

# Uloga upravljačkih sustava na zrakoplovima

---

Šopić, Karlo

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:405593>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Karlo Šopić**

**ULOGA UPRAVLJAČKIH SUSTAVA NA**  
**ZRAKOPLOVIMA**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2019.**

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

# **ULOGA UPRAVLJAČKIH SUSTAVA NA ZRAKOPLOVIMA ROLE OF AIRCRAFT CONTROL SYSTEMS**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović

Student: Karlo Šopić

JMBAG: 0135239210

Zagreb, rujan 2019.

Zagreb, 18. ožujka 2019.

Zavod: **Zavod za zračni promet**  
Predmet: **Osnove tehnike zračnog prometa**

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 4994

Pristupnik: **Karlo Šopić (0135239210)**

Studij: **Promet**

Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Uloga upravljačkih sustava na zrakoplovima**

Opis zadatka:

U radu je potrebno dati pregled uvodnih postavki - definirati predmet istraživanja, svrhu i cilj istraživanja te ukratko prikazati kompoziciju rada.

Opisati ulogu upravljačkih sustava na zrakoplovima te dati primjere primarnih, sekundarnih i ostalih vrsta upravljačkih površina koji se koriste na zrakoplovima.

Objasniti ulogu upravljačkih sustava te opisati mehanički i hidraulički sustav upravljanja zrakoplovom s posebnim osvrtom na "Fly by Wire" sustav upravljanja.

Izvesti konkretne zaključke i interpretirati rezultate istraživanja.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za

završni ispit:



izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović

## SAŽETAK

Upravljački sustavi su bitni elementi u funkcioniranju zrakoplova. U ovom radu bit će prikazana njihova podjela na upravljačke površine, mehanički, hidraulički i „*Fly by wire*“ sustav upravljanja zrakoplovom. Općenito se opisuju njihove konstrukcijske karakteristike i način na koji ti sustavi funkcioniraju. Upravljačke površine se dijele na primarne (koje osiguravaju kontrolu nad zrakoplovom prilikom izvođenja manevara) i sekundarne (koje poboljšavaju performanse i smanjuju potrebnu silu za upravljanje primarnim upravljačkim površinama). Mehaničkim, hidrauličkim i „*Fly by wire*“ sustavom upravljanja zrakoplova omogućuje se pilotu pojednostavljeno upravljanje te se njegove namjere pomoću tih sustava prenose do odgovarajućih upravljačkih površina.

**KLJUČNE RIJEČI:** zrakoplov; upravljačke površine; sustav upravljanja zrakoplovom; uzgon; otpor

## SUMMARY

Control systems are essential elements in the operation of aircraft. This thesis will outline their division into control surfaces, mechanical, hydraulic and "Fly by wire" aircraft control systems. There are generally describe their structural characteristics and how these systems function. The control surfaces are divided into primary (which provide control of the aircraft when performing maneuvers) and secondary (which improve performance and reduce the force required to operate the primary control surfaces). The aircraft's mechanical, hydraulic and fly-by-wire control systems enable the pilot to simplify control and transfer his intentions to the corresponding control surfaces by means of these systems.

**KEY WORDS:** aircraft; control surfaces; aircraft control systems; lift, drag

# Sadržaj

1.UVOD .....	1
2.UPRAVLJAČKE POVRŠINE ZRAKOPLOVA.....	3
2.1. Konvencionalne upravljačke površine .....	4
2.1.1. Primarne upravljačke površine.....	4
2.1.1.1. Krilca .....	5
2.1.1.2. Kormilo pravca i kormilo visine .....	7
2.1.2. Sekundarne upravljačke površine.....	9
2.1.2.1. Pretkrilca .....	9
2.1.2.2. Zakrilca.....	14
2.1.2.3. Trimeri.....	19
2.1.2.4. Aerodinamičke kočnice i spojleri.....	19
2.2. Nekonvencionalne upravljačke površine .....	21
2.2.1. Canard .....	21
2.2.2. V-rep.....	22
2.2.3. Elevon.....	22
3. MEHANIČKI SUSTAVI UPRAVLJANJA ZRAKOPLOVOM.....	24
4. HIDRAULIČKI SUSTAVI UPRAVLJANJA ZRAKOPLOVOM .....	27
5. „FLY BY WIRE“ SUSTAV UPRAVLJANJA ZRAKOPLOVOM .....	32
6. ZAKLJUČAK .....	35
LITERATURA.....	36
POPIS SLIKA .....	37

# 1.UVOD

Još od prvih letova braće Wright upravljanje letjelicom je predstavljalo značajan problem čovjeku koji je želio letjeti više, brže i dalje. Razvojem zrakoplovstva dolazi do uporabe novih i naprednijih sustava koje pilotu omogućuju lakše uspostaviti kontrolu nad zrakoplovom. Neki od tih sustava su upravljačke površine koje se koriste na velikim i modernim putničkim zrakoplovima koji su, za razliku od svojih prvih primjeraka veći, brži i teži, te su pogonjene hidrauličkim sustavima koji uvelike pomažu pilotu pri upravljanju zrakoplovom.

Predmet istraživanja u ovom završnog rada su različiti sustavi i uređaji koji se koriste pri upravljanju zrakoplovom, počevši od osnovnih karakteristika upravljačkih površina i mehaničkih sustava pa sve do onih naprednijih hidrauličkih i „*Fly by wire*“ sustava. Svrha je prikazati njihovu podjelu, namjenu i način rada s ciljem ukazivanja na uz njihove konstrukcijske i aerodinamičke značajke.

Rad je konceptijski podijeljen u šest cjelina:

1. Uvod
2. Upravljačke površine zrakoplova
3. Mehanički sustavi upravljanja zrakoplovom
4. Hidraulički sustavi upravljanja zrakoplovom
5. „*Fly by wire*“ sustav upravljanja zrakoplovom
6. Zaključak

U uvodnom dijelu će biti ukratko opisani predmet, svrha i cilj ovog istraživanja i predočena kompozicija rada.

U drugom poglavlju opisane su tri osi zrakoplova oko kojih isti manevrira, te podjela upravljačkih površina na konvencionalne (primarne i sekundarne), koje se koriste na gotovo svim današnjim zrakoplovima, i nekonvencionalne koje nisu toliko često u uporabi.

Treće poglavlje govori o mehaničkom sustavu upravljanja zrakoplovom, koji je ujedno prvi i osnovni način, a danas se uglavnom ovaj sustav upravljanja može naći kod manjih zrakoplova.

Četvrto poglavlje govori o naprednijem sustavu upravljanja od mehaničkog, a to je hidraulički sustav.

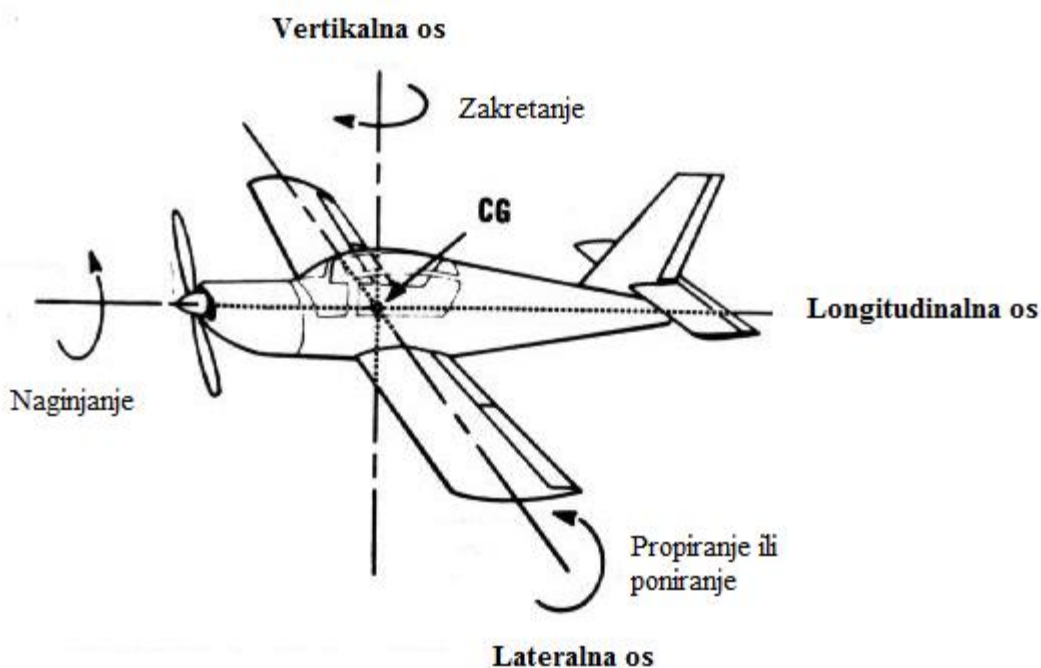
Peto poglavlje se bavi modernim „*Fly by wire*“ sustavom upravljanja koji sve više nalazi svoju primjenu kod današnjih sofisticiranih komercijalnih putničkih zrakoplova.

U sedmom, zaključnom dijelu rada, ukratko će se dati kratki osvrt na rad prethodno nabrojanih sustava.



## 2.UPRAVLJAČKE POVRŠINE ZRAKOPLOVA

Tijekom leta zrakoplov ima mogućnost manevriranja po tri osi; longitudinalno, lateralno i vertikalno. Sve tri osi prolaze kroz centar ravnoteže (*Centre of Gravity*- CG), točku kroz koju ukupna masa zrakoplova djeluje okomito prema dolje(Slika 1.). Longitudinalna ili uzdužna (x) os je linija koja prolazi kroz nos zrakoplova i izlazi kroz rep te se oko nje vrši nagnjanje zrakoplova lijevo ili desno. Lateralna ili poprečna (y) os je linija koja prolazi kroz vrh jednog krila i izlazi kroz vrh drugog i oko nje se vrši propinjanje ili poniranje zrakoplova. Vertikalna ili normalna (z) os je linija koja prolazi kroz donju stranu trupa i izlazi preko vrha zrakoplova oko koje se vrši zakretanje.



Slika 1.: Tri osi zrakoplova

Izvor: [http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/211\\_fall\\_2016/Benson\\_Hoover/Slide6.htm](http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/211_fall_2016/Benson_Hoover/Slide6.htm)

(kolovoz 2019.)

U ovom poglavlju će dalje biti prikazana podjela upravljačkih površina na konvencionalne (primarne i sekundarne) te neke ostale nekonvencionalne vrste upravljačkih površina koje se koriste na zrakoplovima.

## 2.1. Konvencionalne upravljačke površine

U ovom potpoglavlju prikazana je podjela konvencionalnih upravljačkih površina na primarne i sekundarne koje su neophodne za upravljanje zrakoplovom po sve tri osi.

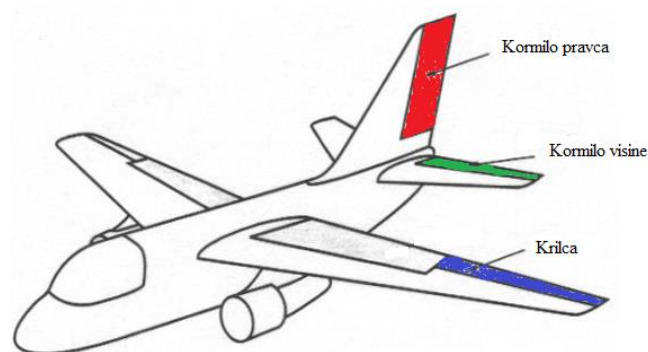
### 2.1.1. Primarne upravljačke površine

Sustavi kontrole zrakoplova pažljivo su osmišljeni kako bi pilotu zrakoplova osigurali što prirodniji osjećaj prilikom vršenja manevara skretanja, propinjanja ili poniranja te nagnjanja lijevo ili desno. Pri niskim brzinama leta kontrole su obično mekane i trome, a zrakoplov reagira polako na upravljačke funkcije dok pri većim brzinama leta one postaju sve čvršće i postiže se sve brži odziv zrakoplova.

Primarne upravljačke površine (Slika 2.) potrebne su za sigurnu kontrolu zrakoplova tijekom leta i dijele se na:

- Krilca
- Kormilo smjera (pravca)
- Kormilo dubine (visine)

Kretanjem bilo koje od ove tri primarne upravljačke površine mijenja se protok zraka i raspodjela tlaka iznad i oko aerodinamičkog profila. Ove promjene utječu na uzgon i otpor uzrokovane kombinacijom aerodinamičkog profila/upravljačkih površina čime se pilotu omogućuje upravljanje zrakoplovom oko sve tri osi rotacije.



