mijenja ovisno o odabranoj kartici. Na gornjem dijelu sučelja nalaze se osnovne funkcije za uključivanje programa, indikatori za praćenje određenih parametara rada programa, funkcije za odabir načina izvođenja programa, funkcije za zapisivanje mjerenih veličina te funkcije za ulazak u postavke programa. Na gornjem dijelu sučelja također se nalaze i element za praćenje parametara zraka te element za praćenje pozicija rotacijskih osi.

Donji dio sučelja sastoji se od četiri vertikalno postavljene kartice. Odabirom pojedine kartice omogućavamo promjenu donjeg dijela sučelja. Prva vertikalna kartica služi za upravljanje sustavom i u njoj se nalaze tri horizontalne kartice u kojima su prikazane funkcije za upravljanje čija mogućnost korištenja ovisi o odabranom načinu rada programa. U drugoj vertikalnoj kartici nalazi se prikaz svih izlaznih veličina dinamometra koje su prikazane pomoću pokazivača iznosa s kazaljka. U trećoj kartici nalazi se grafički prikaz izmjerenih sila u ovisnosti o vremenu, a u četvrtoj kartici prikazuje se grafički prikaz izmjerenih momenata u ovisnosti o vremenu.

Prilikom uključivanja sučelja onemogućeno je korištenje gotovo svih elemenata korisničkog sučelja. Onemogućenjem pristupa sprječava se mogućnost podešavanja parametara rada neaktivnog sustava. Time se sprječava neželjeno gibanje rotacijskih osi stroja koje bi se krenulo izvršavati neposredno nakon uključivanja sustava. Pristup elementima sučelja omogućava se aktivacijom rada sustava.

4.1. Elementi korisničkog sučelja

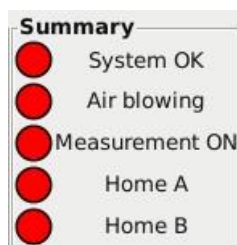
4.1.1. Elementi gornjeg dijela korisničkog sučelja

Na slici 24. prikazan je prvi element gornjeg dijela sučelja (eng. *Power*) koji služi za pokretanje programa LinuxCNC. Omogućavanje uključivanja programa vrši se deaktivacijom sigurnosnog prekidača (eng. *E-STOP*). U programu on predstavlja stvarni sigurnosni prekidač koji služi za hitan prekid rada stroja. Deaktivacijom prekidača *E-STOP* omogućeno je aktiviranje prekidača za uključivanje programa (eng. *POWER*). Indikacija uključivanja programa prikazana je zelenim indikatorom za rad sustava (eng. *System OK*). Posljednja tipka (eng. *Home*) koristi se za dovođenje posmičnih osi ispitnog postava u referentne položaje.



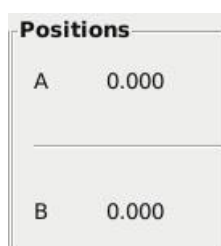
Slika 24. Element sučelja za pokretanje programa

Na drugom elementu korisničkog sučelja (eng. *Summary*) prikazani su indikatori rada pojedinih funkcija programa. U slučaju izvršavanja pojedine funkcije, indikator mijenja boju iz crvene u zelenu. Redom su prikazani indikatori rada programa, ventilatora i zapisivanja mjerenih veličina te indikatori pozicioniranja rotacijskih osi A i B u referentnim položajima. Indikatorski element korisničkog sučelja prikazan je na slici 25.



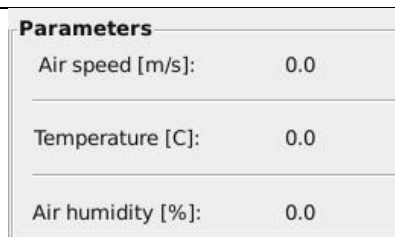
Slika 25. Indikatorski element sučelja

Element sučelja za prikaz pozicija (eng. *Positions*) prikazuje pozicije rotacijskih osi A i B izražene u stupnjevima u odnosu na postavljenu referentnu točku. Prikazan je na slici 26.



Slika 26. Element sučelja za prikaz pozicija rotacijskih osi

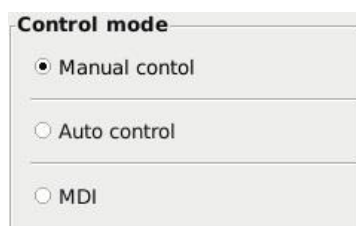
Elementom za prikaz parametara zraka (eng. *Parameters*) prikazuju se brzina strujanja zraka unutar zračnog tunela, temperatura zraka te vlaga zraka. Prikazan je na slici 27.



Parameters	
Air speed [m/s]:	0.0
Temperature [C]:	0.0
Air humidity [%]:	0.0

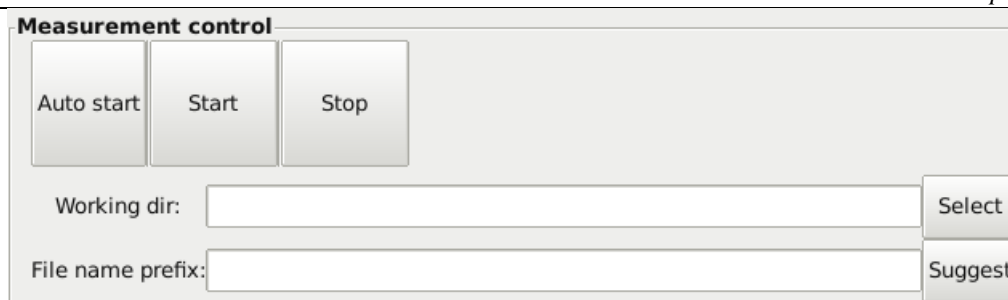
Slika 27. Element za prikaz parametra zraka

