

Mjerenje i analiza vibracija zrakoplova s klipnim motorom

Juretić, Fabijan

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:273964>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Fabijan Juretić

MJERENJE I ANALIZA VIBRACIJA ZRAKOPLOVA SA KLIPNIM MOTOROM

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 4. travnja 2019.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Eksploatacija i održavanje zrakoplova**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5282

Pristupnik: **Fabijan Juretić (0135245454)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Pilot**
Usmjerenje: **Civilni pilot**

Zadatak: **Mjerenje i analiza vibracija zrakoplova s klipnim motorom**

Opis zadatka:

U radu je potrebno prikazati tehničko eksploatacijske značajke predstavnika zrakoplova s klipnim motorom te opisati glavne konstrukcijske značajke predstavljenog zrakoplova. Potrebno je analizirati uzroke i pojavu vibracija na predstavniku zrakoplova s klipnim motorom. Nadalje, potrebno je prikazati mogućnosti mjerenja i praćenja vibracija na zrakoplovu u eksploataciji. Za potrebe mjerenja vibracija, potrebno je opisati mjerni set za mjerenje vibracija na zrakoplovu te prikazati mogućnosti ugradnje na predstavljeni zrakoplov.

Mentor:



izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

MJERENJE I ANALIZA VIBRACIJA ZRAKOPLOVA S KLIPNIM MOTOROM

AIRCRAFT PISTON ENGINE VIBRATION MEASUREMENT AND ANALYSIS

Mentor: izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

Student: Fabijan Juretić

JMBAG:0135245454

Zagreb, rujan 2019.

SAŽETAK

Ovaj završni rad usmjeren je ka vibracijama zrakoplova sa klipnim motorom u eksploataciji. U radu je opisan zrakoplov koji je odabran za mjerenje i analizu vibracija. Također, detaljno su opisani izvori vibracija s teorijskog stajališta koji obuhvaćaju vibracije na stajnom trapu, vibracije elisno-klipnog pogonskog sustava koje značajano doprinose ukupnim vibracijama te aerodinamičke vibracije. Osim teorijske analize, opisani su i mjerni instrumenti te princip mjerenja vibracija. S obzirom na važnost vibracija u eksploataciji zrakoplova, osmišljen je i napravljen mjerni set za mjerenje vibracija zrakoplova u eksploataciji. Mjerni set je baziran na Arduino UNO platformi, perifernoj ploči SW-420 koja služi kao senzor pomaka te ADXL345 akcelerometru. Mjerni set je postavljen na zrakoplov, te su tokom leta prikupljeni podaci sa senzora koji su u radu grafički prikazani i analizirani.

KLJUČNE RIJEČI: zrakoplov; vibracije; Arduino; eksploatacija; mjerni set; akcelerometar; senzori

SUMMARY

This thesis is focused on vibration of an aircraft with piston engine in exploitation. It describes aircraft which is chosen for measurement and analysis of vibration. Also, paper describes sources of vibration from theoretical point of view such as landing gear vibration, powerplant and propeller vibration which make a significant contribution to vibration of whole system, aerodynamic vibration etc. Beside theoretical analysis, instruments used for vibration measurement are described as well as principle of measuring vibration. Considering importance of vibration on an aircraft in operation, instrument for measuring vibration is designed and created. Instrument is consisted of Arduino UNO board, tilt sensor SW-420 and ADXL345 accelerometer. Measuring set is assembled on the aircraft, and data is collected during the flight. Collected data is analyzed and shown in charts.

KEYWORDS: aircraft; vibration; Arduino; operation; instrument; accelerometer; sensors

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Tehničko-eksploatacijske značajke predstavnika zrakoplova s klipnim motorom	3
2.1. Konstrukcija zrakoplova C-172	3
2.2. Pogonski sustav.....	5
2.3. Tehničko-eksploatacijske karakteristike C-172R	7
3. Uzroci i pojava vibracija na zrakoplovu.....	9
3.1. Harmonijsko titranje	9
3.2. Sustavi s jednim stupnjem slobode	12
3.3. Uzroci vibracija na predstavniku zrakoplova	15
3.3.1. Vibracije i suspenzija stajnog trapa.....	15
3.3.2. Vibracije na klipnom motoru	17
3.3.3. Vibracije elise.....	18
3.3.4. Aerodinamičke vibracije	20
4. Mogućnost mjerenja vibracija na zrakoplovu u eksploataciji	22
4.1. Instrument za mjerenje frekvencije.....	22
4.2. Instrumenti za mjerenje amplitude.....	23
4.3. Električni instrumenti za mjerenje vibracija	24
5. Mjerni set za mjerenje vibracija na zrakoplovu C-172R.....	26
5.1. Arduino UNO.....	26
5.2. Grove SW-420	27
5.3. ADXL345 akcelerometar.....	28
5.4. Mogućnost montaže mjernog seta na zrakoplov C-172R.....	29
6. Prikaz i analiza podataka dobivenih mjerenjem u letu	31
6.1. Pokretanje motora	32
6.2. Voženje	33
6.3. Penjanje.....	35
6.4. Krstarenje.....	37
6.5. Snižavanje	39

6.6. Slijetanje	40
7. Zaključak	43
Literatura.....	44
Popis slika	46
Popis grafikona	47
Prilog.....	48

1. Uvod

Zrakoplovi s klipnim pogonskim sustavom u eksploataciji izloženi su vibracijama iz različitih izvora. Letenje se odvija u stvarnim atmosferskim uvjetima koji podrazumijevaju varijabilne meteorološke elemente poput temperature, vjetrova, oborina i sl. Spomenuti uvjeti utječu na parametre leta kako iz navigacijskog aspekta tako i iz konstrukcijskog aspekta zrakoplova koji mora izdržati iste. Također svi zrakoplovi su opremljeni sustavima koji generiraju vibracije što može narušiti udobnost ali i sigurnost leta.

Iako vibracije predstavljaju neizostavan element eksploatacije na lakim zrakoplovima sa s klipnim motorom, vibracije se ne mjere na spomenutim zrakoplovima niti za iste postoji regulativa koja propisuje mjerenje vibracija. Stoga je ovaj rad osim analize nastanka vibracija na lakom zrakoplovu s klipnim motorom (C-172R) usmjeren i na osmišljavanje mjernog seta koji će poslužiti kao mjerni instrument za mjerenje vibracija. Također podaci prikupljeni mjernim setom prikazani su u radu u svrhu analize i prikaza vibracija na spomenutom tipu zrakoplova. Rad je podijeljen u sedam cjelina:

1. Uvod
2. Tehničko-eksploatacijske značajke predstavnika zrakoplova s klipnim motorom
3. Uzroci i pojava vibracija na zrakoplovu
4. Mogućnost mjerenja vibracija u eksploataciji
5. Mjerni set za mjerenje vibracija
6. Prikaz i analiza podataka dobivenih mjerenjem u letu
7. Zaključak

U drugom poglavlju opisane su tehničko-eksploatacijske karakteristike zrakoplova s klipnim motorom. Opisani su konstrukcijski elementi te je prikazan njihov razmještaj na zrakoplovu. Također prikazan je i elisno-klipni pogonski sustav te značajke održavanja zrakoplova.

Treće poglavlje opisuje uzroke i pojavu vibracija na zrakoplovu s klipnim motorom, pojednostavljene prikaze vibracija na primjeru harmonijskog titranja. Također su opisane vibracije koje su karakteristične za zrakoplov (vibracije pogonskog sustava, vibracije stajnog trapa, aerodinamičke vibracije).

Četvrto poglavlje obuhvaća instrumente koji mjere vibracije te principe njihova mjerenja i prikaza podataka.

Peto poglavlje opisuje mjerni set koji je sastavljen za potrebe ovoga rada. Opisuje komponente koje su ugrađene u set, njihove osnovne značajke te osnovne principe rada. Također opisana je i montaža mjernog seta na zrakoplov u svrhu mjerenja

Šesto poglavlje sadrži podatke prikupljene mjernim setom te njihove grafičke prikaze skupa s analizom podataka.

U zadnjem, sedmom poglavlju iznose se zaključna razmatranja koja su zaključena na temelju promatranja vibracija na zrakoplovu sa klipnim motorom te na temelju provedenih mjerenja.

2. Tehničko-eksploatacijske značajke predstavnika zrakoplova s klipnim motorom

Rad se temelji se na proučavanju i analizi vibracija koji proizvode zrakoplovi pogonjeni klipnim motorom. Za potrebe mjerenja i analize vibracija, izabran je predstavnik zrakoplova s klipnim motorom, Cessna 172 (C-172) čije su tehničko-eksploatacijske značajke opisane u ovom poglavlju.

Cessna 172 je jednomotorni klipni laki zrakoplov, visokokrilac s 4 sjedišta. Proizvodi ga američka zrakoplovna tvrtka Cessna Aircraft Company. Prvi let ovog tipa zrakoplova odvio se 1955. godine što ga čini jednim od najdugovječnijih zrakoplova u eksploataciji. Ako je suditi po broju izrađenih primjeraka Cessna predvodi kao zrakoplov proizveden u najviše primjeraka (više od 44000 proizvedenih). [1]

2.1. Konstrukcija zrakoplova C-172

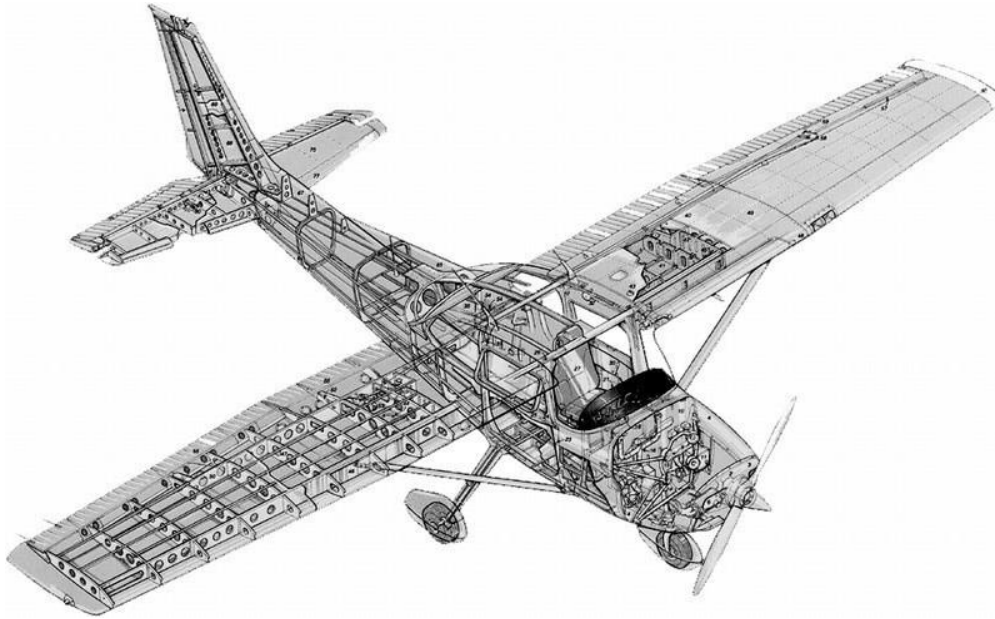
Trup zrakoplova je prema strukturi konvencionalni s metalnim gredama, okvirima te s metalnom oplatom, koje su predviđene da podnose tangencijalna i normalna naprezanja, što se prema uobičajenoj terminologiji naziva semimonokok. Karakteristični trup kao i sveukupna konstrukcija je u cijelosti metalna što je važno za interpretaciju i razumijevanje vibracija i osciliranja strukturnih komponenata ovog zrakoplova. Istaknuti dijelovi strukture zrakoplova su platforme koje se nalaze ispod putničke kabine tj. ispod samih vrata na koje je pričvršćen glavni stajni trap, dvije glavne ramenjače koje su glavni nosioci krila te platforme koje se nalaze u strukturi ispred vrata gdje su pričvršćene upornice krila. Motor je pričvršćen s četiri nosača na već spomenute platforme te na protupožarni zid. Spomenuta građa vidljiva je na slici 1.

Noseća struktura krila ovoga zrakoplova su ramenjače (prednja i stražnja) oko kojih su smještena rebra povezana međurebrenim ojačanjima (*stingers*). Cjelokupna struktura obuhvaćena je metalnom oplatom koja je za noseće elemente pričvršćena zakovicama. Praznine unutar krila imaju svrhu spremanja goriva za predviđeni let. [2]

Rep zrakoplova (*empennage*) ima oblik konvencionalnog repa što podrazumijeva horizontalni stabilizator pričvršćen za trup zrakoplova i vertikalni stabilizator s pripadajućim upravljačkim površinama. Osim konvencionalnog dijela repa na modelu C-172 prisutan je i dorsalni dio vertikalnog stabilizatora što dodatno pridonosi stabilnosti zrakoplova. Struktura repa se kao i kod krila sastoji od glave noseće ramenjače te rebara za koje je pričvršćena oplata zakovicama.

Upravljačke površine su konvencionalne strukture kao i kod većine zrakoplova što podrazumijeva krilca (*aileron*s) na krilima pozicionirane bliže vrhovima krila zbog stvaranja većih momenata oko longitudinalne osi, kormilo dubine (*elevator*s), koje je učvršćeno na horizontalni stabilizator te

stvara momente oko lateralne osi te kormilo smjera (*rudder*), čija je zadaća stvaranje momenta oko vertikalne osi, odnosno kontrola po pravcu leta. [2]



Slika 1. Konstrukcijski elementi zrakoplova, [3]

Upravljačke površine su konstrukcijski izvedene na način da glavna opterećenja nosi ramenjača a potpomažu je rebra te rebrasta oplata koja je spojena na stražnjem bridu upravljačke površine. Specifičan oblik aerodinamičke kompenzacije izveden kod repnih upravljačkih površina na ovome zrakoplovu je tzv. rogljasta aerodinamička kompenzacija. Spomenutu kompenzaciju karakterizira kormilo dubine koje se na vrhovima horizontalnog stabilizatora prostire bliže prednjem bridu aeroprofila te na taj način kompenzira silu koju pilot mora proizvesti na upravljač u kabini. S druge strane rogljasta kompenzacija kvari aerodinamička svojstva horizontalnog stabilizatora promatrajući ga kao krilo pa je s gledišta vibracija interesantna za promatranje o čemu će u kasnijim poglavljima biti riječ.

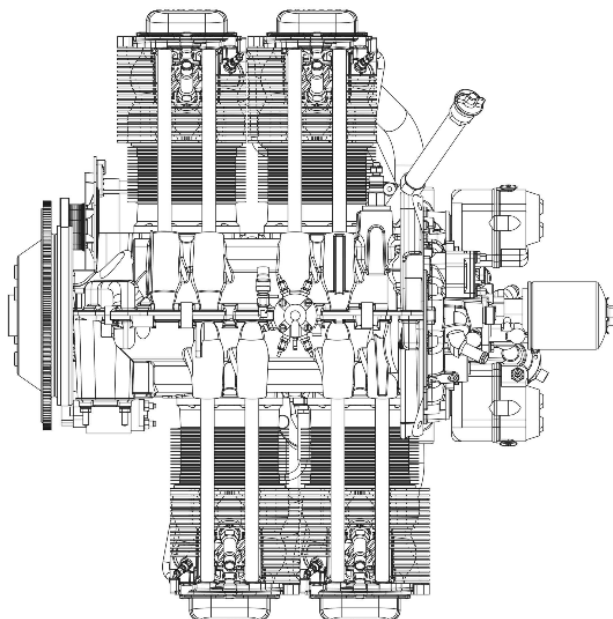
Zakrilca na zrakoplovu ovoga tipa su zakrilca s jednim procjepom upravljana elektroničkim aktuatorom. Maksimalni otklon u odnosu na tetivu aeroprofila iznosi ovisno od varijante modela od 30° - 45° . [2]

Stajni trap kod ovog zrakoplova je tricikl formacije. Zaslužan je za kompenzaciju velikog dijela vibracija tijekom voženja te zatrčavanja. Konstrukcija tricikl stajnog trapa podrazumijeva dva glavna kotača koja se nalaze iza centra mase dok je nosni kotač smješten ispod nosa zrakoplova tj. u prednjem dijelu trupa kako bi osigurao što veću upravljivost tijekom voženja ali i visoku stabilnost kod značajnijih deceleracija primjerice za usporavanje zrakoplova neposredno nakon

slijetanja. Prigušenje vibracija kod stajnog trapa na glavnim kotačima izvedeno je pomoću opružnih metalnih šupljih nosača dok je kod nosnog kotača prigušenje oscilacija u vertikalnoj ravnini izvedeno s ulje-zrak amortizerom. Za nosni kotač specifične su *shimmy* oscilacije sinusoidalnih oblika zbog čega je nosni dio stajnog trapa dodatno opremljen prigušivačem oscilacija u horizontalnoj ravnini zvanog *shimmy damper*. [2]

2.2. Pogonski sustav

Pogonski sustav zrakoplova C-172 je klipni motor s unutarnjim izgaranjem. Odabrani model za ovaj zrakoplov proizvod je proizvođača zrakoplovnih motora Lycoming. S obzirom da je zrakoplov u eksploataciji više od 60 godina, razvoj i unapređenja svih konstrukcijskih komponenata pa tako i motora traje od ulaska u eksploataciju pa sve do danas. [1] Lycoming je tokom godina proizveo više od 160 inačica zrakoplovnih klipnih motora koje su primjenjene na sve vrste zrakoplova, od lakih zrakoplova generalne avijacije, helikoptera pa sve do lakih vojnih zrakoplova. Neke od inačica su: O-360 (serija sa rasplinjačem), HO-360 (serija predviđena za ugradnju na helikoptere), LO-360 (inačica s koljenastim vratilom rotiranim suprotno od kazaljke na satu u svrhu ugradnje na višemotorne zrakoplove), TO-360 (serija s prednabijanjem). Na izabranom predstavniku zrakoplova, C-172 na kojem su provedena mjerenja za potrebe ovoga rada ugrađena je inačica motora IO-360. U svrhu boljeg razumijevanja razmještaja spominjanih komponenata u prilogu je slika 2. na kojoj je ilustrativni prikaz motora Lycoming IO-360 L2A iz tlocrta. [2]



Slika 2. Lycoming IO-360 L2A, [4]

Inačica spomenutog modela koja je detaljnije opisana je IO-360 L2A, zbog učestalosti i reprezentativnosti modela. IO-360 L2A je kao i svi ostali modeli ove porodice motora je bokser motor. [4]

Broj cilindara je također zajednički svim modelima C-172 i iznosi četiri, a radni obujam motora iznosi 361 kubičnih inča [in^3]. Cilindri su konvencionalni a izvedeni su iz dvije komponente, košuljice i glave cilindra koji na sebi imaju izvedene proreze u svrhu disipacije topline kroz strujanje vanjskog zraka. Promjer cilindra iznosi 5,125 in dok hod klipa iznosi 4,375 in. Koljenasto vratilo smješteno je u centru strukture, između dva cilindra a izvedeno je od kovanog čelika legiranog s molibdenom, kromom i niklom. Koljenasto vratilo prijenosnik je kinetičke energije klipova koji su preko klipnjače pričvršćeni za leteći rukavac koljenastog vratila. Klipovi su izvedeni od lijevanog aluminija koji ovisno o tipu mogu biti izvedeni s tri ili četiri klipna prstena sa zadaćama zadržavanja kompresije i skupljanja ulja po stjenki cilindra. IO-360 L2A ima mokri karter, koji se nalazi u najnižem dijelu motora te pohranjuje ulje za podmazivanje. U sklopu kartera nalaze se i ventili za dreniranje ulja, platforme za ugradnju rasplinjača ili sustava za ubrizgavanje ovisno o tipu motora. Motor je opremljen dvostrukim sustavom magneta proizvođača Bendix.