**Slika 2.: Tri primarne upravljačke površine**

Izvor: <http://www.aerospaceweb.org/question/history/q0103.shtml> (kolovoz 2019.)

### 2.1.1.1. Krilca

Krilca su primarna upravljačka površina koja kontroliraju kretanje zrakoplova oko longitudinalne ili uzdužne osi. Taj se pokret naziva „valjanje“. Ona su pričvršćena za vanjski rub svakog krila i, kada se zrakoplovom upravlja ručno ili preko autopilota, kreću se u suprotnim smjerovima jedan od drugog. Na nekim velikim zrakoplovima, dva krilca su montirana na svako pojedini krilo. U ovoj konfiguraciji oba krilca na svakom krilu su aktivna tijekom leta pri manjim brzinama dok je pri većim brzinama vanjsko krilce zaključano, a unutarnje je funkcionalno.

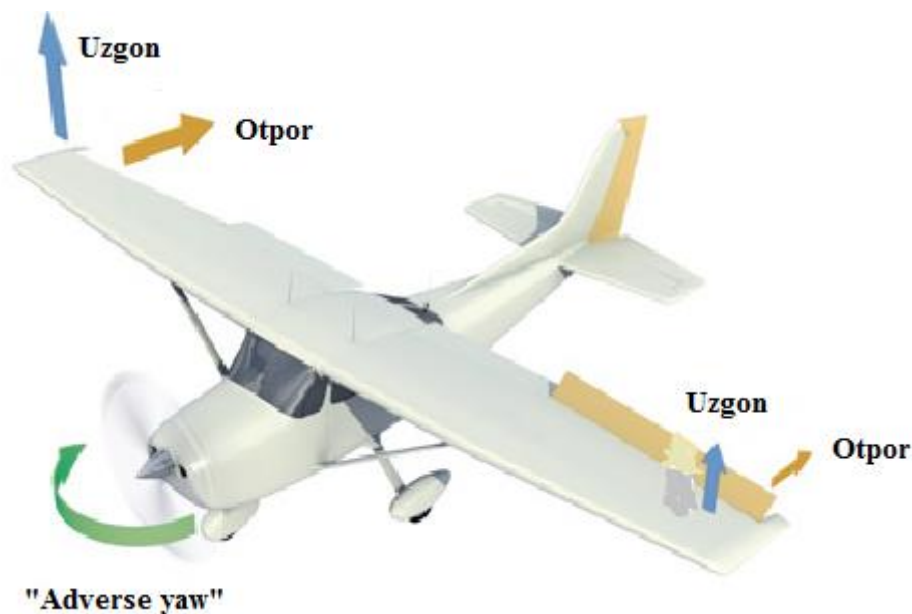
Pomicanjem upravljačke palice desno dolazi do toga da se krilce postavljeno na desnoj strani krila otklanja prema gore (Slika 3.), dok se istovremeno, krilce postavljeno na lijevoj strani krila otklanja prema dolje. Otklonom desnog krilca prema gore smanjuje se zakrivljenost aeroprofila što rezultira smanjenjem uzgona na desnoj strani krila. Suprotno tome, otklonom lijevog krilca prema dolje povećava se zakrivljenost aeroprofila što rezultira odgovarajućim porastom uzgona na lijevom krilu.



**Slika 3.: Krilce otklonjeno prema gore na zrakoplovu Airbus A320**

Izvor: <https://wingsescola.com.br/asas-superficies-de-controle/aileron-a320> (kolovoz 2019.)

Osim poželjne rotacije oko longitudinalne osi koja podiže krilo sa spuštenim krilcem, a spušta krilo s podignutim krilcem dolazi i do nepoželjne rotacije oko normalne osi. Naime, kao posljedica nastalih promjena u uzgonima, otklonjena krilca isto tako uzrokuju i promjene u otporima. Inducirani otpor povećava se na krilcu koje je otklonjeno prema dolje, dok na krilcu otklonjenom prema gore više do izražaja dolazi otpor profila. Zrakoplov istovremeno rotira oko normalne osi tako da pozitivnom valjanju odgovara negativno skretanje i obrnuto, negativnom valjanju odgovara pozitivno skretanje (Slika 4.). Ta pojava se naziva nepoželjno skretanje ili „Adverse yaw“.



**Slika 4.: Nepoželjno skretanje ili "Adverse yaw"**

Izvor: <https://www.cfinotebook.net/notebook/aerodynamics-and-performance/aircraft-stability> (kolovoz 2019.)

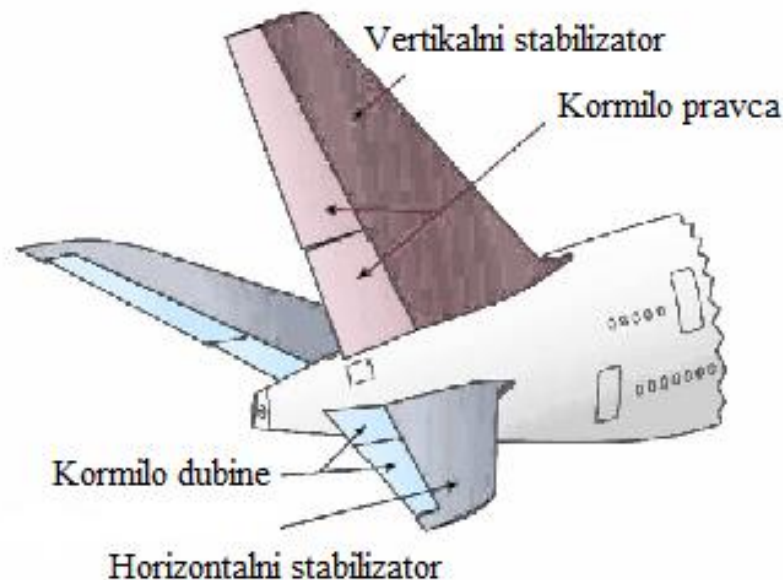
Pri niskim brzinama leta povećanje otpora je veće na krilcu koje je otklonjeno prema dolje. Kako bi se smanjio utjecaj nepoželjnog skretanja projektirano je nekoliko sustava u tu svrhu, a neki od njih su:

- Diferencijalna krilca – jedno krilce se zakreće prema gore za daleko veći kut od suprotnog krilca koje se zakreće prema dolje. Time se izjednačavaju otpori krila te se neutralizira skretanje, ali se ne eliminira u potpunosti.
- Spajanjem krilca i kormila pravca – ovo je izvedeno tako da su krilca/kormilo međusobno povezani oprugama, koje pomažu korigirati otpor krilca tako da automatski otklanja kormilo pravca u isto vrijeme kad dolazi do otklona krilca.

### 2.1.1.2. Kormilo pravca i kormilo visine

Vertikalna repna površina služi za održavanje pravca leta te promjenu smjera, a sastoji se od dva dijela: nepomičnog (vertikalni stabilizator) i pomičnog (kormilo pravca ili smjera) (Slika 5.). Kormilo pravca kontrolira kretanje zrakoplova oko njegove vertikalne osi. Kao i druge primarne upravljačke površine kormilo pravca je pomična površina pričvršćena na fiksnu, nepomičnu površinu koja se zove vertikalni stabilizator (Slika 6.). Kormilom smjera se upravlja preko nožnih pedala koje se nalaze u kabini zrakoplova.

Kada se kormilo smjera odkloni u smjeru strujanja zraka horizontalna aerodinamička sila djeluje u suprotnom smjeru. Gurajući lijevu papučicu kormilo se pomiče lijevo. To mijenja strujanje zraka oko vertikalnog stabilizatora/kormila i izaziva bočni uzgon koji pomiče rep udesno i skreće nos zrakoplova ulijevo. Učinkovitost kormila smjera se povećava porastom brzine, stoga, veliki odklon pri malim brzinama i mali odklon pri velikim brzinama mogu biti potrebni kako bi se osigurala željena reakcija.



**Slika 5.: Prikaz vertikalnog stabilizatora i kormila pravca te horizontalnog stabilizatora i kormila dubine na repu zrakoplova**

Izvor: <https://www.wpi.edu> (kolovoz 2019.)



**Slika 6.: Prikaz vertikalne repne površine na zrakoplovu Airbus A320**

Izvor: <https://flyawaysimulation.com/downloads/files/21140/fsx-croatia-airlines-airbus-a320/>(kolovoz 2019.)

Horizontalna repna površina se kao i vertikalna sastoji od pomičnog i nepomičnog dijela. Pomični dio (kormilo dubine) je pričvršćen na nepomični dio (horizontalni stabilizator) (Slika 7.) te kontrolira kretanje zrakoplova oko lateralne osi (propinjanje ili poniranje). Pomicanjem upravljačke palice prema naprijed prouzrokuje to da se kormilo dubine pomiče prema dolje. To stvara aerodinamičku silu koja djeluje na rep zrakoplova u smjeru prema gore zbog čega zrakoplov pomiče nos prema dolje. Pomicanjem upravljačke palice prema nazad stvara obrnuti učinak, što prouzrokuje pomicanje nosa zrakoplova prema gore. Ovakvim upravljanjem mijenja se napadni kut pa samim time i brzina leta. Svi ovi pokreti se događaju oko centra ravnoteže CG, čija snaga i aerodinamička učinkovitost se određuje prema udaljenosti između CG i horizontalne repne površine.



**Slika 7.: Prikaz horizontalne repne površine na zrakoplovu Boeing 787 Dreamliner**

Izvor: <https://www.ifn.news/posts/korean-air-commits-to-order-30-boeing-787-dreamliner/> (kolovoz 2019.)

### **2.1.2. Sekundarne upravljačke površine**

Sekundarne upravljačke površine služe za poboljšanje performansi i za smanjenje potrebne količine sile koju pilot koristi prilikom upravljanja primarnim upravljačkim površinama zrakoplova. Najčešće sekundarne upravljačke površine su:

- Pretkrlca
- Zakrilca
- Trimeri
- Aerodinamičke kočnice i spojleri

#### *2.1.2.1 Pretkrlca*

Pretkrlca (Slika 8.) su dodatne upravljačke površine koje se postavljaju na prednjoj napadnojivici krila i služe za bolje opstrujavanje krila pri većim napadnim kutovima i za povećanje vrijednosti koeficijenta uzgona. Ona čine sastavi dio osnovnog aeroprofila te se prema potrebi odvajaju formirajući procjep kroz koji struji zrak. Ona mogu biti:

- Fiksana – ne mogu mijenjati svoj položaj u odnosu na krilo
- Automatska – sama se u toku leta automatski postavljaju uz krilo pri većim napadnim kutovima i brzinama
- Upravljiva – aktivira ih pilot prema potrebi

Pretkrilca imaju i svoje nedostatke: povećava se ukupni otpor krila, povećava se težina i komplicira izrada krila, produljuje se dužina stajnog trapa čime se smanjuje vidljivost iz pilotske kabine.



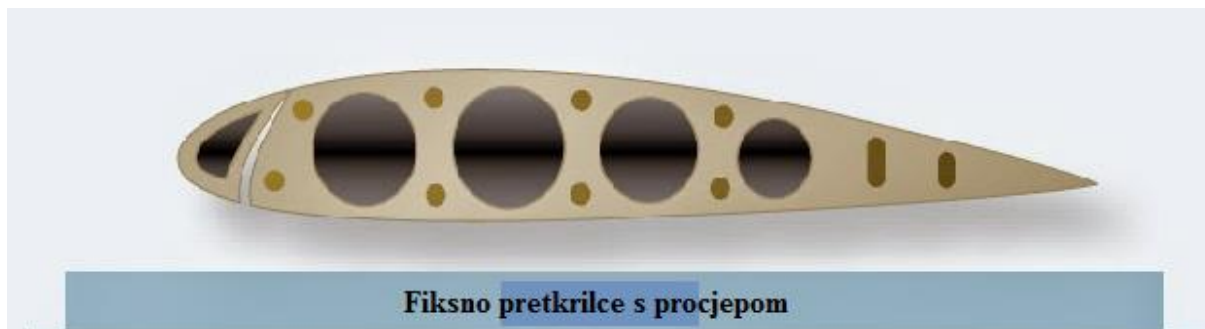
**Slika 8.: Pretkrilca na krilu zrakoplova**

Izvor: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aircraft-systems/here-is-how-leading-edge-slats-work-to-get-you-off-the-ground> (kolovoz 2019.)