Na korisničkom sučelju nalazi se element za odabir načina upravljanja (eng. *Control mode*) pomoću kojeg se može odabrati ručni (eng. *Manual control*), automatski (eng. *Auto control*) ili MDI (eng. *Manual data input mode*) način upravljanja. Ručnim načinom upravljanja može se namjestiti brzina strujanja zraka i pozicija modela zrakoplova te se parametri simulacije mogu mijenjati prilikom izvođenja mjerenja opterećenja. Automatskim načinom upravljanja sustavom upravlja se pomoću unaprijed napisanog G koda kojim zadajemo željene pozicije i brzine strujanja zraka. Pomoću MDI upravljanja ručno se upisuju naredbe G koda koje program izvršava. Aktivacijom pojedinog načina upravljanja onemogućen je pristup ostalim načinima upravljanja. Element je prikazan na slici 28.



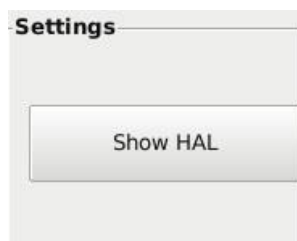
Slika 28. Element za odabir načina upravljanja

Pomoću elementa za kontrolu zapisivanja mjerenih veličina (eng. *Measurement control*) generira se datoteka u kojoj će biti zapisani izmjereni parametri simulacije. Potrebno je odabrati direktorij (eng. *Working dir*) u kojem će se datoteka s izmjerenim podacima nalaziti tipkom za odabir direktorija (eng. *Select*). Nakon odabira direktorija potrebno je odabrati ime datoteke. Ono se može odabrati ručno upisivanjem imena datoteke unutar elementa za upis teksta (eng. *File name prefix*) ili koristeći tipku za prijedlog imena datoteke (eng. *Suggest*). Aktivacijom tipke za pokretanje (eng. *Start*) generira se datoteka s odabranim imenom unutar odabranog direktorija. Mjerenje se zaustavlja aktivacijom tipke za zaustavljanje (eng. *Stop*). Aktivacijom sklopke za automatsko pokretanje mjerenje (eng. *Auto start*) generiranje datoteke izvršava se u trenutku pokretanja G koda u automatskom načinu rada. Element je prikazan na slici 29.



Slika 29. Element za kontrolu zapisivanja mjerenih veličina

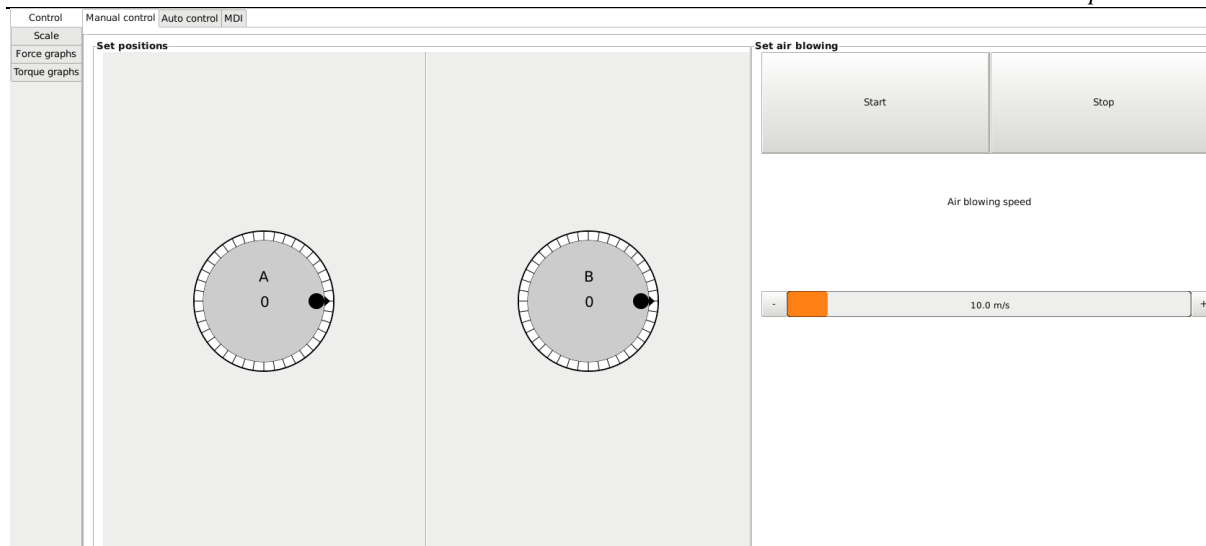
Unutar elementa za postavke programa (eng. *Settings*) nalazi se tipka za pokretanje postavki (eng. *Show HAL*). Njome se pokreće sučelje u kojem su prikazani pinovi i signali programa u obliku stabla. Unutar sučelja moguće je mijenjanje postavki konfiguracije programa. Promijenjene postavke izvršavat će se za vrijeme rada programa, ali neće biti spremljene nakon gašenja i ponovnog pokretanja programa. Element je prikazan na slici 30.