Motor je ograničen na 160 HP (117,7 kW) pri maksimalnih 2400 RPM dok je moguća izvedba s ograničenjem na 2700 RPM pri kojima razvija snagu od 180 HP (132,4 kW). Kompresijski omjer iznosi 8.5:1. Prijenos kinetičke energije rotacije koljenastog vratila na elisu se prenosi direktno bez redukcija pa i elisa tijekom svih režima leta ima jednak broj okretaja kao i motor. Elisa ima lijevo okretanje s gledišta pilota.

Masa motora uključuje rasplinjač ili sustav ubrizgavanja (skupa s gorivom koje ispunjava rasplinjač ili sustav ubrizgavanja u toku rada), starter generator, magneti, svjećice, uljne vodove, ispušni sustav te kontrole za upravljanje pogonskim sustavom. Navedena masa iznosi 278 lb, odnosno 126.4 kg što iznosi 11.3% ukupne maksimalne uzletne mase koja iznosi 2450 lb (1113.6 kg) što je bitan podatak gledajući sa stanovišta vibracija s obzirom da motor proizvodi vibracije na zrakoplovima s klipnim motorom. [5]

Gorivo koje se koristi u pogonskom sustavu je avionski benzin sa oktanskim brojem 91, 96 i 100LL, a karter zaprema maksimalnih 8 kvarata ulja. [2]

Propeler pomoću kojega motor stvara vučnu silu je propeler fiksnog koraka koji je izveden iz lijevanog aluminija u svrhu prigušenja vibracija. Promjer propelera je 75 in.

Uzevši u obzir činjenicu da su ispravno održavanje i redovite provjere komponenata zrakoplova u eksploataciji ključni elementi sigurnosti letenja valja spomenuti i sustav održavanja pogonskog sustava zrakoplova C-172. Održavanje je podijeljeno u nekoliko pregleda različitih opsega koji slijede. [5]

Dnevni predpoletni pregled koji se obavlja prije svakog leta ili prije prvog leta u danu od presudne je važnosti za svaki let zbog toga što pilot ili tehničar, odnosno ovlaštena osoba u spomenutom pregledu pregledava elemente koji su esencijalni za sigurnost letenja.

Spomenuti pregled obuhvaća sljedeće: provjeru ulja, provjeru goriva u spremnicima, dreniranje goriva iz spremnika u svrhu odstranjivanja potencijalno kondenzirane vode te nečistoća koje mogu naštetiti gorivnom sustavu, provjeru vodova ulja u sustavu te osiguravanje nepostojanja curenja, pregled kaputaža (*engine cowling*) skupa s filterima zraka vidljivima s vanjske strane. [5]

Održavanje zrakoplova obuhvaća bazne preglede u intervalima po 50 sati u vidu 50-satnog, 100-satnog i 400-satnog pregleda.

Pedeset-satni pregled zahtijeva preglede poput pregleda svijećica, inspekcije cilindara, te pregled potencijalnih mjesta curenja na cilindrima, nasjedanja rasplinjača na ležište, kao i zamjenu filtera ulja skupa s uljem.

Sljedeći u nizu 100-satni, još većeg obujma od prethodnog uključuje sve prethodne radnje održavanja uz dodatak provjere električnih sustava, detaljan pregled magneta te pregled pumpi, senzora i sl. [5]

Četiristo-satni pregled kao najobuhvatniji pregled obuhvaća dosad navede elemente pregleda te provjeru zazora ventila kada su u zatvorenom položaju kao i nasjedanje opruga ventila na predviđena sjedišta opruga. Spomenuti raspored održavanja pogonskog sustava je uobičajen i organizacije za održavanje prema regulativama ne odstupaju znatno od uobičajenog rasporeda. No ipak postoje iznimke kada se osim pregleda po rasporedu mogu izvesti i neplanirani pregledi koji je najčešće provode primjerice zbog novo izdanih servisnih biltena ili izvanrednih događaja u letu pa se zahtijeva pregled određenog sustava na motoru kako bi se osigurala daljnja sigurnost u provedbi letenja. [5]

Važno je spomenuti kako je TBO (*time between overhaul*) ili vrijeme između generalnog remonta za ovaj pogonski sustav iznosi 2000 sati ili 12 godina, nakon čega se provodi detaljan pregled te remont i/ili zamjena komponenata sustava cjelokupnog motora. [5]

2.3. Tehničko-eksploatacijske karakteristike C-172R

C-172R je predstavnik zrakoplova izabran za mjerenje vibracija. Točnije, mjerenja će se provoditi na zrakoplovu 9A-DAD koji je u vlasništvu Fakulteta prometnih znanosti, Sveučilišta u Zagrebu. Zrakoplov je namijenjen za školovanje studenata Fakulteta koji studiraju na preddiplomskom studiju Aeronautike, smjer Pilot, usmjerenje Civilni pilot. Tehničko-eksploatacijske karakteristike zrakoplova C-172R vidljive su u tablici 1.

Tablica 1. Tehničko-eksploatacijske karakteristike zrakoplova C-172R

Značajka	Vrijednost
Duljina:	8.28 [m]
Raspon krila:	11 [m]
Visina:	2.71 [m]
Aeroprofil:	NACA 2412
Površina krila:	16.2 [m ²]
Aspektni odnos:	7.32
Maksimalna uzletna masa:	2450 [lb], 1111 [kg]
Kapacitet goriva:	56 [US gal], 212 [l]
Pogonski sustav:	Lycoming IO-360-L2A
Elisa:	Dva kraka
Brzina krstarenja (IAS):	122 [kt], 226 [km/h]
Maksimalna brzina: (IAS)	160 [kt], 302 [km/h]
Operativni plafon leta:	13500 [ft]
Broj članova posade:	1
Broj putnika:	3

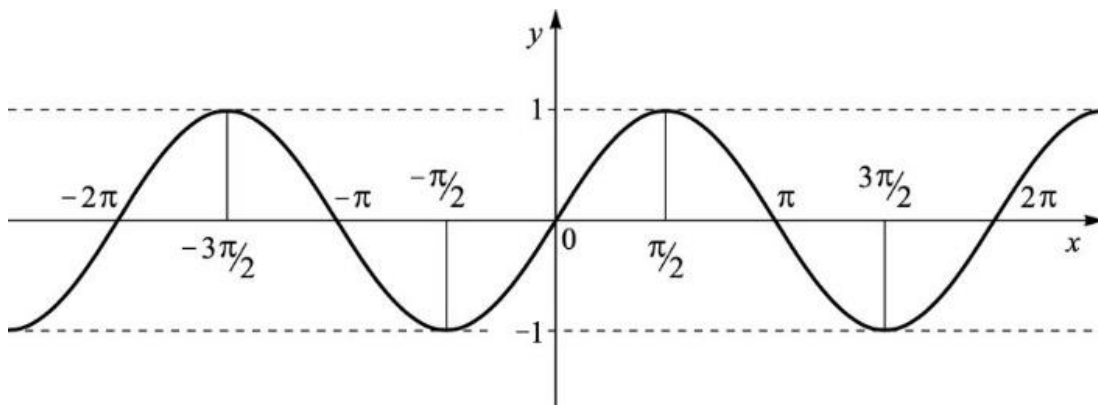
Izvor: [2]

3. Uzroci i pojava vibracija na zrakoplovu

U ovom poglavlju opisano je harmonijsko titranje, vibracije s jednim stupnjem slobode te izvori vibracija na predstavniku zrakoplova. Vibracije su u općem smislu periodička kretanja koja se svojim karakterističnim obilježjima ponavljaju u određenom vremenskom intervalu. Vibracije se u mehaničkim sustavim pojavljuju uslijed djelovanja vanjske sile ili otklona elemenata sustava iz ravnotežnog položaja. Jednom kada je sustav pomaknut iz stanja ravnoteže potencijalna energija sustava pretvara se u kinetičku što rezultira relativno malim, periodičkim pomacima sustava koji mogu biti s prigušenjima ili u idealnim slučajevima bez njih. [6]

3.1. Harmonijsko titranje

Promatrajući titrajne sustave najjednostavnija vrsta periodičkih kretanja su harmonijska titranja pa će se stoga na njima objasniti osnovne veličine korištene u kinematskim sustavima vibracija. Spomenuto harmonijsko titranje prikazano je na slici 3. Harmonijsko titranje izraženo je jednačbom 3.1 koja će sustavu dati udaljenost od ravnotežnog položaja tj. pomak izražen x u ovisnosti od vremena izraženog t . [7]



Slika 3. Sinusoida, [6]

Jednačba pokazuje primjerice gibanje matematičkog njihala oko ravnotežnog položaja. U jednačbi x_0 označava maksimalni otklon čestice od ravnotežnog položaja koji se u praksi naziva amplituda. S obzirom da je spomenuto kako su vibracije periodički pomaci odnosno kretanja čestice ili dijelova sustava važno je za spomenuti period T koji označava vrijeme koje je potrebno da čestica napravi svoj karakterističan pomak odnosno ciklus.

Slika 3. prikazuje sinusoidalno titranje kojem je period titranja T jednak 2π . Period se obično mjeri u sekundama [s] a recipročna vrijednost perioda je frekvencija tj. učestalost f čija je mjerna jedinica Herc [Hz]. [7]

$$x = x_0 \sin \omega t \quad (3.1)$$

Član ω u jednadžbi označava kružnu frekvenciju čije se vrijednosti izražavaju u radijanima po sekundi [rad/s]. Veza između kružne frekvencije ω , frekvencije f i perioda titraja T može se izraziti jednadžbom: [6]

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3.2)$$

Jednadžba pokazuje da će vibracija tokom jednog punog perioda ukoliko ima veličinu ωt napraviti puni okret od 360° odnosno izraženo u radijanima, 2π . S obzirom na izrečeno, kada ωt iznosi 2π vrijeme t jednako je periodu T . Kod strojeva sa okretnim dijelovima frekvencija se može izraziti u okretajima po minuti što znatno pojednostavljuje razumijevanje s obzirom da se radi o rotirajućem sustavu poput koljenastog vratila klipnih motora, kompresora ili turbine mlaznih motora ili pak rotora generatora. [6]

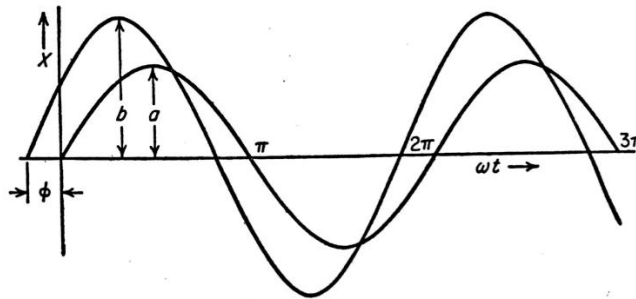
Kada se želi prikazati brzine kojim čestica titra u harmonijskom titranju derivira se jednadžba pomaka (3.1) po vremenu te se dobiva jednadžbu brzina harmonijskog titranja (3.3).

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = x_0 \omega^2 \cdot \cos \omega t \quad (3.3)$$

Dvostrukim deriviranjem pomaka, odnosno deriviranjem brzine u harmonijskom titranju dobiva se jednadžba akceleracija (3.4) u harmonijskom titranju što značajno za mehaničke sustave s obzirom da se ograničenja naprezanja mnogih mehaničkih sustava izražavaju u tzv. G opterećenju tj. u opterećenju akceleracije sustava.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x} = -x_0 \omega^2 \cdot \sin \omega t \quad (3.4)$$

Promatrajući sliku 4. na grafikonu vidljive su dvije sinusoidalne krivulje koje možemo opisati jednadžbama $x_1 = a \sin \omega t$ i $x_2 = b \sin(\omega t + \varphi)$. Dvije krivulje imaju različite iznose maksimuma odnosno amplituda no također amplitude ne dostižu svoju maksimalnu vrijednost otklona od ravnotežnog položaja. Njihovi maksimumi se razlikuju za φ/ω sekundi zbog čega veličinu φ nazivamo faznim pomakom. [6]



Slika 4. Fazni pomak, [6]

Veličina koja je značajna za mnoge primjene u mehaničkim sustavima vezano uz vibracije je određivanje rada izvršenog na harmonijskom titranju primjenom promjenjive sile. Ako se prepostavi da je vibracija zadana jednadžbom (3.1), na nju djeluje sila F čije se djelovanje može iskazati izrazom $F = F_0 \sin(\omega t + \varphi)$. Rad ove sile može se dobiti kao diferencijal sile F po dx . Integral koji je potrebno riješiti je sljedeći:

$$\int_0^{2\pi} P \frac{dx}{dt} \quad (3.5)$$

Rješavanjem jednadžbe dobiva se jednadžba rada koji vrši sila u harmonijskom titranju i ona glasi:

$$W = \pi P_0 x_0 \sin\varphi \quad (3.6)$$

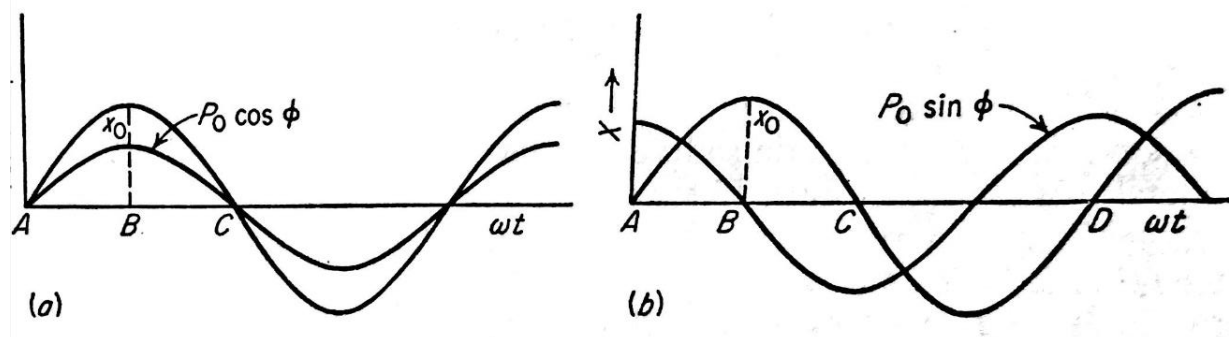
Za lakše razumijevanje veze sila i rada slučaj će se objasniti grafički na primjeru slike 5. Silu F_0 će se rastaviti na dvije komponente $F_0 \sin\varphi$ i $F_0 \cos\varphi$. Komponente su međusobno u faznoj razlici od 90° što je zapravo geometrijsko zbrajanje vektora. Promatrajući prvi slučaj na slici 5. sila je u fazi sa harmonijskim gibanjem čestice. Slučaj od A do B na prvom slučaju na slici prikazuje pozitivan iznos sile, a tijelo se udaljava od ravnotežnog položaja tj. vrijednost varijable x raste stoga je i rad pozitivan. Nadalje u slučaju od točke B do C sila i dalje ima pozitivan iznos iako negativnog gradijenta dok rad ima negativan predznak. Radovi oba dijela kretanja kada se zbroje, zbog suprotnih predznaka i jednakih iznosa daju rad jednak nuli. Dakle može se zaključiti da kada je komponenta sile u fazi sa gibanjem sustava rad koji daje spomenuta komponenta sile jednaka je nuli. No kada promatramo drugi slučaj sa slike 5. vidimo da komponenta sile i harmonijsko gibanje nisu u fazi, tj. postoji određeni fazni pomak tada slučaj od A do B ima pozitivnu orijentaciju i istu orijentaciju kretanja što daje pozitivan rad, a od B do C sila je usmjerena naniže zbog čega ju se označava negativnom dok je i rad također negativan zbog kretanja čestice naniže. Kada se zbroje radovi u ova dva dijela tj. u ovom poluperiodu dobiva se dvostruki iznos rada. Može se reći da se u cijelom periodu izvršio četverostruki rad od točaka A do D. Kao zaključak možemo navesti kako

komponente sile koje su u fazi sa gibanjem daju iznos rada nula, dok komponente sile koje su u faznom pomaku za 90° daju maksimalni rad u sustavu. [6]

Rad će se izraziti pomoću jednadžbe:

$$W = \int F dx = \int F \frac{dx}{dt} dt = \int Fv dt. \quad (3.7)$$

Uvrštavanjem perioda u granice integrala i jednadžbu sile $F = (F_0 \sin \varphi) \cos \omega t$ te jednadžbu brzine $v = x_0 \omega \cos \omega t$ u početnu jednadžbu dobivamo jednadžbu koja rješavanjem daje istu jednadžbu rada (3.6) već prethodno spomenutu. [6]