### **Fiksno pretkrilce s procjepom**

Pri malim napadnim kutovima (velikim brzinama leta) pretkrilce je priljubljeno uz napadnu ivicu krila (Slika 9.), a dok pri velikim napadnim kutovima (malim brzinama leta) pretkrilce se odvaja od krila stvarajući procjep. Strujanje zraka se usmjerava kroz procjep preko gornje površine krila čime se povećava kinetička energija graničnog sloja, zbog čega se sprječava prerano odvajanje graničnog sloja. Procjep ne povećava zakrivljenost aeroprofila, ali omogućava porast maksimalne vrijednosti koeficijenta uzgona jer se slom uzgona odgađa sve dok krilo ne dosegne veći napadni kut. Kod velikih brzina leta ovakvo pretkrilce može uzrokovati malo povećanje koeficijenta otpora. Koeficijenta uzgona za krilo koje koristi ovu vrstu pretkrilca ima 50% veću vrijednost u odnosu na isto krilo bez pretkrilca i povećanje napadnog kuta za više od 20°. Fiksna izvedba se upotrebljava kod sporih zrakoplova kao što je Stinson 108-1(Slika10.)





**Slika 9.: Fiksno pretkrilce s procjepom**

Izvor: <https://www.aircraftsystemstech.com/p/auxiliary-lift-devices.html> (kolovoz 2019.)

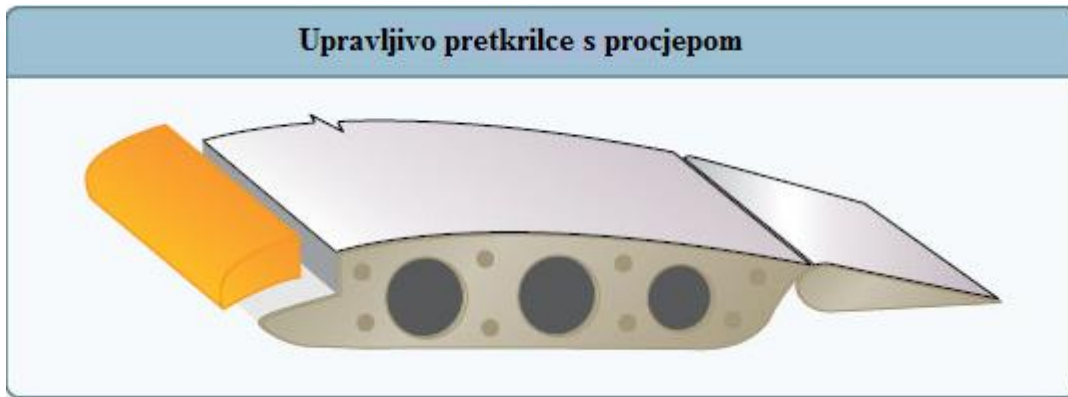


**Slika 10.: Fiksno pretkrilce s procjepom na zrakoplovu Stinson 108-1**

Izvor: <https://www.flickr.com/photos/av8pix/2424607309> (kolovoz 2019)

### **Upravljivo pretkrilce s procjepom**

Kod automatskog i upravljivog pretkrilca s procjepom (Slika 11.) pri malim napadnim kutovima pretkrilce je priljubljeno uz osnovni aeroprofil. Kako se napadni kut povećava formira se zona visokog tlaka koja se pomiče ispod donje površine krila, omogućujući pretkrilcu da se pomiče prema naprijed. Međutim, neka pretkrilca pilot može uvlačiti i izvlačiti pri bilo kojem napadnom kutu. Otvaranjem procjepa omogućuje se zraku ispod donje površine krila da opstrujava gornju površinu, odgađajući prerano odvajanje strujnica.

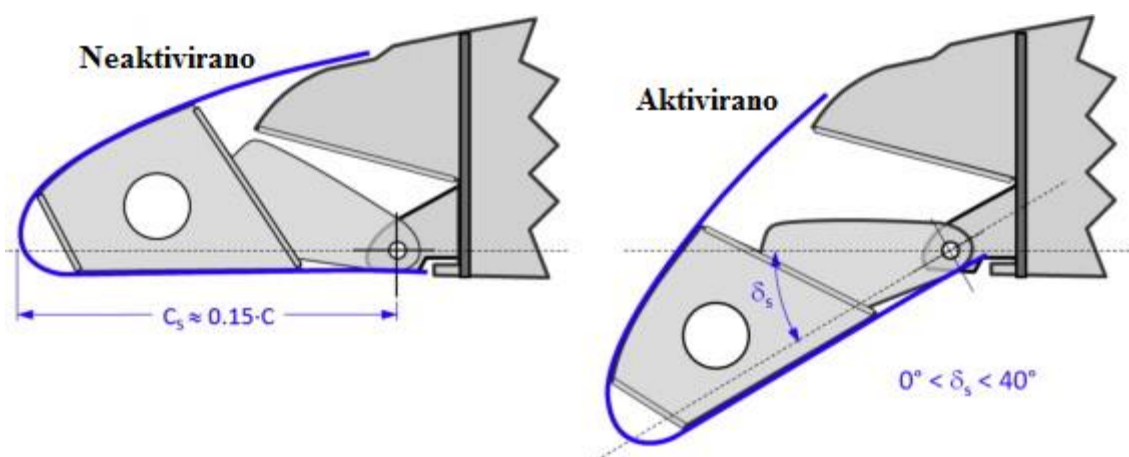


**Slika 11.: Upravljivo pretkrilce s procjepom**

Izvor: <https://www.flightliteracy.com/flight-control-systems-secondary-flight-controls-part-one> (kolovoz 2019.)

### Zakretni nos pretkrilca

Ovo pretkrilce se koristi za povećanje maksimalne vrijednosti koeficijenta uzgona i povećanje zakrivljenosti profila. Za velike brzine upotrebljavaju se tanki aeroprofil s malim polumjerom zakrivljenja nosa aeroprofila. Zbog neprilagođenosti fluidne struje malom zakrivljenju profila, već kod umjerenih napadnih kutova na djelu gornje površine u blizini prednjeg brida javlja se mjehurasta zona odvajanja koja se može proširiti do izlaznog brida i uzrokovati naglo smanjenje koeficijenta uzgona. Da bi se to izbjeglo nos aeroprofila se čini zakretnim oko zgloba da bi se konture gornje površine prilagodile većim napadnim kutovima (Slika 12.).



**Slika 12.: Zakretni nos pretkrilca**

Izvor: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/leading-edge-flap> (kolovoz 2019.)

Dužina tetive pretkrilca iznosi 0,15c, a kut zakretanja se kreće od 15° do 40°. Glavne prednosti su niska cijena, relativno laka proizvodnja, mali utjecaj na težinu krila i otpor. Porast koeficijenta uzgona za ovo pretkrilce je daleko manje da bi našlo svoju primjenu u putničkim zrakoplovima, stoga se koristi na vojnim zrakoplovima kao što je Lockheed F-104 Starfighter (Slika 13.).



**Slika 13.: Prikaz zakretnog nosa pretkrilca na zrakoplovu Lockheed F-104 Starfighter**

Izvor: <https://www.pinterest.com/pin/308004061990016564> (kolovoz 2019.)

### **Krugerovo pretkrilce**

Krugerovo pretkrilce kada je neaktivirano uklapa se u donju površinu krila neposredno iza prednjeg brida, a karakteristično je po tome što nema procjep. Izvlačenjem pretkrilca ispod donje površine krila povećava se zakrivljenost, a samim time i uzgon. Efikasnost ovog pretkrilca ovisi o kutu zakretanja i dužini tetive krilca. Ako je kut zakretanja manji od 100° on ima negativan utjecaj na porast koeficijenta uzgona. Kada kut zakretanja pređe 100° s maksimalnom vrijednosti do 140°, ima pozitivan utjecaj na porast koeficijenta uzgona. Ovakva izvedba pretkrilca je karakteristična za zrakoplove tvrtke Boeing (Slika 14.).



**Slika 14.: Krugerovo pretkrilce na zrakoplovu Boeing 727**

Izvor: <https://www.flickr.com/photos/95025859@N08/10639982755> (kolovoz 2019.)

#### 2.1.2.2. Zakrilca

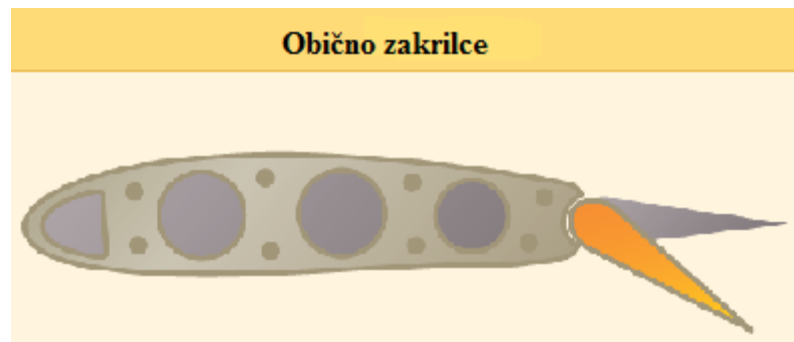
Zakrilca su pokretne površine koje se nalaze duž stražnjeg dijela krila postavljena na dijelu bliže trupu zrakoplova čijim se aktiviranjem mijenja zakrivljenost aeroprofila. Povećanje uzgona omogućuje zrakoplovu da poleti pri nižim brzinama. Promjenom napadnog kuta zakrilaca koeficijent otpora raste proporcionalno više od koeficijenta uzgona, čime se smanjuje finesa. To se može smatrati povoljnim jer tijekom slijetanja dodatni otpor usporava zrakoplov, čime se smanjuje potrebna duljina staze za slijetanje.

Vrste zakrilca su:

- Obično zakrilce
- Podijeljeno zakrilce
- Zakrilce s procjepom
- Zakrilce s dva procjepa
- Fowlerovo zakrilce

## Obično zakrilce

Obično zakrilce (Slika 15.) je najjednostavniji tip zakrilca te između njega i osnovnog profila krila nije moguće strujanje fluida. Optimalna dužina tetive zakrilca iznosi  $0,25c$ , a kut zakretanja se nalazi u području  $50^{\circ}$ - $60^{\circ}$ . Povećava zakrivljenost aeroprofila što rezultira značajnim porastom koeficijenta uzgona pri nekom napadnom kutu. U isto vrijeme znatno se povećava otpor čime se centar potiska (engl. *Center of pressure* - *CP*) pomiče ka stražnjem bridu aeroprofila. Time se smanjuje moment pa nos zrakoplova ima tendenciju poniranja prema dolje. Zato se položaj zakrilca s manjim kutom zakretanja koristi se kod polijetanja jer veći kut ima za posljedicu veće otpore. Ovaj tip zakrilca se koristi većina manjih i lakših zrakoplova kao što je Piper PA-23-250 (Slika 16.).



Slika 15.: Obično zakrilce

Izvor: <http://learntoflyblog.com/2015/10/19/aircraft-systems-flaps> (kolovoz 2019.)



Slika 16.: Obično zakrilce na zrakoplovu Piper PA-23-250

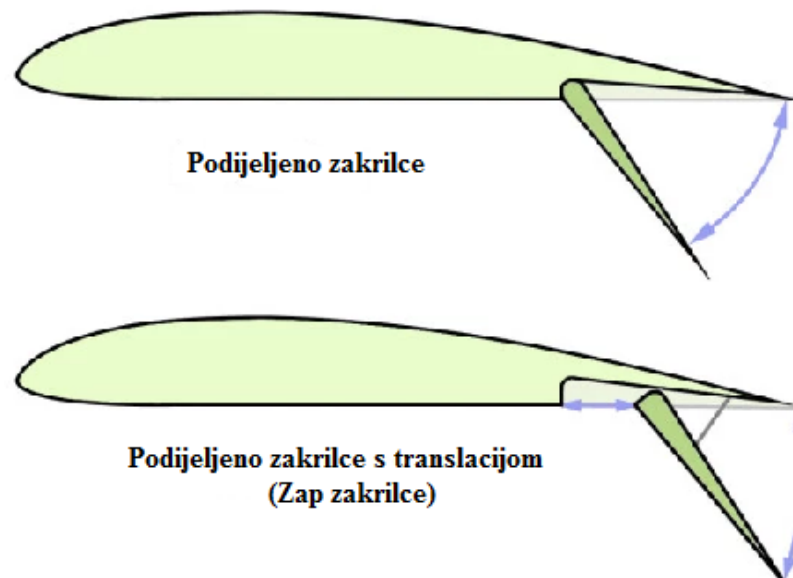
Izvor: <https://aviation.stackexchange.com/questions/27194/does-the-piper-aztec-have-flaps-and-slats-and-if-so-what-kind> (kolovoz 2019.)

