

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Metod Fajmut

ANALIZA ZANESLJIVOSTI
RAČUNALNIŠKEGA SISTEMA
ZRAČNEGA PLOVILA AIRBUS A-330

DIPLOMSKO DELO NA VISOKOŠOLSLEM STROKOVNEM ŠTUDIJU

Mentor: prof. dr. Miha Mraz

Ljubljana, 2010



Št. naloge: 00471/2009

Datum: 01.09.2009

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **METOD FAJMUT**

Naslov: **ANALIZA ZANESLJIVOSTI RAČUNALNIŠKEGA SISTEMA ZRAČNEGA
PLOVILA AIRBUS A-330**

**RELIABILITY ANALYSIS OF AIRBUS A-330 COMPUTER FLIGHT
MANAGEMENT SYSTEM**

Vrsta naloge: Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija

Tematika naloge:

Kandidat naj v svojem delu analizira zgradbo in zanesljivost računalniškega sistema zračnega plovila Airbus A-330. Pri tem naj opiše vzroke za nastanek »fly by wire« sistema in predstavi temeljna izhodišča za razvoj tovrstnih sistemov. V nadaljevanju naj kandidat izbere nekaj teoretičnih metod za izračunavanje zanesljivosti in jih aplicira na podatkih, ki izhajajo iz karakteristik plovila A-330.

Mentor:

prof. dr. Miha Mrz



Dekan:

prof. dr. Franc Solina

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za računalništvo
in informatiko

Tržaška 25
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon: 01 476 84 11
faks: 01 426 46 47
www.fri.uni-lj.si
e-mail: dekanat@fri.uni-lj.si



Št. naloge: 00471/2009

Datum: 01.09.2009

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **METOD FAJMUT**

Naslov: **ANALIZA ZANESLJIVOSTI RAČUNALNIŠKEGA SISTEMA ZRAČNEGA PLOVILA AIRBUS A-330**
RELIABILITY ANALYSIS OF AIRBUS A-330 COMPUTER FLIGHT MANAGEMENT SYSTEM

Vrsta naloge: Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija

Tematika naloge:

Kandidat naj v svojem delu analizira zgradbo in zanesljivost računalniškega sistema zračnega plovila Airbus A-330. Pri tem naj opiše vzroke za nastanek »fly by wire« sistema in predstavi temeljna izhodišča za razvoj tovrstnih sistemov. V nadaljevanju naj kandidat izbere nekaj teoretičnih metod za izračunavanje zanesljivosti in jih aplicira na podatkih, ki izhajajo iz karakteristik plovila A-330.

Mentor:

prof. dr. Miha Mraz



Dekan:

prof. dr. Franc Solina

IZJAVA O AVTORSTVU

diplomskega dela

Spodaj podpisani Metod Fajmut,

z vpisno številko 63020037,

sem avtor diplomskega dela z naslovom:

ANALIZA ZANESLJIVOSTI RAČUNALNIŠKEGA SISTEMA ZRAČNEGA PLOVILA AIRBUS A-330

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom (naziv, ime in priimek)

prof. dr. Mihe Mraza

in somentorstvom (naziv, ime in priimek)

/

- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki »Dela FRI«.

V Ljubljani, dne 25.2.2010

Podpis avtorja: Metod Fajmut

Zahvala

Najprej bi se rad zahvalil mami, ki mi je omogočila študij in me vseskozi spodbujala in podpirala. Velika zahvala gre mentorju izr. prof. dr. Mihi Mrazu za vse pripombe, koristne nasvete in strokovno pomoč. Prav tako bi se zahvalil osebju in sošolcem na fakulteti za računalništvo in informatiko, ki so mi posredovali svoje znanje in pomagali do uspešnega zaključka študija. Za vse spodbude se zahvaljujem tudi bratu Primožu in vsem prijateljem.

Na koncu gre hvala tudi njej, ki mi je stala ob strani ob vseh uspehih in neuspehih, ob vseh ovirah, ki sva jih skupaj premagala in se jih veselila ter za vso potrpežljivost, Sandri.

KAZALO VSEBINE

Seznam kratic in simbolov	IV
Povzetek.....	VII
Abstract	VIII
1. Uvod.....	1
2. Avionika in računalniški nadzor letenja zračnega plovila.....	3
2.1 Zgodovina in osnovni pojmi	4
2.2 Varnost in zanesljivost »letenja po žici«	5
2.3 Razlike med Boeingovim 777 in Airbusovim »Fly-by-wire« sistemom.....	7
3. Zanesljivostni vidiki letalskega plovila Airbus A330	8
3.1 Pregled	9
3.2 Primarni sistem za krmiljenje letala airbus A330/A340	13
3.3 Krmila za kontrolo letenja.....	15
3.3.1 Primarne letalne kontrole	16
3.4 Arhitektura sistema kontrole letenja.....	18
3.5 Toleranca napak skozi proces rekonfiguracije	21
3.6 Računalniška arhitektura.....	22
3.7 Toleranca napak	26
3.8 Navigacija	26
3.9 Centralni sistem za vzdrževanje	26
3.10 Redundanca	27
3.10.1 Redundanca virov energije	27
3.10.2 Redundanca računalnikov.....	29
3.10.3 Rekonfiguracija zakonov krmiljenja letala in zaščita ovojnice letenja	29
3.11 Komunikacija	30

3.11.1 Struktura ACARS sistema	31
3.12 Prilagodljivost in posodabljanje v notranjih storitvah	32
3.13 Razvojno okolje	33
3.14 Podporno okolje	34
4. Teorija zanesljivosti v računalniških sistemih	35
4.1 Faze življenjske dobe računalniškega sistema	35
4.2 <i>N</i> -modularna redundanca	36
4.3 »Consecutive k out of n:F« konfiguracija sistema	38
5. Izračuni.....	39
5.1 Sistemska verjetnost delovanja motorjev za Airbus A330	39
5.2 Sistemska verjetnost delovanja spojlerjev za Airbus A330 zračno plovilo	41
5.3 Sistemska zanesljivost računalnikov računana s TMR.....	41
5.4 Sistemska zanesljivost spojlerjev in hidravličnega napajanja Airbusa A330	42
6. Zaključek.....	43
7. Viri in literatura	44

KAZALO SLIK

Slika 1: Lovec F-8C Crusader	5
Slika 2: Ovojnica letenja tipičnega nadzvočnega letala	6
Slika 3: Tipi Airbus-ovih letal glede na preleteno razdaljo in število sedežev	9
Slika 4: Serija Airbus A330/A340 in njihove lastnosti	10
Slika 5: Airbus A330	14
Slika 6: Krmila za kontrolo letenja pri Airbus-u A330.....	15
Slika 7: a) Par kontrolnih stebričkov b) Kontrolna paličica ("joy stick")	16
Slika 8: Primerjava med mehansko (a) in električno (b) kontrolo	17
Slika 9: Računalniki uporabljeni v sistemu kontrole letenja	18
Slika 10: Razporeditev računalnikov in aktuatorjev pri plovilu Airbus-u A330/A340	20
Slika 11: Pristop sprejema kontrole nadzora glede na stanje sistemskih komponent	21
Slika 12: Primerjava normalne in direktne kontrole nadzora	22
Slika 13: Globalna računalniška arhitektura	23
Slika 14: Kanal za spremljanje s povezanimi aktuatorji	24
Slika 15: Sistemska arhitektura Airbusa A340-600	28
Slika 16: Električno-hidrostatski aktuator	28
Slika 17: Običajni servoventil	29
Slika 18: Potek prenosa podatkov oziroma komunikacije	31
Slika 19: Različne življenjske dobe sestavnih delov računalniških sistemov	35
Slika 20: Potek zanesljivosti v odvisnosti od števila N	37
Slika 21: TMR sistem.	37
Slika 22: Tabela spojlerjev in sistemov hidravlike.....	42

Seznam kratic in simbolov

A/D	- analogno/digitalno;
ABS	- avtomobilski zavorni sistem (angl. <i>Anti-lock Braking System</i>);
ACARS	- sistem za komunikacijo med tehniki in vzdrževalci ter posadko na letalu (angl. <i>Aircraft Communications Addressing and Reporting System</i>);
ACMS	- sistem za nadzor stanja letala (angl. <i>Aircraft Conditions Monitoring System</i>);
ADIRU	- referenčna enota podatkov o letenju (angl. <i>Air Data Inertial Reference Unit</i>);
ARINC	- ponudnik prometnih komunikacijskih sistemov inženirskih rešitev (angl. <i>Aeronautical Radio, Incorporated</i>);
ATC	- kontrola zračnega prometa (angl. <i>Air Traffic Control</i>);
ATE	- oprema za avtomatsko testiranje (angl. <i>Automatic Test Equipment</i>);
CASA	- špansko podjetje Construcciones Aeronauticas;
CFDS	- centralni sistem prikazovanja napak (angl. <i>Central Fault Display System</i>);
CMS	- centralni sistem vzdrževanja (angl. <i>Central Maintenance Systems</i>);
CRT	- katodna cev (angl. <i>Cathode-Ray Tube</i>);
DFMS	- dvojni sistem za vodenje zrakoplova (angl. <i>Dual Flight Management System</i>);
EHA	- električni hidrostatični aktuator (angl. <i>Electro Hydrostatic Actuator</i>);
ELAC	- računalnik, ki skrbi za krilca in višinski krmili (angl. <i>Elevator and Aileron Computer</i>);
EADS	- združeno podjetje European Aeronautic Defense and Space Company;
ECAM	- monitor, ki prikazuje opozorila povezana z motorji in informacije o pomembnih letalskih sistemih (angl. <i>Electronic Centralized Aircraft Monitor</i>);
EFCS	- elektronski sistem za krmiljenje letala (angl. <i>Electronic Flight Control System</i>);
EFIS	- elektronski sistem za letenje z instrumenti (angl. <i>Electronic Flight Instrumental System</i>);

FAC	- računalnik, ki skrbi za varno ovojnico letenja (angl. <i>Flight Augmentation Computer</i>);
FCDC	- koncentrator podatkov kontrole leta (angl. <i>Flight Control Data Concentrator</i>);
FCPC	- primarni računalnik kontrole leta (angl. <i>Flight Control Primary Computer</i>);
FCS	- sistem za nadzor leta (angl. <i>Flight Control System</i>);
FCSC	- sekundarni računalnik kontrole leta (angl. <i>Flight Control Secondary Computer</i>);
FEPM	- način zaščite ovojnice letenja (angl. <i>Flight Envelope Protection Mode</i>);
FMC	- računalnik za upravljanje poleta (angl. <i>Flight Management Computer</i>);
FMS	- sistem za vodenje zrakoplova (angl. <i>Flight Management System</i>);
HFDL	- visokofrekvenčna podatkovna povezava (angl. <i>High Frequency Data Link</i>);
KCAS	- kalibrirana hitrost vetra v vozlih (angl. <i>Knots Calibrated Speed</i>);
LRU	- zamenljiva okvarjena enota (angl. <i>Line-replaceable unit</i>);
MCDU	- multifunkcijski kontrolni prikazovalnik (angl. <i>Multifunction Control Display Unit</i>);
MU	- upravna enota (angl. <i>Management Unit</i>);
NASA	- nacionalna zrakoplovna in vesoljska uprava (angl. <i>National Aeronautics and Space Administration</i>);
ND	- navigacijski zaslon (angl. <i>Navigation Display</i>);
OBRM	- pomnilniški moduli (angl. <i>On-Board Replaceable Memories</i>);
PFD	- primarni zaslon letenja (angl. <i>Primary Flight Display</i>);
PL/M	- zbirni programski jezik za mikroročunalnike (angl. <i>Programming Language for Microcomputers</i>);
RAT	- rezervni generator (angl. <i>Ram Air Turbine</i>);
SEC	- računalnik, ki skrbi za spojlerje in krilca (angl. <i>Spoiler and Elevator Computer</i>);

- THS - uravnoteženi horizontalni stabilizator
(angl. *Trimmable Horizontal Stabilizer*);
- VHF - zelo visoke frekvence (angl. *Very High Frequency*);

Povzetek

Diplomska naloga obravnava digitalizirani računalniški sistem za krmiljenje letala »Fly-by-wire« in vidike zanesljivosti računalniškega sistema letalskega plovila Airbus A330. Tako kot pri vesoljskih in vojaških zračnih plovilih je tudi pri komercialnih letalih velik del finančnega vložka namenjen zanesljivosti. Kontrolni sistemi konvencionalnih letal so se, in nekateri se še, zanašali na mehanske in hidravlične povezave med kontrolami letala s katerimi upravlja pilot in kontrolnimi površinami. Novejša letala pa v večini uporabljajo »Fly-by-wire« sistem, kjer ukazi v pilotski kabini generirajo signale, ki jih nato računalniki interpretirajo v izhodne ukaze, ti pa poganjajo hidravlične sisteme, ki upravljajo s kontrolnimi površinami.