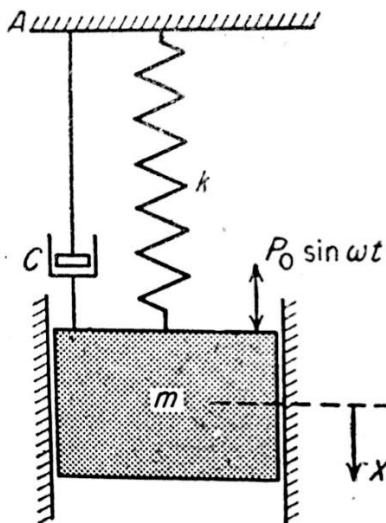
Slika 5. Dijagram komponentata sile sa harmonijskim gibanjem, [6]

3.2. Sustavi s jednim stupnjem slobode

Ukoliko je neki sustav opisan kao sustav s jednim stupnjem slobode može se reći da je položaj toga sustava odnosno komponentata toga sustava moguće opisati jednim brojem tj. jednom koordinatom. Primjerice klip u cilindru motora je tipičan primjer mehaničkog sustava s jednim stupnjem slobode zbog toga što se položaj klipa u cilindru u potpunosti može opisati jednom koordinatom u svakom dijelu hoda klipa. Koordinata koju će se koristiti da definiranje položaja klipa je primjerice udaljenost čela klipa od gornje mrtve točke. Također, kao reprezentativan primjer može se uzeti i koljenasto vratilo čija se pozicija opisuje kutom koji je vratilo zatvara s pozicijom koje je imalo na početku prvog takta četverotaktnog ciklusa. Motor s više cilindara sagledan kao cjelina može također biti vibracijski sustav s jednim stupnjem slobode s obzirom da su svi položaji komponentata definirani položajem koljenastog vratila, no ukoliko je motor ovješten na elastične opruge kao što jest u realnoj eksploataciji tada motor ima sedam stupnjeva slobode, šest stupnjeva kao neovisno tijelo u prostoru (tri translacije i tri rotacije) te jedan stupanj kojeg definira kutom koljenastog vratila. [6]

Kako bi se riješio problem vibracijskih sustava odnosno vibracija uopće promatrati će se sustav koji je prikazan na slici 6. Na slici se nalazi sustav u kojem je masa ovješena oprugom za nepomičnu plohu. Krutost opruge definirana je koeficijentom k koji se još naziva i konstantom opruge. Konstanta opruge definira se kao broj jedinica težine (sile) koju treba proizvesti kako bi se opruga izdužila za jednu jediničnu dužinu. Nepomičnu plohu i ovješenu masu kao što se vidi na slici osim opruge povezuje i uljni/zračni mehanizam tj. klip za kojega će se pretpostaviti da ne prenosi nikakvu silu na masu sve dok je masa u miru. Kada se masa počinje kretati javlja se sila prigušenja koja je jednaka umnošku koeficijenta prigušenja c i prvog diferencijala pomaka x . Za silu prigušenja može se reći da je proporcionalna s obzirom na spomenutu jednakost te suprotno usmjerena od vektora brzine. Na masu djeluje vanjska sila koja nastaje uslijed rada mehaničkih sustava čiji oblik se može opisati izrazom $F = F_0 \sin \omega t$ koji je objašnjen u poglavlju 3.1.

Računom se želi odrediti kretanje čestice u sustavu koje nastaje usred djelovanja spomenute sile odnosno dobiti jednadžbu kretanja mase u funkciji vremena. Uvesti će se pretpostavka da je sila pozitivna ukoliko je orijentirana nadolje.



Slika 6. Sustav s jednim stupnjem slobode, [6]

Sila prigušenja $c\dot{x}$ prikazana je u jednadžbi 3.8 negativno zbog toga što djeluje u suprotnom smjeru kada masa putuje prema dolje. Kako je već spominjano koeficijent prigušenja množi se s diferencijalnom pomaka s obzirom da je proporcionalna brzinom mase m . Nadalje sila cx opruge ima također negativan predznak zbog suprotnog djelovanja sile kod gibanja mase. Sile koje su analizirane po predznacima tj. orijentacijama djelovanja, po Drugom Newtonovom zakonu uvrštene su u jednadžbu (3.7). [6]

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = m\ddot{x} = -kx - c\dot{x} + F_0 \sin \omega t \quad (3.8)$$

Jednadžba sređivanjem daje diferencijalnu jednadžbu kretanja sustava s jednim stupnjem slobode koja uključuje inercijalnu silu, silu prigušenja, silu opruge ili elastičnu silu te poremećajnu vanjsku silu.

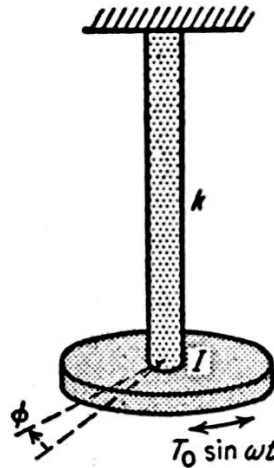
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin\omega t \quad (3.9)$$

Osim vibracijskog sustava koji je objašnjen u ovom poglavlju valja spomenuti i druge sustave kod kojih je moguće primijeniti diferencijalnu jednadžbu kretanja sustava s jednim stupnjem slobode. S obzirom da će se u radu uvelike spominjati vibracije koje proizvodi motor spomenuti ćemo i sustav sa diskom i torzijskim vratilom te analizirati vibracijsku jednadžbu s obzirom da komponente poput koljenastog vratila stvaraju takve oscilacije.

U tom slučaju promatra se disk s momentom inercije I koji je ovješten na čvrsto vratilo. Vratilo ima torzionu krutost k koja se opisuje pomoću momenta koji je potreban da proizvede uvijanje od jednog radijana. Kao i kod prethodnog slučaja tri momenta koja djeluju na disk: moment opruge $k\varphi$, moment prigušenja $c\dot{\varphi}$, i vanjski moment. Uz navedene momente prema Drugom Newtonovom zakonu slijedi konačna jednadžba (3.10) koja ima isti oblik kao i (3.9) samo sa prilagođenim veličinama primjerenim za slučaj na slici 7. [6]

$$I\ddot{\varphi} + c\dot{\varphi} + k\varphi = T_0 \sin \omega t \quad (3.10)$$

Osim dva slučaja prije spominjana jednadžba vibracija može se primijeniti i na sustave električne struje koji sadrže generatore izmjeničnog napona no zbog manjeg značaja za određivanje vibracija na zrakoplovu sa klipnim motorom neće biti dalje obrađene.



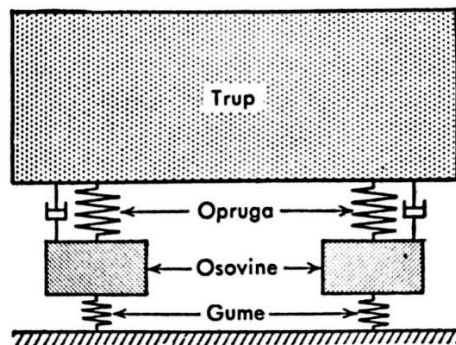
Slika 7. Sustav sa torzijskim momentom, [6]

3.3. Uzroci vibracija na predstavniku zrakoplova

Daljnja poglavlja koja teoretski obrađuju izvore vibracija na zrakoplovu s klipnim motorom neće biti obrađene prema stupnjevima slobode već će biti objašnjene i obrađene prema izvorima vibracija primjenama koje su osmišljene i instalirane na zrakoplovu kao prigušivači vibracija na sustavima zrakoplova.

3.3.1. Vibracije i suspenzija stajnog trapa

Kao što se vidi u naslovu poglavlja problematiziraju se vibracije nastale vanjskim poremećajima vožnje zbog neravnina podloge i sl. O konstrukciji stajnog trapa na zrakoplovu C172 R bilo je riječi u prethodnom poglavlju kada je opisana konstrukcija. No za bolje shvaćanje i ilustraciju opisan će se detaljnije suspenzija nosnog kotača. Nosni kotač kao i ostale komponente sustava stajnog trapa projektiran je da trpi udare vanjskih sila te tako štiti cjelokupnu konstrukciju kao i instrumentaciju zrakoplova. Izveden je iz dva cilindra koja su na svojim krajevima zatvorene i ispunjene kombinacijama hidrauličkog fluida i plinova poput komprimiranog zraka ili dušika koji je izabran zbog svoje stabilnosti. Donji cilindar pričvršćen za osovinu kotača iako nije konstruiran kao klip ponaša se i vrši funkciju klipa te ulazi u gornji klip. Donji cilindar koji je pričvršćen za osovinu kotača ispunjen je hidrauličkim fluidom dok je gornji cilindar koji je pričvršćen za trup ispunjen plinom. Cilindri su povezani relativno malim otvorom kroz kojega, kod vanjske sile tj. kod udara npr. slijetanja, fluid sa donjeg cilindra ulazi u gornji. Kod takvih slučajeva apsorbira se velika količina energije koja se manifestira kroz toplinu zbog čega osim elastične i hidrauličke komponente suspenzije imaju i disipacijsku komponentu. Kada suspenziju sagledamo kao vibracijski sustav uočava se nekoliko različitih masa te konstrukcija koje će se pojednostavljeno nazvati opruge s obzirom da imaju za zadaću da upijaju vanjske sile u potencijalnu elastičnu energiju. [6]



Slika 8. Shema sustava sa amortizerima i dvije osovine, [6]

Dakle, ako se promotri sustav s četiri kotača, vidljivo je na slici 8 da postoje četiri gume koje zasebno u ovom slučaju djeluju kao opruga te dodatno, amortizeri koji djeluju kao opruge pa je tu prisutno zapravo osam različitih opruga. Kako je to i prije definirano svako kruto tijelo ima u prostoru tri translacije i tri rotacije. Nadalje u spomenutom sustavu prisutne su tri mase; glavna masa primjerice zrakoplova, te mase osovina što ukupno čini tri mase sa spomenutih šest stupnjeva slobode pa se može reći da takav sustav ima 18 stupnjeva slobode što ga čini veoma kompleksnim. [6]

No za bolje shvaćanje sustava vibracije su reducirane samo na najbitnije vibracije koje imaju najveći utjecaj na sustav. Sljedeće vibracije su: vibriranje u vertikalnoj ravnini s fiksnom osi, njihanje trupa oko lateralne osi s gotovo fiksnim osovinama, vibracije u vertikalnoj ravnini na elastičnim gumama te ljuhanje osovina na malim pomacima tijela. U praksi su frekvencije, prve spomenute vibracije i druge približno slične pa se njihovo djelovanje može ujediniti pod jednu vibraciju koja vibrira frekvencijom približno 1 Hz. Sukladno tome treća i četvrta vibracija također ima približno istu frekvenciju iznosa od oko 6 Hz. Kako je suodnos frekvencija jedne prema drugoj šest puta veći niti će oscilacije od 1 Hz utjecati na vibracije osovine niti će vibracije od 6 Hz utjecati na vibracije trupa odnosno njegovu harmonijsku silu.

Rezonancija kod ovih frekvencija nastupaju primjerice kada se sustav giba po površini koja ima razmaknute neravnine na cesti tako da pri određenoj brzini vibracije rezoniraju s njihanjem tijela oko lateralne osi. Spomenuto rezultira poprilično neugodnim vibracijama koje osim neudobnosti za konstrukciju predstavljaju popriličan problem s obzirom na to da određeni intenzitet vibracija može oštetiti elemente konstrukcije. Spoznaja o rezonanciji u danom slučaju zahtjeva rješenje koje se nameće u obliku viskoznog prigušivača koji je komponenta uz elastični dio kako je i opisano prije u konstrukciji samih amortizera koji su specifični za sustave na zrakoplovu predstavniku klipne pogonske grupe. Viskozna komponenta amortizacije sustava funkcionira tako da se fluid kreće kroz otvore koji stvara silu suprotne orijentacije u odnosu na relativnu brzinu kretanja što prigušuje oscilacije i povećava udobnost u ovom slučaju voženja ili zatrčavanja isto kao što i štiti ostale sustave kojima vibracije ometaju normalan rad. [6]

Osim spomenutih vibracija na stajnom trapu specifična vibracija se javlja na nosnom kotaču kod zrakoplova koji imaju jedan kotač na prednjem djelu stajnog trapa. Podrhtavanje se javlja oko vertikalne osi kotača i javlja se u obliku zakretnog pomaka koji rezultira time da kotač ima sinusoidalnu putanju a time i značajna naprežanja koja s vremenom generiraju zamor materijala.

Slučaj se rješava ugradnjom viskoznog torzijskog klipa koji sukladno prigušuje kretnje okretanja oko vertikalne osi što je slučaj kod zrakoplova C-172R. Kod većih zrakoplova slučaj se rješava ugradnjom dva kotača kod nosne komponente stajnog trapa koji su povezani osovinom. Pod uvjetom da se vrte istom brzinom, sa čvrstom podlogom stvaraju određenu silu trenja pa time i prigušuju spomenute vibracije.

3.3.2. Vibracije na klipnom motoru

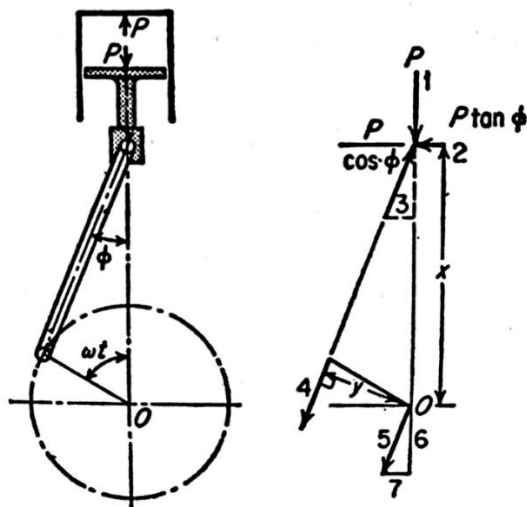
Elisno-klipna zrakoplovna pogonska skupina u osnovi svoga rada sadrži pokretne dijelove koji su konstrukcijski izvedeni tako da kemijsku energiju goriva tj. u ovom slučaju benzina pretvaraju u toplinsku energiju koja se specifičnom izvedbom sustava motora prevodi u kinetičku energiju koljenastog vratila odnosno u okretaje elise na posljetku. Klipni motor podrazumijeva pokretne dijelove koji periodički osciliraju i imaju pripadna ubrzanja u pravocrtnom gibanju ili u rotacijskom gibanju.

Glavne dvije skupine vibracija koje valja spomenuti su one koje motor prenosi kao cjelina na nosače motora odnosno pojednostavljeno na konstrukciju zrakoplova te torzijske vibracije koje nastaju uslijed gibanja okretnih dijelova motora primjerice koljenastog vratila. Zbog jednostavnosti primjera uzeti će se u obzir motor s jednim cilindrom. Klip obavlja svoju zadaću na način da se harmonijski kreće unutar cilindra tj. provodi harmonijska ubrzanja unutar cilindra. Sukladno tome kada se klip giba u jednome smjeru primjerice prema gornjoj mrtvoj točki mora postojati sila koja djeluje na klip u istome smjeru. Iz toga proizlazi misao da se takvoj sili suprotstavlja sila reakcije koja ima suprotnu orijentaciju. Prema tome s obzirom na spreg sila nastalih harmonijskim ubrzanjima klipa kao i sile reakcije osjeća se na nosačima motora koja se dalje prenose na trup i ostale elemente konstrukcije zrakoplova. Isto tako, kada se razmotri os okomito orijentiranu na koljenasto vratilo uočava se tzv. horizontalna neuravnoteženost koja se javlja uslijed ubrzanja rotirajućih komponenata motora kao što su koljenasto vratilo, zamašnjak, bregasto vratilo itd. [6]

Najznačajnije inercijske sile koje se uslijed ubrzanja pokretnih dijelova prenose na one nepokretne su (slika 9.):

1. Sila P koja djeluje na glavu cilindra
2. Sila $P \operatorname{tg} \varphi$ koja djeluje na osovinicu
3. Sila P koja djeluje na leteći rukavac
4. Sila $P \operatorname{tg} \varphi$ koja djeluje također na leteći rukavac, pod pravim kutem u odnosu na silu P

Uslijed spomenutih sila na motoru se konačno pojavljuju u poprečnom (poprečno na radilicu) i u vertikalnom pravcu inercijske sile te inercijski spregovi dok se oko uzdužne osi (paralelne s koljenastim vratilom) ne pojavljuju sile već inercijski spregovi.

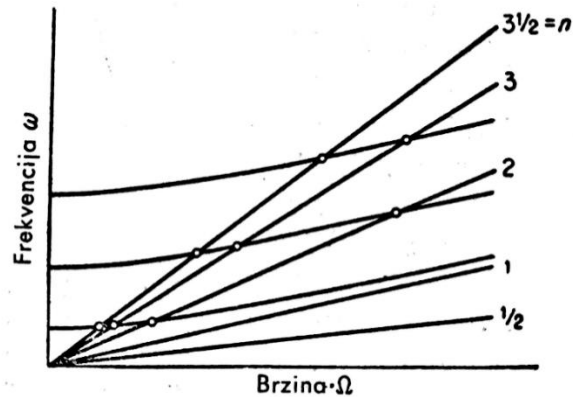


Slika 9. Sile na konstrukcijske elemente motora, [6]

3.3.3. Vibracije elise

Tijekom povijesti razvoja zrakoplova u jednom se trenutku drvo kao glavni konstrukcijski materijal počeo zamjenjivati metalima a kasnije i legurama povoljnijih fizikalnih i kemijskih svojstava. Prelazak s elise drvene konstrukcije na metalnu elisu dovelo je do problema s puknućima elisa tokom leta. Daljnjim analizama utvrđeno je da kod materijala korištenih za konstrukciju elisa dolazi do zamora materijala uslijed naprezanja. Spomenuto dovodi do puknuća elemenata konstrukcije u letu što može rezultirati ozbiljnim incidentima ili krajnje nesrećama. S obzirom da je glavni razlog oštećenja na materijalu zamor valja detaljnije proučiti vibracije na materijalu koje će razjasniti nastajanje spomenutog zamora. [6]

Izvor vibracija na lopaticama su torzijski impulsi čiji je izvor koljenasto vratilo motora koje je više ili manje izravno spojeno na elisu pa se i na elisi javljaju isti impulsi. Prema slici 10. na kojoj su prikazani odnosi frekvencija i kutnih brzina vidljive su dvije skupine krivulja to su hiperbole koje prikazuju veze između frekvencija lopatica i rotacije dok su pravci koji izlaze iz ishodišta koordinatnog sustava veza između poremećajnih frekvencija i brzine lopatica. Sjecišta spomenutih krivulja i pravaca su rezonantne brzine.