## Podijeljeno zakrilce

Postoje dvije izvedbe ovog zakrilca: podijeljeno i podijeljeno s translacijom (Zap zakrilce). Podijeljeno zakrilce (Slika 17.) je s zglibom ugrađena iznad donjake u neposrednoj blizini stražnjeg brida. Tijekom polijetanja zakreću se za kut od  $10^\circ$  do  $20^\circ$ , a pri slijetanju od  $50^\circ$  do  $60^\circ$ . Povećanje koeficijenta uzgona se temelji na povećanju zakrivljenosti aeroprofila i upravljanja graničnim slojem. Strujanje fluida duž donjake, a zatim preko donje strane zakrilca stvara podtlak u zoni između krila i spuštenog zakrilca. Podtlak ubrzava strujanje u graničnom sloju na gornjaci zbog čega dolazi do snižavanja tlaka na gornjaci. Time se odgađa odvajanje graničnog sloja za veće napadne kutove.

Ako se uspoređuje s običnim zakrilcem za isti kut zakretanja i istu duljinu tetive, podijeljeno zakrilce daje veći porast vrijednosti koeficijenta uzgona, ali isto tako se povećava koeficijent otpora zbog vrtložnog traga koji nastaje iza aeroprofila.

Zap zakrilce (Slika 17.) se razlikuje od podijeljenog u tome što osim zakretanja u zglibu ima mogućnost translaticiranja do stražnjeg brida krila. Ono omogućava povećanje zakrivljenosti i povećanje površine aeroprofila. Kada je potpuno aktivirano stvara puno otpora, nos zrakoplova ponire prema dolje i funkcioniranje ovog zakrilca je puno kompliciranije u usporedbi s običnim i podijeljenim zakrilcem.



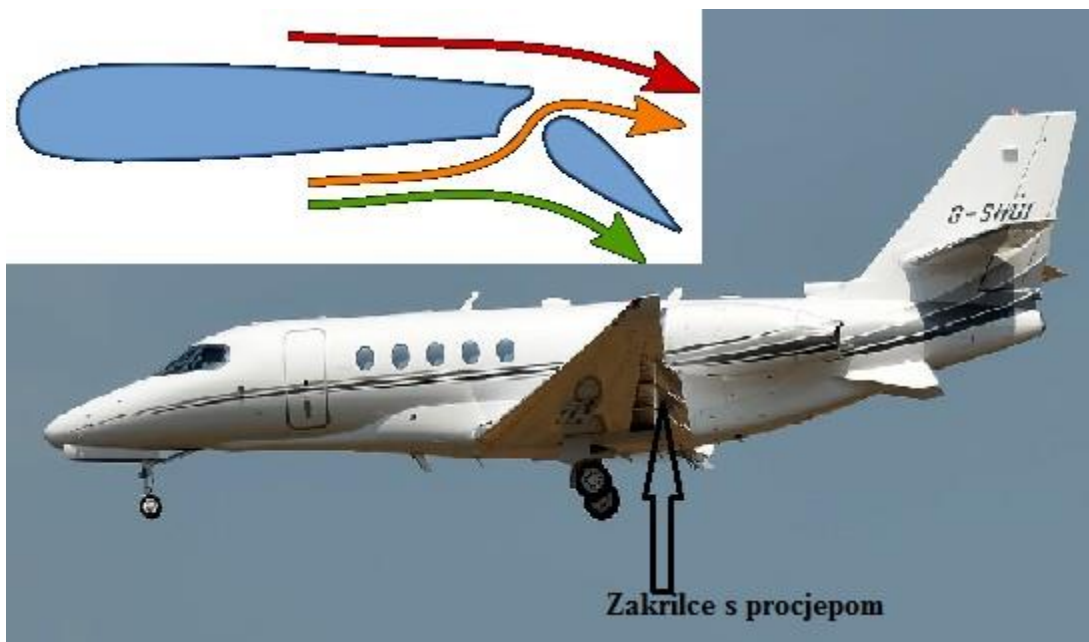
Slika 17.: Podijeljeno zakrilce i Zap zakrilce

Izvor: <https://ultralightdesign.wordpress.com/2017/10/23/all-in-a-flap> (kolovoz 2019.)

## Zakrilce s procjepom i zakrilce s dva procjepa

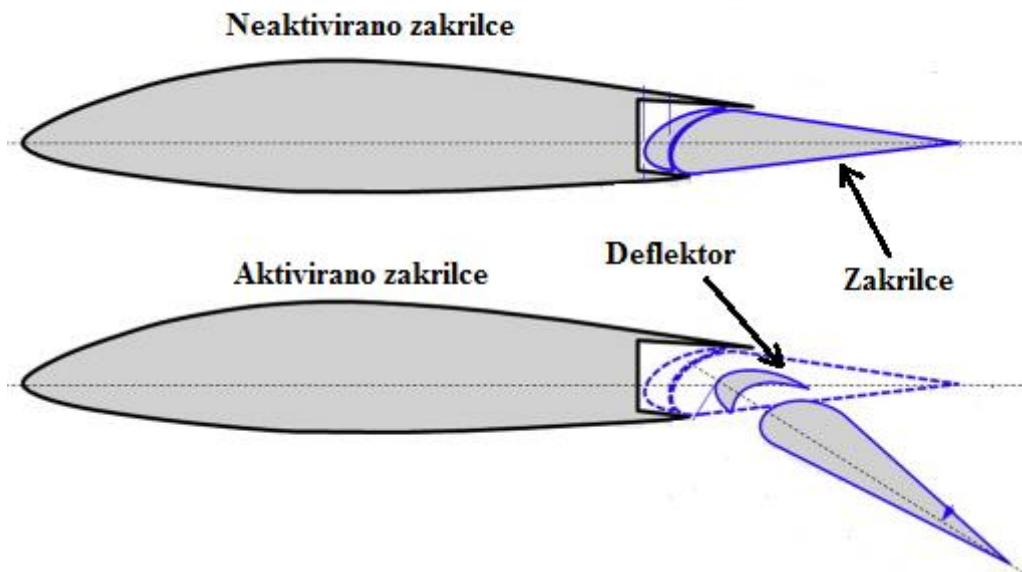
Kada je zakrilce s procjepom neaktivirano ono čini dio krila uključujući stražnji brid. Kada se zakrilce aktivira zakreće se za željni kut čime se otvara procjep između osnovnog krila i zakrilca. Dužina tetive iznosi  $0,3c$ , akut zakretanja do  $50^\circ$ .

Djelovanje zakrilca se temelji na povećanju zakrivljenosti i upravljanja graničnim slojem. Aktivacijom se stvara nadtlak s donje strane krila i zakrilca u odnosu na tlak iznad procjepa. Strujanje fluida s visokom energijom upuhuje se kroz procjep iznad gornjake čime se odgađa odvajanje graničnog sloja i ponovno uspostavlja laminarno strujanje, pružajući veći porast koeficijenta uzgona. Tako se dobivaju puno bolji rezultati u smislu povećanja maksimalne vrijednosti koeficijenta uzgona nego što se dobiju za obično i podijeljeno zakrilce. Ovaj dizajn se obično koristi kod manjih zrakoplova s manjim brojem sjedala kao što je Cessna 550 Citation II (Slika 18.).



**Slika 18.: Prikaz zakrilca s procjepom i njegovog primjera na zrakoplovu Cessna 550 Citation II**

Zakrilce s dva procjepa (Slika 19.) je po obliku i funkciji slično zakrilcu s procjepom. Ono sadrži deflektor koji je postavljen između osnovnog aeroprofila i zakrilca, koji strujanje fluida usmjerava kroz dva procjepa. Kada zakrilce nije aktivirano ono se uvlači u unutrašnjost krila, a zakrilce postaje dio krila. Efekti djelovanja se temelji na povećanju zakrivljenosti aeroprofila, upravljanja graničnim slojem i povećanjem površine.

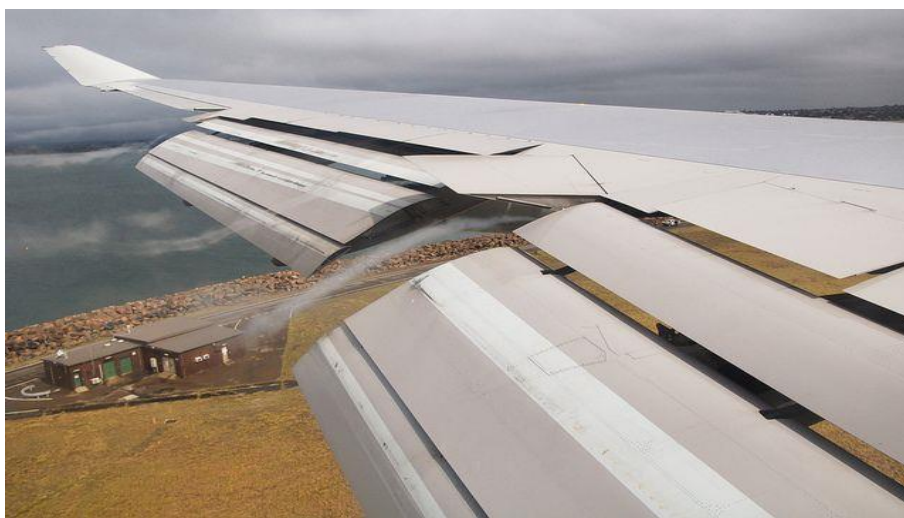


**Slika 19.: Zakrilce s dva procjepa**

Izvor: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/maximum-lift-coefficient> (kolovoz 2019.)

### **Fowlerovo zakrilce**

Fowlerovo zakrilce je slično zakrilcu s procjepom. Ovo zakrilce se ne rotira u zglobu nego se pomiče nizstrujno duž stražnjeg dijela brida krila, gdje se zatim pomiče iz svog ležišta za gotovo cijelu dužinu tetive i zakreće za željeni kut. Prednost ovog zakrilca je u tome što je povećanje maksimalne vrijednosti koeficijenta uzgona veće nego za prethodna zakrilca.



**Slika 20.: Fowlerovo zakrilce s dva procjepa na krilu zrakoplova Boeing 747**

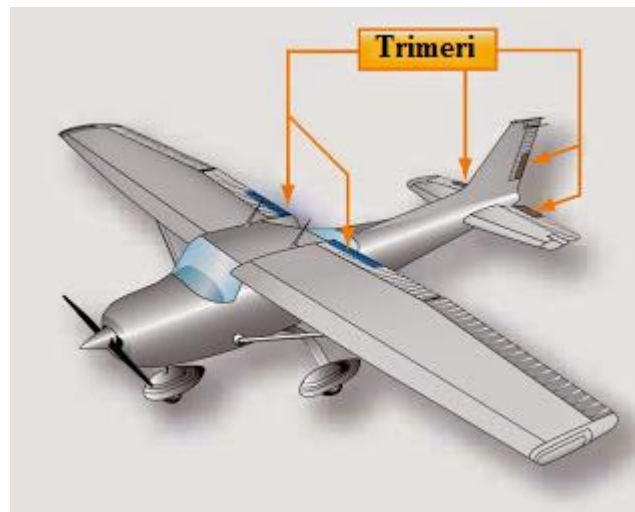
Izvor: <https://www.pinterest.com/pin/645985140273137854> (kolovoz 2019.)



Djelovanje se bazira na povećanju zakrivljenosti i upravljanja graničnim slojem. Otklanjanjem zakrilca prema nazad povećava se efikasnost cjelokupne površine krila, smanjuje se relativna debljina što uzrokuje smanjenje kritičnog napadnog kuta. Koristi se u kombinaciji s dva ili tri procjepa i mnogi zrakoplovi koriste neku od tih varijacija kao što je Boeing 747 (Slika 20.).