V uvodnem poglavju sem predstavil sam pojem avionike in glavne značilnosti »Fly-by-wire« sistema. Nato sem v drugem poglavju obširno predstavil ta sistem, vključno z njegovo zgodovino, varnostjo in prednostmi kot so zmanjšanje obremenitve pilota in zmanjšanje teže letala ter razlike med Boeingovim 777 in Airbusovim standardnim »Fly-by-wire« sistemom. Prav tako sem v drugem poglavju preučil razmere na področju avionike in sisteme za nadzor letenja. V tretjem poglavju sem podrobno preučil zanesljivostne vidike letalskega plovila Airbus A330 vključno s primarnim sistemom za krmiljenje letala, krmili za kontrolo letenja, računalniško arhitekturo, redundanco, toleranco napak, navigacijo in komunikacijo. Glavna analiza zanesljivostnih vidikov je opravljena v četrtem in petem poglavju, kjer sem najprej preučil in opisal teorijo zanesljivosti v računalniških sistemih, nato pa še z izračuni prikazal sistemsko verjetnost delovanja posameznih enot letalskega plovila.

Ključne besede: digitalizirani računalniški sistem, avionika, »Fly-by-wire« sistem, sistem za nadzor letenja, zanesljivostni vidiki, reliability point of views

Abstract

Diploma thesis deals with digitized, computerized flight control system »Fly-by-wire« and security aspects of the computer system of an aircraft Airbus A330. As for space and military aircraft structures is also in commercial airplanes, much of the financial contribution devoted to reliability. Conventional aircraft control systems have, and some are still, to rely on mechanical and hydraulic connections between the controls on aircraft operated by the pilot and control surfaces. But newer aircrafts are in most using the "Fly-by-wire" system, where the commands in the flight deck are generating signals which are then interpreted by computers in the output commands, and are then driven by hydraulic systems which operate the control surfaces.

In the introductory chapter, I introduced the very concept of avionics and the main features of »Fly-by-wire« system. Then in the second chapter I presented the system extensively, including its history, security and benefits such as reducing the burden pilots and aircraft weight reduction and the difference between Boeing 777 and Airbus standard »Fly-by-wire« system. I also examined the situation in the field of avionics and flight control systems. In the third chapter I examined closely reliability aspects of an aircraft including the Airbus A330 primary flight control system, air traffic controls, computer architecture, redundancy, fault tolerance, navigation and communication. The main analysis of the reliability considerations is made in the fourth and fifth chapter, where I first examined and described the theory of reliability in computer systems and then with the calculations showed a likelihood of systemic activity of individual units of air craft.

Keywords: digitized, computerized system, avionics, »Fly-by-wire« system, flight control system,

1. Uvod

Avionika je sinonim za letalsko elektroniko. Obsega elektronske sisteme, ki se uporabljajo na letalih, umetnih satelitih in vesoljskih plovilih ter vključuje komunikacijo, navigacijo in prikaz ter upravljanje več sistemov. Prav tako vključuje stotine sistemov, ki so vgrajeni v letalska plovila, da izpolnjujejo posamezne vloge. Te so lahko tako enostavne, kot iskanje luči za policijski helikopter ali pa zapletene, kot taktični sistem za zgodnje opozarjanje iz zraka na platformo na zemlji.

Izraz letalske elektronike ni bil v splošni uporabi do začetka 1970 leta. Do te točke so instrumenti kot so radio, radar, sistemi za gorivo, motor, pripomočki radio-navigacijskega sistema in podobni bili individualno ločeni mehanski sistemi.

Pojem avionike je torej prišel v uporabo leta 1970 in sicer na pobudo vojaških potreb in ne zaradi razvoja civilnih letal. Vojaška letala so postala leteče platforme, ki so vsebovale velike količine elektronske opreme. In prav izziv, da bi ta elektronska opreme delovala naenkrat je botroval za nastanek avionike. Danes letalska elektronika oziroma avionika, kot je uporabljena v vojaških in komercialnih letalih skoraj vedno obsega največji del vsakega razvojnega proračuna. Pri letalih, kot sta F-15E in sedaj upokojeni F-14 je šlo približno 80 odstotkov vsega proračuna za letalsko elektroniko. Pri večini sodobnih helikopterjev je proračun razdeljen nekje 60/40 v korist letalske elektronike.

Trg civilnih letal je prav tako doživel rast stroškov letalske elektronike. Sistemi kontrole letenja, med njimi tudi »Fly-by-wire« sistem, boljši navigacijski sistem in podobni sistemi so povečali stroške razvoja. Naraščanje števila letov je pogojevalo tudi razvoj varnosti letenja. Ker vse več ljudi uporablja letenje kot njihov primarni način transporta, so bile izumljene bolj izpopolnjene in varne metode nadzora letal. Z dodatnim izboljšanjem natančnosti miniaturnih ležajev so postali vodenje in navigacijski sistemi zrakoplova bolj natančni. Prav tako so se razvijali vedno bolj in bolj zapleteni in tesno integrirani sistemi v pilotski kabini. Eden od teh naprednih sistemov je znani sistem upravljanja leta ali FMS. Ta vključuje funkcije radijskih komunikacij, navigacijo, različne senzorje in druge funkcije. Primer enega izmed nazadnje razvitih sistemov za splošno rabo v letalstvu je Garmin G1000.

Na splošno pa pod glavne kategorije avionike štejemo:

- sisteme za komunikacijo,
- sisteme za navigacijo,
- sisteme za spremljanje letala,
- sisteme kontrole letenja,
- sisteme za izogibanje trkov,

- vremenske sisteme in
- sisteme za upravljanje letala.

Mehanski in hidro-mehanski sistemi za krmarjenje leta, so težki in zahtevajo natančno usmerjanje mehanskih vzvodov kontrole letenja z zrakoplovi z uporabo sistemov škripcev, ročic, napetostnih kablov in hidravličnih cevi. Tovrstni sistemi pogosto zahtevajo odvečne rezervne dele za obravnavo pomanjkljivosti, kar spet poveča maso letala. Poleg tega imajo omejeno zmožnost za nadomestilo ob spremembi aerodinamičnih pogojev. Nevarnosti, kot so kolebanje, prekomerno nagibanje in inducirana oscilacija, ki so odvisni predvsem od stabilnosti in strukture zrakoplova namesto nadzornega sistema samega, se lahko še vedno pojavijo pri takšnih sistemih.

»Fly-by-wire« sistem nadomesti ročni sistem nadzora nad zrakoplovom z elektronskim vmesnikom. Gibanja kontrole letenja so pretvorjene v elektronske signale prek katerih računalniki oziroma sistemi za krmiljenje letala ugotovijo, kako je treba premakniti določeno stikalo na posamezni kontrolni površini, da dobimo pričakovani odziv. Pogoni so običajno hidravlični, vendar se uporabljajo tudi električni.

Z uporabo električnih krmilnih vezij v kombinaciji z računalniki oblikovalci lahko minimizirajo težo, izboljšujejo zanesljivost in z uporabo računalnikov ublažijo nezaželene lastnosti navedene predhodno. Sodobni napredni »Fly-by-wire« sistemi se uporabljajo tudi za nadzor v sicer nestabilnih lovskih letalih.

Izraz »Fly-by-wire« pomeni zgolj električni sistem nadzora letala. Vendar pa se uporablja v splošnem smislu kot računalniško nastavljen krmilnik, kjer je računalniški sistem posredovalec med upravljavcem in končnimi stikali nadzora oziroma kontrolnimi površinami. Ta krmilnik pa z ročnim vnosom spreminja pilot v skladu s parametri za nadzor letenja. Te parametre pa so skrbno razvili in potrdili, da se proizvede največji učinek delovanja brez ogrožanja varnosti.

V drugem poglavju sledi opis avionike in računalniškega nadzora letenja zračnega plovila, vključno z zgodovino, varnostjo in zanesljivostjo »Fly-by-wire« sistema ter razlikami med Boeingovim in Airbusovim sistemom. Nato sledi obširno tretje poglavje, kjer so obširno predstavljeni zanesljivostni vidiki zračnega plovila Airbus A330. V četrtem in petem poglavju pa je najprej opisana teorija zanesljivosti v računalniških sistemih, ki ji nato sledi računski del.

2. Avionika in računalniški nadzor letenja zračnega plovila

Pod pojmom avionike smatramo kakršnokoli elektroniko, ki nastopa na področju aviacije. Glede na področje vrši funkcije navigacije, komunikacije, vodenja plovil, itd. Ker večina današnje elektronike nastopa v digitaliziranih sistemih, lahko pojem avionike enačimo s pojmom računalniškega sistema.

Zgodovinsko gledano sta za razvoj avionike pomembna dva mejnika:

- vpeljava navigacijskih sistemov za vodenje letal preko Atlantika med drugo svetovno vojno,
- vpeljava "fly by wire" koncepta v vodenje letalskih plovil v osemdesetih letih prejšnjega stoletja (Airbus A-320).

V prvem primeru se je avionika pokazala kot izjemno učinkovito, saj so letala kljub slabim vremenskim razmeram lahko prečkala Atlantik po najkrajši možni poti. V drugem primeru gre za nadomeščanje težkih in nezanesljivih hidravličnih vzvodov z "računalniškim omrežjem", ki povezuje krmilne sisteme z letalnimi površinami (angl. *flight control surfaces*), kot so zakrilca, krmila, rep ter motorji. Medtem ko so bili različni podsistemi današnje avionike v začetku postranskega pomena in niso bili ključni za letenje, so se razmere v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja korenito spremenile. Avionika je dejansko prevzela nadzor nad plovilom in tudi delež stroškov namenjenih avioniki je krepko presegel polovico cene sodobnega komercialnega letala. Danes je avionika zaradi misijske rizičnosti izredno razvito področje, tako z vidika sestavnih komponent, kot tudi s programskega in systemskega vidika. Delež v ceni razvoja za novo potniško ali vojaško letalo se pri avioniki giblje okoli 80%, pri helikopterjih pa do 60% celotne razvojne cene.

Če za prenos ukazov namesto mehanskih uporabimo električne povezave, dobimo tako imenovano »letenje po žici« (angl. *Fly-by-wire*). Povezave so tako mnogo lažje, z malo težav in večjih stroškov pa jih lahko tudi podvajamo. Čeprav to ni pogoj, je »letenje po žici« običajno povezano z računalniško podprtim nadzorom letenja. Ukaze pilota sprejme računalnik, na katerem teče skrbno razvita, preverjena in potrjena programska oprema, ki pilotove ukaze ob upoštevanju varnostnih omejitev maksimalno učinkovito izvede.

Vzdrževanje električnih povezav je mnogo enostavnejše in cenejše od hidravlično-mehaničnih. Slednje je namreč potrebno mastiti, uravnati napetost (jermenov in verig), preverjati morebitna puščanja cevi in občasno menjavati hidravlično tekočino. Poleg tega lahko računalnik prepreči izvedbo ukaza, ki bi prekomerno obremenil letalo, ali ga denimo preveč upočasnil v letu.

2.1 Zgodovina in osnovni pojmi

Piloti zgodnje dobe letalstva so imeli pri pilotiranju neposreden stik z letalom, saj so zakrilca upravljali direktno prek fizično povezanih vzvodov. Ko so letala postajala vse večja in s tem vse večje tudi kontrolne površine ter vse hitrejša, se je ustrezno povečevala tudi moč potrebna za usmerjanje letala. Ob tem so seveda piloti ostali fizično enako močni in zato se je izkazala potreba po posredniku med pilotom in letalom. Do neke mere je te probleme možno reševati z mehničnimi rešitvami, pri večjih letalih pa tudi to več ne zadostuje.

Prvi električni sistem za krmiljenje letala »Fly-by-wire«, je za civilno letalo izdelalo podjetje Aerospatiale in ga namestilo na sloviti Concorde. To je bil **analogni sistem** s polnim nadzorom nad vsemi krmilnimi površinami, ki je kopiral ukaze krmila na te površine in pri tem dodajal stabilizacijske pogoje. Pilotovi ukazi so prek pretvornikov kot električni signali posredovani do kontrolerjev. Namesto mehnično so ventili krmiljeni električno, prek krmilnikov. Tovrstni sistemi so prišli v rabo v petdesetih letih prejšnjega stoletja. V bolj sofisticiranih sistemih so krmilnike zamenjali analogni računalniki. Kljub temu je obstajal mehnični podporni sistem na primarnih treh oseh.