Slika 10. Suodnos frekvencija i brzina elise, rezonantne brzine, [6]

Za razliku od idealnog slučaja kod kojega se lopatice skupa sa glavčinom rotiraju u ravnini u stvarnosti treba uzeti u obzir i oscilacije koje se događaju zbog neuravnoteženosti motora tj. oscilacije karakteristične za uzdužnu os motora tj. gledano sa stajališta elise poprečne oscilacije. Ukoliko postoji zazor kod elemenata ležaja koji su povezani sa koljenastom osovinom ili ukoliko koljenasto vratilo ima određenu savitljivost promjenjivi torzijski moment uslijed paljenja cilindara može dovesti do kretanja same osovine a time i nepomičnih dijelova pa tako i ležajeva blizu glavčine što rezultira oscilacijama na lopaticama elise.

Poprečne sile se također javljaju uslijed prolaska elise pokraj krila s obzirom da je elisa najčešće konstrukcijski ugrađena na motor ispred krila. Brzine neposredno ispred krila razlikuju se od onih u neporemećenoj struji zraka pa se i tu nameće periodička oscilacija u brzini odnosno konačno i poprečna oscilacija na elisi. Ovakav slučaj nije specifičan kod predstavnika jednomotornog zrakoplova s klipnim motorom već je mogući kod višemotornog zrakoplova kod kojeg su elise odnosno motori ugrađeni na krilo a ne na trup zrakoplova. [6]

Ipak moguće je spriječiti značajne oscilacije elise s pripadnim postupcima. Ukoliko zahtjevi za sustav u eksploataciji ne iziskuju promjene brzine jednostavno se može operativna brzina elise projektirati tako da se razlikuje od kritične brzine te ima zaštitni raspon brzine izvan čijeg raspona su brzine sigurne. Ukoliko pak elisa ima širok spektar operativnih brzina što je slučaj na zrakoplovnoj elisi tada se uključuju u konstrukciju prigušivači torzijskih vibracija kao što su Lanchesterov prigušivač, centrifugalno njihalo ili pak fluidni zamašnjak. [6]

3.3.4. Aerodinamičke vibracije

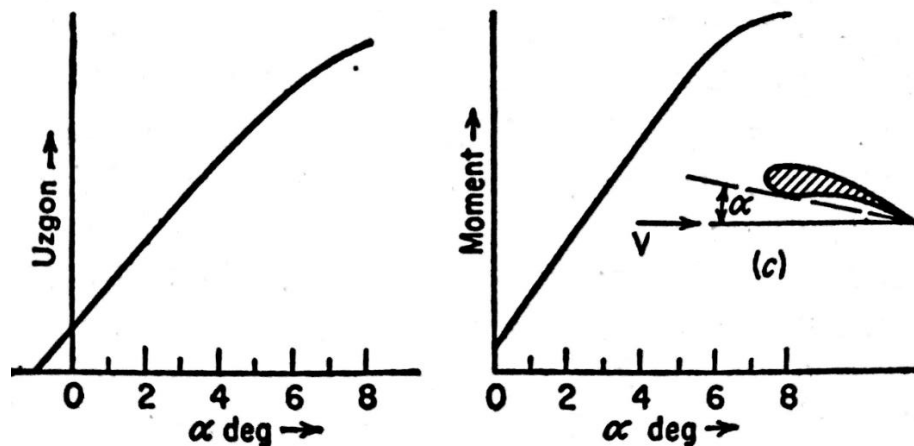
Uzgon pomoću kojeg zrakoplov leti stvara se nastrujavanjem zraka oko krila. Spomenutim nastrujavanjem zraka na krilo, stvaraju se tlakovi koji djeluju neposredno na konstrukciju krila te na posljetku stvaraju uzgon. Uzevši u obzir činjenicu da se zrakoplov kreće kroz zrak koji se kreće nije savršeno miran niti su kretanje zrakoplova koje pilot proizvodi putem upravljačkih površina jednolike pa se na krilu mogu očekivati oscilacije. O konstrukciji krila više je rečeno u poglavlju 2.1. Korištenje zrakoplova u eksploataciji pokazalo je da krilo pri specifičnim brzinama strujanja, koje su razmjerno velike dolazi do podrhtavanja krila odnosno treperenja što se još naziva i *flutter*. [6]

Vrsta tzv. treperenja koja se češće javlja kod avionskog krila jest ona koja se događa pri malim napadnim kutovima te većim dozvučnim ili krozvučnim brzinama.

Naizgled krilo tijekom spomenute vibracije oscilira u jednoj ravnini (gore-dolje), no samo naizgled, pa zaključak da se radi o sustavu sa jednim stupnjem slobode je netočan. Kada se pomno promotri kretanje krila osim kretanja krila u vertikalnoj ravnini krilu se dodaje još jedno kretanje a to je ono oko lateralne osi odnosno ono kod kojega se javljaju torzijska naprezanja. Da bi se opisalo stanje sustava tijekom vibracije odnosno riješio problem vibriranja sustava mora se koristiti model rješavanja slučaja sa dva stupnja slobode.

Izvor energije za ove vibracije na krilu je struja zraka koja u odnosu na položaj krila tj. kut između slobodne struje zraka i tetive aeroprofila stvara određenu silu na aeroprofil a na posljetku i na krilo. Za određeni napadni kut krilo proizvodi određenu silu uzgona kako je već poznato ali s time i proizvodi određeni moment te uvija krilo određenim intenzitetom. Moment uvijanja krila mijenja položaj krila u odnosu na struju zraka odnosno napadni kut što rezultira promjenom i uzgona i momenta za pripadni slučaj što pod utjecajem slobodne zračne struje koja uvodi dodatnu energiju u sustav donosi vibracije mogu biti opasne po strukturu krila.

Ako se uzme konkretan slučaj da kada se krilo giba na više od ravnotežnog položaja da je napadni kut veći nego za kretanje niže od ravnotežnog položaja može se reći da slobodna struja unosi energiju te potiče vibracije sustava. Ako se pak dodaju i momenti koji proizlaze iz pripadnih kretanja tj. momenti koji svojim djelovanjima povećavaju napadni kut utjecaj vibracija se povećava, što se vidi i iz slike 11. [6]



Slika 11. Graf koeficijenta uzgona i momenta u odnosu na napadni kut, [6]

Osim oscilacija krila kao krute cjeline *flutter* na krilu se javlja i u kombinaciji sa eleronima koji svoystvenoj vibraciji daju specifičan i značajan doprinos. Eleron je zaseban aeroprofil koji je pričvršćen za krilo tako da je pomičan odnosno da se zakreće oko pričvršćene osi sa jednim stupnjem slobode. Uslijed vibracija krila, s obzirom da je eleron pričvršćen za krilo, oscilira s krilom iz razloga što se centar težišta elerona ne poklapa s osi oko koje se eleron kreće. Također eleron je kontroliran od strane pilota pomoću komandi koje su u ovom slučaju metalne žice koje imaju određeni elasticitet pa ih se smatra oprugom. Spomenute opruge daju eleronu specifičnu frekvenciju oscilacije koja može biti u fazi sa oscilacijom cijelog krila ili pak pomaknuta za 90° što će nepovoljno djelovati na krilo. Ukoliko se dogodi fazni pomak od 90° između dvije vibracije to znači da će se krilo u pomaku na gore od ravnotežnog položaja prouzrokovati pomak elerona prema gore što će generirati uzgon na gore što će dodatno destabilizirati krilo i pojačati vibracije. Takav problem se rješava uvođenjem mase ispred osi zakretanja elerona što dovodi centar mase u os zakretanja što uobičajeno dovodi do stabilizacije u kritičnim situacijama. Nadalje, ako se eleron zamisli kao greda sa utezima na krajevima grede kada se eleron postavi na stvarno krilo amplitude vibracija su na većoj udaljenosti od centra zakretanja veći pa su i inercijalne sile utega na krajevima elerona različite, pa je cilj da se konstrukcijski tijekom projektiranja ostvari ideja da os zakretanja elerona postane jedna od glavnih inercijskih osi. [6]

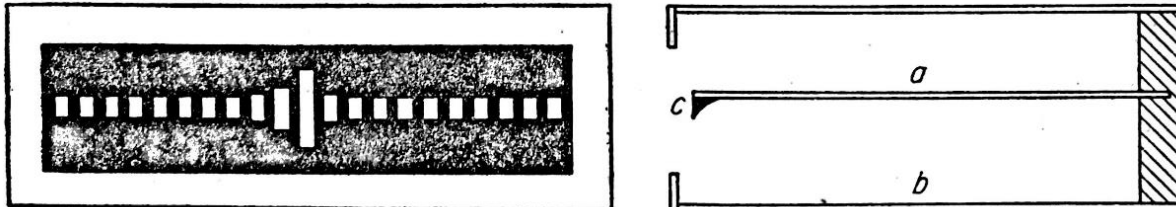
4. Mogućnost mjerenja vibracija na zrakoplovu u eksploataciji

U ovom poglavlju će biti prikazani instrumenti kojima se bilježe vibracije, te principi njihova funkcioniranja skupa s primjenama. Projektiranje zrakoplova zahtjeva detaljne proračune vibracija elemenata konstrukcije kako bi elementi činili funkcionalnu i dugotrajnu cjelinu bez oscilacija koje mogu prouzročiti oštećenja na strukturama. Nakon projektiranja zrakoplov ulazi u eksploataciju i letačke operacije nakon kojih slijedi održavanje kao neizbježan dio eksploatacije.

Tijekom mjerenja vibracija pripadnom instrumentacijom zadaća je da se očita jedna ili više veličina koje određuju vibracije s pripadnim karakteristikama. Kako bi se proučavalo štetne učinke vibracija na strukturu u pojedinim slučajevima dovoljno je imati i jednu od veličina pa se primjerice mjere frekvencija, amplituda ili ubrzanje kod oscilacija sustava.

4.1. Instrument za mjerenje frekvencije

Primjer ovoga instrumenta uzet je kao puno upotrebljavaniji i principijelno najjednostavniji sustav koji je namijenjen za mjerenje frekvencije. Instrument koristi veliki broj metalnih traka koje su pričvršćene za kućište samo s jedne strane dok je druga strana slobodna što je vidljivo na slici 12.



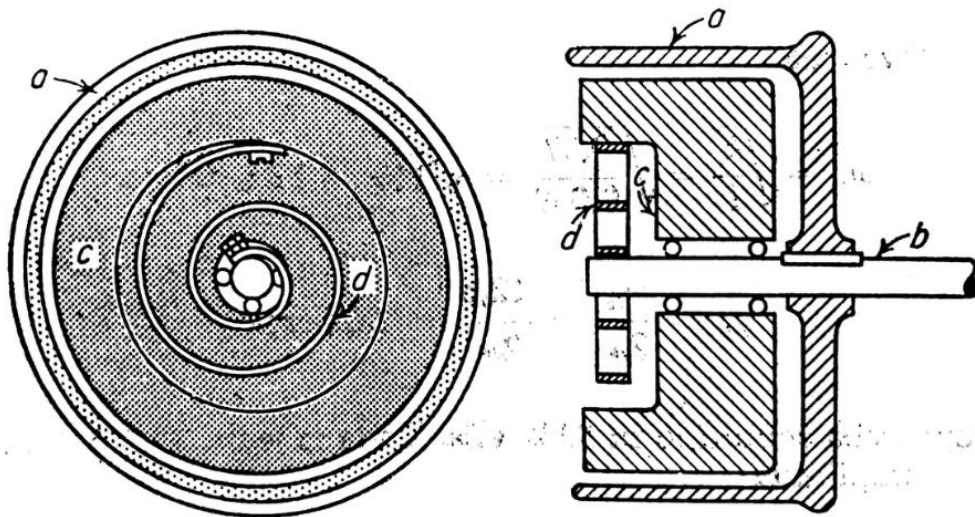
Slika 12. Frahmov tahometar, [6]

Specifičnost pričvršćenih traka je da svaka ima specifičnu frekvenciju gibanja te će se gibati samo kada kućište skupa sa sustavom vibrira određenom frekvencijom. Spektar frekvencija pokriven je tako da svaka traka pokriva mali spektar frekvencija te se instrument sastoji od mnoštva traka kako bi se pokrio veći spektar. Na slici 12. vidljivo je kako u trenutku vibracije jedna do dvije trake imaju značajnu amplitudu dok ostale metalne trake imaju neznatnu što znači da frekvencija kojom vibrira sustav je sukladna vibraciji koja je predodređena za traku sa najvećom amplitudom. [8]

4.2. Instrumenti za mjerenje amplitude

Za mjerenje amplitude kod vibracija koriste se tzv. seizmički instrumenti. Instrument funkcionira tako da je unutar kućišta instrumenta na oprugama ovješena masa koja pri vibracijama napravi pomak koji se i dokumentira. To se postiže mehanizmom koji se dodaje na instrument koji oscilacije zapisuje primjerice na papir. Cjelina koja čini instrument i mehanizam za zapisivanje čine vibrograf.

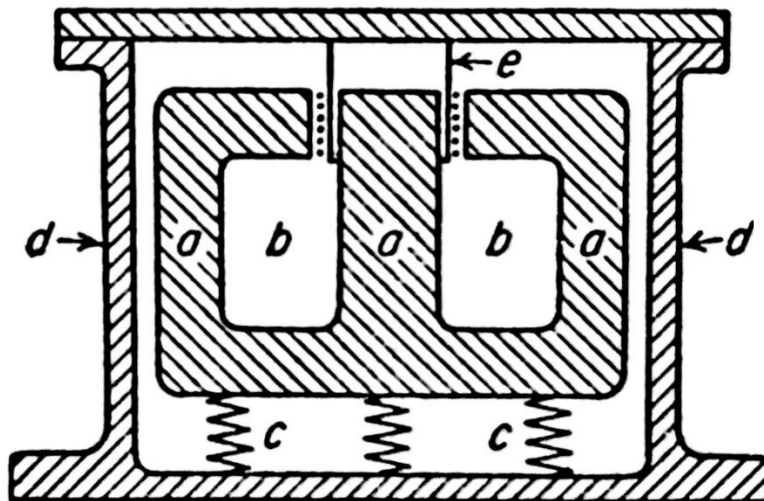
Kod primjerice vibracija koje se javljaju kod elise kao što je spomenuto u poglavlju 3.5 javljaju se torzijski momenti koji shodno tome uzrokuju torzijske vibracije koje je također potrebno mjeriti te bilježiti kako tijekom proizvodnje tako i tijekom cijele eksploatacije i održavanja. Pripadni instrument koji je konstruiran za mjerenje takvih vibracija je torziograf. Instrument je pojednostavljeno rečeno inačica vibrografa no kako je njegova zadaća mjerenje torzijskih vibracija opruge nisu linearne već su torzijske. Instrument je izveden iz kućišta (*a* na slici 13.) unutar kojega se nalazi tijelo relativno velike mase (*c* na slici 13.). Masa je sa kućištem povezana torzijskom oprugom (*d* na slici 13.). S obzirom na veliku masu i inerciju tijela unutar kućišta ono uslijed torzijskog momenta ima pomak koji se bilježi kao parametar vibracije. Na slici 13. vidljiva je građa instrumenta u poprečnom u uzdužnom presjeku. [6]



Slika 13. Torziograf, [6]

4.3. Električni instrumenti za mjerenje vibracija

Neki od električnih mjernih instrumenata koji se koriste za mjerenje vibracija su u osnovi isti kao i instrumenti opisani u prethodnom poglavlju. Rezultat mjerenja vibracija daje pomake elemenata električne konstrukcije što se očituje primjerice u razlici napona. Instrument koji se koristi za mjerenje vibracija u jednoj ravnini, sa jednim stupnjem slobode nalik je na vibrometar uz pojedine razlike. [9] Kod električnog instrumenta masa (na slici 14. označena *a*) se nalazi unutar kućišta (na slici 14. označeno *d*). Masa je izvedena iz feromagnetnog materijala oko kojega je namotana zavojnica koja je pod istosmjernim naponom, što je čini elektromagnetom. Elektromagnet ima procjepe u strukturi u koje su umetnuti cilindri od dielektrika oko kojih je namotana žica (na slici 14. označena *e*). Kako je magnet ovješena na opruge (na slici 14. označene *c*), pomak koji se događa uslijed vibracija ujedno daje i pomak između elektromagneta i zavojnice daje izmjenični napon pa se spomenuti napon mjeri. Izmjereni napon za razliku od uređaja za mjerenje amplitude daje napon koji je proporcionalan brzini kretanja. [6]



Slika 14. Električni instrument za mjerenje vibracija, [6]

Princip mjerenja torzijskih vibracija temelji se na konstrukciji s permanentnim magnetom koji se može okretati oko jezgre no povezane su torzijskom oprugom. Jezgra na sebi ima namotanu zavojnicu pa se pomaci permanentnog magneta, koji predstavlja inercijsku masu, rezultiraju naponom koji je proporcionalan kutnoj brzini pomaka sustava koji vibrira.

Za vibracije relativno velikog perioda odnosno za frekvencije manje od 15 Hz princip koji se koristi kod mjerenja je princip varijacije magnetnog otpora. Mjerni instrument osmišljen je na način da ima dva elementa koji su čvrsto spojeni za kućište i imaju namotanu zavojnicu. Alternator doprema električnu struju za dvije zavojnice koje su spojene serijski. Između spomenutih

zavojnica nalazi se čelični element koji je jednako udaljen od obje zavojnice. Uslijed vibracija čelični element se pomiče te se zazor između dvije zavojnice mijenja. Razlika napona na zavojnicama u slučaju mirovanja je nula, s obzirom da je i zazor isti. U slučaju pomaka, uslijed vibracija, se zazori mijenjanju a time i razlika napona na serijski spojenim zavojnicama. Instrument je dodatno spojen na *Wheatstoneov* most. Zadaća Wheatstoneovog mosta je da mjeri razliku napona između dvije zavojnice koji je proporcionalan razlici između zazora tj. pomaku čeličnog elementa među zavojnicama. [6]

Nadalje, osim mjernih instrumenata koji se zasnivaju na principu instrumenata za mjerenje amplitude s dodatnim električnim komponentama koje ih čine električnim mjernim instrumentima, značajan doprinos mjerenju daju i elektrootporne trake. [9] Trake se sastoje od tankih žica (0.2 mm) koje su složene između dva sloja papira. Žica je izvedena iz materijala visokog otpora primjerice nikal-krom legure te je otpor trake relativno visok (primjerice 500 Ω). Traka se lijepi na objekt koji vibrira pa se uslijed deformacija materijala mijenja ukupni otpor trake. [6] Primjerice, za potrebe mjerenja vibracija na zrakoplovu s klipnim motorom traka se može lijepiti na vratilo koje pokreće elisu odnosno produžetak koljenastog vratila kod kojeg se mogu pratiti torzijske vibracije.