#### 2.1.2.3. Trimeri

Trimeri su male sekundarne upravljačke površine koji su spojeni na izlaznoj ivici neke veće primarne upravljačke površine (Slika 21.). Njihova svrha je da smanjuju potrebnu količinu sile koju pilot primjenjuje na upravljačke kontrole leta, te kako bi olakšali kretanje i promjenu pozicije upravljačke površine na koju su pričvršćeni. Njihov otklon je uvijek suprotan otklonu komandi leta.



**Slika 21.: Prikaz trimera na krilima zrakoplova i repnim upravljačkim površinama**

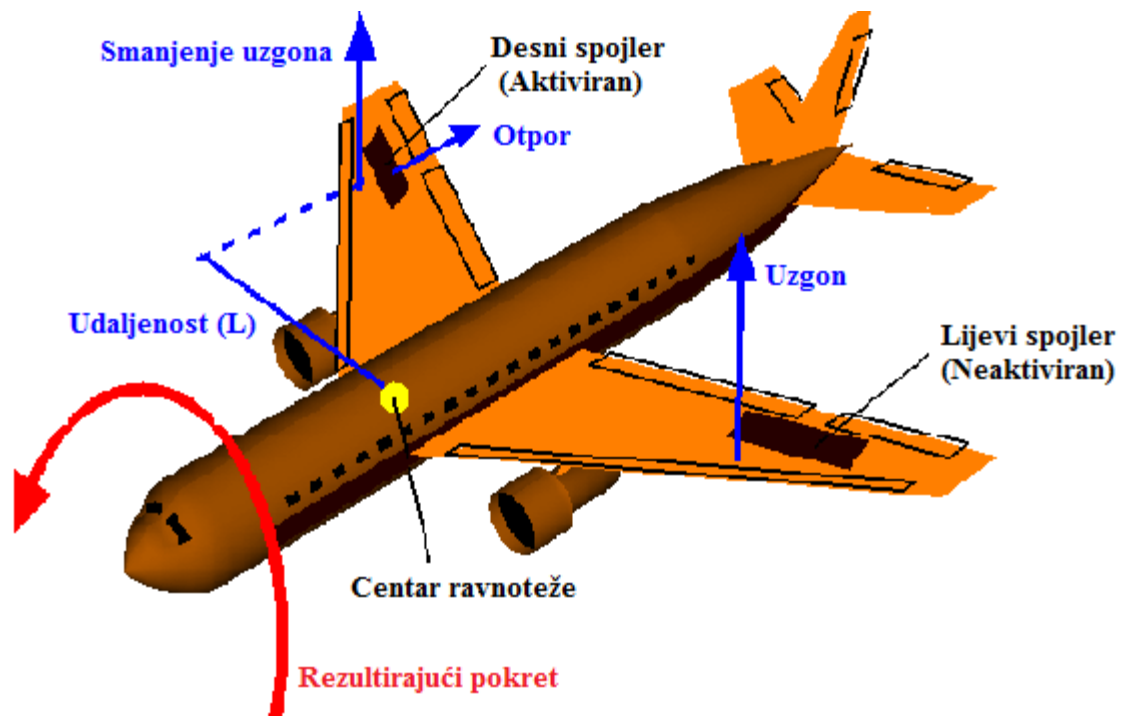
Izvor: <https://www.aircraftsystemstech.com/p/trim-controls-included-in-trim-controls.html> (kolovoz 2019.)

#### 2.1.2.4. Aerodinamičke kočnice i spojleri

Aerodinamičke kočnice su dodatne pomične površine koje se sastoje od panela koji su u skladu s oblikom zrakoplova i upravljaju se hidrauličnim sustavima, a nalaze na gornjoj strani krila ili trupu zrakoplova koje svojim aktiviranjem povećavaju koeficijent otpora, smanjuju brzinu leta i povećavaju kut prilaza prilikom slijetanja. Pilot ih može aktivirati ručno ili se prema potrebi u određenim situacijama otklanjaju automatski. Uglavnom se koriste na gotovo svim vojnim zrakoplovima i nekim komercijalnim tipovima zrakoplova.

Spojleri su paneli koji su montirani na gornju površinu krila koji, kad su aktivirani, povećavaju otpor i smanjuju uzgon tako što poremećuju strujanje zraka preko krila. Na manjim zrakoplovima obično se koriste za kontrolu stope spuštanja i preciznije slijetanje, dok kod ostalih zrakoplova služi za kontroliranje „valjanja“ čime se eliminira efekt „*Adverse yaw*“. Smanjivanjem uzgona težina se prenosi na kotače poboljšavajući tako učinkovitost kočenja.

Primjer: Za skretanje desno, spojler na desnoj strani krila se podiže smanjujući jedan dio uzgona, a povećava se otpor. Desno krilo se spušta, zrakoplov se naginje i skreće u desno (Slika 22.). Aktiviranje spojlera na oba krila u isto vrijeme omogućuje zrakoplovu spuštanje bez dobivanja dodatne brzine.



**Slika 22.: Prikaz što se događa kada pilot otkloni samo spojler na desnoj strani krila**

Izvor: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/spoil.html> (kolovoz 2019.)

Razlika između aerodinamičkih kočnica i spojlera je ta što su aerodinamičke kočnice dizajnirane da povećaju otpor dok se uzgon malo mijenja, a dok spojleri uvelike smanjuju uzgon uz umjereni porast otpora.

## 2.2. Nekonvencionalne upravljačke površine

### 2.2.1. Canard

„*Canard*“ dolazi od francuske riječi što znači patka. Riječ je o vrsti zrakoplova koja ne zahtijeva konvencionalni oblik repa. U ovom dizajnu horizontalni stabilizator je zamijenjen horizontalnom površinom koja je montirana na trup zrakoplova ispred glavnog krila bliže nosu.

Za razliku od konvencionalnih repnih površina, težina zrakoplova je podijeljena između kanarda i krila, omogućujući lakše opterećenje krila i uporabu lakše strukture krila. Jedan od efekta kanarda montiranog naprijed, ispred glavnog krila, je što stvara uzgon koji se suprotstavlja negativnom momentu krila koji za posljedicu ima da nos zrakoplova počinje padati prema dolje. Oni se ugrađuju pod malo većim kutom nagnutosti od glavnog krila. To rezultira da kanard ima veći napadni kut čime se postiže stvaranje pozitivnog momenta krila koji podiže nos zrakoplova, a daljnjim povećanjem napadnog kuta dolazi do sloma uzgona na kanardu prije nego li na glavnom krilu. Ovaj dizajn je uglavnom našao primjenu kod lovačkih zrakoplova kao što je Eurofighter Typhoon (Slika 23.) jer time dobivaju veću sposobnost manevriranja.



**Slika 23.: Prikaz kanarda na borbenom zrakoplovu Eurofighter Typhoon**

Izvor: <https://www.paolacasoli.com/2015/09/eurofighter-typhoon-facts-figures-cose-chi-lo-fa-e-chi-lo-compra> (kolovoz 2019.)

### 2.2.2. V-rep

V-rep (Slika 24.) zamjenjuje tradicionalne vertikalne i horizontalne površine s dvije površine koje su postavljene pod određenim kutom u obliku slova V. Te dvije fiksne repne površine djeluju kao vertikalni i horizontalni stabilizator i svaka ima svoju pokretnu upravljačku površinu. Kada pilot pomiče upravljačku palicu prema naprijed, kormila se pokreću simetrično, te se stvara moment poniranja, dok se pri povlačenju upravljačke palice dolazi do momenta propinjanja. Pritiskanjem nožnih pedala jedno ili drugo kormilo će se podići ili spuštati što omogućuje skretanje zrakoplova. Prednost V-repa je što smanjuje broj upravljačkih površina čime se smanjuje masa i otpor zrakoplova. Nedostatak je što zahtjeva duži stražnji trup i može doći do pucanja pri ekstremnom stresu.



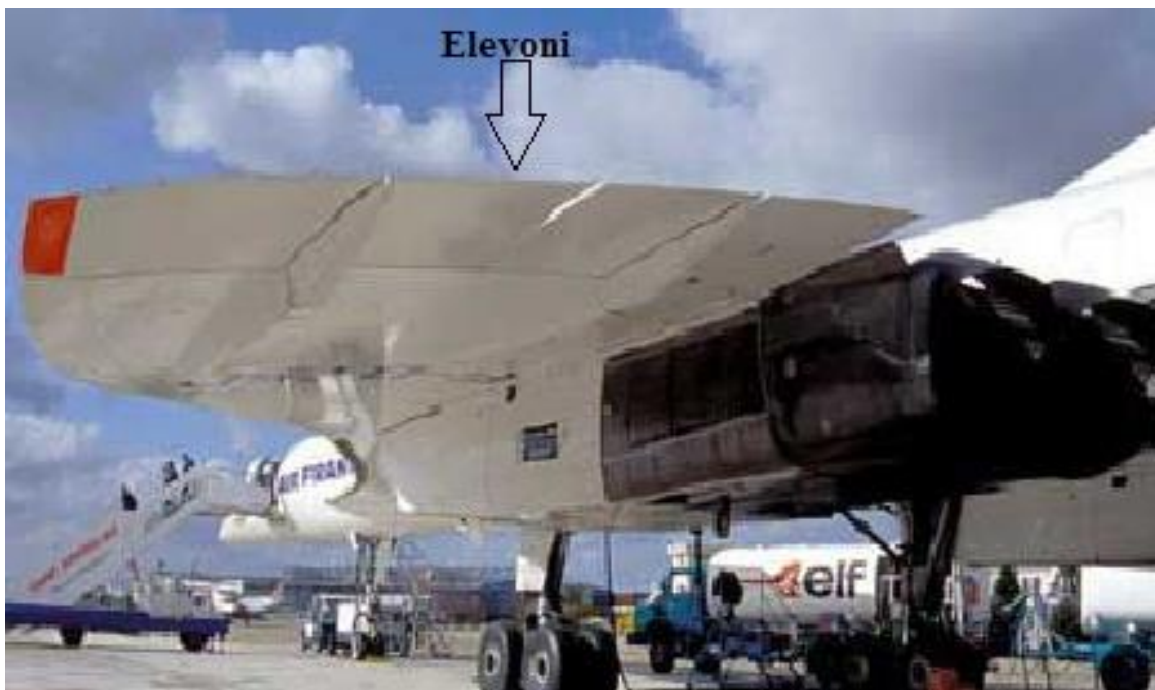
**Slika 24.: Prikaz V-repa na zrakoplovu Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk**

Izvor: <https://mymodelplanes.wordpress.com/2011/03/07/south-korea's-plans-to-buy-global-hawk-accessed-by-chinese-hackers> (kolovoz 2019.)

### 2.2.3. Elevon

Zrakoplovi koji koriste delta krila, kao što je Concorde (Slika 25.), ne mogu koristiti konvencionalne upravljačke sustave po sve tri osi zbog njihovog jedinstvenog oblika krila. Kao zamjena za krilca i kormilo dubine koristi se elevon koji kombinira funkcije tih dviju površina. Oni su ugrađeni na izlaznoj ivici svakog krila. Kada se istovremeno pomiču prema gore ili dolje, tada se elevon koristi u funkciji kormila dubine. Kada se jedan elevon otkloni prema dolje, a drugi prema gore tada se oni nalaze u funkciji krilaca. Kada pilot istovremeno

djeluje na kontrole, mehaničkim ili elektroničkim putem mogu se koristiti kombinacije ovih dviju funkcija kako bi se istovremeno upravljalo valjanjem i propinjanjem/poniranjem.



**Slika 25.: Elevoni na zrakoplovu Concorde**

Izvor: <https://www.heritageconcorde.com/concorde-elevons-and-rudder> (kolovoz 2019.)