Ob zamenjavi analognih krmilnikov ali računalnikov z digitalnimi, dobimo digitalno različico »letenja po žici«. Prva generacija električnih sistemov za krmiljenje letala z **digitalno tehnologijo** se je pojavila na več civilnih letalih v začetku 1980-ih, vključno z Airbusom A310. Digitalni »Fly-by-wire« sistem za krmiljenje letala, je v bistvu zelo podoben analognemu sistemu. Bistvena razlika je, da signale procesira digitalni računalnik. To pomeni, da pilot letalo upravlja prek računalnika. Takšen sistem je bolj prilagodljiv, saj lahko digitalni računalnik sprejme podatke od senzorjev vseh vrst. Prav tako poveča elektronsko stabilnost sistema, saj je takšen sistem manj odvisen od kritičnih komponent, kot pri analognem krmilniku. Računalnik preko pilotovih ukazov in senzorjev, ki so nameščeni po letalu, dobi vhodne podatke. Rešuje diferencialne enačbe, z namenom, da ugotovi kaj določeni ukazi oziroma signali pomenijo in nato premakne kontrolne površine tako, kot si je zamislil pilot. Prav tako računalniki prek svojih programov omogočajo, da letalo ne preseže območja normalnega delovanja oziroma letenja. Oblikovalci letala morajo biti pozorni na lastnosti upravljanja, da ostanejo znotraj celotne meje tistega, kar je mogoče, glede aerodinamike in strukture letala. Na primer računalnik, ki ima vključen način zaščite letenja (angl. *flight envelope protection mode*), lahko poskuša preprečiti nevarno obnašanje letala s tem, da pilotu ne dovoli, da bi presegel prednastavljene omejitve za situacije kolebanja letala, vrtenja okoli osi ali omejevanja gravitacijske sile. Programska oprema se uporablja tudi za filtriranje kontrolnih vhodnih podatkov, z namenom da bi preprečili morebitno kolebanje letala, ki bi ga povzročil pilot. Uporaba računalnika za nadzor letenja močno razbremeni pilota. Letalo je zmožno samo ohranjati smer in višino leta, ob kritičnih fazah leta (vzlet, pristane) pa nudi računalnik močno podporo. Dejansko bi bila mnoga sodobna letala zmožna tudi pristajati in vzletati brez sodelovanja pilota. Predvsem zaradi kritičnosti in nepredvidljivosti, pa se v teh fazah še vedno zahteva posredovanje pilota.

Prvo letalo s popolnoma digitalnim sistemom za »letenje po žici« je bil leta 1972 prirejen lovec F-8C Crusader, letalo v lasti ameriške vesoljske agencije NASA. Na njem so testirali sprejemljivost in uporabnost nove tehnologije, ki so jo kasneje uporabili tudi v vesoljskem raketoplanu (angl. *Space Shuttle*).



Slika 1: Lovec F-8C Crusader [1].

2.2 Varnost in zanesljivost »letenja po žici«

Glavna dilema »letenja po žici«, tako analognega kot digitalnega, je zanesljivost. Medtem, ko tradicionalni hidravlično-mehanični sistem odpove postopoma, je v primeru odpovedi računalnika pri »letenju po žici« izguba nadzora nad letalom lahko takojšnja in popolna.

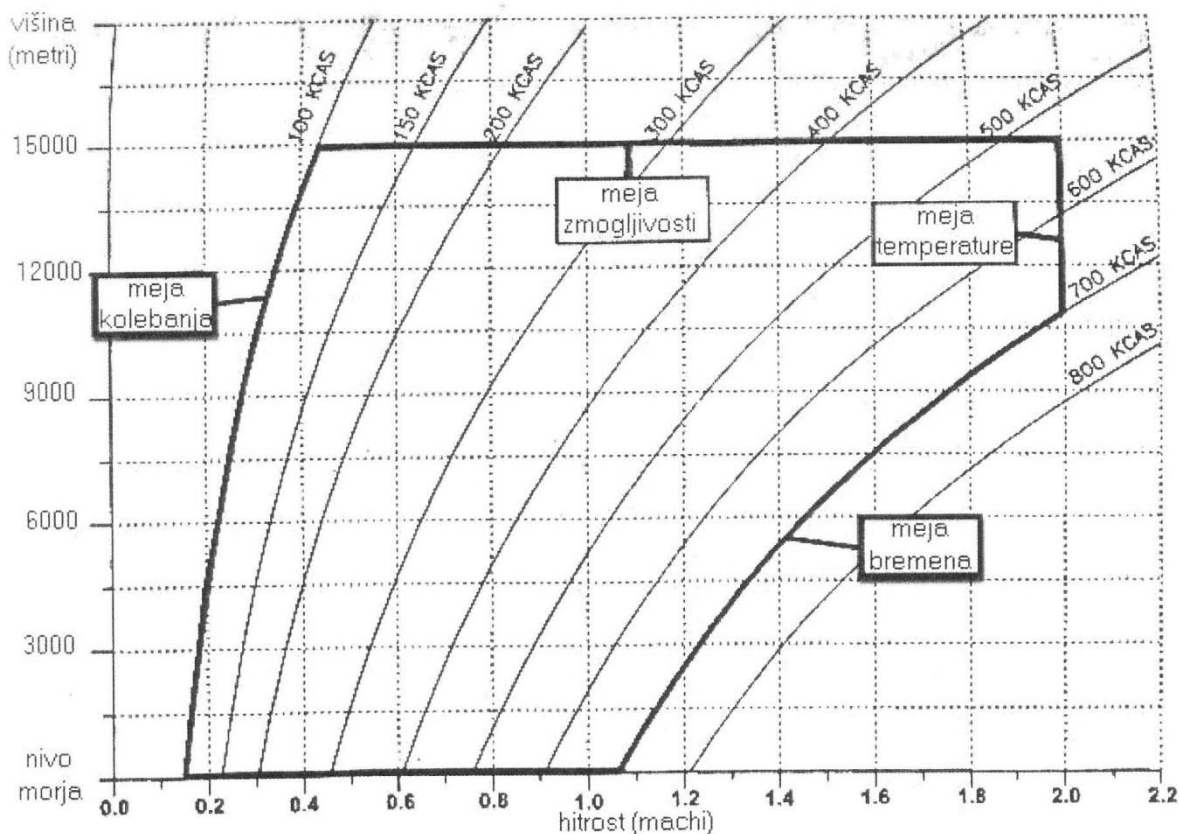
Tveganje odpovedi je še posebej povečano pri elektronskih komponentah, saj so izpostavljene agresivnemu okolju. Izpostavljene so namreč vibracijam, vlagi, velikim in pogosto hitrim temperaturnim spremembam, nihanjem napajanja in elektromagnetnim motnjam. Vsi ti dejavniki vplivajo na povečano obrabo elementov in v končni fazi povzročijo odpoved posameznih sistemov. S primernim načrtovanjem celotnega sistema lahko omilimo te škodljive vplive in s tem zmanjšamo verjetnost odpovedi. Vseeno pa je najboljša rešitev sistem, ki je odporen na odpovedi posameznih komponent in podsistemov.

V ta namen se običajno uporablja vsaj trojna, največkrat pa štirikratna redundanca tako računalnikov, kot tudi povezav med računalniki in površinami za usmerjanje. Možna je tudi rezervna mehanično-hidravlična povezava, ki omogoča nadzor nad plovilom v primeru odpovedi žične povezave. Vendar pa ta način v modernih sistemih ni uporabljen, saj z njim izgubimo nekaj tako želenih prednosti »letenja po žici«, kot so manjša teža, lažje vzdrževanje itd.

»Letenje po žici« omogoča mnogo varnejše letenje, saj je možno določiti točne okvire t.i. ovojnice letenja (angl. *flight envelope*). Ovojnica letenja definira meje letenja določenega

zračnega plovila - od toplozračnega balona prek jadralnih in motornih letal do nadzvočnih raket in vesoljskih plovil. Te meje so odvisne od fizičnih lastnosti in sposobnosti plovila. Določajo dopustno višino in hitrost letala pri določeni obremenitvi. Iz ovojnice letenja tipičnega nadzvočnega letala lahko razberemo, s katerimi hitrostmi zmore leteti letalo na določeni višini ob upoštevanju faktorja KCAS. Enota za hitrost zvoka je mach, kratica KCAS pa pomeni »Knots Calibrated Speed«. Meje ovojnice so:

- meja kolebanja, ko pri trenutnem zračnem pritisku (višini) in hitrosti krila več ne zagotavljajo zadostnega vzgona;
- meja zmogljivosti, ko zaradi redkosti zraka reaktivni motor ne zmore več delovati;
- meja temperature, ko se lupina letala zaradi visoke hitrosti močno segreva;
- meja bremena, pri visokem dinamičnem pritisku zaradi aerodinamičnih obremenitev na okvir letala – postavljena meja, ki ščiti letalo pred pojavom vibracij.



Slika 2: Ovojnice letenja tipičnega nadzvočnega letala [2].

Sile, ki delujejo na letalo, občutno nihajo znotraj takšne ovojnice. Z nadzorovanjem teh sil vzdržujemo nadzor nad višino, hitrostjo in lego letala. Sistem za nadzor leta poskuša nadzorovati te sile z upravljanjem usmerjevalnih površin in motorjev letala. Običajno je možno upravljati le jakost, pri nekaterih sodobnih vojaških letalih pa tudi smer motorjev.

Električne žice ponekod zamenjujejo optični kabli (angl. *fly-by-optics*). Njihova prednost je večja hitrost prenosa in imunost na elektromagnetne motnje. Sicer sta koncept in izvedba povsem enaka kot pri »letenju po žici«.

2.3 Razlike med Boeingovim 777 in Airbusovim »Fly-by-wire« sistemom

Boeing je še pri serijah 757 in 767 uporabljal običajne kontrolne sisteme (hidravlično-mehanične), medtem ko je Airbus, že pri seriji A320 uporabil sistem »letenja po žici«. Šele pri Boeingu 777 se je njihovo vodstvo odločilo za vpeljavo tega sistema. Ta koncept, ki je v bistvu posledica tega, da je človek želel na luno, je dandanes del vsakega sodobnega letala.

Kljub temu, da sta imela Boeing 777 in A320, ter vse nadaljnje serije vgrajen ta sistem, obstajajo manjše razlike med obema. Airbus je, za razliko od Boeinga, sprejel precej drugačen filozofski pristop k uporabi računalnikov. Evropski izdelovalec letal je sistem »Fly-by-wire« nameščal z vgrajeno zaščito ali s strogimi omejitvami. Podjetje Boeing pa je mnenja, da morajo pri vsem skupaj vseeno imeti glavno besedo piloti. To pomeni, da lahko pilot v vsakem primeru razveljavi operacije, ki jih opravi računalnik. Tu se pojavi vprašanje, kje so meje pilota in kje računalnika pri takšnem odločanju. Piloti obeh izdelovalcev letal imajo stroge argumente. Nekateri so mnenja, da je računalniška zaščita pri A320 zelo dobra, medtem ko so drugi dali prav Boeingu in njegovi teoriji, da mora biti zadnja odločitev pri nadzoru letala še vedno prepuščena pilotu.

Oboji imajo dobro utemeljene argumente. Leta 1995 se je Boeing 757 zaletel v goro, ko je želel pristati v mestu Cali. Umrlo je 159 ljudi na krovu. Pri tem je računalniški sistem opozoril posadko na nevarnost nesreče. Pilot je izvedel vzpon, vendar je pozabil potegniti nazaj zavore, rezultat česar je bila katastrofa. Na Airbusu A320 bi te zavore avtomatsko »popravljal« računalnik. Pri Boeingu sicer trdijo, da bi v vsakem primeru letalo trčilo v gorovje. Po drugi strani pa so nesreče doživeli tudi Airbusi s »Fly-by-wire« tehnologijo in avtomatsko zaščito. Pravzaprav je do danes »izginilo« šest A320 letal. Eno izmed letal A320 je strmoglavilo kmalu po vstopu te serije na trg, kar je sprožilo mnoge polemike. Na enem testiranju Airbusa je prav tako prišlo do nesreče, a ta ni zahtevala življenj. Pilot je preizkušal letenje s spuščnim podvozjem na 30,48 metrih nad tlemi (100 feet), vendar se je spustil prenizko, tako da je bil samo 9,14 metra nad tlemi (30 feet). Ko je letalo 15,24 metrov (50 feet) ali manj nad tlemi, računalnik privzame, da želi pilot pristati. Rezultat je bil – pristanek med drevesi.

3. Zanesljivostni vidiki letalskega plovila Airbus A330

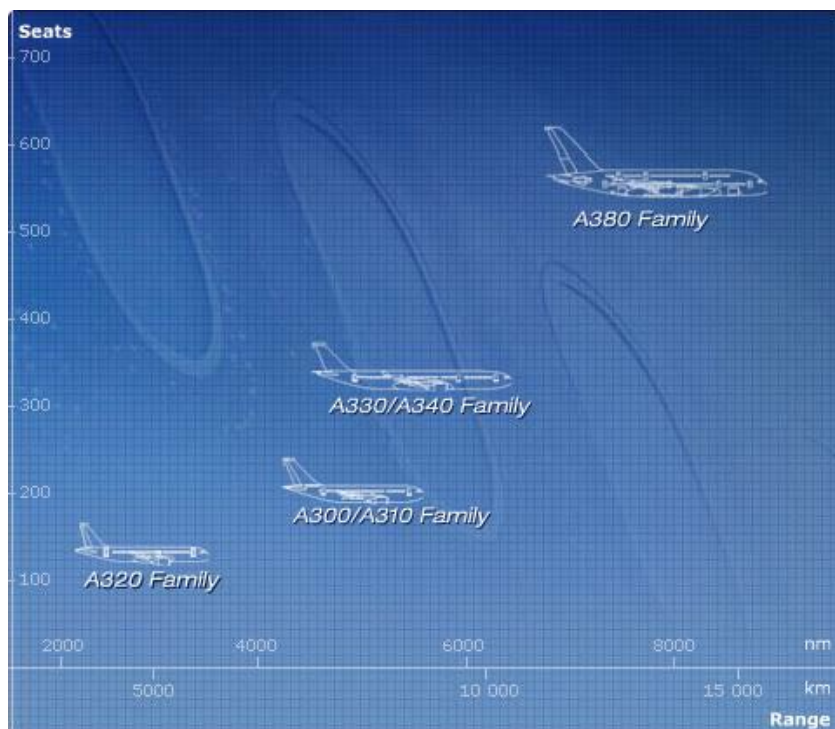
Leta 1970 so štiri najmočnejše evropske države združile moči, znanje in kapital ter ustanovile podjetje Airbus. Največji delež sta pri tem imela nemški Dasa, ki spada pod Deimler-Benz in francoski Aerospatiale. Poleg teh dveh pa sta svoje prispevala tudi britanski Aerospace in španski Construcciones Aeronauticas (CASA). Že od ustanovitve podjetja so številni strokovnjaki družbi napovedovali črno prihodnost, a izkazalo se je ravno obratno. Kljub nacionalnim razlikam ter mnogim drugim oviram, je Airbus skozi leta uspel uskladiti interese, razvoj in znanje v upanju po čim večjem tržnem deležu.