Slika 30. Element za postavke programa

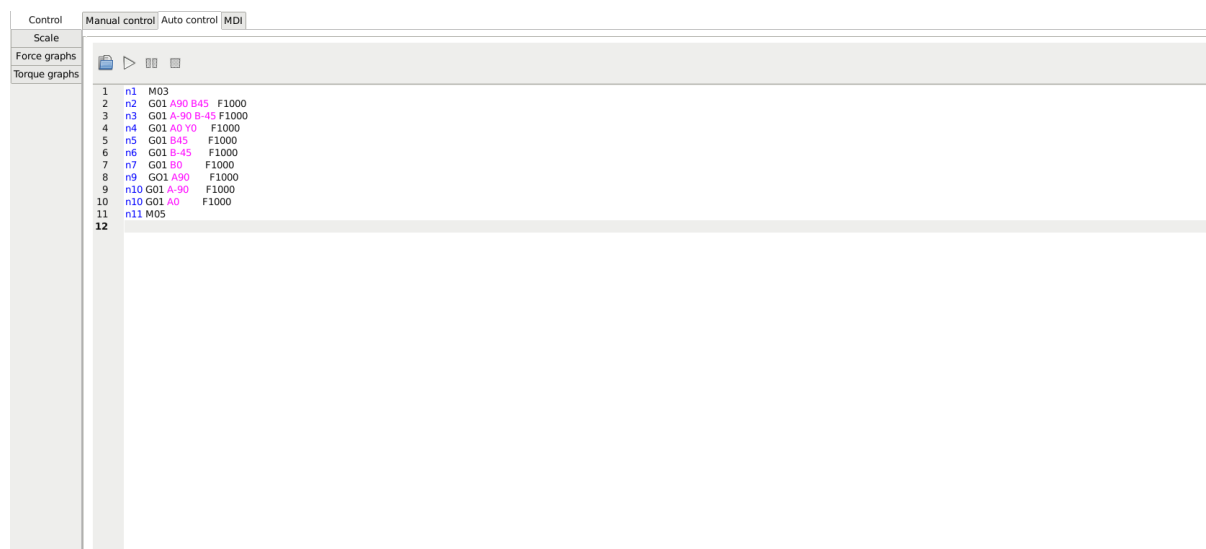
4.1.2. Elementi donjeg dijela sučelja

Prilikom pokretanja programa na donjem dijelu sučelja prikazana je vertikalna kartica za upravljanje (eng. *Control*) u kojoj se nalaze horizontalne kartice. Prva horizontalna kartica (eng. *Manual control*) služi za ručno upravljanje procesa simulacije. Unutar kartice se nalaze dva ručna generatora impulsa (MPG) pomoću kojih se zadaju pozicije pojedinih rotacijskih osi. Mogućnost zadavanja pozicija pomoću upravljačkih kotačića moguće je samo kada su aktivni indikatorski signali *Home A* i *Home B*. Tipkom za pokretanje (eng. *Start*) uključuje se ventilator kojim se generira strujanje zraka unutar zračnog tunela, a isključuje se tipkom za zaustavljanje (eng. *Stop*). Ispod tipki nalazi se modul kojim se određuje brzina strujanja zraka. Kartica je prikazana na slici 31.



Slika 31. Kartica za ručno upravljanje

Druga horizontalna kartica služi za automatsko upravljanje (eng. *Auto control*) procesa simulacije. Pomoću nje se izvršava unaprijed napisan G kod kojim se unose pozicije i posmične brzine rotacijskih osi. Na kartici za automatsko upravljanje nalaze se tipke za učitavanje G koda te tipke za pokretanje, pauziranje i zaustavljanje izvršavanja automatskog načina rada. Kartica je prikazana na slici 32.



Slika 32. Kartica za automatsko upravljanje

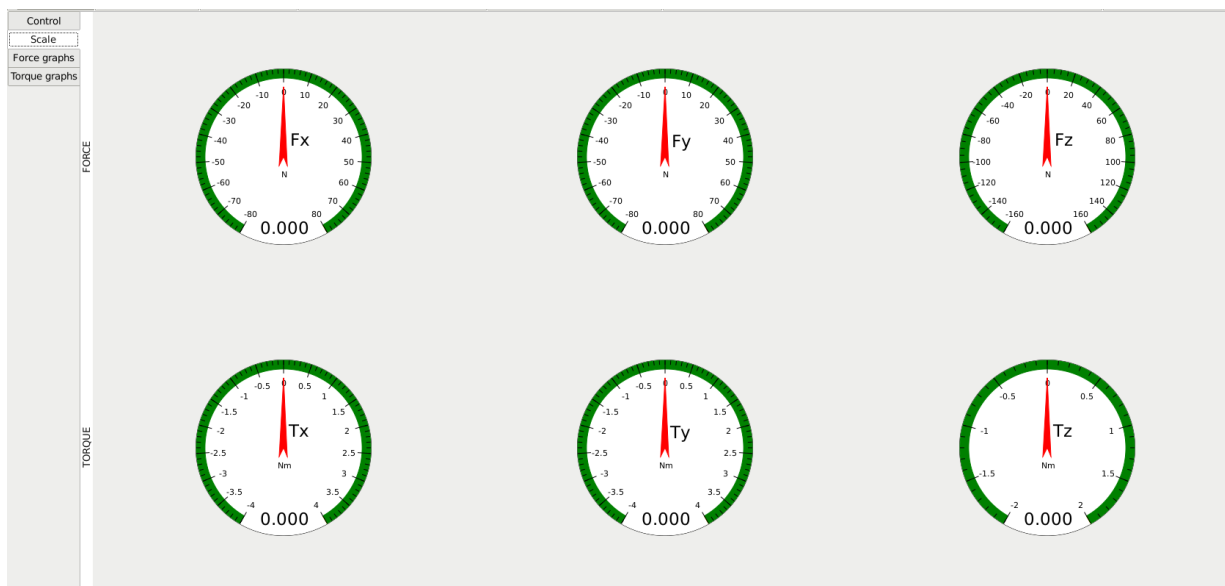
Na trećoj horizontalnoj kartici nalazi se modul za MDI (eng. *Manual Dana Input*) način upravljanja. Unutar modula ručno se upisuju naredbe G koda koje program izvršava pritiskom

na tipku koja se nalazi na donjem desnom uglu. Naredbe ostaju spremljene na prikazu te se mogu ponovno iskoristavati. Kartica je prikazana na slici 33.