### 3. MEHANIČKI SUSTAVI UPRAVLJANJA ZRAKOPLOVOM

Mehanički ili ručni sustav upravljanja zrakoplovom je osnovni način upravljanja zrakoplovom. Taj sustav se koristio na prvim zrakoplovima (Slika 26.) gdje aerodinamičke sile nisu bile prevelike da ih pilot ne može savladati. Mehanički sustav upravljanja sastoji se od skupa mehaničkih dijelova kao što su:

- Kablovi/Žice/Sajle/Šipke
- Koloture
- Upravljačke palice
- Vodilice kroz koje se usmjerava kabel
- Protuutege koji održavaju ravnotežu i stabilnost
- Opruge
- Zatezači i kabelski konektori

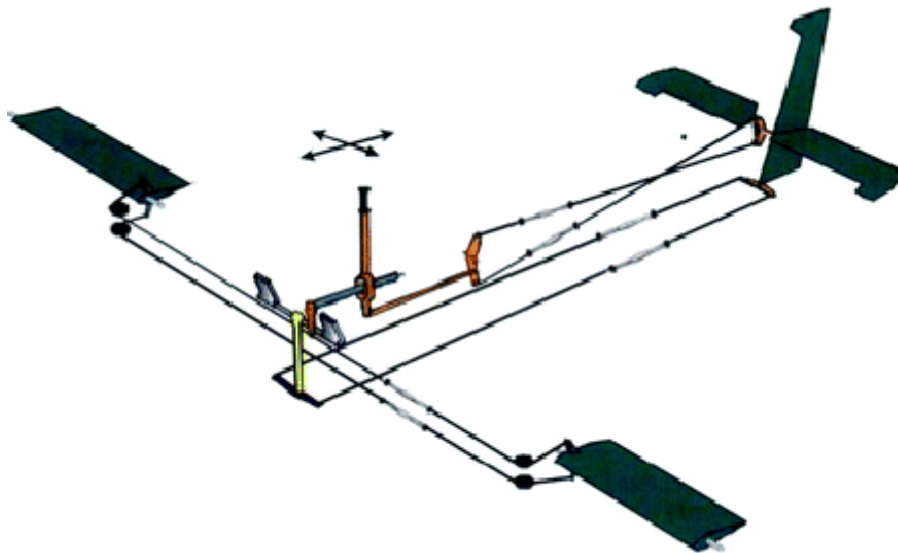
Za lakše zrakoplove i one koji lete pri sporijim brzinama upravljačke površine, koje su proporcionalno veće nego one kod brzih zrakoplova, imaju manje opterećenje zrakom koje djeluje na njih kada je upravljačka površina otklonjena. To omogućuje konstruktoru da koristi direktno mehaničko vezivanje između komandi i upravljačke palice/pedala kormila. Tipovi direktne mehaničke veze su upravljački kabeli i upravljačke šipke. Kako bi se osiguralo da ulazne komande, kojima upravlja pilot, se trenutno prenesu do upravljačkih površina gdje se koriste upravljački kabeli, kabelski sustavi moraju biti pod napetošću. Ova napetost se podešava uporabom zatezača. Ako sustav upravljačkih kabela izgubi napetost i postane labav, može doći do nekontroliranih kretanja.



**Slika 26.: Zrakoplov Fokker Eindecker s mehaničkim sustavom upravljanja**

Izvor: <http://www.jimforeman.com/Stories/fokker.htm> (kolovoz 2019.)

Dva upravljačka kabela prema ulazu upravljačke palice/pedala kormila pravca povezuje svaku upravljačku površinu, a kabel može raditi samo ako je napet. Kada pilot djeluje na upravljačku palicu prema naprijed ili na pedale kormila pravca, kabel pod napetošću prenosi te komande, a drugi kabel prati pokrete do upravljačkih površina. Kada se radi obrnuti postupak funkcija kabela je obrnuta. Da bi se osiguralo da kableli mijenjaju smjer glatko i da sustav stvara minimalno moguće trenje, primjenjuju se koloture. Kako ne bi došlo do oštećenja kabela ili strukture zrakoplova od kretnje kabela naprijed/nazad, koriste se vodilice kroz koje se kabel usmjerava. Pilot dobiva mehaničku prednost tako što ima upravljačke kabele podešene prema bazi upravljačke palice i polugu koja je pričvršćena na pedale kormila pravca (Slika 27.).

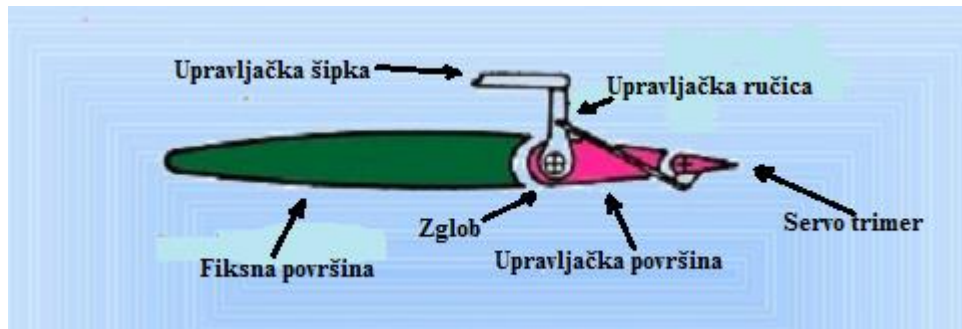


**Slika 27.: Sustav s upravljačkim kablovima [1]**

Sustav upravljačke šipke koristi cijev koja može podnijeti kompresiju i zatezanje, i na taj način dopušta jednoj šipki upravljanje u oba smjera. Gdje šipke prolaze kroz strukturu primjenjuje se, kao i u prijašnjom slučaju, vodilice. Kako bi se šipka mogla poduprijeti po njezinoj dužini koristi se poluga s praznim hodom. Kad šipka mora promijeniti smjer, koristi se zupčasta poluga.

Neki mehanički sustavi upravljanja koriste servo trimere koji pružaju aerodinamičku pomoć prilikom savladavanja sila. Servo trimeri su mali uređaji koji su zglobno povezani s primarnom upravljačkom površinom (kormilo pravca i kormilo visine) i pomažu prilikom pomicanja tih upravljačkih površina (Slika 28.). Kada se primarna upravljačka površina otkloni servo trimer će se otkloniti u suprotnom smjeru od primarne upravljačke površine,

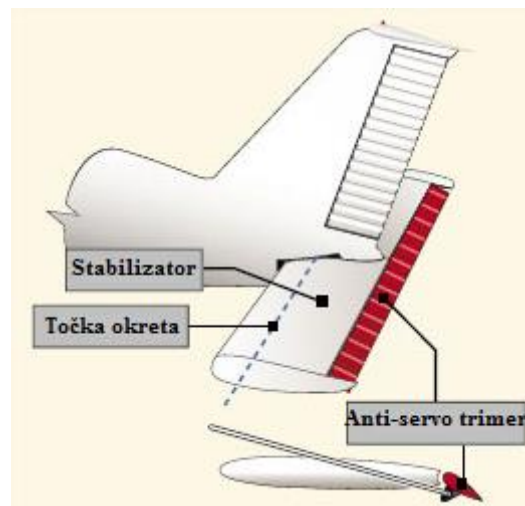
čime se smanjuje potrebna količina mehaničke sile koju pilot treba primijeniti i upravljanje zrakoplovom postaje lakše.



**Slika 28.: Servo trimeri**

Izvor: <http://precolumbianweapons.com/trim-aircraft/trim-aircraft-fresh-basic-aircraft-control-system> (kolovoz 2019.)

Anti-servo trimer radi u suprotnom smjeru od servo trimera. On se otklanja u istom smjeru kao i upravljačka površina (Slika 29.) zbog čega je kretanje upravljačke površine otežano i potrebna je veća količina sile koju pilot treba primijeniti na upravljačku palicu/pedale kormila. Ovo se možda čini kontraproduktivno, ali se uobičajeno koristi na zrakoplovima gdje su kontrole previše lagane pa tako zrakoplov dobiva dodatnu stabilnost.



**Slika 29.: Anti-servo trimeri**

Izvor: <http://www.flightlearnings.com/2009/09/12/secondary-flight-controls-part-five--balance-tabs-and-antiservo-tabs> (kolovoz 2019.)



## 4. HIDRAULIČKI SUSTAVI UPRAVLJANJA ZRAKOPLOVOM

Hidraulički sustavi nisu novost u zrakoplovstvu. Već kod prvih zrakoplova koristili su se hidraulički sustavi za kočnice. Sile koje su djelovale na upravljačke površine postajale su sve veće te su se mehanički sustavi izlagali sve većim opterećenjima. Kako su zrakoplovi postajali sve sofisticiraniji razvijeni su noviji sustavi koji koriste hidrauličku snagu. Glavni razlog za korištenje hidraulike je taj što imaju mogućnost prijenosa velikih sila, na određene dijelove koji se trebaju aktivirati, s malim volumenom tekućine. Hidraulički sustavi imaju niz prednosti pred drugim sustavima; jako su pouzdani, njihove tekućine su praktički nestišljive što omogućuje prijenos velikih sila, kombiniraju prednosti male težine, jednostavna instalacije i kontrola, gotovo 100%-tna efikasnost i minimalni zahtjevi održavanja.

Kompleksnost hidrauličkog sustava varira od malih zrakoplova, koji zahtijevaju fluid samo za kočnice na kotačima, do onih većih zrakoplova gdje je sustav mnogo veći i složeniji. Kako bi se postigla potrebna redundancija i pouzdanost, sustav se može sastojati od nekoliko podsustava. Svaki podsustav ima crpke pokretane motorom, akumulatore, izmjenjivač topline, sustav filtriranja, itd. Tlak u tim sustavima kreće se u granicama od nekoliko stotina psi (engl. *Pound per square inch*) kod malih zrakoplova, do 5.000 psi kod velikih transportnih zrakoplova.

Jedinice koje koriste hidraulične sustave su:

- Kočnice na kotačima
- Uvlačenje/izvlačenje stajnog trapa
- Pretkrilca i zakrilca
- Aerodinamičke kočnice i spojleri
- Umjetni osjećaj (*Q feel*)
- Cargo vrata/utovarne rampe itd.

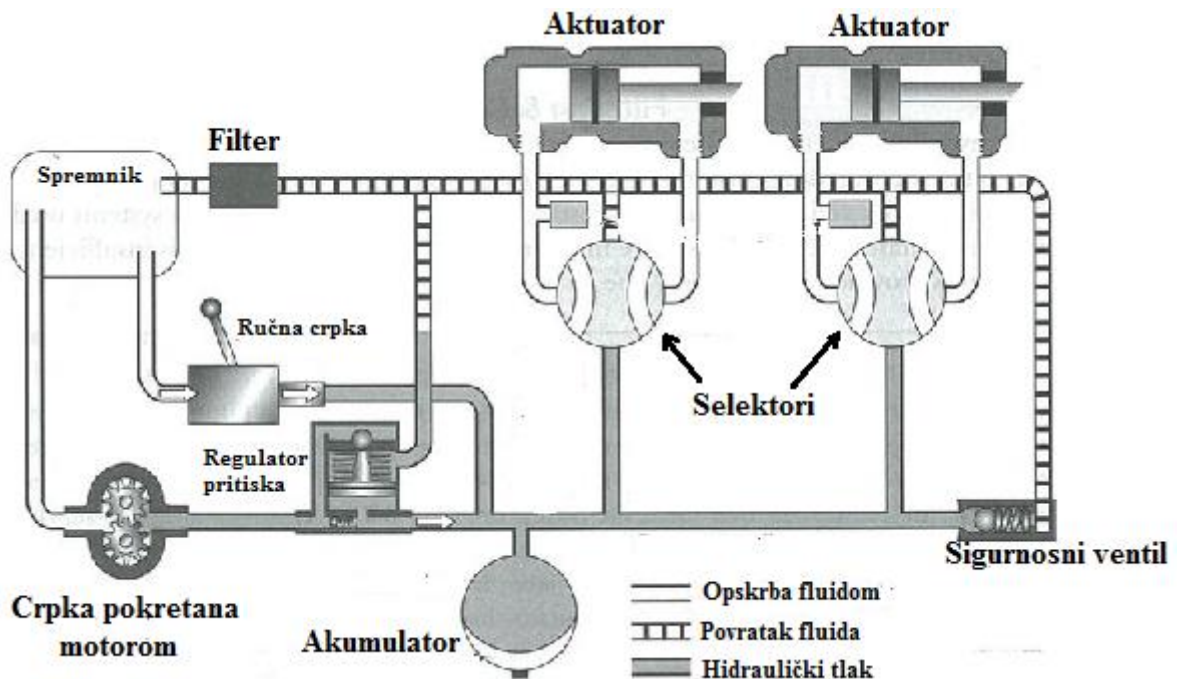
Danas se koristi tri vrste tekućina, od koja svaka ima svoja svojstva i zahtjeve:

- Biljne – obojene su plavom bojom i rade se od ricinusovog ulja ili alkohola. Uglavnom se koristi na starijim zrakoplovima gdje se koriste brtve od prirodne gume (koje su sad zamijenjene sintetičkom). Uporaba ove tekućine može prouzrokovati mulj i koroziju.