Prvo Airbusovo letalo je bilo predstavljeno že slabo leto pred samo združitvijo podjetij in sicer je šlo za letalo A300B. Ljudje so si ga lahko ogledali na znamenitem pariškem letalskem sejmu. To dvomotorno letalo s širokim trupom je imelo prostora za 226 potnikov v dveh potniških razredih. Upoštevajoč želje in potrebe letalske družbe Air France so kmalu zatem razvili še podaljšano verzijo z oznako A300B2, ki je imela 250 sedežev. Sredi 70-ih let prejšnjega stoletja je Airbus že imel 10% tržni delež in skupno 55 naročil. Sledila je gospodarska kriza, ki je oklestila tudi letalske družbe. Ponoven zagon po krizi je prišel z naročilom ameriške družbe Eastern Airlines. To je povzročilo zvišanje tržnega deleža na 26% s 133 naročili. Konec leta 1979 je imel Airbus 256 naročil od 32 različnih naročnikov, 81 letal je bilo v uporabi pri 14 operaterjih [3].

Leta 1978 je bila predstavljena izboljšava verzije A300. Letalo A310 je bilo prvo letalo z dvopilotsko opremo in je v standardni, dvorazredni konfiguraciji imelo prostora za 218 potnikov. Istega leta so z letalom A320, ki je imelo kapaciteto od 130 do 170 sedežev, pričeli konkurirati Boeingu, ki je prevladovalo na segmentu letal s takšno zmogljivostjo. Svojo družino letal so nato razširili še z modeli A321, A319 in A318.

Letalski promet v Evropski uniji ima zelo stroge predpise, ki se jih pri Airbusu tudi držijo. Zato že od začetka razvijajo letala, ki so ekonomična, operativno učinkovita in uporabljajo okolju prijazno tehnologijo (manjši hrup, manjša poraba goriva,...). Zaradi visoko razvite računalniške tehnologije, velikega poudarka na varnosti in na samih tehnoloških izboljšavah imajo letala Airbus zelo majhen odstotek nesreč.

Da bi pri Airbusu dosegli zeleni tržni delež tako na segmentu letal s 100 do 250 sedeži, kot s 250 do 350 sedeži, so njihovi strokovnjaki v začetku 80-ih let prejšnjega stoletja začeli razvijati dve širokotrupni letali z dvema prehodoma v potniški kabini – dvomotorni A330 in štirimotorni A340. Obe sta bili namenjeni poletom na velike razdalje. Obe letali imata identično osnovno obliko trupa in kril, podobnosti so opazne tudi v funkcionalnih sistemih in v pilotski kabini. Omenjena tipa letal so naredili v več različicah: A340-200, A340-300, A340-300E in A330-300.



Slika 3: Tipi Airbus-ovih letal glede na preleteno razdaljo in število sedežev [4].

Vendar so želje vodilnih ljudi Airbusa bile še večje, zato se razvoj ni ustavil tu. Počasi je začel nastajati projekt letala z imenom A3XX, ki bi lahko imelo 500 in več sedežev. Kasneje se je projekt preimenoval v A380. Prva predstavitev tega letala pa se je zgodila decembra leta 2000. Kmalu po predstavitvi je konzorcij Airbus že prejel 50 naročil od šestih največjih letalskih družb iz celega sveta: Air France, Emirates, International Lease Finance Corporation, Qantas, Singapore Airlines in Virgin Atlantic.

Kar se tiče lastništva, je družba Airbus do leta 2000 veljala za bolj ohlapno kot zavezujočo se družbo. Tega leta pa so se podjetja Daimler Chrysler Aerospace, Aerospatiale in Construcciones Aeronauticas (CASA) združila v podjetje, imenovano The European Aeronautic Defence and Space Company (EADS). Leta 2001 se jim je pridružilo še podjetje BAE Systems. Tako se je združenje Airbus Industrie preoblikovalo v Airbus Integrated Company. Leta 2006, torej dobrih trideset let po nastanku, je Airbus postal samostojno podjetje, katerega sto odstotni lastnik je danes podjetje European Aeronautic Defence and Space Company (EADS).

3.1 Pregled

Kot sem že omenil je A330/A340 dvojni program – prvič v zgodovini se je zgodilo, da so dve letali, enega z dvema motorjema, drugega s štirimi, začeli razvijati istočasno. Obe izvedbi imata enako velik tako potniški, kot tudi tovorni prostor. Štirimotorni A340 je optimiziran

predvsem za dolge razdalje, čeprav je učinkovit tudi na kratkih, vendar se zaradi boljšega ekonomskega poslovanja za krajše razdalje uporablja predvsem A330.

Pristop, ki je torej temeljil na razvoju dveh letal s podobnimi značilnostmi, je zagotovil veliko prednosti za podjetje, za proizvajalca ogrodja in za proizvajalca notranje opreme. Že od samega začetka je bila skupna zahteva inženirstva za obe »sestrski« letali ta, da bi obstajala točka v razvoju, kjer bi dodatne funkcije za eno ali drugo letalo predstavljale zelo malo dodatnih stroškov v smislu cene, teže, zanesljivosti, vzdrževanja, porabe goriva itd.

Kot rezultat vsega tega lahko letali uporabljata iste dele (razen delov povezanih z motorji), upravlja ju lahko ista posadka, vzdržuje ju lahko isto osebje, stroški so skoraj enaki, kot če bi razvijali eno samo letalo in najpomembnejše, da sta obe letali suvereno učinkoviti.



Slika 4: Serija Airbus A330/A340 in njihove lastnosti [5].

Airbus A340 je na voljo v dveh različicah in operaterjem omogoča izbiro med A340-300 in A340-200. Zmogljivejši A340-300 ima enako dolžino trupa kot A330, njegovi stroški, ki se nanašajo na sedeže in preletene milje, so primerljivi s tistimi od Boeinga 747 in so tako ugodna alternativa na dolgih progah na območjih z manjšo gostoto prometa.

A340-200, ki sprejme od 250 do 300 potnikov, ima izmed vseh komercialnih letal največji razpon sposobnosti. Zaradi relativno nizkih stroškov letenja in operativno prožnostjo štirih motorjev, je letalo idealno tudi za dolge razdalje, kadar ostala letala niso na voljo oziroma so neekonomična.

Medtem ko Airbus A340 služi predvsem za dolge poti, je A330 namenjen krajšim letalskim linijam z visoko gostoto letov. Kljub temu se pa A330 uporablja oziroma ima možnost delovati tudi na daljših, gospodarsko razširjenih, mednarodnih progah. Običajno s 335 sedeži v dveh potniških razredih ima A330 sposobnost preleteti 4500 NMi (navtičnih milj) s polnim številom potnikov in prtljage ter 3200 NMi z maksimalnim tovorom. Zaradi tega lahko služi tudi kot neposredna zamenjava za tovorna letala.

A330 in A340 sta zgrajeni po tehnološkem ozadju, ki je bilo osnovano po dveh prejšnjih serijah letal, in sicer A300/A310 in A319/A320/A321.

A300/A310 serija še danes velja za najboljšo serijo dvojček letal, t.j. med vsemi letali z dvema prehodoma, ki premore veliko tehnološko naprednih funkcij in se še dandanes uporabljajo v najnovejših letalih. A319/A320/A321 serija je svetovno najbolj razširjena serija, ki prav tako ponuja in vsebuje posebnosti, ki so značilne za mnogo večja letala.

V celotnem procesu razvoja je bilo pomembno zagotavljati čim več skupnih značilnosti, ki bi jih bilo mogoče doseči tudi z drugimi programi, brez izgube učinkovitosti. Z uporabo izbranih funkcij in programov iz vsake od teh proizvodnih linij, ki so jih po potrebi seveda posodabljali, je nastal program A330/A340. Tako se program ni srečeval z začetnimi težavami, hkrati pa je bil pripravljen na nove izzive in merila v kategoriji tako velikih letal. Dodatna prednost je pa tudi ta, da se lahko tehnološke značilnosti A330/A340 letala v mnogih primerih uporabijo za izboljšanje določenih starejših proizvodnih linij.

Pred začetkom uporabe serij letal A330/A340 je bilo tehnološko najbolj napredno letalo v vseh kategorijah Airbus A320. Njegova zasnova pa je bila kasneje osnova za letali A330 in A340.

Pilotska kabina letala A330 je iz vidika pilota identična tisti v A320. Izjeme so v velikosti letal, dodane so funkcije, potrebne pri misijah na dolgih razdaljah, izboljšan sistem pospeševanja in zaviranja, sposobnost polarne navigacije in seveda funkcije povezane z motorji. Posledica vsega tega je, da je od pilotiranja letala A319 s 130 sedeži do pilotiranja letala A340, ki ima najbolj napredno pilotsko kabino med vsemi letali, potrebno le minimalno dodatno usposabljanje.

Zasnova za pilotsko kabino letal A330 in A340 se je razvila iz istih metod, ki so bile uspešno uporabljene za prvi Airbus Industrie A300. Začetna zasnova pilotske kabine in sistemov za A330 je temeljila na treh značilnostih :

- obstoječe lastnosti pilotske kabine prejšnjega modela letala (v primeru letala A330 je to letalo A320),
- geometrijski profil nosu ostane praktično nespremenjen prejšnjim modelom in
- nova raziskovalna in razvojna dela se sproti nadgrajujejo.

Ta prvotna konstrukcija je bila pregledana s strani delovne skupine, sestavljene iz pilotov in inženirjev, ki so na podlagi svojih izkušenj pri modelu A320 presodili njeno ustreznost. Skupina se je sestajala večkrat letno. Na vsakem koraku v razvoju se je dizajn dopolnjeval in izboljševal. Vsako pilotsko kabino so, seveda preden so jo premestili v sam trup letala, testirali še v simulatorjih, kjer so dobili celostno podobo le-te.

Avionika v letalih A330/A340 je močno integrirana in je optimalno prirejena posadki, kot tudi vzdrževalnim ekipam. Kot pri vseh modelih od A300FF naprej je primarni protokol ARINC 429. Drugi standardi so prisotni v primerih, ko ARINC 429 ne ustreza. ARINC 429 je električni in podatkovni standard za dvožična serijska vodila z enim pošiljateljem in več poslušalci. Ta standard opredeljuje eno od najpogosteje uporabljenih podatkovnih vodil v sodobnih komercialnih letalih.

ARINC (angl. *Aeronautical Radio Incorporated*), ki je bil ustanovljen leta 1929, je glavni ponudnik prometnih komunikacijskih sistemov inženirskih rešitev za osem panog:

- letalstvo,
- letališča,
- obrambo,
- vlado,
- zdravstveno varstvo,
- omrežja,
- varnost in transport.

ARINC je nameščen tudi na računalniško podatkovnih omrežjih v policijskih vozilih in tudi na železnicah oziroma vlakih. V zadnjih letih se ta standard vedno bolj uporablja tudi na raznih vesoljskih plovilih.

Poznamo različne serije ARINC standardov. Serija 400 vključuje smernice za namestitve, električne napeljave, podatkovna vodila in podatkovne baze. V to serijo spada tudi omenjeni ARINC 429. Serija 500 opisuje analogno avioniko na letalih kot so Boeing 727, Douglas DC-9, DC-10, Boeing 737 in 747 in Airbus A300. Serija 600 opisuje temelje opreme, ki je specifična za serijo 700. Serija 700 opisuje digitalne sisteme in opremo nameščeno na letalih, vključno s podatki, elektroniko digitalnih sistemov in komunikacijske protokole. Serija 800

opisuje razvoj tehnologij, ki podpirajo omrežja v letalih, vključno z optičnimi vlakni, ki se uporabljajo pri vodilih z visoko hitrostjo. In kot zadnja, serija 900 opisuje sisteme letalske elektronike v integrirani modularni in omrežni arhitekturi.