5. Mjerni set za mjerenje vibracija na zrakoplovu C-172R

U ovome poglavlju opisan je mjerni set koji je sastavljen za potrebe ovoga rada. Zadaća mjernog seta je prikupljanje podataka koji su u sljedećem poglavlju opisani i analizirani. Konstruiran je mjerni set koji se sastoji od dvije glavne skupine komponenata a one su platforma Arduino UNO, te pripadajuće platforme senzora čija je zadaća da mjere zadane parametre vibracija tokom različitih režima leta zrakoplova. Najvažnija funkcija mjernog seta jest prijenos podataka sa senzora na računalo kako je to učinjeno i u ovom radu u svrhu prikaza podataka grafički, tablično ili kako korisnik zahtjeva. Druga funkcija sustava je da prilikom detekcije vibracija, pomoću senzora SW-420 signalizira prisutnost vibracija putem svjetleće diode (*light emitting diode*, LED) koja zasvijetli.

5.1. Arduino UNO

Arduino platforma jest mikrokontrolna ploča koja je osmišljena od strane Interaction Design Institute Ivrea. [10] Njezina zadaća je olakšavanje rada manje iskusnim korisnicima u području znanosti kojima se bave. Također Arduino UNO platforma olakšava programiranje sustava, kao i rukovanje sa platformom glede ožičenja i spajanja električnih vodova sa vanjskim jedinicama sustava. [10]

Arduino UNO proizvodi tvrtka Arduino.cc. [10] Opremljen je sa nizom ulaznih i izlaznih pinova koji su poveznica za eventualno sučelje nekih drugih platforma koje se priključuju, ukoliko je primjerice slučaj kao što je to sa ovim radom zadatak mjerenje parametara pa sustav zahtjeva specifične senzore. [10]

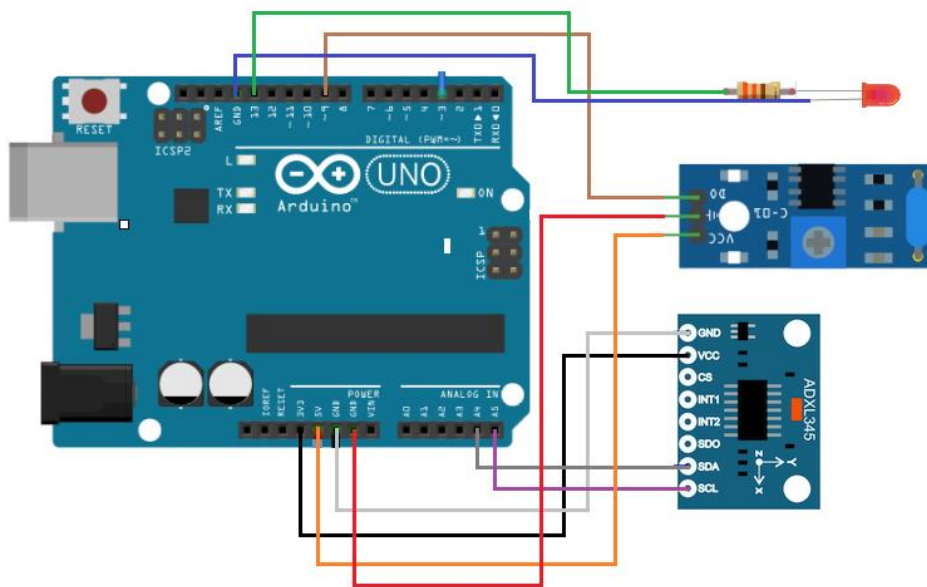
Arduino UNO je opremljen sa 14 digitalnih i 6 analognih pinova putem kojih ga je moguće programirati za obavljanje zadataka putem Integrated Development Environment (IDE). Na računalo putem kojeg se programira, spaja se sa USB kabelom tipa B. Obično je pokretan putem USB kabela koji doprema istosmjernu struju 9V dok je moguće da izvor bude baterija čiji napon može biti 7-20 V. Arduino UNO koristi ATmega328 8-bitni mikročip. [10]

Izgled platforme skupa sa rasporedom komponenti (ulaznih, izlaznih pinova, mikročip itd.) i načinom spajanja platforme sa perifernim platformama koje služe kao senzori je prikazan na slici 15. Programski kod koji koristi mjerni set je u prilogu.

5.2. Grove SW-420

SW-420 je višenamjenski senzor vibracija proizveden od tvrtke Grove. Ova platforma koja služi kao senzor vibracija pojednostavljena je u pogledu interpretacije vibracija. Takozvani je *tilt senzor* ili senzor pomaka. Pojednostavljenje je ostvareno tako da se tijekom mjerenja u eksploataciji ne dobiva specifični parametar vibracije poput amplitude, frekvencije ili perioda već se dobiva informacija od tome jesu li vibracije prisutne ili nisu. Platforma se sastoji od komparatora LM393, senzora za vibraciju koji se sastoji od unutarnje mase koja je slobodna u kretanju, indikatora napajanja (LED dioda), indikatora vibracija (LED dioda), potencijometra za određivanje praga indikacije vibracija te pinova za napajanje, pina za uzemljenje te digitalnog izlaza. [11]

Platforma se koristi tako da se u kombinaciji sa Arduino UNO platformom postavi na izvor vibracija sa što čvršćom vezom koja neće amortizirati vibracije. Također od velike je važnosti da mjesto na zrakoplovu na koje se postavi senzor bude reprezentativan primjer vibracija koje su prethodno u radu analizirane. Orijentacija postavljanja senzora nema veliku važnost za mjerenje s obzirom da senzor mjeri vibracije omnidirekcionalno. Nadalje, sustav tijekom mjerenja vibracije prepoznaje na način da se logičkim sklopovima u perifernoj platformi (senzoru) masa pod utjecajem inercijalnih sila otklanja od početnog položaja te prekida strujni krug. Takva informacija se interpretira kao vibracija te sustav pokazuje da su vibracije prisutne. Jačina vibracija koje se u eksploataciji mjere mogu biti različitih intenziteta pa se tome doskače podešavanjem potencijometra koji će s obzirom na podešavanje ili filtrirati samo vibracije jačeg intenziteta ili manjeg ovisno o podešavanju. [11] Spajanje periferni platforme SW-420 skupa sa pripadnom LED koja služi kao indikacija prisutnosti vibracija.



Slika 15. Spajanje Arduino UNO platforme sa perifernim platformama SW-420 i ADXL345

Izvor: [10]

Kada je sustav pod utjecajem određene vibracije ili pomaka sustav mjeri vrijeme utjecaja inercijske sile na masu. Mjereno vrijeme se prikazuje u milisekundama na sučelju koje je vidljivo korisniku. Numeričkim vrijednostima se zbog lakšeg praćenja dodaju i vremenski razmaci te točna vremena snimanja kako bi se grafički vibracije sustava lakše pratile. Izgled ukupnog mjernog seta sa ugrađenim i spojenim sensorima i LED unutar kućišta vidljiv je na slici 16.



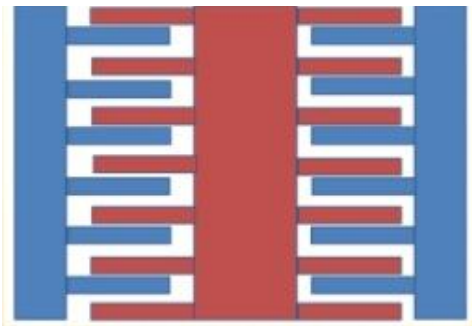
Slika 16. Izgled mjernog seta

5.3. ADXL345 akcelerometar

Akcelerometri se u osnovi koriste kako bi se u eksploataciji mjerila ubrzanja pojedinih sustava. Primjena ovih sustava je široka: mjerenje kutnih ubrzanja pa time i položaja, primjene u navigaciji kod inercijalnih sustava navigacije, i naposljetku vibracija za koje se akcelerometar u mjernom setu koji je sastavljen za ovaj rad koristi. Osim mehaničkih akcelerometara koji su konstrukcijski najjednostavniji u eksploataciji se koriste i MEMS akcelerometri kakav se koristi na perifernoj platformi mjernog instrumenta ADXL345. [12]

MEMS je akronim od punog imena *Micro Electro Mechanical System* što govori da se princip zasniva na elektromehaničkom principu rada. Elementi se izrađuju u mikroskopskim veličinama i bazirane su na siliciju što zbog svojih karakteristika i veličine daje poželjne karakteristike u eksploataciji i mjerenju. Također specifično svojstvo MEMS akcelerometara jest da mogu mjeriti ubrzanja koja su i statičke i dinamičke prirode, koje nemaju frekvenciju. Ovaj tip akcelerometra koristi MEMS promjenjivog kapaciteta (*variable capacitance* MEMS). Pojednostavljeno, sustav se sastoji od čvrste mase, koja je povezana kućištem elastičnim materijalom koji predstavlja oprugu. Masa je postavljena između dvije metalne ploče koje skupa sa masom čine dva prazna prostora između mase i ploča. Sustav se nalazi u vakuumu koji štiti sustav od promjenjivih

atmosferskih parametara u svrhu čim preciznijeg mjerenja. Kako je masa pomična zazori između metalnih ploča i mase se proporcionalno akceleraciji mijenjaju. [13] Idejno je ovaj sustav osmišljen kao dva kondenzatora koje u ovom slučaju predstavljaju prostori između mase i ploča pa se i kapacitet kondenzatora mijenja proporcionalno akceleraciji pod čijim je utjecajem sustav. Sustav je inače zbog veće primjenjivosti izveden kako je prikazano na slici 17. Izvedeni vodiči iz metalne mase koji se kreću unutar prostora kondenzatora te tako tvore dva kondenzatora različitih kapaciteta. Razlika na kapacitetima je proporcionalna akceleraciji pa se skladno tome na taj način i interpretira. [14]



Slika 17. Struktura MEMS akcelerometra, [15]

Mogućnost spajanja periferne platforme ADXL345 sa Arduino UNO vidljivo je na slici 15. ADXL345 mjeri ubrzanja u tri osi pa će ugradnja sustava na zrakoplov morati biti isplanirana tako da se pretpostavi os vibracija u kojoj će vibracije biti najintenzivnije.

Intenzitet vibracija za koje se pretpostavlja da će biti najveći se očekuje u poprečnoj osi zrakoplova zbog vibracija koje nastaju uslijed rada motora. Akceleracija izmjerena instrumentom prikazivati će akceleraciju izraženu putem veličine g koja iznosi 9.81 m/s^2 . Sukladno tome instrument bi trebao biti postavljen okomito na sve tri osi zrakoplova. U tom slučaju mjerenja će u mirovanju pokazati da se u vertikalnoj osi Z dobiva očitavanje u vrijednosti 1, dok će preostale dvije osi davati očitavanje u vrijednosti 0.

5.4. Mogućnost montaže mjernog seta na zrakoplov C-172R

Mjerni set koji je konstruiran za potrebe ovoga rada osmišljen je tako da se njime mogu vršiti mjerenja koja će potvrditi postojanje vibracija te izmjeriti podatke za daljnju analizu. Mjerni set je nastao po uzoru na ostale instrumente koji se koriste u eksploataciji za mjerenje vibracija. Senzori skupa sa Arduino UNO platformom ugrađeni su u plastično kućište od krute plastike koja je odabrana zbog krutosti koja omogućava prijenos vibracija na periferne platforme na kojima se nalaze senzori. Sustav ima jedan senzor pomaka i jedan akcelerometar pa se vibracije mjere za

cijeli zrakoplov. Mjerni set je stoga montiran unutar pilotske kabine kako bi se izbjegao utjecaj potencijalnim atmosferskim uvjetima (niska temperatura, visoka relativna vlažnost zraka, oborine i sl.) koji bi mogli narušiti preciznost mjerenja.



Slika 18. Ugradnja i orijentacija mjernog seta na zrakoplovu

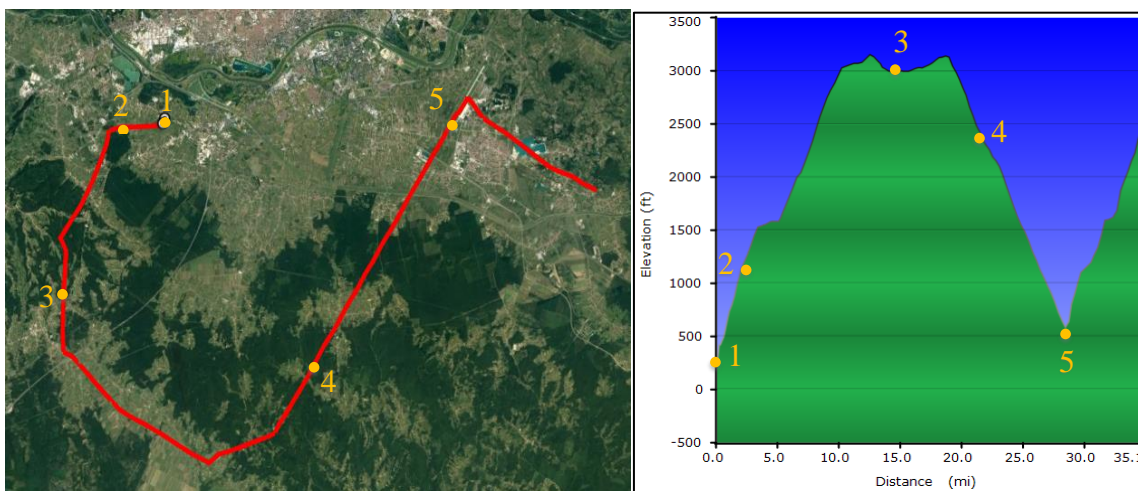
Mjesto ugradnje koje je odabrano za montažu mjernog seta je noseća konstrukcija stražnjeg sjedala. Konstrukcija se sastoji od metalnih elemenata kvadratnog oblika koji su izravno spojeni sa nosivim gredama zrakoplovne konstrukcije. Mjesto je odabrano zbog toga što je izravno spojeno krutim vezama na konstrukciju trupa zrakoplova što osigurava prijenos vibracija svih elemenata zrakoplova. Mjerni set je pričvršćen na konstrukciju samoljepljivom trakom što omogućava jednostavnu montažu bez dodatnih dorada konstrukcije na koju se montira. Kućište, a time i senzori unutar njega postavljeni su okomito na sve tri osi zrakoplova. Orijentacija osi i izgled ugradnje mjernog seta vidljiv je na slici 18. Os X predstavlja uzdužnu os zrakoplova, os Y predstavlja poprečnu os zrakoplova, dok os Z predstavlja vertikalnu os zrakoplova.

6. Prikaz i analiza podataka dobivenih mjerenjem u letu

Mjerenje vibracija za potrebe ovoga rada provedeno je za vrijeme trenaznog leta IFR letenja. Let je odrađen na zrakoplovu C-172R, 9A-DAD, 30. kolovoza 2019. Let je započeo na aerodromu Lučko (LDZL) te je nakon toga let nastavljen prema IFR točki KOTOR u svrhu prilaza na Međunarodnu zračnu luku Zagreb – Franjo Tuđman (LDZA). Tijekom cjelokupnog leta izvedena su tri prilaza na stazu 05 nakon čega je uslijedio povratak i slijetanje na aerodrom Lučko. Ruta je zabilježena GPS prijemnikom te je dio putanje koji je relevantan za analizu skupa sa vertikalnim profilom iscrtan na slici 19. Osim samog prikaza rute na slici 19. brojevima su obilježene i karakteristične točke koje su pridružene određenim režimima leta u sljedećem poglavlju. Putanja leta i vertikalni profil na slici 19. izdvojene su iz aplikacije *MapSource* koju koristi Garmin-ov GPS prijemnik tipa GPS76, iz 2007. godine.

Brojevi na slikama opisuju sljedeće:

1. Pokretanje motora, početak mjerenja kod režima voženja
2. Početak mjerenja u režimu penjanja
3. Početak mjerenja u režimu krstarenja
4. Početak mjerenja u režimu snižavanja
5. Početak mjerenja za slijetanje s produžavanjem

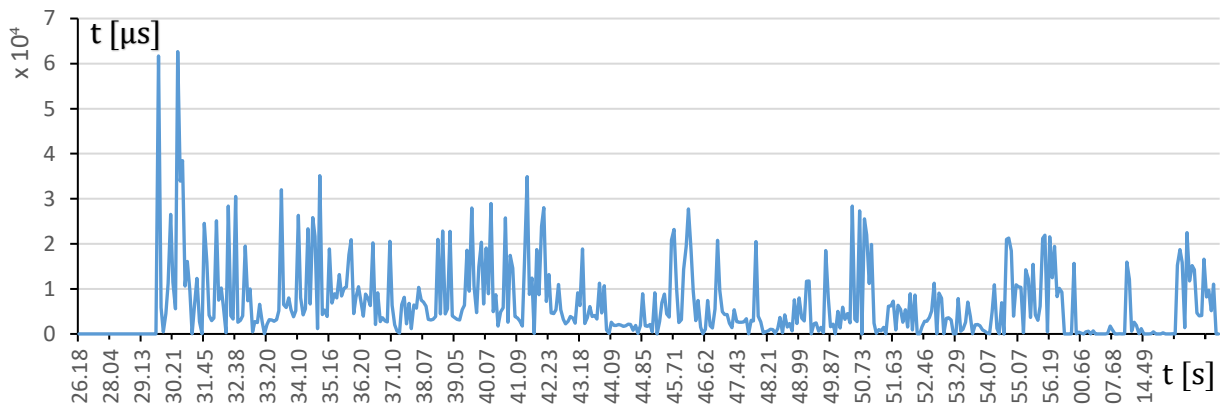


Slika 19. Prikaz putanje leta i vertikalnog profila sa karakterističnim točkama

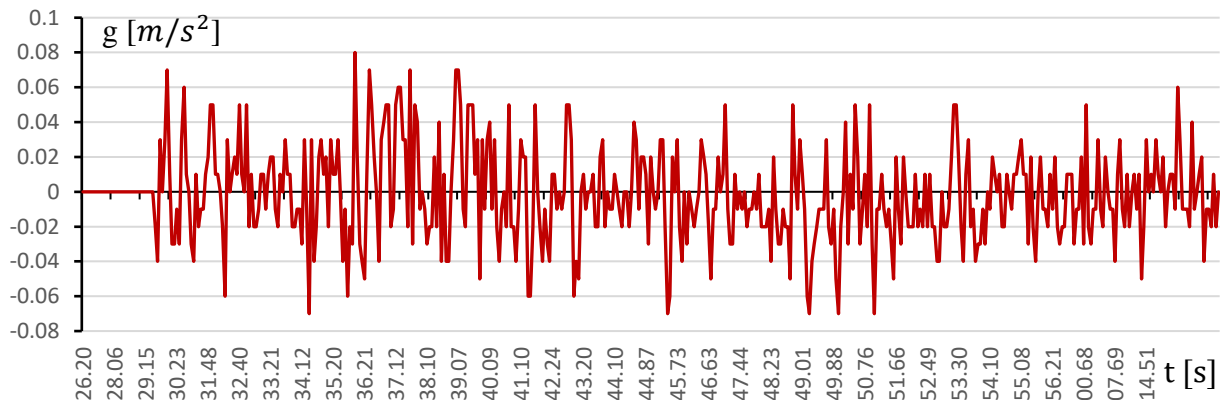
Podaci prikupljeni mjerenjima mjernog seta su prikazani grafički. Svaki graf prikazuje određenu os akcelerometra, odnosno vrijeme oscilacije koje je izraženo u μs , kod senzora pomaka. Također svakom režimu je pridružena i faza leta kojoj je osim opisa i grafičkog prikaza pridružen broj koji na slici 19. prikazuje točku na ruti na koju se graf odnosi.