- Mineralne – obojene su crveno i bazira se na petrokemijskim proizvodom kerozina. Ima dobra svojstva podmazivanja, vrlo je stabilna s malom promjenom u viskoznosti uslijed promjene temperature. Ne smiju se koristiti u kombinaciji s prirodnom gumom i jako su zapaljive.
- Sintetičke – ovaj tip tekućine je obojan u ljubičasto i manje je zapaljiv od mineralnog tipa. Bazira se na sintetičkom fosfatu i ima tendenciju privlačenja vode (vlage), a može degradirati zrakoplovne instalacije.

Osnovni hidraulički sustav se sastoji od spremnika, crpke (ručne, električne ili pokretane motorom), filtera da održava fluid čistim, ventila da održava smjer toka, sigurnosnog ventila da oslobodi prekomjerni pritisak i aktuatora.

Crpke crpe fluid iz spremnika te ga distribuiraju kroz aktuator ili servo u sustav cijevi koje raspoređuju fluid po cijelom zrakoplovu. Servo je cilindar unutar kojeg se nalazi klip koji pretvara snagu fluida u rad i stvara energiju potrebnu za pomicanje zrakoplovnih sustava (Slika 30.). Servo može biti jednostruki ili dvostruki. Ventil omogućuje fluidu održavanje smjera. Jednostruki servo osigurava snagu u samo jednom smjeru, dok dvostruki osigurava u oba smjera, a to je osobito važno za operacije uvlačenja/izvlačenja stajnog trapa tijekom kojeg fluid mora raditi u dva različita smjera. Drugi sustav cijevi vraća iskorišteni fluid nazad u spremnik. U sustavu su najčešće ugrađeni akumulatori koji skladište fluid pod tlakom za korištenje tijekom glavnih operacija. Crpke mogu biti fiksne (rade konstantno, višak fluida se vraća u spremnik kada nije potreban) i varijabilne (rade samo koliko je potrebno, uzimajući energiju po potrebi).



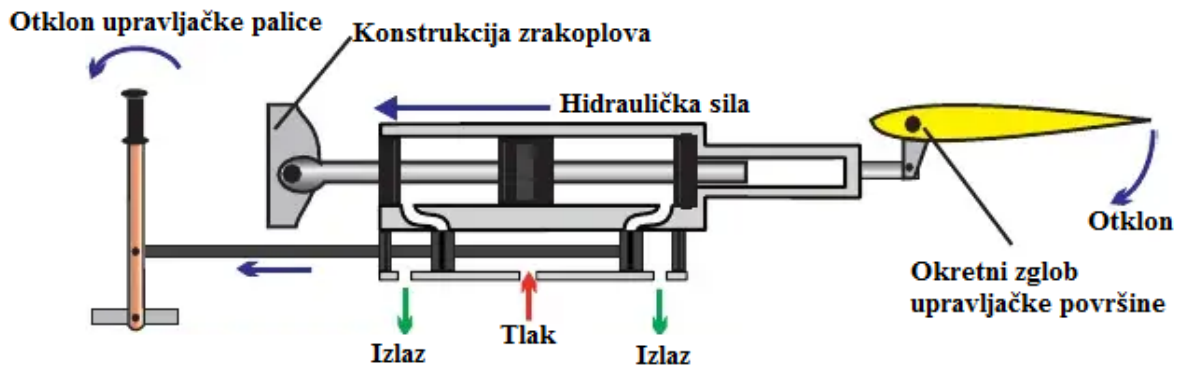
**Slika 30.: Prikaz hidrauličkog sustava**

Izvor: <https://slideplayer.com/slide/1698384> (kolovoz 2019.)

Većina zrakoplova ima dva, tri ili više hidrauličkih sustava podešenih tako da ako jedan od sustava zakaže, ostali mogu preuzeti funkciju bez ikakvih smetnji u daljnjem radu.

Porastom opterećenja koja nastaju na većim i bržim zrakoplovima prilikom strujanja zraka preko upravljačkih površina primjenjuju se jedinice za kontrolu snage (engl. *Power control unit* - PCU). Uporabom PCU-a savladavaju se sile za koje bi inače bilo potrebno uporabiti pretjerane mehaničke veze.

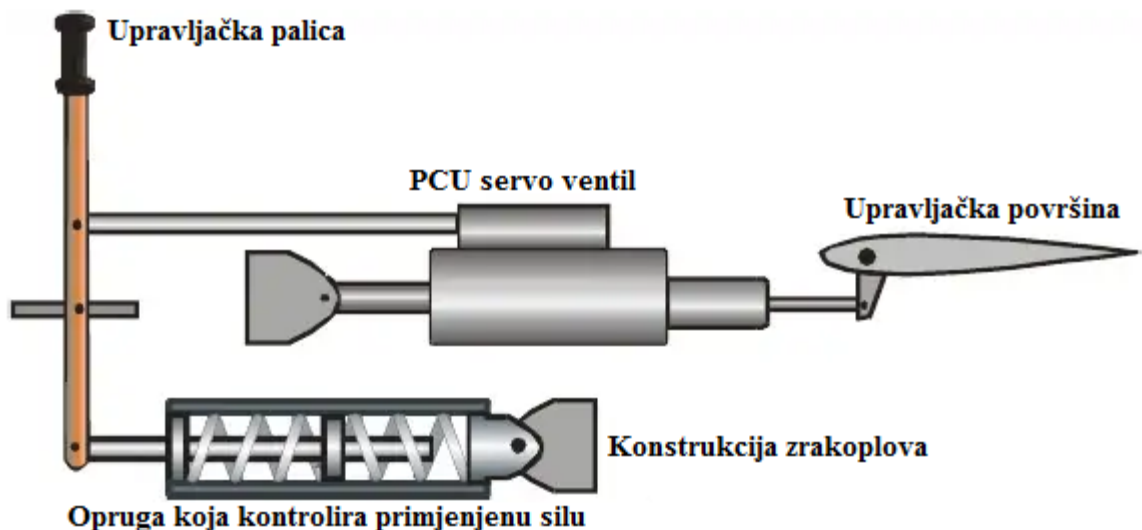
Ovaj sustav je podešen između upravljačkih površina i upravljačke palice. Kada pilot djeluje na upravljačku palicu otvara se ventil, koji omogućuje hidrauličkom tlaku zrakoplovnog sustava da pobudi silu koja pokreće upravljačke površine (Slika 31.). Kako nema direktne veze između pilota i upravljačke površine, otkaz jednog PCU-a ili gubitka hidrauličkog tlaka može dovesti do otkaza kontrola. Kako bi se to izbjeglo koristi se više od jednog PCU-a pričvršćenog na upravljačku površinu, gdje svaki PCU ima odvojen izvor hidrauličke snage.



**Slika 31.: Prikaz osnovnog PCU-a [1]**

U zrakoplovima gdje se koristi PCU pilot nema direktnu povratni „osjećaj“. U tu svrhu konstruktori moraju koristiti umjetni osjećaj (*Q feel*) kako bi pilot osjetio koliki učinak ima prilikom upravljačkih kretnji. U modernim zrakoplovima postoje dva tipa sustava umjetnog osjećaja: s oprugom i hidraulički umjetni osjećaj.

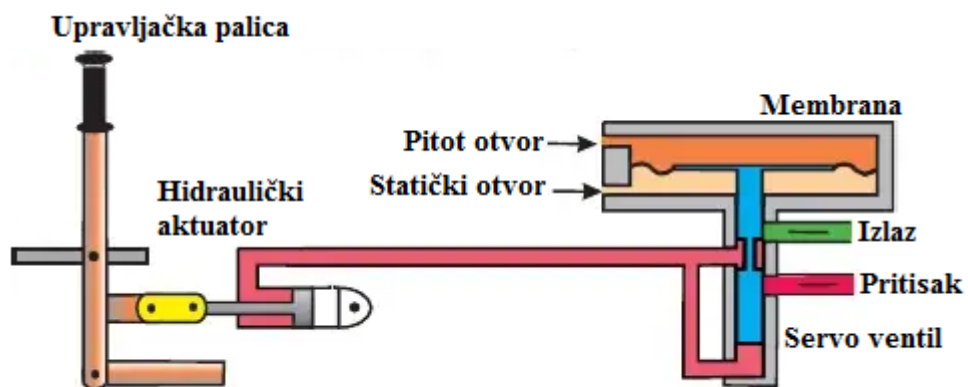
U sustavu umjetnog osjećaja s oprugom (Slika 32.) kako pilot daje signal PCU da otkloni upravljačku površinu osjeti se otpor opruge. Što je veći rad to je otpor isto veći. Ovaj sustav je djelotvoran pri nižim brzinama gdje je potreban veći otklon.



**Slika 32.: Sustav umjetnog osjećaja s oprugom [1]**

Hidraulički sustav umjetnog osjećaja (*Q feel*) gdje se *Q* odnosi na dinamički tlak (Slika 33.). Pitot tlak se usmjerava na jedan ulaz, a statički tlak na drugi (koji su međusobno odvojeni membranom) što rezultira diferencijalnim dinamičkim tlakom. Ako se dinamički tlak poveća kao posljedica povećanja brzine leta, sila koja je potrebna za pomicanje upravljačkih kontrola leta će se povećati. U slučaju smanjenja brzine leta dogodit će se

obrnuti učinak. Stoga ovaj sustav osigurava da sila koja se primjenjuje na palicu varira tijekom leta razmjerno opterećenju na upravljačkim površinama.



Slika 33.: Hidraulički sustav umjetnog osjećaja [1]

## 5. „FLY BY WIRE“ SUSTAV UPRAVLJANJA ZRAKOPLOVOM

Moderni zrakoplovi koriste računalnu tehnologiju u radu primarnih upravljačkih površina. Takav sustav se zove „Fly by wire“ (FBW) i u njemu se zamjenjuju mehaničke veze, tako da pilot nije direktno povezan sa upravljačkim površinama. Umjesto mehaničkih veza koristi se računalo kod kojeg se prilikom pomicanja upravljačke palice od strane pilota ili autopilota, prenose odgovarajući električni signali do aktuatora upravljačkih površina. Žiroskopi opremljeni s senzorima montirani su na zrakoplov da osjete promjene pokreta u valjanju, zakretanju i propinjanju ili poniranju. Svaki pokret (od pravca ili razine leta za primjer) šalje signal do računala, koji automatski pomiče aktuator da stabilizira zrakoplov. Prvi komercijalni putnički zrakoplovi koji koriste ovakav način upravljanja je Airbus A320 porodica zrakoplova (Slika 34.). Prednosti ovog sustava su:

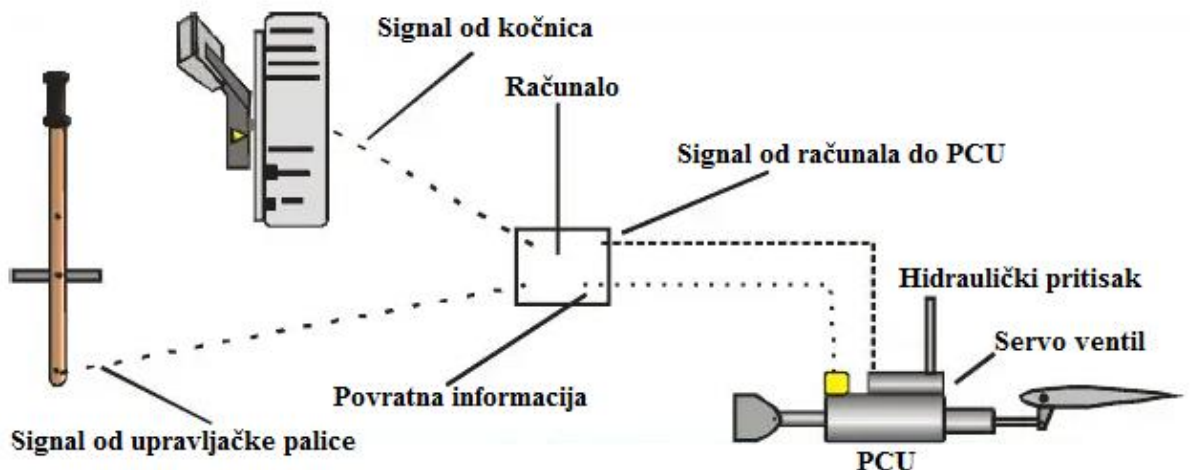
- Smanjena težina
- Poboljšana pouzdanost
- Tolerancija na oštećenja i smanjeno održavanje
- Učinkovitost i povećana pokretljivost zrakoplova



**Slika 34.: Airbus A320 - Prvi komercijalni putnički zrakoplov sa "Fly by wire" sustavom upravljanja**

Izvor: <https://www.bljesak.info/gospodarstvo/ulaganja/kina-ce-od-francuske-kupiti-184-zrakoplova-airbus-a320/223905> (kolovoz 2019.)