3.2 Primarni sistem za krmiljenje letala airbus A330/A340

Sistemi za elektronsko krmiljenje se v civilnem letalstvu uporabljajo že več kot 40 let [6]. Aplikacije, ki so bile najprej izdelane za ta namen, so obravnavale delovanje motorjev. Sredi petdesetih let prejšnjega stoletja pa so že začeli razvijati tudi analogne tehnike s katerimi so nadzirali hidromehanska stikala, odgovorna za gorivo in pretok zraka. Približno 20 let kasneje so bile uvedene digitalne metode za nadzor spremenljivih zračnih odprtih pri letalih Concorde. Pri sodobnih letalih je dandanes razširjena uporaba mikroračunalniških sistemov, ki temeljijo na optimalnem delovanju motorja in ekonomičnosti porabe goriva.

Pri predstavitvi letala Concorde so prvič prikazali uporabo elektronskih sistemov, ki manipulirajo hidravlične komande, namenjene upravljanju letala. Concorde uporablja oziroma je uporabljal analogno elektroniko z mehansko varnostno ureditvijo. Digitalni sistemi so bili v te namene prvič uporabljeni v zgodnjih 1980-ih letih s predstavitvijo letala Airbus A310. Ta uporablja več računalnikov za nadzor sprednjih in zadnjih zakrilc in spojlerjev, za primarno kontrolo letenja pa uporablja bolj konvencionalne metode. Digitalni sistemi oziroma tehnike so se tekom časa razvijale in izboljševale ter bile leta 1988 vključene v primarni kontrolni sistem letala Airbus A320. Čeprav ima to letalo možnost uporabe mehanskega varnostnega sistema, se v normalnih okoliščinah poslužuje 'Fly-by-wire' sistema, kjer so ukazi posadke posredovani preko krmilne plošče računalnikom. Sredi 90-ih let prejšnjega stoletja je Airbus predstavil družino letal A330/A340. Tudi ta družina uporablja 'Fly-by-wire' tehniko in omogoča široko uporabo naprednih računalniških sistemov. A330 je letalo z dvema motorjema, medtem ko ima A340 štiri motorje. V nadaljevanju so podrobno predstavljeni vidiki oblikovanja računalniških sistemov, ki se uporabljajo v primarnem kontrolnem sistemu omenjenih letal.



Slika 5: Airbus A330 [7].

Implementacija računalniško podprtega operacijskega sistema ni bila lahka naloga, vendar je bila želja po zmanjšanju obremenitev pilota in preprečevanju nenamernega preobremenjevanja meja zmogljivosti letala večja. Primarna motivacija za obe spremembi je bila izboljšanje varnosti. Statistični podatki kažejo, da je približno 60% vseh letalskih nesreč posledica človeške napake. To ne pomeni, da takšne nesreče nastanejo zaradi napake pilota, vendar pa človeški faktor igra pomembno vlogo pri določanju varnosti samih letal. Eno izmed ključnih vprašanj, ki vplivajo na učinkovitost letalske posadke, je kako zmanjšati delovno obremenitev. Vse, s čimer se lahko le-ta zmanjša, pripomore k izboljšanju splošne varnosti. Z naprednimi računalniško podprtimi sistemi kontrole letenja si prizadevajo zmanjšati obremenjenost pilota z bolj intuitivnim uporabniškim vmesnikom in z izvajanjem nekaterih samodejnih funkcij. Takšni sistemi so uporabni tudi zato, da držijo letalo v okviru normalnega delovanja, in bi, v primeru da pilot nenamerno potegne nek vzvod, to preprečili. Rezultat vsega tega je zmanjšanje fizične in psihične obremenjenosti posadke in izboljšanje ugodja med samim letom.

Čeprav lahko letala A330 in A340 letijo brez uporabe elektronskega sistema za krmiljenje letala (EFCS), lahko okvara tega sistema predstavlja znatno zmanjšanje splošne ravni varnosti. EFCS zato zahteva visoko stopnjo integritete in je bil oblikovan ter izdelan pod strogimi predpisi prav za tak sistem. Ker se letalo močno zanaša na svoj računalniški sistem, je pomembno, da kontrolni sistem deluje v vsakem trenutku. Kljub prisotnosti napak tak sistem zagotavlja varno obratovanje letala tudi več ur. Te napake se odkrivajo, in če se le da tudi odpravljajo spotoma. Obstaja več vidikov tega sistema, v nadaljevanju pa so opisane arhitekturne značilnosti, ki se uporabljajo za doseg tako visoke stopnje tolerance napak.

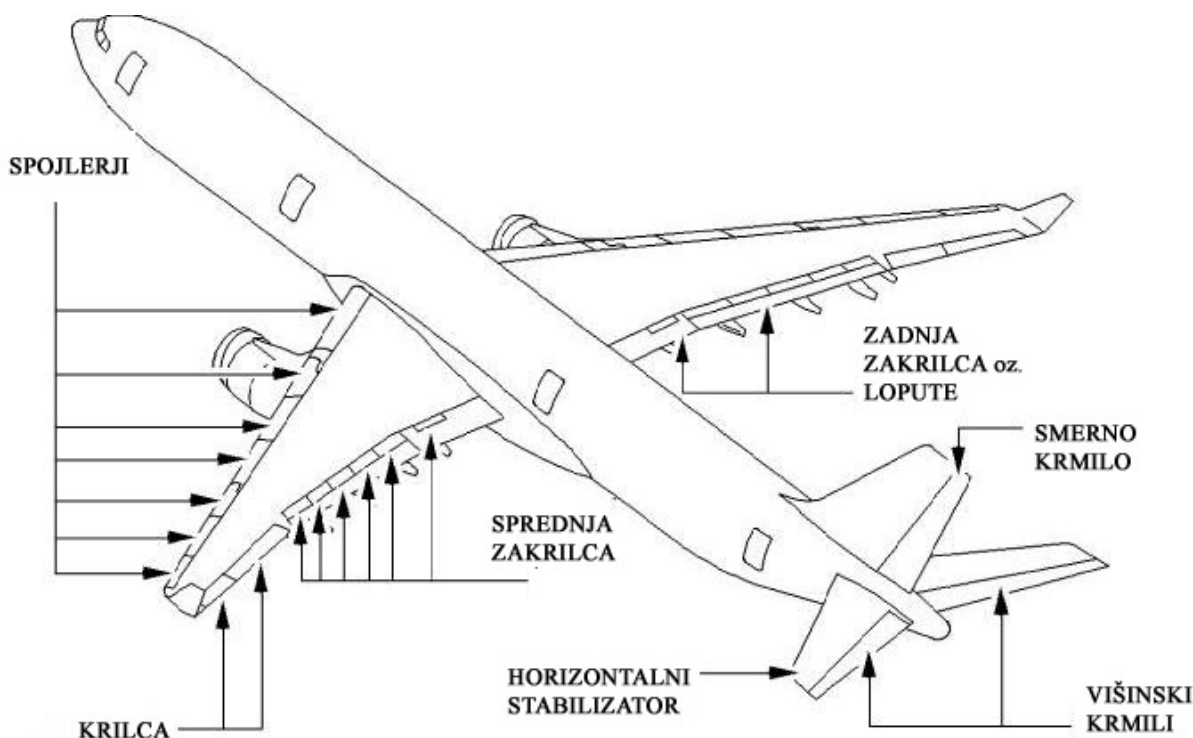
3.3 Krmila za kontrolo letenja

Letenje letala v veliki meri nadzirajo številni kontrolni deli, ki vplivajo na pretok zraka nad samo površino letala. Krmila za kontrolo letenja so prikazana na sliki 6.

Primarna krmila za kontrolo letenja so krilca, višinsko krmilo in smerno krmilo.

Krilca so premična krmila na zadnjem delu kril letala, ki nadzorujejo krivuljo leta. V običajnih primerih delujejo prek krmilne ročice. Ta deluje tako, da če se obrne v desno, se krilca letala dvignejo na desnem krilu, posledično pa se znižajo krilca na levem krilu. To povzroči, da letalo zavije v desno. Premik ročice v levo pomeni torej zasuk letala v levo.

Višinski krmili sta premična kovinska lističa na zadnjem robu horizontalnega stabilizatorja letala (na repu letala). Premikata se skladno in posledično skrbita za višinski nadzor letala. Upravljanje višinskih krmil prav tako poteka preko krmilne ročice, ki se premika naprej in nazaj. Potisk ročice naprej povzroči znižanje višinskih krmil, to pa posledično usmeri nos letala navzdol. Nasprotno povzroči potisk ročice nazaj, usmeritev nosu letala navzgor.



Slika 6: Krmila za kontrolo letenja pri Airbus-u A330.

Smerno krmilo je navpično, premično krmilo, ki se nahaja na zadnjem robu navpičnega stabilizatorja (repne plavuti). Premikanje krmila v eno oziroma drugo smer povzroči, da se letalo vrti okrog navpične smeri (nihajna os). Krmilo se običajno nadzira prek nožnih pedal. Pritiskanje na levi pedal obrne krmilo na levo, kar prisili rep letala, da se obrne v desno. S tem

se premakne tudi nos letala, in sicer v levo. Pritiskanje na desni pedal deluje ravno obratno. Pedala smernega krmila se uporabljajo tudi za vožnjo letala na tleh.

Letalo ima še nekaj *sekundarnih krmil* za kontrolo letenja.

Zadnja zakrilca oziroma **lopute** so premična krmila, ki se nahajajo na sprednji strani kril, zraven krilc (razvidno iz slike). Znižanje loput povečuje upor in s tem omogoča počasnejše pristajanje letala.

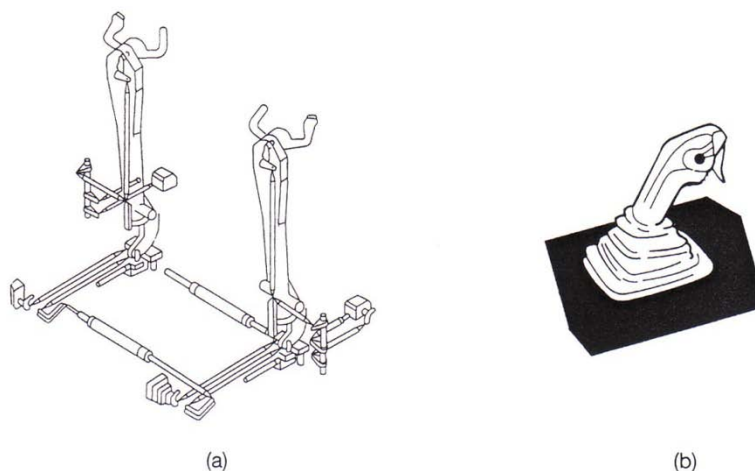
Spojlerji se nahajajo na vrhu krila letala, pred zakrilci. Njihova funkcija je, da prekinejo tok zraka, ki teče čez krila in tako zmanjšajo vertikalno silo zračnega pritiska na letalo, ki deluje v obratnem sorazmerju s silo teže. To posledično pomeni upočasnitev letala. Spojlerji prav tako omogočajo strm pristonek z zmanjšano hitrostjo.

Sprednja zakrilca so premične lopute na sprednji strani kril. Pretok zraka skozi te lopute pomaga, da letalo ne koleba preveč pri zmanjšanju hitrosti.

Uravnoteženi horizontalni stabilizator (THS) se uporablja za uravnoteženost pri dviganju in spuščanju ob pomoči višinskih krmil. Prav tako omogoča, da posadki ni treba ohranjati neke stalne sile na krmilno palico med mirnim letom.

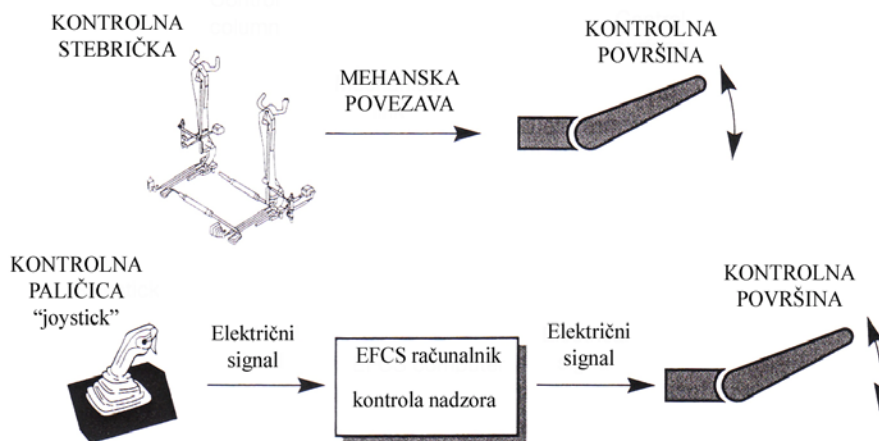
3.3.1 Primarne letalne kontrole

Pri običajnih letalih se nadzor nad primarnimi letalnimi kontrolnimi površinami doseže prek uporabe kontrolnih plošč in nizom pedal za krmiljenje. Vsi ti neposredno vplivajo na različne kontrolne površine, po drugi strani pa ti mehanizmi olajšajo tudi fizični napor pilota. Pri družini letal A330/A340 (in ostalimi novejšimi letali) so kontrolne stebričke zamenjali s kontrolno paličico oziroma »joy-stickom«, kot kaže slika 7.



Slika 7: a) Par kontrolnih stebričkov b) Kontrolna paličica ("joy stick") [8].