6.1. Pokretanje motora

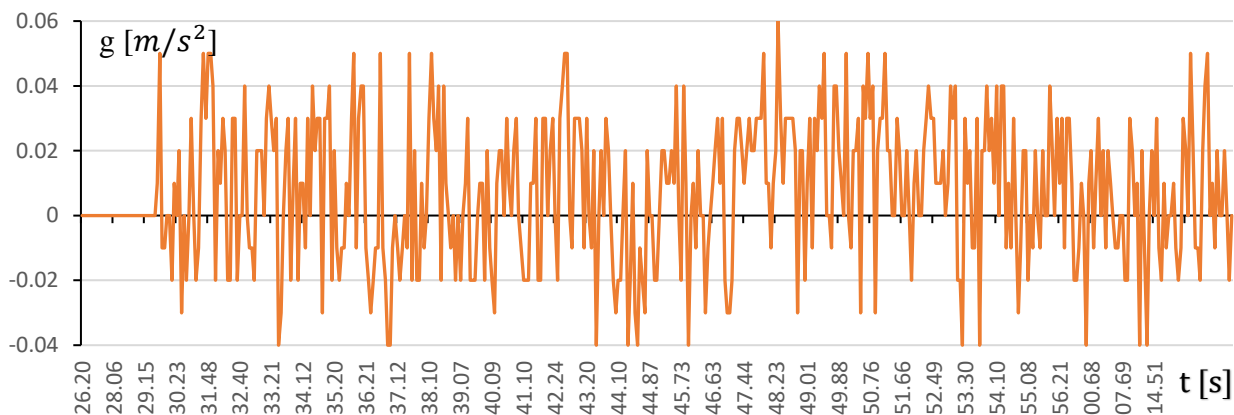
Faza paljenja motora obuhvaća pokretanje motora DC starterom te zatim slijedi paljenje i samostalan rad motora. U grafu je prikazan i rad motora na parkirnoj poziciji na stajanki u režimu rada na 1000 RPM. Na grafikonima 1., 2., 3. i 4. vidljive su oscilacije većeg intenziteta kod rada DC startera i općenito paljenja motora, a zatim slijedi režim rada motora na 1000 RPM sa manjim oscilacijama. Na grafikonu 1. prikazani su podaci prikupljeni putem senzora SW-420 dok su na grafikonima 2., 3. i 4. prikazani podaci prikupljeni putem senzora ADXL345 sa osi X,Y,Z.



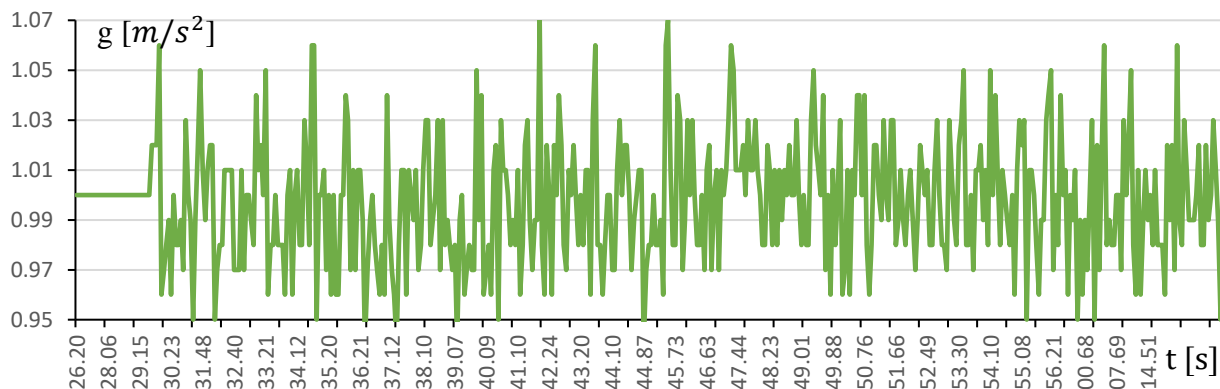
Grafikon 1. Podaci dobiveni od senzora SW-420 kod pokretanja motora.



Grafikon 2. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 za os X kod pokretanja motora



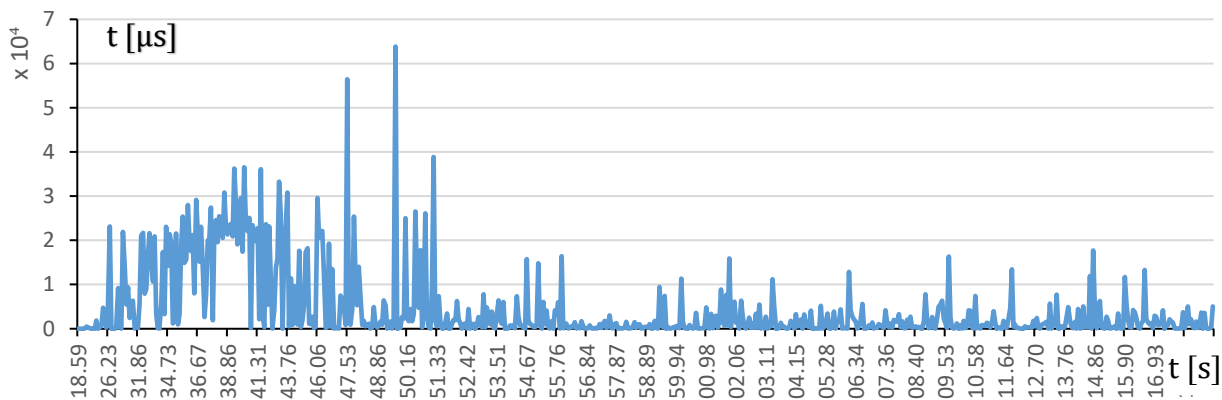
Grafikon 3. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 za os Y kod pokretanja motora



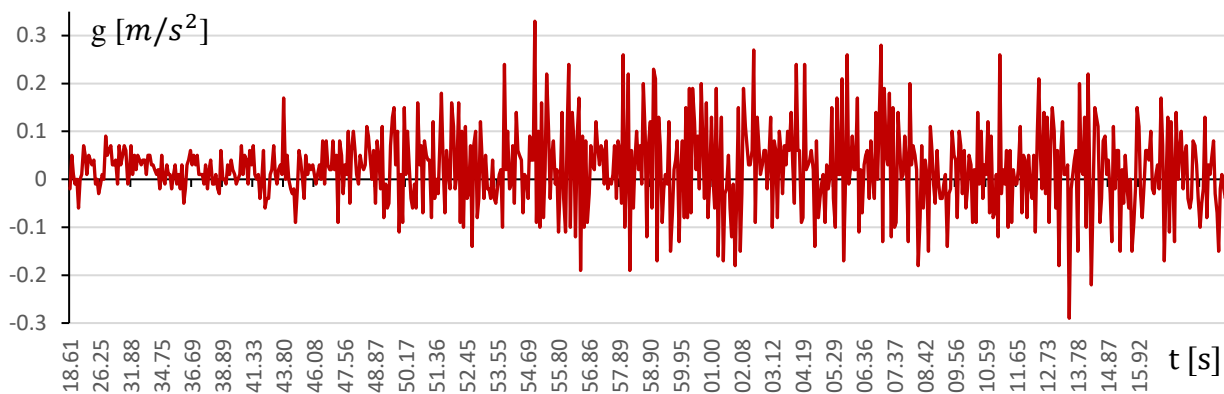
Grafikon 4. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 za os Z kod pokretanja motora

6.2. Voženje

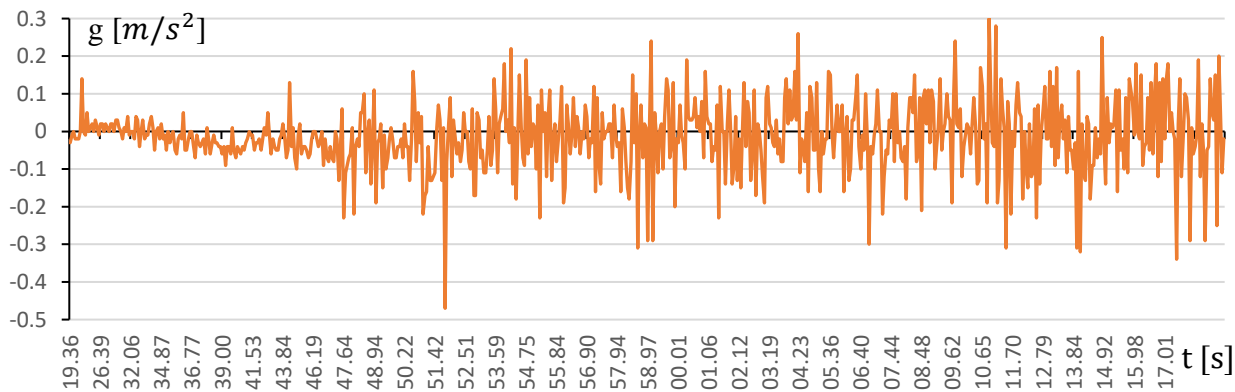
Voženje je faza kada se zrakoplov počinje kretati po manevarskim površinama svojim pogonom. Za konkretan slučaj taksiranja kada se vršilo mjerenje mjernim setom, voženje uključuje kretanje sa parkirne pozicije, probu kočionih sustava, voženje po stajanci koja ima asfaltnu podlogu, a zatim i voženje do pozicije za čekanje što podrazumijeva kretanje po manevarskim površinama koje imaju travnatu podlogu. Različitost podloge glede neravnina vidljiva je i u grafikonima 5., 6., 7., 8. koji prikazuju podatke mjerene mjernim setom. Voženje je provedeno brzinom od 10 km/h u režimu rada motora od 1200 RPM-a. Na grafikonu 5. prikazani su podaci prikupljeni putem senzora SW-420 dok su na grafikonima 6., 7. i 8. prikazani podaci prikupljeni putem senzora ADXL345 sa osi X,Y,Z.



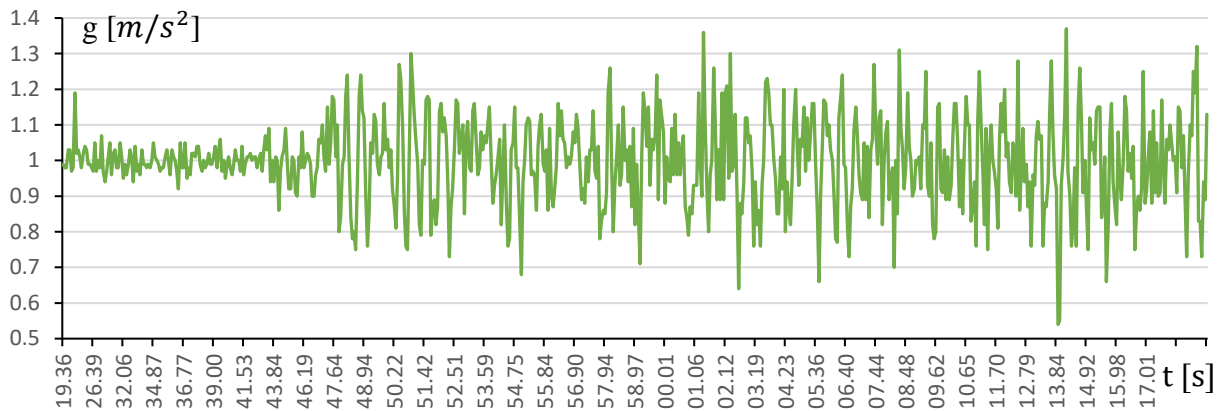
Grafikon 5. Podaci dobiveni od senzora SW-420 u voženju



Grafikon 6. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u voženju za os X



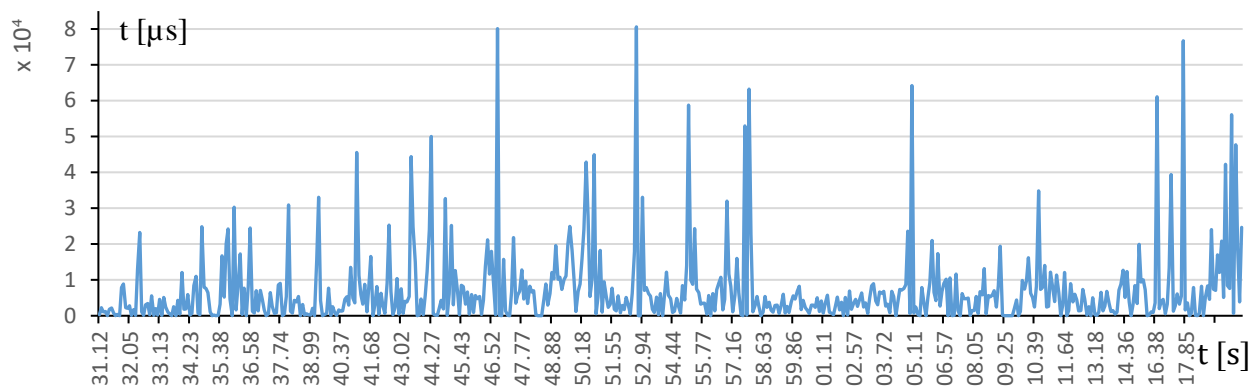
Grafikon 7. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u voženju za os Y



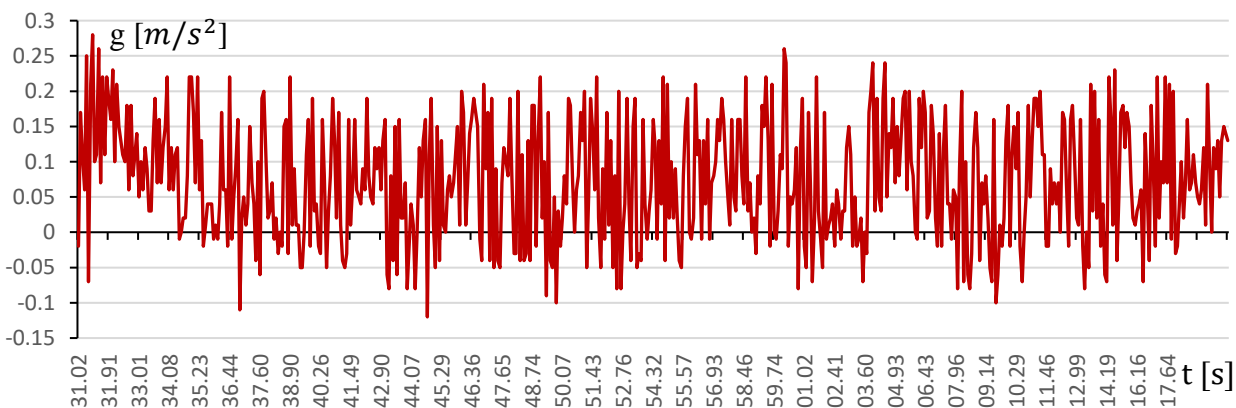
Grafikon 8. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u voženju za os Z

6.3. Penjanje

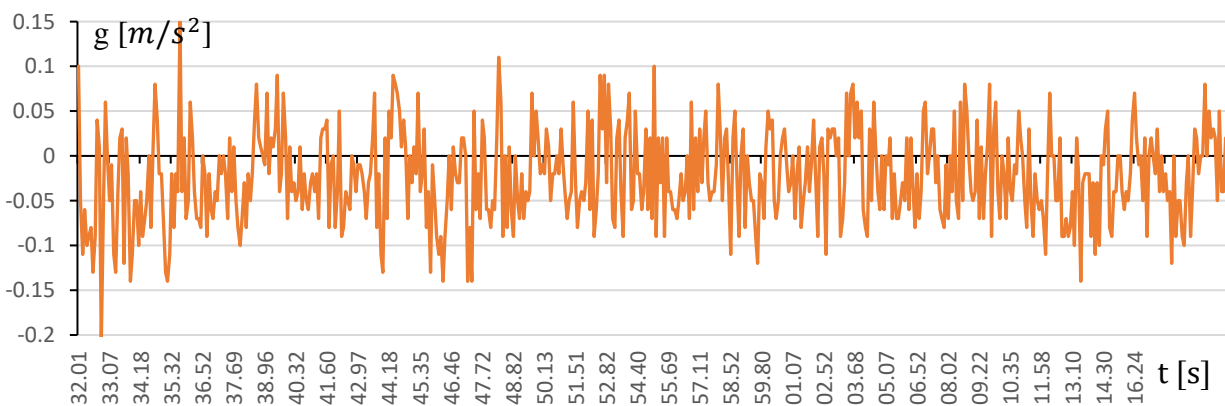
Faza penjanja slijedi nakon polijetanja te sadrži nekoliko elemenata penjanja. Za potrebe mjerenja uzeto je u obzir penjanje najvećom vertikalnom brzinom koje se u konkretnom slučaju provodi na *acceleration altitude* odnosno na 300 stopa iznad terena. Prikazani podaci mjereni su u penjanju sa 700 stopa AMSL (*above mean sea level*), na 1500 stopa AMSL. Penjanje najvećom vertikalnom brzinom podrazumijeva da je postavka snage postavljena na maksimalnu snagu, a brzina da iznosi 75 čvorova (tzv. V_y). Osim režima leta koji ima značajan doprinos u osciliranju kompletnog sustava, valja spomenuti da i meteorološka situacija ima značajan doprinos osobito kada su relativno velika vertikalna strujanja (konvekcija) kao što je to bilo za vrijeme leta na kojem je provedeno mjerenje. Za razliku od voženja, na grafikonima 9., 10. i 11. primjetna su manja ubrzanja u mjerenjima oscilacija posebice zbog rotacije i početnog penjanja što podrazumijeva da se zrakoplov više ne kreće po neravnoj podlozi na tlu. Na grafikonu 9. prikazani su podaci prikupljeni putem senzora SW-420 dok su na grafikonima 10., 11. i 12. prikazani podaci prikupljeni putem senzora ADXL345 sa osi X, Y, Z.