Princip korištenja se zasniva na kontroli pogrešaka u kojem položaj upravljačke površine (izlazni signal) stalno šalje povratne informacije računalu za kontrole leta (engl. *Flight control computer - FCC*). Kada se unosi naredba (ulazni signal) od strane pilota ili autopilota, razlika između trenutnog položaja upravljačke površine i željenog položaja te iste površine, naznačene od strane komandi, se analizira od strane računala i šalje upravljačkoj površini odgovarajući ispravljački signal elektroničkim putem. Ovi signali se usmjeravaju preko električnih kabela do servo ventila pričvršćenog na hidraulički PCU. Signali se pretvaraju u zamjenu za servo ventil, omogućujući hidrauličkom protoku i pritisku da pokrenu upravljačku površinu (Slika 35.). Kompenzacija povratnih informacija funkcionira kao kontrola pogreške i FCC regulira sustav uspoređujući izlazne signale s ulaznim signalima. Bilo koja pogreška između ta dva signala postaje naredba upravljačkoj površini sve dok izlaz ne bude jednak ulazu.



**Slika 35.: Osnovni prikaz "Fly by wire" sustava upravljanja zrakoplovom [1]**

Svi FBW eliminiraju kompleksnost, krhkost i težinu hidromehaničkih i elektromehaničkih upravljačkih sustava. FBW ih zamjenjuje s elektroničkim krugovima. Upravljački mehanizam u pilotskoj kabini sada upravlja pretvaračima signala, koji zauzvrat generiraju odgovarajuće elektroničke naredbe. Ovi se dalje obrađuju od strane elektroničkog kontrolora, koji može biti analogni ili digitalni.

Kod ranijih i najjednostavnijih analognih FBW sustava hidraulički krugovi su slični osim mehaničkih servo ventila koji su zamijenjeni električki upravljivim servo ventilima. U sofisticiranijim verzijama, analogno računalo zamjenjuje elektronički kontrolor. Digitalni FBW sustav je sličan analognom. Međutim, obrada signala se vrši preko digitalnog računala i pilot doslovno može „letjeti putem računala“. Ovo također povećava fleksibilnost

upravljačkog sustava pošto digitalno računalo može primiti ulazne jedinici od bilo kojeg senzora na zrakoplovu (kao što je visinomjer i pitot otvor).

Kao u većine sofisticiranih zrakoplova, nema mogućnosti ručnog vraćanja. Signali naredbe se šalju kroz 80 ili više kabela koji se kreću različitim smjerovima od ulaza do izlaza kako bi se osiguralo da niti jedan kvar kabela ili oštećenje ne bi rezultirali gubitkom kontroli tijekom leta. Civilni putnički zrakoplovi imaju dvostruki ili trostruki FBW sustav kako bi se u slučaju kvara na jednom mogle pravovremeno otkloniti kvarovi, a dok u slučaju potpunog kvara na FBW sustavu postoji pomoćni hidro-mehanički redundantni sustav.

Noviji sustavi od FBW su „*Fly by optics*“ i „*Fly by wireless*“. „*Fly by optics*“, koji se ponekad naziva i „*Fly by light*“, ima mogućnost prijenosa podatak pri većim brzinama i otporan je na elektromagnetske utjecaje. U većini slučajeva električni kabele se zamjenjuju optičkim. Ožičenje dodaje znatnu težinu zrakoplovu, stoga se istražuje implementacija „*Fly by wireless*“ sustava. Ovaj sustav je sličan FBW osim toga što se umjesto žičanih protokola kao fizičke veze koristi bežična veza. Osim što smanjuje težinu ovaj sustav ima potencijal za smanjenje troškova kroz cijeli životni ciklus zrakoplova.



## 6. ZAKLJUČAK

Upravljački sustavi su bitni konstrukcijski elementi zrakoplova. Oni zahtijevaju besprijekoran rad te degradacija ili otkaz nekog od tih sustava može dovesti do fatalnih posljedica. Ovisno o njihovoj namjeni, bilo u vojne ili komercijalne svrhe, zrakoplovi mogu imati implementirane različite sustave ovisno o njihovim aerodinamičkim karakteristikama. Bilo da je riječ o konvencionalnim ili nekonvencionalnim upravljačkim površinama, koje se sastoje od različitih mehanizama odnosno uređaja, njihova namjena se očituje u tome da omogućavaju bolju i lakšu upravljivost zrakoplovom. Svaki od tih uređaja karakterizira posebna odlika, ali i nedostatak. Za primjer jednog od tih uređaja može se uzeti fiksno pretkrilce čijom ugradnjom zrakoplov postaje stabilniji, pokretljiviji na većim napadnim kutovima te se pritom povećava vrijednost kritičnog kuta i koeficijenta uzgona. Glavni nedostatak ovog pretkrilca je što se njegovom ugradnjom povećava ukupni otpor krila i težina te se komplicira izrada krila.

Tako se primjerice konvencionalne upravljačke površine koriste kod putničkih zrakoplova jer omogućavaju sigurniji i ekonomičniji let, dok su neke nekonvencionalne upravljačke površine svoju primjenu uglavnom pronašli kod vojnih zrakoplova jer s njima dobivaju veću mogućnost manevriranja.

Sustavi upravljanja zrakoplova se isto tako koriste ovisno o različitoj namjeni zrakoplova. Tako primjerice mehanički sustav upravljanja zrakoplovom ne bi bio dobar izbor za korištenje u današnjim modernim putničkim zrakoplovima, jer su opterećenja kojima se izlažu upravljačke površine zrakoplova daleko veće nego što su bile kod prvih zrakoplova da bi ih pilot mogao samostalno savladati tijekom leta. U tu svrhu su razvijeni neki novi i napredniji sustavi kao što su hidraulički sustav upravljanja i „*Fly by wire*“ sustav upravljanja zrakoplovom. Tako je hidraulički sustav omogućio daljinsko upravljanje upravljačkim površinama gdje se od pilot ne zahtjeva upotreba prekomjerne sile, dok je „*Fly by wire*“ sustav upravljanje zrakoplovom podignuo na višu razinu. Ovi sustavi su kompliciraniji u izvedbi, ali imaju brojne prednosti, efikasniji su i odgovaraju zahtjevima u današnjem modernom i sofisticiranom zrakoplovstvu.

## LITERATURA

- [1] Jeppesen: Airframesand Systems, JAA ATPL Training, 2004.
- [2] Jeppesen: Principles of Flight, JAA ATPL Training, 2004.
- [3] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008.
- [4][https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/phak/media/08\\_phak\\_ch6.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/media/08_phak_ch6.pdf) (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [5] [https://www.skybrary.aero/index.php/Spoilers\\_And\\_Speedbrakes](https://www.skybrary.aero/index.php/Spoilers_And_Speedbrakes) (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [6] <http://users.skynet.be/spotterfreak/flightcontrols2.html> (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [7] <https://www.skybrary.aero/index.php/V-Tail> (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [8] <https://www.skybrary.aero/index.php/Canard> (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [9] <https://www.skybrary.aero/index.php/Ailerons> (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [10] <https://www.skybrary.aero/index.php/Elevator> (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [11] <https://www.skybrary.aero/index.php/Rudder> (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [12] <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/spoil.htm> (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [13] [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Aircraft\\_flight\\_control\\_system](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Aircraft_flight_control_system) (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [14] [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Servo\\_tab](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Servo_tab) (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [15] <https://www.experimentalaircraft.info/articles/hydraulic-principles.php> (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [16] [https://www.skybrary.aero/index.php/Hydraulic\\_Systems](https://www.skybrary.aero/index.php/Hydraulic_Systems) (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [17][https://www.skybrary.aero/index.php/Fly-By-Wire#System\\_Redundancy.3F](https://www.skybrary.aero/index.php/Fly-By-Wire#System_Redundancy.3F) (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [18] <https://www.flightliteracy.com/aircraft-hydraulic-systems/> (Pristupljeno: kolovoz 2019.)

## POPIS SLIKA

Slika 1.: Tri osi zrakoplova .....	3
Slika 2.: Tri primarne upravljačke površine .....	4
Slika 3.: Krilce otklonjeno prema gore na zrakoplovu Airbus A320.....	5
Slika 4.: Nepoželjno skretanje ili "Adverse yaw" .....	6
Slika 5.: Prikaz vertikalnog stabilizatora i kormila pravca te horizontalnog stabilizatora i kormila dubine na repu zrakoplova.....	7
Slika 6.: Prikaz vertikalne repne površine na zrakoplovu Airbus A320 .....	8
Slika 7.: Prikaz horizontalne repne površine na zrakoplovu Boeing 787 Dreamliner .....	9
Slika 8.: Pretkrilca na krilu zrakoplova .....	10
Slika 9.: Fiksno pretkrilce s procjepom.....	11
Slika 10.: Fiksno pretkrilce s procjepom na zrakoplovu Stinson 108-1.....	11
Slika 11.: Upravljivo pretkrilce s procjepom .....	12
Slika 12.: Zakretni nos pretkrilca .....	12
Slika 13.: Prikaz zakretnog nosa pretkrilca na zrakoplovu Lockheed F-104 Starfighter.....	13
Slika 14.: Krugerovo pretkrilce na zrakoplovu Boeing 727.....	14
Slika 15.: Obično zakrilce .....	15
Slika 16.: Obično zakrilce na zrakoplovu Piper PA-23-250 .....	15
Slika 17.: Podijeljeno zakrilce i Zap zakrilce.....	16
Slika 18.: Prikaz zakrilca s procjepom i njegovog primjera na zrakoplovu Cessna 550 Citation II .....	17
Slika 19.: Zakrilce s dva procjepa .....	18
Slika 20.: Fowlerovo zakrilce s dva procjepa na krilu zrakoplova Boeing 747.....	18
Slika 21.: Prikaz trimera na krilima zrakoplova i repnim upravljačkim površinama .....	19
Slika 22.: Prikaz što se događa kada pilot otkloni samo spojler na desnoj strani krila.....	20
Slika 23.: Prikaz kanarda na borbenom zrakoplovu Eurofighter Typhoon.....	21
Slika 24.: Prikaz V-repa na zrakoplovu Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk .....	22
Slika 25.: Elevoni na zrakoplovu Concorde.....	23
Slika 26.: Zrakoplov Fokker Eindhoven s mehaničkim sustavom upravljanja.....	24
Slika 27.: Sustav s upravljačkim kablovima .....	25
Slika 28.: Servo trimeri .....	26
Slika 29.: Anti-servo trimeri.....	26
Slika 30.: Prikaz hidrauličkog sustava .....	29

Slika 31.: Prikaz osnovnog PCU-a.....	30
Slika 32.: Sustav umjetnog osjećaja s oprugom.....	30
Slika 33.: Hidraulički sustav umjetnog osjećaja .....	31
Slika 34.: Airbus A320 - Prvi komercijalni putnički zrakoplov sa "Fly by wire" sustavom upravljanja.....	32
Slika 35.: Osnovni prikaz "Fly by wire" sustava upravljanja zrakoplovom .....	33

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

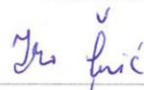
Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj Završni rad  
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na  
objavljenju literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.  
Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen 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 **Uloga upravljačkih sustava na zrakoplovima**

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

U Zagrebu, 8/19/2019

Student/ica:



(potpis)