Ta »joy-stick« predstavlja znatno izboljšanje ergonomije vmesnika med posadko in sistemom kontrole letenja. Vendar ta sprememba vključuje veliko več, kot alternativno napravo za vnašanje, kot je prikazano na sliki 8.



Slika 8: Primerjava med mehansko (a) in električno (b) kontrolo [9].

V konvencionalno ali mehansko nadzorovanih letalih je gibanje kontrole letenja bilo dopolnjeno in nato uporabljeno za različne kontrolne površine. Moč, ki je potrebna za delovanje teh površin, je na voljo z uporabo hidromehanskih servo-ojačevalnikov. Vendar je sama naloga usklajevanja različnih gibanj še vedno prepuščena letalski posadki. Pri letalih, ki uporabljajo 'fly-by-wire' sistem, pilot posreduje signale računalnikom, ki skrbijo za krmiljenje letala, t.j. obnašanje letala oziroma delovanje letala. Računalniški sistemi nato interpretirajo te signale in generirajo ustrezne ukaze za različne naprave. Takšen način poenostavi kontroliranje letala, poleg tega pa določa računalniškim sistemom tudi omejitve nad operacijami, ki jih izvajajo.

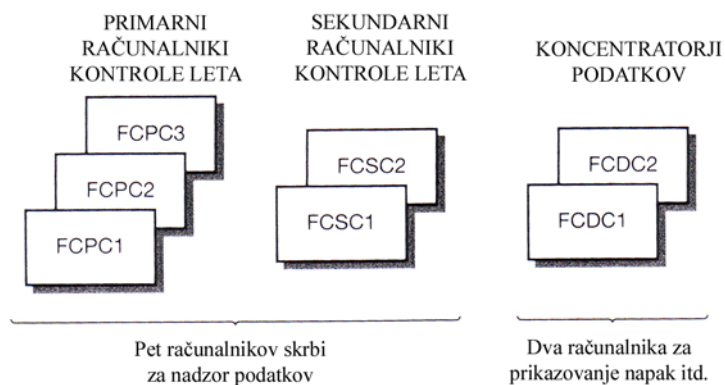
Omejitve, ki jih vsiljuje sistem za krmiljenje letala, se izvajajo v okviru določenih nadzornih zakonov. Ti določajo razmerje med premikanjem »joy-stick-a« in obnašanjem letala. Vplivajo namreč na običajno obnašanje letala in hkrati preprečujejo, da bi člani posadke nenamerno sprožili neprimeren način delovanja letala. Na primer sistem bi pomagal preprečiti kolebanje letala zaradi zmanjšanja hitrosti ali pa prehitrega spuščanja, pri čemer bi bila presežena maksimalna dovoljena hitrost. Omejitve nadzornih sistemov in protiblokirnega avtomobilskega zavornega sistema (ABS) so zelo primerljive. ABS sistem deluje tako, da voznik avtomobila uporabi največji pritisk na zavorni pedal, zavorni sistem pa samodejno preprečuje blokiranje koles. Podobno lahko pilot A330/A340 letala zahteva najvišjo stopnjo vzpenjanja, vedoč da bo sistem za krmiljenje letala pomagal preprečiti kolebanje letala.

3.4 Arhitektura sistema kontrole letenja

Upoštevač zanašanje na sisteme za krmiljenje letala in pojav težav pri manevriranju letala brez njih, je toleranca napak zelo pomembna. Ta se izvaja na več načinov in na več ravneh. Stopnja tolerance napake je zagotovljena iz strani primarnih in sekundarnih kontrolnih površin, ki so povezane prek sistema kontrole letenja. V izredno redkih primerih, ko odpove celoten avtomatiziran računalniški sistem, je lahko letalo še vedno obvladljivo s smernim krmilom in uravnoteženim horizontalnim stabilizatorjem. Oba sta namreč še vedno povezana s kontrolnimi ploščami pri pilotu.

Prehod na uporabo mehanskega rezervnega sistema bi pomenil bistveno zmanjšanje varnosti v letalu. Zato je to zadnja rešitev, ki se uporabi le v primeru popolne odpovedi elektronskih sistemov. Kakorkoli, sistemi se lahko spopadejo z odpovedjo več posameznih sestavnih delov, brez izgube na funkcionalnosti in brez vidnega znižanja stopnje varnosti. To se doseže z uporabo številnih računalnikov, senzorjev in stikal, ki so v stalni pripravljenosti in zagotavljajo visoko stopnjo zaščite ob pojavu številnih sistemskih napak.

Računalniki uporabljeni v sistemu kontrole letenja so prikazani na sliki 9. Pet računalnikov je v uporabi za kontrolo letalne kontrolne površine, od tega so trije primarni in dva sekundarna. Dva dodatna računalnika se uporabljata za zgoščevanje podatkov in skrbita za zbiranje informacij iz sistema kontrole letenja ter posredovanje teh informacij opozorilnim sistemom. Oba računalnika pošiljata informacije še računalnikom, ki snemajo podatke o letu in sistemom za vzdrževanje.



Slika 9: Računalniki uporabljeni v sistemu kontrole letenja [10].

Funkcije petih računalnikov, ki nadzorujejo letalne površine, se lahko razdelijo na dve področji :

- računske funkcije vključno z izračuni, ki zadevajo nadzorne zakone in

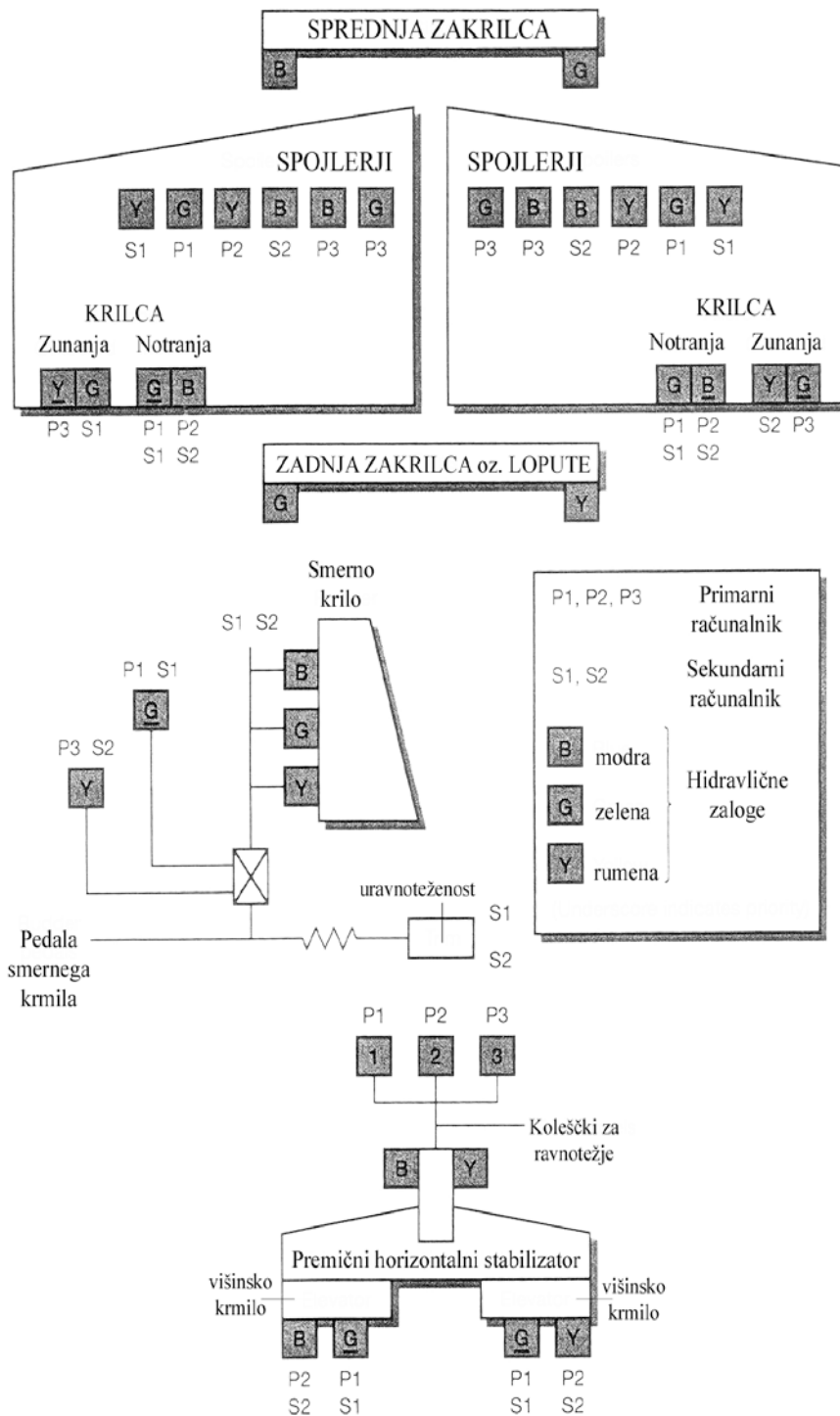
- izvršilne funkcije, ki kontrolirajo različne servo-zanke.

Vsak računalnik je sestavljen iz dveh različnih kanalov v obliki ukazne vrstice in monitorja. Ti kanali delujejo neodvisno od različne strojne in programske opreme. Nesoglasja med temi kanali povzročijo, da se računalnik ugasne ali resetira in se nadzor preusmeri na drug procesor. Odpoved enega ali več procesorjev se lahko tolerira zaradi ureditve, ki povezuje računalnike. Ta ureditev zagotavlja, da je vsaka letalna površina pod nadzorom več neodvisnih naprav, vse pa nadzirajo različni računalniki. Na ta način je zagotovljen večji nadzor, in sicer odpoved ene neodvisne naprave ali računalnika ne pomeni odpoved celotne letalne površine.

Premikanje različnih krmilnih površin je doseženo s hidravličnimi pogoni. Slednji predstavljajo ključni element v nadzornem sistemu. Kot vsa druga komercialna letala, ima tudi Airbus A330 tri ločene dovode hidravlike, ki se uporabljajo za preprečevanje neuspeha enotne dobave. Enotna dobava bi lahko povzročila izgubo vseh pogonov letala. Dovodi hidravlike so določeni kot modri, zeleni in rumeni tokokrogi in so usmerjeni ločeno po vsej ravnini letala ter preprečujejo, da bi vsak lokalni dogodek poškodoval katerega izmed različnih sistemov.

Razporeditev različnih elementov nadzornega sistema cilja na zaščito letal pred odpovedjo katerekoli posamezne enote kot so računalnik, pogon, hidravlika ipd. To razporeditev prikazuje slika 10.

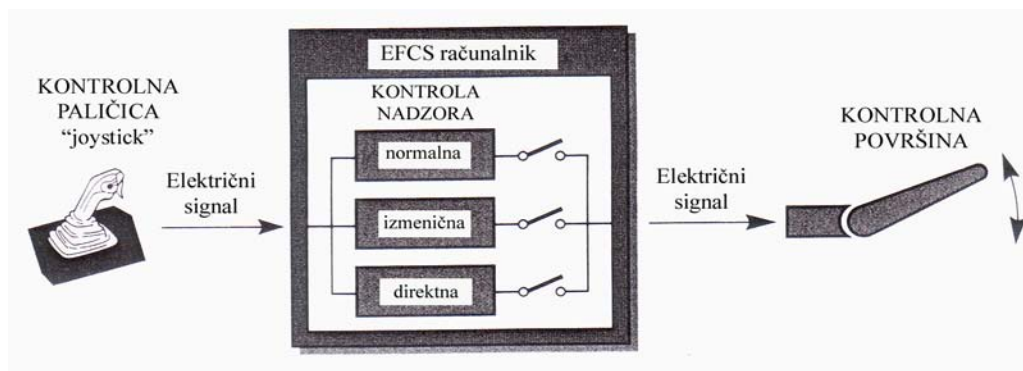
Čeprav lahko sistem za krmiljenje letala deluje pravilno tudi ob prisotnosti več vrst napak, bodo nekatere komponente delovale na določeni točki tako, da se bo del funkcionalnosti izgubil. Za ohranjanje varnega delovanja se sistem, ob doseganju določene stopnje poslabšanja, rekonfigurira.



Slika 10: Razporeditev računalnikov in aktuatorjev pri plovilu Airbus-u A330/A340 [11].

3.5 Toleranca napak skozi proces rekonfiguracije

Sistem za krmiljenje letala se lahko rekonfigurira ob spopadu s sistemskimi napakami na dva načina. V prvem primeru lahko naloge, ki jih različni računalniki prerazporedijo v skladu z v naprej pripravljenim formularjem, razdelijo svoje kritične posle med razpoložljive vire. V drugem primeru lahko sistem sprejme kontrolo nadzora glede na stanje sistemskih komponent. Ta drugi pristop je prikazan na sliki 11 in kaže zmožnost sistema za preklop med kontrolo nadzora, odvisno od razpoložljivosti sistema.



Slika 11: Pristop sprejema kontrole nadzora glede na stanje sistemskih komponent [12].

Sistem za krmiljenje letala ima tri različne kontrole nadzora:

- normalne,
- izmenične,
- direktne.