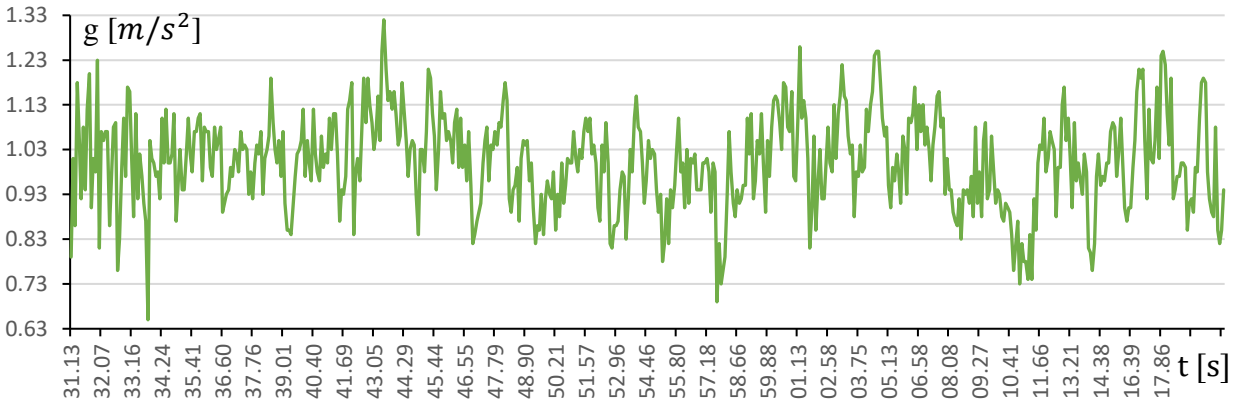
Grafikon 9. Podaci dobiveni od senzora SW-420 u penjanju



Grafikon 10. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u penjanju za os X



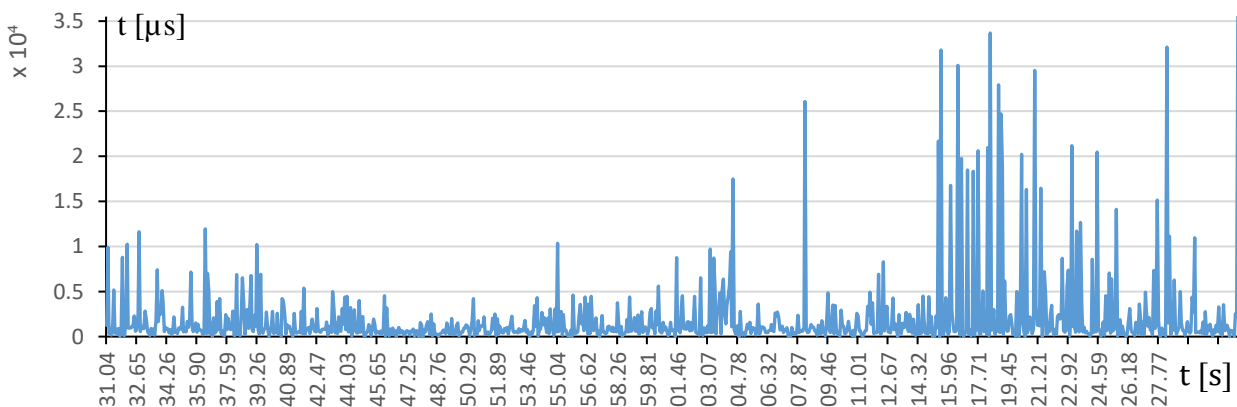
Grafikon 11. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u penjanju za os Y



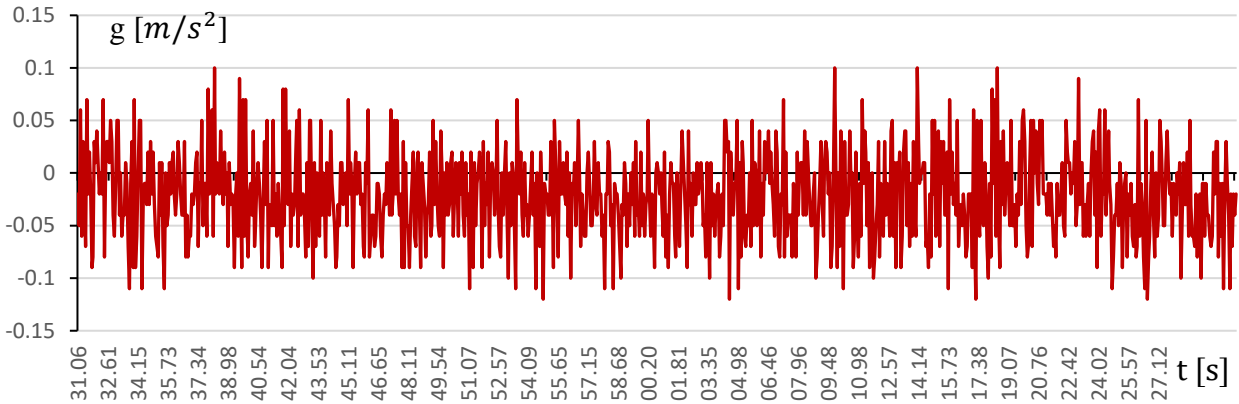
Grafikon 12. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u penjanju za os Z

6.4. Krstarenje

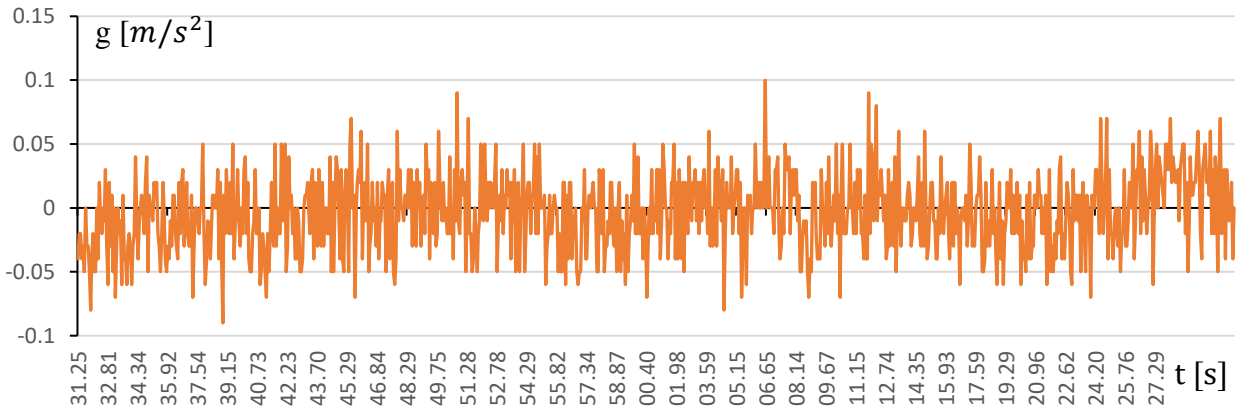
Faza krstarenja nastupa nakon što zrakoplov prestane penjati, odnosno postigne željenu visinu leta. Općenito krstarenje obilježava promjena položaja zrakoplova i smanjivanje snage u odnosu na penjanje odnosno promjenu režima rada motora. Za konkretan slučaj mjerenja krstarenje se odvijalo na visini od 3000 stopa, a snaga je od maksimalne (u penjanju) smanjena na 61% snage što na visini od 3000 stopa podrazumijeva (za tadašnje atmosferske uvijete) režim rada motora na 2100 RPM i krstareću brzinu (TAS) od 104 čvora. [1] Mjerenja u krstarenju pokazuju da su vibracije manjeg intenziteta primarno zbog režima rada motora što je vidljivo na grafikonima 13., 14., 15. i 16. Na grafikonu 13. prikazani su podaci prikupljeni putem senzora SW-420 dok su na grafikonima 14., 15. i 16. prikazani podaci prikupljeni putem senzora ADXL345 sa osi X,Y,Z.



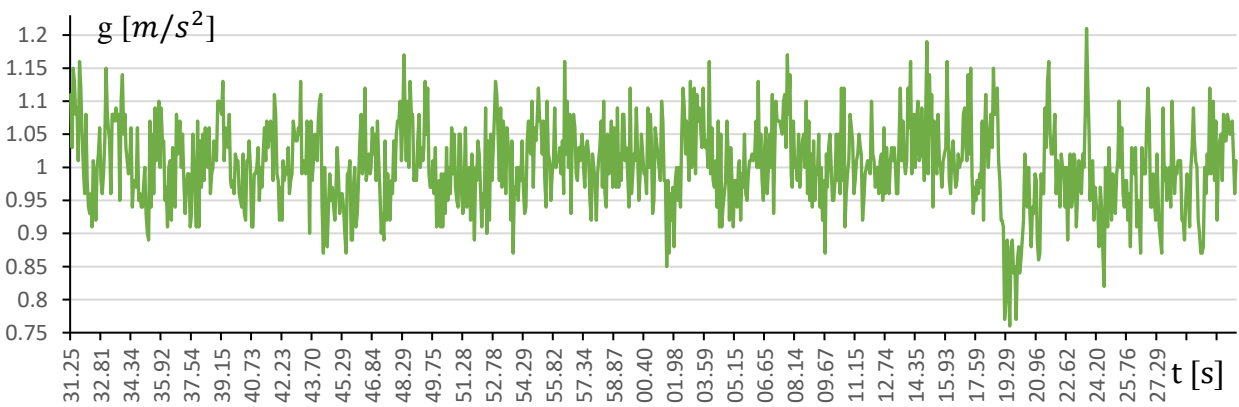
Grafikon 13. Podaci dobiveni od senzora SW-420 u krstarenju



Grafikon 14. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u krstarenju za os X



Grafikon 15. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u krstarenju za os Y

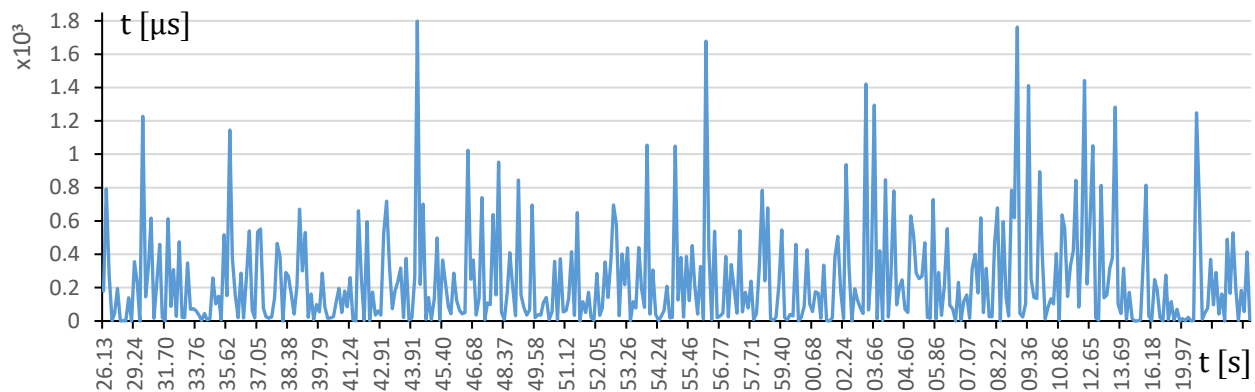


Grafikon 16. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u krstarenju za os Z

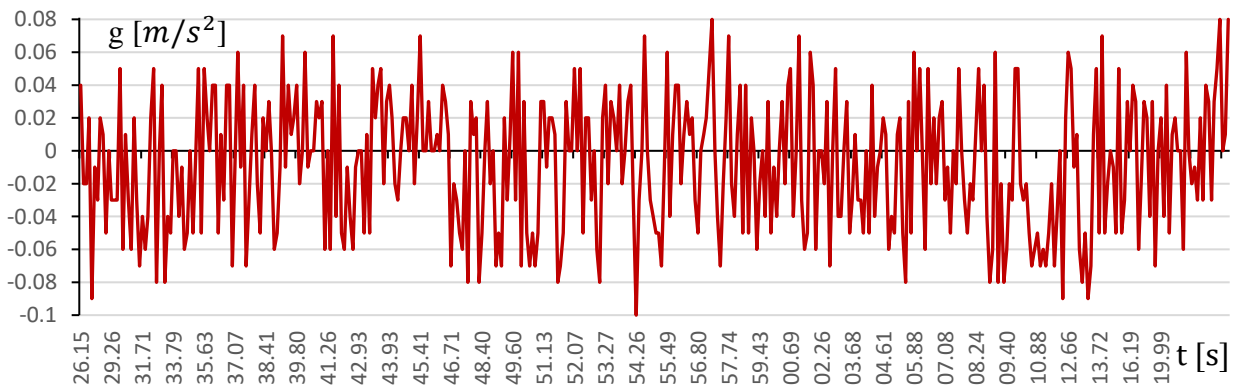
6.5. Snižavanje

Snižavanje generalno slijedi nakon faze krstarenja u svrhu smanjenja visine za izvedbu prilaza. Takvu promjenu režima leta karakterizira smanjenje snage (promjena režima rada motora), smanjenje brzine u odnosu na krstareću, promjena položaja zrakoplova i na posljetku postavljanje zakrilaca u svrhu usporavanja i dobivanja željenih performansi za prilaz i slijetanje.

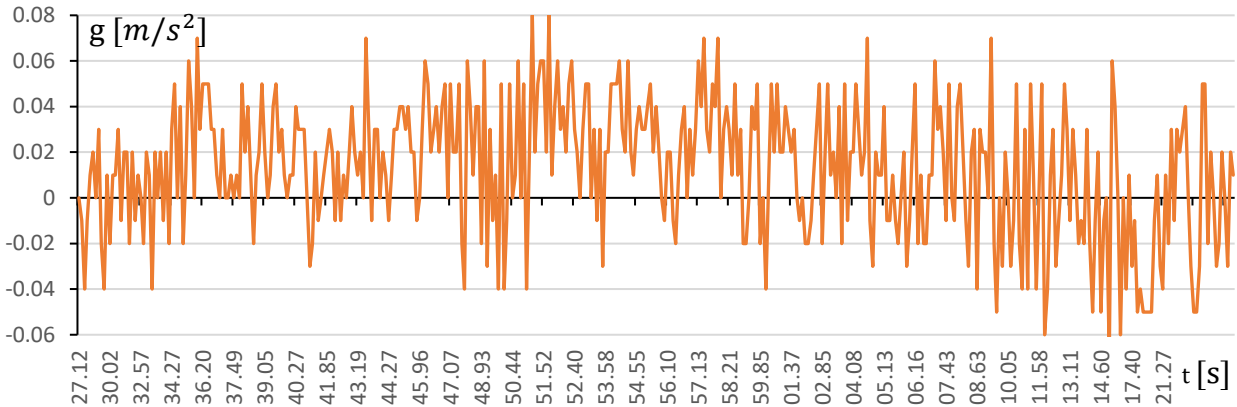
U konkretnom slučaju gdje je mjerenje obavljeno, snižavanje je započelo na visini od 3000 stopa. Snižavanje je započelo u svrhu ILS prilaza i slijetanja s produžavanjem na stazu 05. Snižavanje je nastavljeno u režimu rada motora od 1650 RPM, TAS 100 čvorova te brzinom spuštanja od 531 ft/min. Mjerenja u snižavanju koja su prikazana na grafikonima 17., 18., 19., i 20. pokazuju da su oscilacije manjeg intenziteta u spuštanju u odnosu na krstarenje primarno zbog promjene rada motora koji radi na manjoj snazi. Na grafikonu 17. prikazani su podaci prikupljeni putem senzora SW-420 dok su na grafikonima 18., 19. i 20. prikazani podaci prikupljeni putem senzora ADXL345 sa osi X,Y,Z.