Slika 33. Kartica za MDI upravljanje

Unutar druge vertikalne kartice (eng. *Scale*) nalaze se prikazi svih izlaznih veličina dinamometra. Prikazane su pomoću šest pokazivača iznosa s kazaljka. U prvom redu prikazuju se iznosi komponenti sila po x , y , i z osi. U drugom redu prikazuju se iznosi komponenti zakretnog momenta oko x , y , i z osi. Kartica je prikazana na slici 34.



Slika 34. Kartica za prikaz iznosa mjerenih veličina dinamometra

Na trećoj vertikalnoj kartici (eng. *Force graphs*) nalaze se grafički prikazi iznosa komponenti sila po pojedinim osima u ovisnosti o vremenu. Prednost korištenja grafičkog

prikaza je preglednost izmjerenih podataka koji ostaju prikazani na grafikonu. Crvena crta predstavlja iznos mjerene veličine. Kartica je prikazana na slici 35.



Slika 35. Kartica za grafički prikaz mjerenih komponenti sila

Unutar četvrte vertikalne kartice (eng. *Torque graphs*) nalaze se grafički prikazi iznosa komponenti momenta oko pojedinih osi u ovisnosti o vremenu. Kartica je prikazana na slici 36.



Slika 36. Kartica za grafički prikaz mjerenih komponenti momenata

4.2. Programska podrška

Kako bi se omogućio rad korisničkog sučelja, potrebno je razviti programsku podršku za odgovarajući rad korisničkog sučelja. GladeVCP podržava programski jezik Python pomoću kojeg se razvija pozadinsko izvođenje programa. Povezivanje programa Glade i Python datoteke vrši se pomoću *handler* funkcija kojima se povezuju *widjeti* (elementi korisničkog sučelja) s programskim linijama koda kojima se omogućuje funkcionalnost *widjeta*. Unutar razvojnog okruženja Glade tijekom uređivanja korisničkog sučelja omogućeno je definiranje upravljačkih signala koji služe za pokretanje *handler* funkcija unutar Python koda. Upravljački signali pokreću se aktivacijom pojedinog *widjeta* za vrijeme rada korisničkog sučelja [18].

Upravljački signali (pinovi) korisničkog sučelja mogu se podijeliti na ulazne i izlazne signale. Ulazni signali spajaju se na elemente sustava koji služe za prikaz pojedinog stanja programa. Ulazne signale imaju indikatori rada funkcija programa, prikazi pozicija osi i parametara struje zraka, prikazi mjerenih veličina s kazaljka i grafikoni. Izlazni signali povezuju se s upravljačkim signalima i funkcijama unutar programa pisanog Python kodom. Elementi korisničkog sučelja koji imaju izlazne signale su sve tipke, modul za unos imena generirane datoteke, upravljački kotačići i modul za kontrolu izlazne brzine zraka.

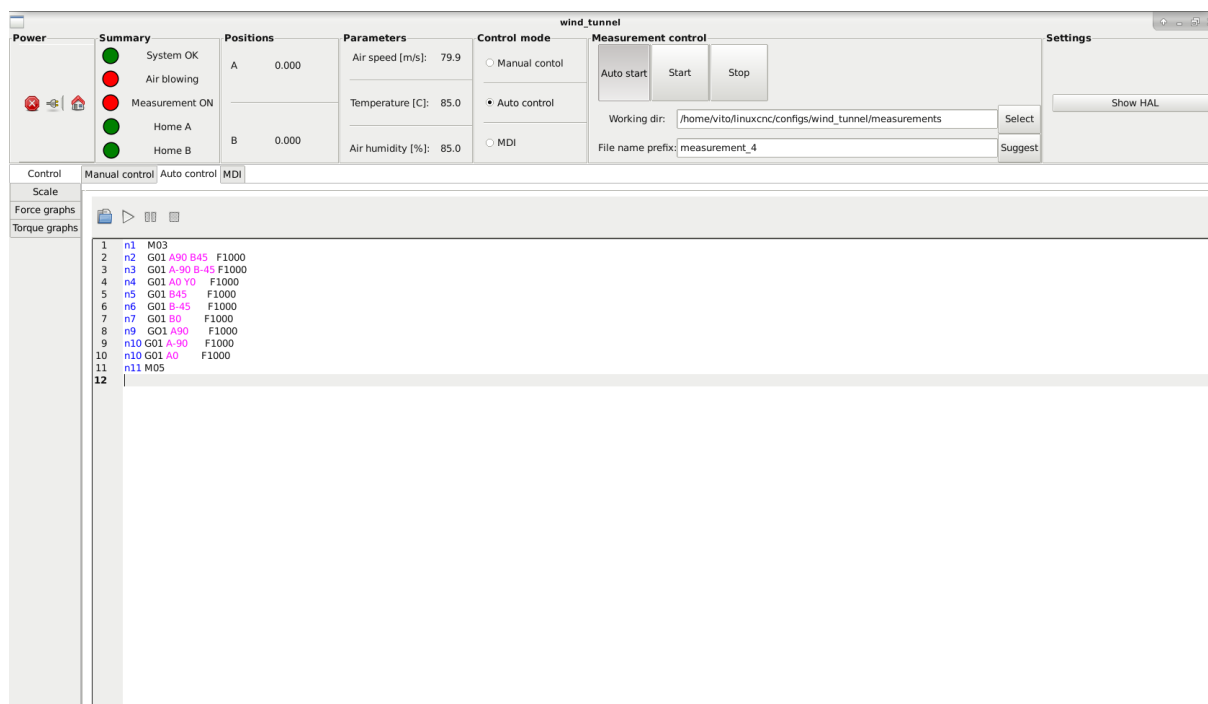
Za povezivanje signala korisničkog sučelja i LinuxCNC sustava koristi se Hardverski apstrakcijski sloj (HAL). Povezivanje se omogućava pomoću HAL datoteka koje su adresirane unutar INI datoteke unutar modula [HAL]. U *postgui.hal* datoteci definirane su poveznice signala korisničkog sučelja sa signalima LinuxCNC sustava.