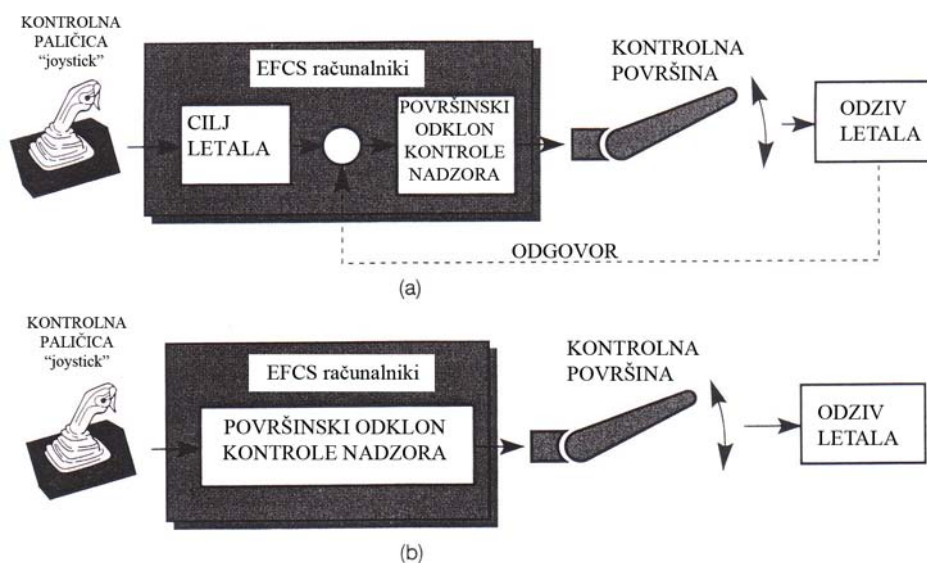
Pri normalnih okoliščinah funkcioniра letalo pod normalnim nadzorom kontrole leta. To pomeni, da sistem sprejme signal, ki ga pošlje kontrolna ročica in ustvarja ustrezne premike kontrolne površine za izvedbo zahtevanega dejanja. Nadzor prav tako omogoča stabilizacijo ob atmosferskih nihanjih (sunki vetra), zmanjšuje delovno obremenitev pilota in onemogoča nepravilno zibanje letala. Prav tako pomaga pilotu pri kolebanju letala zaradi zmanjšane hitrosti ali pa pri preseganju njegove največje varne hitrosti. Še ena od značilnosti tega nadzora je, da nudi dobro zaščito v primeru okvare motorja.

V primeru znatne izgube sistemskih virov lahko sistem za krmiljenje letala preklopi na izmenični nadzor kontrole leta. Slednji poleg funkcionalnosti normalnega nadzora kontrole leta omogoča še samodejni nadzor naklona. Računalnikom posreduje tudi opozorila o nenadnih kolebanjih letala ali prekoračitvi varnostne hitrosti.

Če letalu odpove večji del sistema za krmiljenje letala, je potreben direkten preklop na kontrolo nadzora. V tem primeru se krmilna palica uporablja neposredno za določanje položaja posamezne kontrolne površine, kar seveda povzroči določeno izgubo

funkcionalnosti. Kljub temu so računalnikom še vedno posredovana sporočila o kolebanju in prekoračeni varnostni hitrosti letala.

Normalna in direktna kontrola nadzora se med seboj razlikujeta v tem, da pri normalni kontroli nadzora kontrolna palica vnose interpretira kot neke cilje letala ter jih nato primerja z odgovorom letala (slika 12). S primerjavo se nato določi ukrepe za nadzor kontrolnih površin. Kot je razvidno iz slike kontrola nadzora prikazuje kontrolno metodo zaprte zanke. Kadar je v uporabi direktna kontrola nadzora, se signali kontrolne palice interpretirajo kot direktni ukazi za premik določene kontrolne površine in se ne čaka na odgovor letala. Zato gre v tem primeru za odprto zanko.



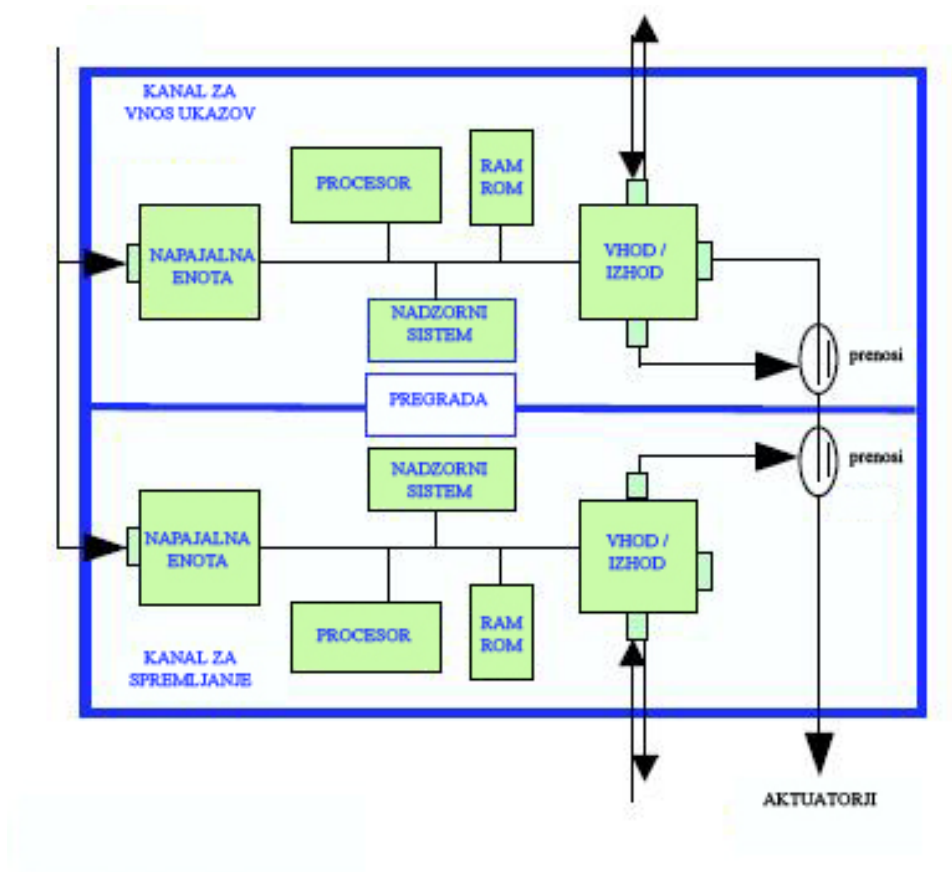
Slika 12: Primerjava normalne in direktne kontrole nadzora [13].

Samo ena napaka v sistemu kontrole letenja še ne bo povzročila izklopa normalne kontrole nadzora. Nekatero dvojno napako bodo posledično vklopile izmenično kontrolo nadzora, za preklon na direktno kontrolo nadzora pa se mora pojaviti napaka na vsaj treh komponentah. Vedeti moramo, da tudi kadar je v uporabi direktna kontrola nadzora, lahko letalo še vedno leti in pristane brez večjih problemov.

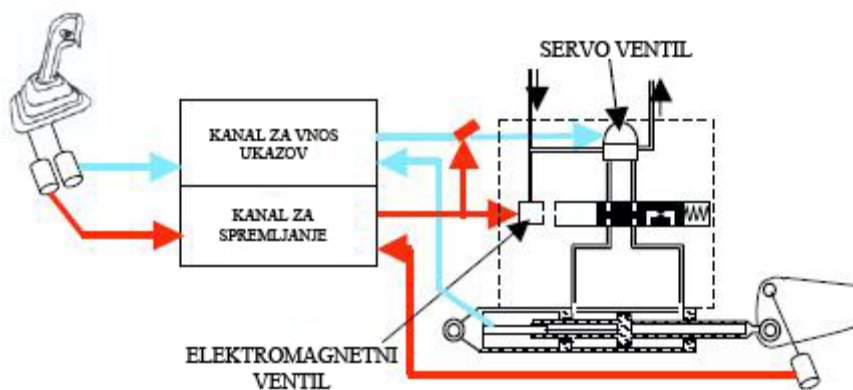
3.6 Računalniška arhitektura

Funkcionalno so računalniki sestavljeni iz dveh delov - iz kanala za vnos ukazov in iz kanala za spremljanje (slika 13). Kanal za vnos ukazov omogoča oziroma zagotavlja funkcije dodeljene računalniku (npr. nadzor premika površine). Prek kanala za spremljanje je možno spremljati pravilno delovanje kanala za vnos ukazov. Takšne vrste računalnikov se je že uporabljalo pred A330 in sicer je na ta način deloval avtopilot pri Concorde-u, prav tako pa tisti v zgodnjih serijah Airbusa. Tak tip računalnikov lahko obravnavamo tudi kot dva različna

in neodvisna računalnika drug od drugega. Oba računalnika opravljata različne funkcije in imata različno programsko opremo, vendar ko delujeta skupaj je upravljanje leta lažje. Tako vnos ukazov kot spremljanje potekata neodvisno. Ko so računalniki v stanju pripravljenosti, so še vedno pozorni na »mirujoče« napake, katere nato izolirajo. Kanal za spremljanje deluje tudi s povezanimi aktuatorji, npr. ob priklicu označitve COM vrstnega reda se prestavi aktuator, ki skrbi za elektromagnetni ventil in računalnik gre v stanje pripravljenosti (slika 14).



Slika 13: Globalna računalniška arhitektura [14].



Slika 14: Kanal za spremljanje s povezanimi aktuatorji [15].

Pri Airbusu A320 se za krmiljenje letala uporabljata dve vrsti računalnikov: ELAC (*Elevator and Aileron Computers*) in SEC (*Spoiler and Elevator Computers*). Prvi je računalnik, ki skrbi za krilca in višinski krmili, drugi pa računalnik, ki skrbi za spojlerje in krilca. Vsak računalnik ima kanal za vnos ukazov in kanal za spremljanje. Torej obstajajo štiri entitete: ELAC s kanalom za vnos ukazov in kanalom za spremljanje, oba pa ima tudi SEC. To pripelje torej k štirim različnim programskim opremljenim. Dve vrsti računalnikov se uporabljata tudi na Airbusu A330/A340 in A380: PRIM (primarni računalnik) in SEC (sekundarni računalnik). Čeprav se ti računalniki med sabo razlikujejo, so osnovna načela varnosti zelo podobna. Poleg ELAC in SEC, se pri A320 uporabljata še dva računalnika, ki skrbita za nadzor smernega krmila (FAC), vendar nista podvojena, kot ELAC in SEC. Na drugih serijah Airbusa so funkcije tega računalnika integrirane v primarne in sekundarne računalnike.

Vsak primarni in sekundarni računalnik, ki skrbi za kontrolo letenja, ima dva procesorja. Enemu procesorju je dodeljena vloga vodenja, drugemu pa vloga kontroliranja. Izmenjava informacij med procesorjema pa povzroča tudi statusne napake oziroma izgubo funkcionalnosti.

V primarnih računalnikih sta nameščena dva Intel 80386 procesorja, ki obratujeta s 16 MHz. Ukazna vrstica je sprogramirana v zbirnem jeziku, monitor pa uporablja PL/M (*Programming Language for Microcomputers*). Skupaj je programske opreme približno 800 kb. Za programsko in strojno opremo skrbi proizvajalec Aerospatiale.

Sekundarni računalniki uporabljajo dva Intel 80186 procesorja, ki operirata z 12 MHz. Tudi tu je bil uporabljen zbirni jezik za ukazno vrstico, medtem ko monitor uporablja programski jezik Pascal. Programska oprema zasede približno 300 kb. Strojna oprema za računalnike je v domeni podjetja Sextant Avionique, medtem ko za programsko skrbi podjetje Aerospatiale.

Vsak kanal vključuje enega ali več procesorjev, priključene pomnilnike, vhodno-izhodne povezave, enote za napajanje in specifično programsko opremo. Če rezultati enega od teh dveh kanalov bistveno odstopajo med seboj, potem računalnik, ki ugotovi to napako, prekine povezavo med kanaloma in sporoči napako.

Sistem je zasnovan tako, da so izhodni podatki računalnika v zanesljivem stanju. Detekcija napak se pogosto doseže s primerjanjem sprememb med obema kanaloma, z v naprej določeno mejo. Pregled torej omogoča, da se posledice odpovedi enega od sestavnih delov računalnika hitro odkrijejo in preprečijo nadaljnje napake, ki lahko zaradi tega nastanejo. Ta metoda detekcije se dopolni z nadzorom za dobro izvajanje programa, preko svojega zaporednega kodiranja. Računalniki za krmiljenje letala morajo biti še posebno robustni oziroma močni. Imeti morajo prenapetostno in podnapetostno zaščito, zaščito pred močnim elektromagnetnim valovanjem in zaščito pred posrednimi udarci strel. Ohlajajo jih prezračevalni sistemi, vendar njihovo delovanje ni ogroženo tudi v primeru, če se prezračevanje pokvari.