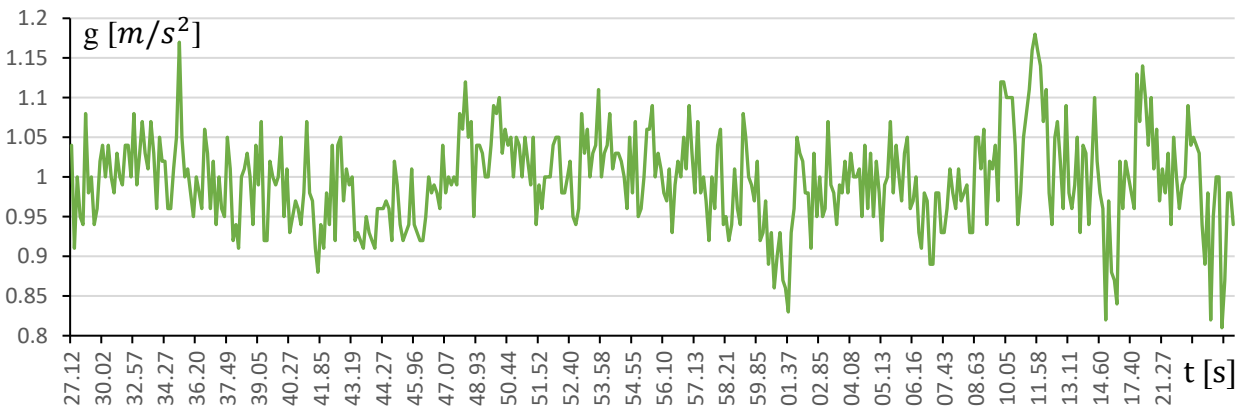
Grafikon 17. Podaci dobiveni od senzora SW-420 u režimu snižavanja



Grafikon 18. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u snižavanju za os X



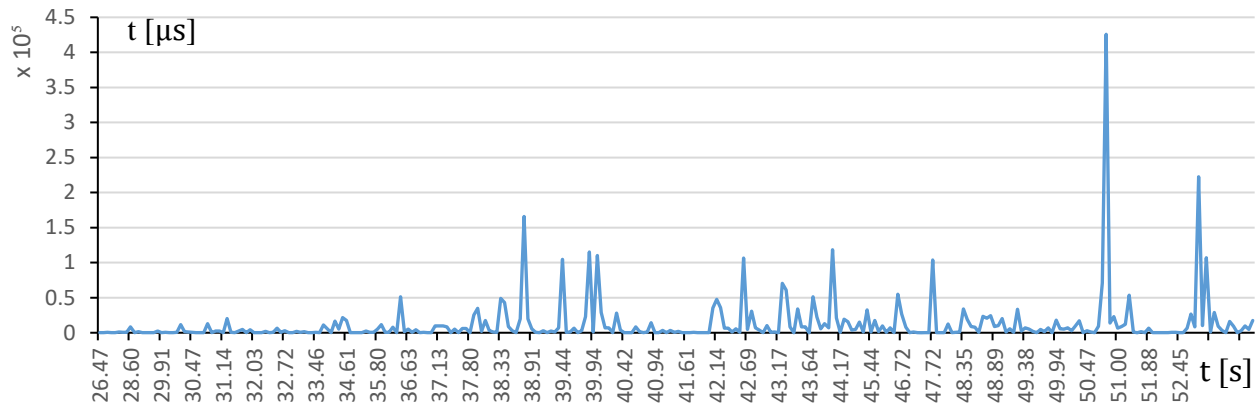
Grafikon 19. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u snižavanju za os Y



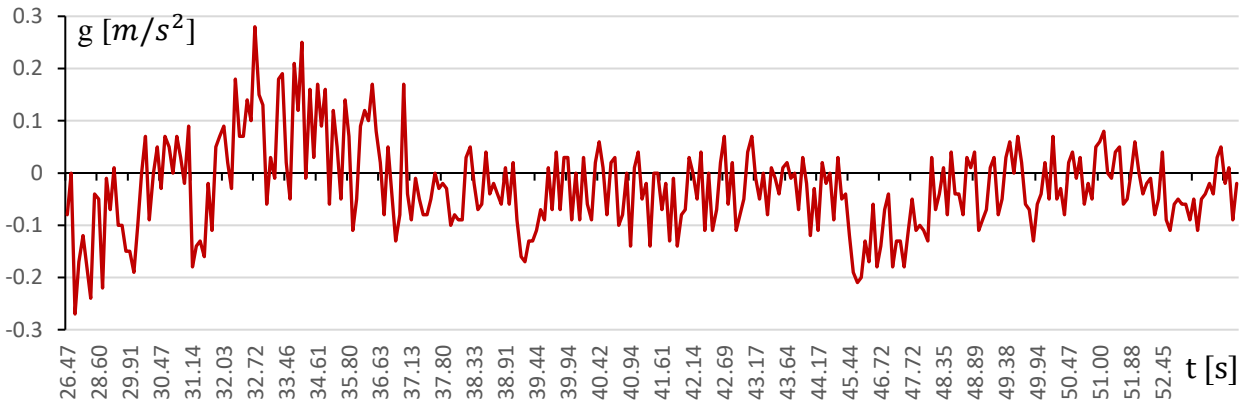
Grafikon 20. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u spuštanju za os Z

6.6. Slijetanje

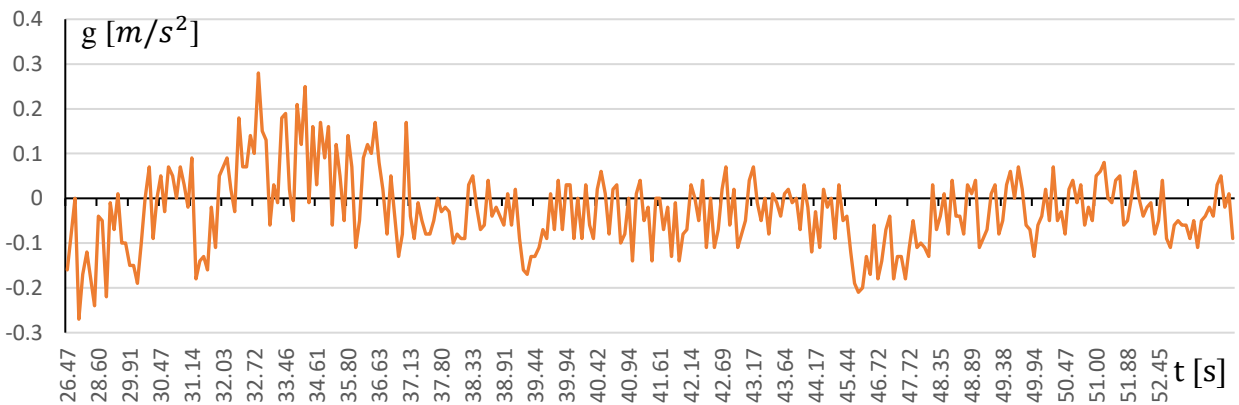
Slijetanje je faza leta koja slijedi na kraju prilaza. Uobičajeno ona podrazumijeva dodir zrakoplova sa površinom piste te usporavanje na tlu. U konkretnom slučaju leta gdje je provedeno mjerenje zrakoplov je prethodno u prilazu na visini od 1550 stopa AMSL (*outer marker-OM*) usporen na 65 čvorova te su zakrilca postupno spuštana u položaj od 20° . Kod slijetanja neposredno prije dodira postavka snage postavljena je na *idle* te je promijenjen položaj zrakoplova (podignut nos) što se još naziva ravnanje (*flare*). U grafikonima 21., 22., 23., 24. vidljivi su podaci o slijetanju. gdje se distinktivno vidi trenutak dodira, nakon kojeg je uslijedilo ubrzavanje s obzirom da je bilo planirano izvesti slijetanje s produžavanjem. Na grafikonu 21. prikazani su podaci prikupljeni putem senzora SW-420 dok su na grafikonima 22., 23. i 24. prikazani podaci prikupljeni putem senzora ADXL345 sa osi X,Y,Z.



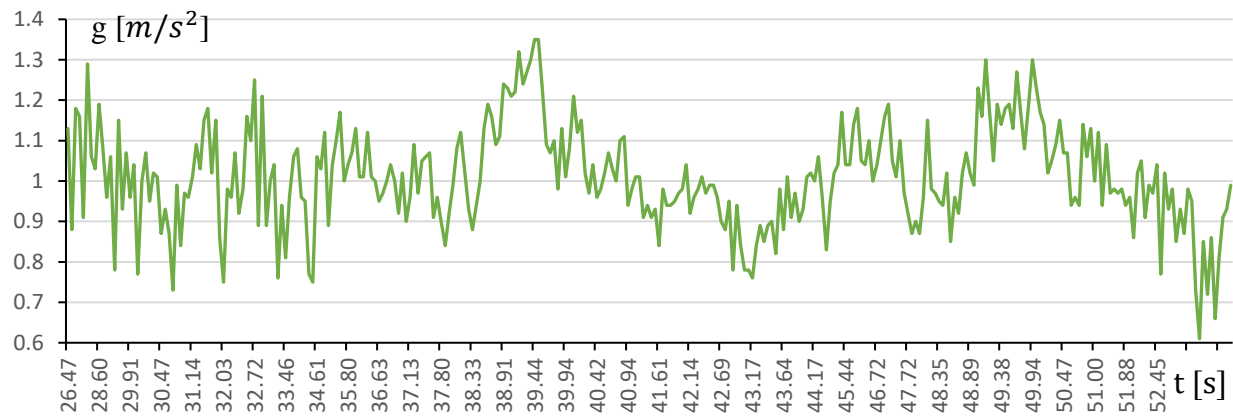
Grafikon 21. Podaci dobiveni od senzora SW-420 u slijetanju



Grafikon 22. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u slijetanju za os X



Grafikon 23. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u slijetanju za os Y



Grafikon 24. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 kod slijetanja za os Z

7. Zaključak

Vibracije su značajan čimbenik u konstrukciji, eksploataciji i održavanju svih zrakoplova. Ukoliko vibracije djeluju na određene elemente konstrukcije na nepredviđen način, znatno skraćuju vrijeme koje elementi konstrukcije mogu provesti u eksploataciji prije otkaza. Stoga su izvori vibracija na zrakoplovu s klipnim motorom analizirani prema vanjskim utjecajima koji značajno utječu na vibracije ali i prema sustavima koji sami generiraju vibracije. Mjerenje vibracija u eksploataciji omogućava praćenje vibracija i time određivanje ispravnosti te preostali vijek sustava na zrakoplovu. Stoga je za potrebe ovoga rada osmišljen mjerni set koji mjeri vibracije na temelju Arduino UNO platforme s pripadajućim sensorima. Spomenuti mjerni set montiran je na laki zrakoplov s klipnim motorom (C-172R) te su na trenožnome letu prikupljeni podaci sa mjernog seta. Nakon spomenutog, podaci su grafički prikazani te analizirani po karakterističnim fazama leta. Osim vanjskih utjecaja poput površine vozne staze, udara vjetrova i ostalih atmosferskih uvjeta, zaključeno je da značajan udio vibracija na zrakoplovu generira motor. Nadalje, s obzirom na to da mjerni set prikuplja podatke na razini cijelog zrakoplova, postoji mogućnost nadogradnje na način da se ugrade senzori na pojedine elemente konstrukcije pa se vibracije izoliraju samo na jednome sustavu. Također praćenje vibracija na lakim zrakoplovima nije regulirano propisima, iako su vibracije prisutne. Spomenute vibracije značajan su čimbenik u eksploataciji i održavanju zrakoplova, stoga se smatra da se provjere vibracija pojedinih sustava na zrakoplovu trebaju uvrstiti u obavezne stavke redovnih pregleda zrakoplova.

Literatura

- [1] T. Aviation Cessna Aircraft. Preuzeto sa: <https://cessna.txtav.com/en>. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [2] C. A. Company. Pilot's operating handbook Cessna Skyhawk, Wichita, Kansas, SAD: Cessna Aircraft Company, 1977.
- [3] Forumactif. Preuzeto sa: <http://fighters.forumactif.com/t64649-1-20-scale-cessna-c-172-skyhawk-model-by-nichimo>. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [4] Lycoming. IO360L2A Series Illustrated Parts Catalog. Preuzeto sa: <https://www.lycoming.com/sites/default/files/IO-360-L2A%20Parts%20Catalog%20PC-406-L2A.pdf>. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [5] Lycoming. Preuzeto sa: <https://www.lycoming.com/sites/default/files/O-320%20Operator%20Manual%2060297-30.pdf>. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [6] Hartog D. Vibracije u mašinstvu, New York, Toronto, London: McGraw Hill Book Company, 1956.
- [7] Stegić M. Teorija vibracija linearnih diskretnih mehaničkih sustava, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 1996.
- [8] Biddlemegger. Preuzeto sa: http://www.biddlemegger.com/biddle-ug/FRAHM_UG.pdf. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [9] Bucak T. Zorić I. Zrakoplovni instrumenti i prikaznici, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, 2002.
- [10] Arduino.cc. Preuzeto sa: <https://www.arduino.cc/>. [Pristupljeno: 2019.].
- [11] Seeed Studio. Preuzeto sa: http://wiki.seeedstudio.com/Grove-Vibration_Sensor_SW-420/. [Pristupljeno: kolovoz 2019.].
- [12] Sparkfun. Preuzeto sa: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/accelerometer-basics/all>. [Pristupljeno: kolovoz 2019.].
- [13] Piezotronics PCB. Preuzeto sa: <https://www.pcb.com/resources/technical-information/mems-accelerometers>. [Pristupljeno: kolovoz 2019.].
- [14] Andrejašič M. MEMS accelerometers, Ljubljana: Fakultet matematike i fizike, Sveučilište u Ljubljani, 2008.

[15] Slideshare. Preuzeto sa: <https://www.slideshare.net/prashantsingh94651/mems-accelerometer-designing-and-fabrication>. [Pristupljeno: kolovoz 2019.].

Popis slika

Slika 1. Konstrukcijski elementi zrakoplova	4
Slika 2. Lycoming IO-360 L2A	5
Slika 3. Sinusoida.....	9
Slika 4. Fazni pomak.....	11
Slika 5. Dijagram komponenata sila sa harmonijskim gibanjem.....	12
Slika 6. Sustav s jednim stupnjem slobode.....	13
Slika 7. Sustav sa torzijskim momentom.....	14
Slika 8. Shema sustava sa amortizerima i dvije osovine	15
Slika 9. Sile na konstrukcijske elemente motora	18
Slika 10. Suodnos frekvencija i brzina elise, rezonantne brzine.....	19
Slika 11. Graf koeficijenta uzgona i momenta u odnosu na napadni kut	21
Slika 12. Frahmov tahometar	22
Slika 13. Torziograf	23
Slika 14. Električni instrument za mjerenje vibracija.....	24
Slika 15. Spajanje Arduino UNO platforme sa perifernim platformama SW-420 i ADXL345 ...	27
Slika 16. Izgled mjernog seta.....	28
Slika 17. Struktura MEMS akcelerometra	29
Slika 18. Ugradnja i orijentacija mjernog seta na zrakoplovu	30
Slika 19. Prikaz putanje leta i vertikalnog profila sa karakterističnim točkama.....	31

Popis grafikona

Grafikon 1. Podaci dobiveni od senzora SW-420 kod pokretanja motora.	32
Grafikon 2. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 za os X kod pokretanja motora.	32
Grafikon 3. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 za os Y kod pokretanja motora.	33
Grafikon 4. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 za os Z kod pokretanja motora.	33
Grafikon 5. Podaci dobiveni od senzora SW-420 u voženju	34
Grafikon 6. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u voženju za os X	34
Grafikon 7. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u voženju za os Y	34
Grafikon 8. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u voženju za os Z	35
Grafikon 9. Podaci dobiveni od senzora SW-420 u penjanju	36
Grafikon 10. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u penjanju za os X	36
Grafikon 11. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u penjanju za os Y	36
Grafikon 12. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u penjanju za os Z	37
Grafikon 13. Podaci dobiveni od senzora SW-420 u krstarenju	37
Grafikon 14. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u krstarenju za os X	38
Grafikon 15. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u krstarenju za os Y	38
Grafikon 16. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u krstarenju za os Z	38
Grafikon 17. Podaci dobiveni od senzora SW-420 u režimu snižavanja	39
Grafikon 18. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u snižavanju za os X	39
Grafikon 19. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u snižavanju za os Y	40
Grafikon 20. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u spuštanju za os Z	40
Grafikon 21. Podaci dobiveni od senzora SW-420 u slijetanju	41
Grafikon 22. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u slijetanju za os X	41
Grafikon 23. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 u slijetanju za os Y	41
Grafikon 24. Podaci ubrzanja g dobiveni od senzora ADXL345 kod slijetanja za os Z	42

Prilog, programski kod mjernog seta

```
#include <Wire.h>

#define Register_ID 0
#define Register_2D 0x2D
#define Register_X0 0x32
#define Register_X1 0x33
#define Register_Y0 0x34
#define Register_Y1 0x35
#define Register_Z0 0x36
#define Register_Z1 0x37

int ADXAddress = 0x53; //I2C address

int reading = 0;

int val = 0;

int X0,X1,X_out;

int Y0,Y1,Y_out;

int Z1,Z0,Z_out;

double Xg,Yg,Zg;

int led = 13;

int vs = 9;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  delay(100);
  Wire.begin();
```



```

delay(100);
Wire.beginTransmission(ADXAddress);
Wire.write(Register_2D);
Wire.write(8);
Wire.endTransmission();
pinMode(led, OUTPUT);
pinMode(vs, INPUT);
}
void loop()
{
Wire.beginTransmission(ADXAddress);
Wire.write(Register_X0);
Wire.write(Register_X1);
Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom(ADXAddress,2);
if(Wire.available()<=2);
{
X0 = Wire.read();
X1 = Wire.read();
X1 = X1<<8;
X_out = X0+X1;
}
Wire.beginTransmission(ADXAddress);
Wire.write(Register_Y0);
Wire.write(Register_Y1);
Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom(ADXAddress,2);

```

```

if(Wire.available()<=2);
{
  Y0 = Wire.read();
  Y1 = Wire.read();
  Y1 = Y1<<8;
  Y_out = Y0+Y1;
}
Wire.beginTransaction(ADXAddress);
Wire.write(Register_Z0);
Wire.write(Register_Z1);
Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom(ADXAddress,2);
if(Wire.available()<=2);
{
  Z0 = Wire.read();
  Z1 = Wire.read();
  Z1 = Z1<<8;
  Z_out = Z0+Z1;
}
Xg = X_out/256.00;
Yg = Y_out/256.00;
Zg = Z_out/256.00;
Serial.print("A ");
Serial.print(Xg);
Serial.print(" ");
Serial.print(Yg);
Serial.print(" ");

```

```
Serial.println(Zg);
```

```
delay(50);
```

```
long measurement =vibration();
```

```
Serial.print("V ");
```

```
Serial.println(measurement);
```

```
if(measurement > 50){
```

```
    digitalWrite(led, HIGH);
```

```
}
```

```
else {
```

```
    digitalWrite(led, LOW);
```

```
}
```

```
}
```

```
long vibration() {
```

```
    long measurement=pulseIn(vs, HIGH);
```

```
    return measurement;
```

```
}
```



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ završni rad
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.
Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.
Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.
Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ završnog rada
pod naslovom **Mjerenje i analiza vibracija zrakoplova s klipnim motorom**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 9/4/2019 _____

Student/ica
Foljana Jurčić

(potpis)