4.3. Testiranje korisničkog sučelja

Za testiranje sustava koriste se generatori signala pomoću kojih se oponašaju izlazne veličine dinamometra, odnosno oponašaju se ulazne veličine sustava. Izlazni signali generatora signala mogu biti u obliku funkcije sinus i kosinus te u digitalnom, trokutastom, kvadratnom i pilastom obliku. Signali se mogu mijenjati po frekvenciji, amplitudi i pomaku u vertikalnom smjeru (gledajući na grafu funkcije). Za testiranje korisničkog sučelja koriste se tri generatora signala. Prvi i drugi generatori signala koriste se za oponašanje veličina sila i momenata, a treći generator signala koristi se za oponašanje parametara zraka (brzine strujanja, temperature i vlage zraka).

Testirat će se automatski način rada u kojem se pozicioniranje osi vrši pomoću unaprijed napisanog G koda. Testiranje korisničkog sučelja rezultat će generiranjem datoteke u kojoj se nalaze izmjereni podaci pomoću funkcije *sampler* i *halsampler*. Funkcijom *sampler* omogućava se uzorkovanje podataka u realnom vremenu, a funkcijom *halsampler* omogućava se pohranjivanje podataka u datoteku. Funkcije uzimaju podatke u vremenskom intervalu od 1 ms te ih pohranjuju u datoteku u redove. U datoteci će biti prikazana jedanaest mjerenih parametara. Mjereni podaci mogu se zapisati matrično kao:

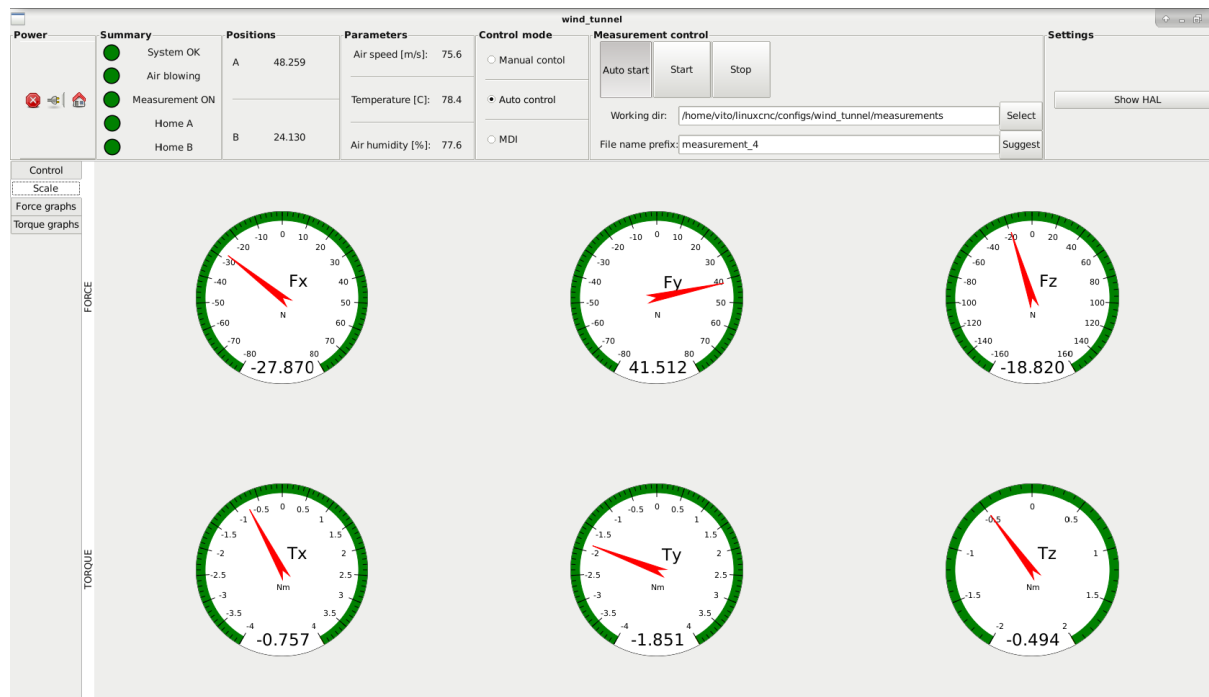
$$R = \begin{bmatrix} F_{x,o} & F_{y,o} & F_{z,o} & T_{x,o} & T_{y,o} & T_{z,o} & \phi_o & V_o & T_o & A_{pos,o} & B_{pos,o} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ F_{x,n} & F_{y,n} & F_{z,n} & T_{x,n} & T_{y,n} & T_{z,n} & \phi_n & V_n & T_n & A_{pos,n} & B_{pos,n} \end{bmatrix}$$



Slika 37. Pokretanje testiranja automatskog načina rada

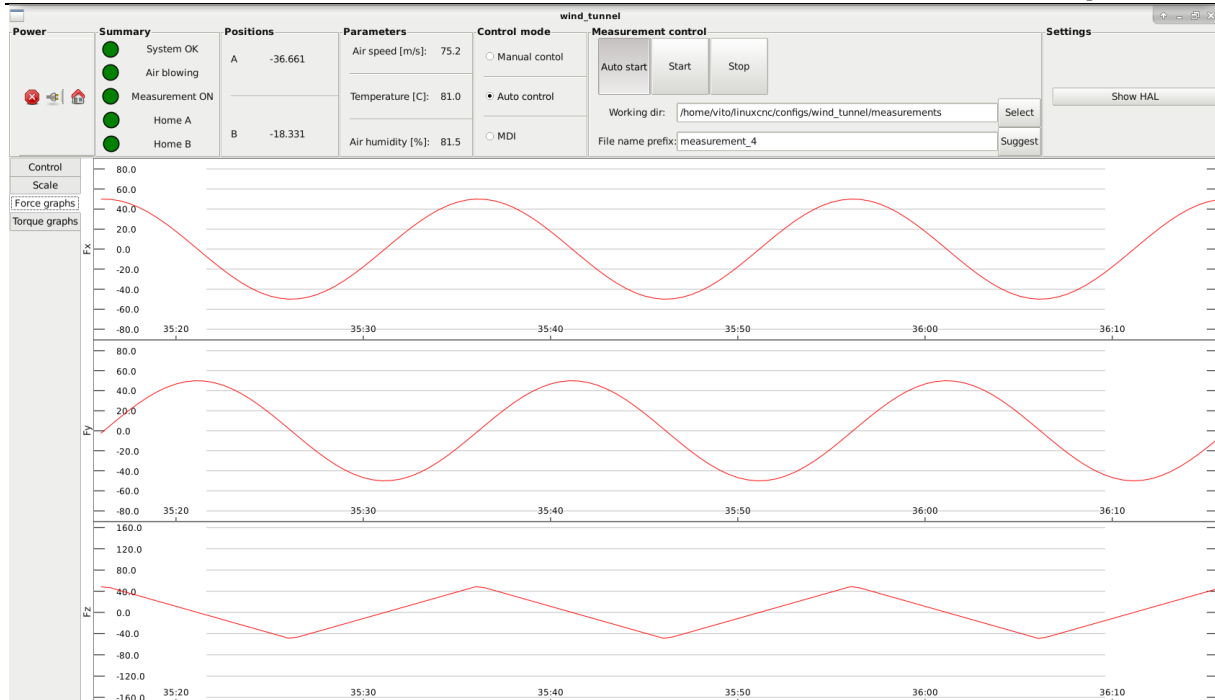
Slika 37. prikazuje pokretanje testiranja. Program se aktivira deaktivacijom sigurnosne sklopke te pritiskom na tipku za uključivanje. Potrebno je odabrati automatski način rada te učitati napisani G kod. Nakon toga potrebno je odabrati direktorij u koji će se spremiti datoteka izmjerenih parametara tipkom *Select* te upisati ime datoteke (ili pritisnuti tipku *Suggest* koja će

sama predložiti ime). Aktivacijom tipke *Auto start* mjerenje će započeti pri pokretanju programa. Pokretanjem programa izvršava se G kod i počinje prikupljanje podataka.



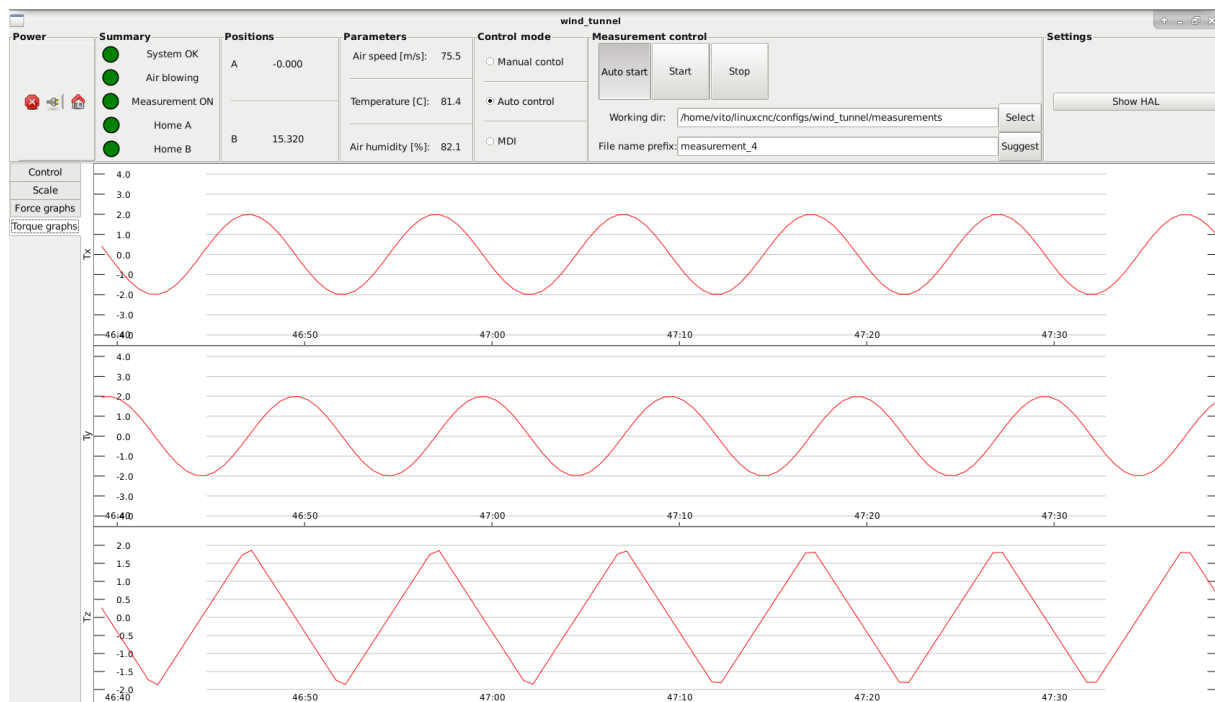
Slika 38. Prikaz iznosa mjerenih veličina

Na slici 38. prikazuju se iznosi komponenti sila i momenata na prikazima s kazaljnkama. Na slici je vidljivo da je došlo do aktivacije indikatora za rad ventilatora zračnog tunela (eng. *Air blowing*) i indikatora za zapisivanje mjerenih veličina (eng. *Measurement ON*). Na pozicijskom elementu (eng. *Position*) prikazani su trenutni iznosi pozicija rotacijskih osi A i B, a na elementu za prikaz parametra zraka (eng. *Parameters*) prikazani su iznosi parametara zraka (brzina strujanja, temperatura i vlaga zraka).



Slika 39. Grafički prikaz iznosa mjerenih sila

Slika 39. prikazuje iznose mjerenih sila na grafičkom prikazu. Grafičkim prikazom omogućena je bolja preglednost mjerenih veličina u odnosu na prikaz s kazaljka jer prikazuje iznose sila u vremenskom periodu od jedne minute te je omogućena vizualna usporedba iznosa sile po pojedinim osima.



Slika 40. Grafički prikaz iznosa mjerenih momenata

Na slici 40. prikazan je grafički prikaz kojim se prikazuju iznosi izmjerenih momenata oko pojedinih osi. Prikaz je izveden istovjetno kao na slici 39., razlika je u tome što se prikazuju iznosi izmjerenih momenata, a ne sila.

99	98	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
100	99	-26.498921	-42.400557	-17.780000	-0.876491	1.797710	-0.577600	75.102110	78.994679	75.644400	0.027188	0.013594	
101	100	-26.485599	-42.408879	-17.770000	-0.877621	1.797159	-0.578400	75.102173	78.994371	75.644600	0.033938	0.016969	
102	101	-26.472275	-42.417198	-17.760000	-0.878750	1.796608	-0.579200	75.102236	78.994063	75.644800	0.041438	0.020719	
103	102	-26.458947	-42.425512	-17.750000	-0.879878	1.796055	-0.580000	75.102299	78.993755	75.645000	0.049688	0.024844	
104	103	-26.445618	-42.433823	-17.740000	-0.881007	1.795502	-0.580800	75.102363	78.993448	75.645200	0.058688	0.029344	
105	104	-26.432285	-42.442129	-17.730000	-0.882135	1.794948	-0.581600	75.102426	78.993140	75.645400	0.068438	0.034219	
106	105	-26.418951	-42.450430	-17.720000	-0.883262	1.794393	-0.582400	75.102489	78.992832	75.645600	0.078938	0.039469	
107	106	-26.405613	-42.458728	-17.710000	-0.884390	1.793838	-0.583200	75.102552	78.992524	75.645800	0.090188	0.045094	
108	107	-26.392273	-42.467022	-17.700000	-0.885517	1.793282	-0.584000	75.102616	78.992217	75.646000	0.102188	0.051094	
109	108	-26.378930	-42.475311	-17.690000	-0.886643	1.792725	-0.584800	75.102679	78.991909	75.646200	0.114938	0.057469	
110	109	-26.365585	-42.483596	-17.680000	-0.887769	1.792168	-0.585600	75.102742	78.991601	75.646400	0.128438	0.064219	
111	110	-26.352237	-42.491877	-17.670000	-0.888895	1.791610	-0.586400	75.102806	78.991294	75.646600	0.142687	0.071344	
112	111	-26.338887	-42.500154	-17.660000	-0.890021	1.791051	-0.587200	75.102869	78.990986	75.646800	0.157454	0.078727	
113	112	-26.325533	-42.508426	-17.650000	-0.891146	1.790491	-0.588000	75.102933	78.990678	75.647000	0.172361	0.086180	
114	113	-26.312178	-42.516694	-17.640000	-0.892271	1.789931	-0.588800	75.102996	78.990371	75.647200	0.187268	0.093634	
115	114	-26.298819	-42.524959	-17.630000	-0.893395	1.789370	-0.589600	75.103059	78.990063	75.647400	0.202175	0.101087	
116	115	-26.285458	-42.533218	-17.620000	-0.894519	1.788808	-0.590400	75.103123	78.989755	75.647600	0.217082	0.108541	
117	116	-26.272095	-42.541474	-17.610000	-0.895643	1.788246	-0.591200	75.103186	78.989447	75.647800	0.231989	0.115995	
118	117	-26.258729	-42.549726	-17.600000	-0.896766	1.787683	-0.592000	75.103250	78.989140	75.648000	0.246896	0.123448	
119	118	-26.245360	-42.557973	-17.590000	-0.897890	1.787119	-0.592800	75.103313	78.988832	75.648200	0.261803	0.130902	
120	119	-26.231989	-42.566216	-17.580000	-0.899012	1.786555	-0.593600	75.103377	78.988524	75.648400	0.276711	0.138355	
121	120	-26.218615	-42.574455	-17.570000	-0.900135	1.785989	-0.594400	75.103441	78.988217	75.648600	0.291618	0.145809	
122	121	-26.205239	-42.582690	-17.560000	-0.901257	1.785423	-0.595200	75.103504	78.987909	75.648800	0.306525	0.153262	
123	122	-26.191860	-42.590920	-17.550000	-0.902378	1.784857	-0.596000	75.103568	78.987601	75.649000	0.321432	0.160716	
124	123	-26.178478	-42.599147	-17.540000	-0.903500	1.784289	-0.596800	75.103631	78.987294	75.649200	0.336339	0.168169	
125	124	-26.165094	-42.607369	-17.530000	-0.904620	1.783721	-0.597600	75.103695	78.986986	75.649400	0.351246	0.175623	
126	125	-26.151707	-42.615587	-17.520000	-0.905741	1.783153	-0.598400	75.103759	78.986679	75.649600	0.366153	0.183077	
127	126	-26.138318	-42.623800	-17.510000	-0.906861	1.782583	-0.599200	75.103822	78.986371	75.649800	0.381060	0.190530	
128	127	-26.124926	-42.632010	-17.500000	-0.907981	1.782013	-0.600000	75.103886	78.986063	75.650000	0.395967	0.197984	

Slika 41. Generirani zapis izmjerenih parametara

Slika 41. prikazuje prvih 29 redova generiranog zapisa iznosa izmjerenih veličina. Promatranjem zadnjeg stupca (rezultati mjerenja pozicije B osi) vidi se da je mala razlika između dvije izmjerene pozicije što znači da je frekvencija uzorkovanja dovoljno visoka da se iz nje može ponovno rekonstruirati ulazni signal. Ovakav zapis izmjerenih parametara je koristan zato što se naknadno može koristiti za daljnju analizu aerodinamičkih svojstava korištenjem alata za obradu podataka (npr. Matlab, Octave, MS Excel).

5. ZAKLJUČAK

Cilj zadatka bio je razvoj grafičkog korisničkog sučelja kojim se upravlja ispitnim postavom zračnog tunela. U svrhu toga, u razvojnom okruženju Glade dizajnirano je korisničko sučelje s obzirom na postavljene zahtjeve vezane za upravljanje sustavom, korištenje sustava i obradu izmjerenih podataka. Izrađena je i programska podrška u programskom jeziku Python kojom se omogućava izvršavanje pojedinih funkcija korisničkog sučelja.

U početnom dijelu rada objašnjeni su osnovni pojmovi vezani uz aerodinamiku koji se primjenjuju prilikom konstruiranja aerodinamičkih tijela. Također je objašnjen princip rada ispitnog postava koji se ugrađuje u zračni tunel. Opisan je i upravljački sustav LinuxCNC te komponente njegove arhitekture.

Prilikom izrade korisničkog sučelja, opisan je svaki elementarni dio sučelja zasebno te mu je objašnjena namjena. Izvođenjem testiranja sučelja dokazano je da sučelje obavlja zadane zahtjeve te da će omogućiti korisniku kvalitetnu upotrebu korisničkog sučelja.

Sljedeći korak u razvoju ispitnog postava je ugradnja dinamometra te implementacija ispitnog postava unutar zračnog tunela na Fakultetu prometnih znanosti. Moguć je i razvoj elementa ispitnog postava kojim će se omogućiti pričvršćenje modela krila (aeroprofila) direktno na prigon za podešavanje kuta propinjanja.

LITERATURA

- [1] Zelić F., Razvoj prigona za orijentaciju modela u zračnom tunelu, 2021.
- [2] Six Key Items To Consider When Selecting a Sensor, <https://duotechservices.com/six-key-items-to-consider-when-selecting-a-sensor>, pristupio 8.7.2022.
- [3] F/T Sensor: Mini27 Titanium, [ATI Industrial Automation: F/T Sensor Mini27 Titanium \(ati-ia.com\)](https://ati-ia.com), pristupio 3.6.2022.
- [4] Six-Axis Force/Torque Transducer, http://atiindustrialautomation.com/app_content/documents/9610-05-1018%20TWE.pdf, pristupio 8.7.2022.
- [5] Strain Gauges, <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-9/strain-gauges/>, pristupio 8.7.2022.
- [6] F/T Transducer Without Electronics (TWE), http://atiindustrialautomation.com/app_content/documents/9610-05-1018%20TWE.pdf, pristupio 8.7.2022.
- [7] EtherCAT – The Ethernet Fieldbus, https://www.beckhoff.com/media/downloads/informationsmedien/etg_brochure_en.pdf, pristupio 8.7.2022.
- [8] EtherCAT F/T Interface, https://www.ati-ia.com/app_content/documents/9620-05-EtherCAT.pdf, pristupio 8.7.2022.
- [9] Janković S.: Mehanika leta zrakoplova, Zagreb, 2002.
- [10] LinuxCNC, https://linuxcnc.org/docs/2.7/html/getting-started/about-linuxcnc.html#_the_operating_system, pristupio 31.5.2022.
- [11] LinuxCNC version 2.8.2-139-gfe2d80e2d, <http://linuxcnc.org/docs/stable/html/>, pristupio 9.7.2022.
- [12] Staroveški T., Brezak D., i Udiljak T., LinuxCNC – The enhanced machine controller: application and an overview, Tehnički vjesnik, svez. 20, br6, 2013., p. 1103-1110
- [13] LinuxCNC User Introduction, http://linuxcnc.org/docs/stable/html/user/user-intro.html#_modes_of_operation, pristupio 21.6.2022.
- [14] AXIS GUI, <https://linuxcnc.org/docs/html/gui/axis.html>, pristupio 23.6.2022.
- [15] Touchy GUI, <http://linuxcnc.org/docs/html/gui/touchy.html>, pristupio 23.6.2022.
- [16] Gscreen, <http://linuxcnc.org/docs/html/gui/touchy.html>, pristupio 23.6.2022.
- [17] GMOCCAPY, <http://linuxcnc.org/docs/html/gui/gmoccapy.html>, pristupio 23.6.2022.

[18] Glade Virtual Control Panel, <http://www.linuxcnc.org/docs/html/gui/gladevcp.html>, pristupio 23.6.2022.