Šest CRT (angl. *cathode ray tube*) monitorjev na glavni armaturni plošči prikazuje pilotom podatke o stanju letala in informacijskih sistemih. Urejeni so tako, da zagotavljajo odlično vidljivost pilotu. Informacije o letu zagotavlja EFIS (angl. *Electronic Flight Instrumentation System*), ki ga sestavljata PFD (angl. *primary flight display*) in ND (angl. *navigation display*). Sistemske informacije zagotavlja ECAM (angl. *Electronic Centralized Aircraft Monitor*), ki na enem monitorju prikazuje opozorila povezana z motorji, na drugem pa informacije o pomembnih letalskih sistemih. Senzorji, ki se nahajajo po vsem letalu, stalno spremljajo sisteme, in če pride do odstopanj spremembe določenega parametra iz normalnega v nenormalno stanje, avtomatsko opozorijo pilota. Med običajnim letom ECAM prikazuje sistemske informacije glede na fazo leta, s poudarkom na sistemih, na katere je pilot najbolj pozoren npr. pritisk in temperatura kabine, podatki motorja, itd. Pilot lahko ročno nastavi čas prikaza podatkov o določenem sistemu. Če se v tem času pojavi določena napaka ali pa samo opozorilo na določenem sistemu, bo ECAM avtomatsko to informacijo predstavil letalski posadki in zahteval nek ukrep. Če pride do okvare nekega sistema, ki povzroči kaskado drugih napak sistema, ECAM identificira poreklo krivde in ponudi operativne kontrolne sezname, brez dodatnih ukrepov posadke. Prikazani podatki kažejo na sisteme, ki so trenutno v uporabi in omogočajo pilotu prilagoditev operativnega stanja letala veliko lažje, kot na starejših modelih letal. Obstajajo tudi precejšnje prednosti pri samem vzdrževanju letala. Celoten elektronski nadzorni sistem je sestavljen le iz treh LRU (angl. *line replaceable unit*) enot, ki omogočajo hitro razpošiljanje moči in večjo razpoložljivost rezervnih zalog. V bistvu so vse informacije letala predstavljene le na enajstih instrumentih, katerih je šest različnih vrst. Od leta 2001 predstavlja izboljšane zmogljivosti tudi novi elektronski nadzorni sistem, z uporabo prikazovalnikov s tekočimi kristali, ki so nameščeni tako na družini letal A320, kot tudi na družinah A330/A340.

3.7 Toleranca napak

Sistemi za kontrolo letenja pri letalih A330 in A340 zagotavljajo visoko stopnjo tolerance napake z uporabo obsežne in raznolike redundance. Toleranca napak vključuje:

- mehanizme: mehanske povezave od smernega krmila do uravnoveženega horizontalnega stabilizatorja prevzamejo nadzor v primeru popolne odpovedi elektronskega sistema
- računalnike: v uporabi je pet računalnikov dveh tipov. Vsak računalnik ima dva ločena procesorja z različno programsko opremo in različnimi programskimi jeziki. Primarni in sekundarni računalniki imajo različno strojno opremo (različne procesorje), različno programsko opremo in različne proizvajalce strojne opreme.
- senzorje: množica senzorjev se uporablja v vseh primerih.
- sprožila: eno, dve ali tri sprožila se uporabljajo za vsako površino.
- hidravliko: V uporabi so trije ločeni krožni toki z osmimi črpalkami. Hidravlična moč je lahko proizvedena mehansko ali električno s pomočjo motorjev ali pa s pomočjo zračne turbine.
- električne zaloge: A340 uporablja 6 generatorjev, dve bateriji in pet vodil. Štiri generatorje poganjajo motorji, enega naprava s pomožno energijo in enega hidravlični sistem.

Čeprav sama toleranca napak sama po sebi ne more zagotavljati varnosti, v tem primeru zagotavlja temelje za sistem z veliko integriteto.

3.8 Navigacija

DFMS (angl. *Dual Flight Management Systems*), ki je povezan z Flight Guidance in Flight Envelope computing functions; FMS kombinira podatke iz senzorjev navigacije letala vključno z opcijsko GPS namestitvijo. Podpora navigacijskih naprav je vključena v vsak pilotov MCDU (angl. *Multifunction Control Display Unit*), ki omogoča letalu pošiljanje podatkov v primeru okvare FMS. FMS omogoča posadki izbiro optimalnega načrta leta za svojo pot iz nabora baze podatkov v letalski navigaciji. Prav tako omogoča tudi samodejno letenje prek avtopilota ali prek »flight directorja« od vzleta letala pa vse do pristanka.

»Canned« načrt leta zajema podatke, potrebne za let iz specifikacij, ki jih vnese posadka pred odhodom, kot tudi med potjo, saj se lahko spremenijo vremenske razmere, ki povzročijo spremembo leta.

Novi FMS sistemi, ki so predvsem bolj učinkoviti, so se začeli nameščati leta 2000. FMS sistem ima nameščen tudi predhodnik Airbusa A330, torej A320.

3.9 Centralni sistem za vzdrževanje

S serijo A320, ki je imela svoj centralni sistem prikazovalnika napak (angl. CFDS oziroma *Central Fault Display System*), so bili narejeni temelji, ki so vodili k standardu CMS (angl.

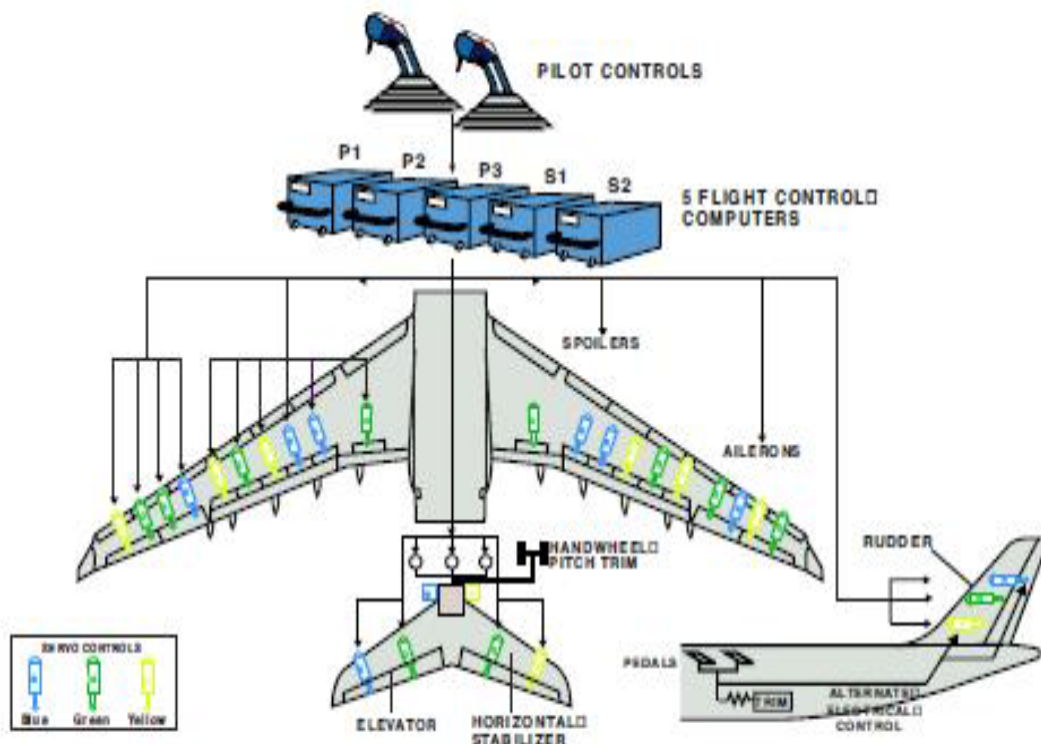
Central Maintenance Systems). V seriji A330/A340 je bila ta tehnologija že izboljšana. Omogoča odpravljanje težav, razna testiranja in storitve direktno iz pilotske kabine. Do velikega dela podatkov CMS sistema se lahko dostopa tudi na daljavo, in sicer preko ACARS-a (angl. *Aircraft Communications Addressing and Reporting System*), ki omogoča tehnikom in vzdrževalcem, da že med samim letom opazijo kakšno nepravilnost ali pomanjkljivost in nato do pristanka letala pridobijo vse potrebne podatke s katerimi takoj odpravijo napake. V primerjavi s prejšnjimi CMS-ji, kot na primer omenjeni CFDS pri A320, je CMS izboljšan tako, da omogoča odpravljanje napak na več kot enem sistemu naenkrat in s še jasnejšimi navodili za delo. Dosežen je bil tudi pomemben napredek v zanesljivosti s poudarkom na vzdrževalnih standardih iz strani sistemskih oblikovalcev in prodajalcev opreme. Prav tako pa je bil v CMS vključen filter, ki ločuje znane in pogoste napake. Za to so hvaležni predvsem vzdrževalci in mehaniki, ki jim tako ni treba delati po reku »Falsus in Uno, Falsus in Omnibus«, oziroma če ta latinski rek prevedemo v slovenskega »Zgrešeno v eni, zgrešeno v vseh stvareh«.

3.10 Redundanca

Vidik redundance se obravnava na ravni sistema. V tem poglavju so opisane samo omejitve, ki jih ima računalnik, z možnostjo rekonfiguracije sistema. Funkcije sistema so razdeljene med vse računalnike, tako da je na vsakem od njih dejaven vsaj en podsklop funkcije. Ob zagonu kakršnekoli funkcije je le en računalnik aktiven, medtem ko so ostali v stanju pripravljenosti (kot »nadomestki«). Takoj, ko kakšen izmed aktivnih računalnikov prekine svoje delovanje, eden izmed računalnikov, ki so v stanju pripravljenosti, postane aktiven. Vse to je možno brez dodatnega zagona oziroma premikanja kontrolnih površin. Tipično so računalniki oblikovani tako, da neprestano posredujejo »zdrave« signale oziroma signale prekinejo takrat, ko se prekine neka druga operacija.

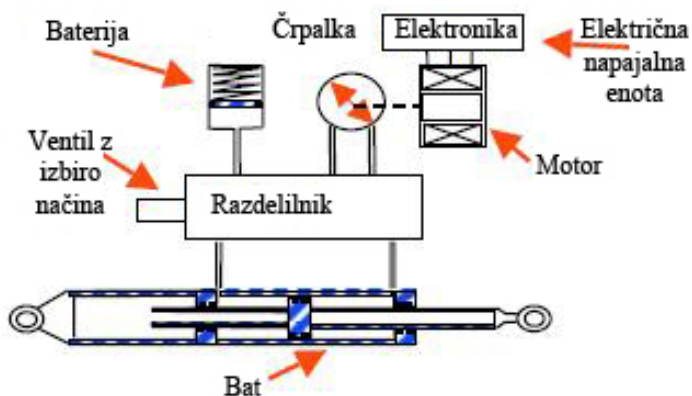
3.10.1 Redundanca virov energije

Primarna moč prihaja iz motorjev kot pritisk za hidravlični sistem in za proizvodnjo električne energije. Prav tako so na voljo še pomožni generator, baterije in RAT (Ram Air Turbine). Če so vsi motorji ugasnjeni, RAT avtomatsko poveča svojo moč. Ta moč nato prisili hidravlični sistem, ki poganja tretji električni generator. Računalniki so povezani z vsaj dvema viroma energije. Letalo ima tri hidravlične sisteme, od katerih že eden zadostuje za nadzor nad letalom (na sliki 15 so označeni z barvami: zelena, modra in rumena).

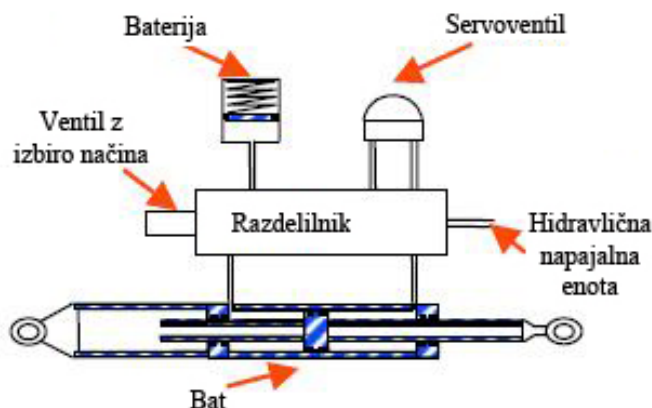


Slika 15: Sistemska arhitektura Airbusa A340-600 [16].

Nove tehnologije pogonov oziroma aktuatorjev so prinesle tudi nove koristi. Slika 16 prikazuje eno od teh koristi - EHA (angl. *Electro Hydrostatic Actuator*) v primerjavi z običajnim servoventilom, ki je v uporabi na starejših letalih (slika 17).



Slika 16: Električno-hidrostatski aktuator [17].



Slika 17: Običajni servovalnik [18].

Koristi so predvsem vidne na letalih Airbus A380 in A400M. Trije hidravlični sistemi so zamenjani s štirimi – dvema hidravličnima in dvema električnima. S tem so zmanjšani stroški in teže letala, pri čemer je redundanca večja, kakor tudi »preživetje«, ki je bilo glavni razlog za uvedbo te tehnologije.

3.10.2 Redundanca računalnikov

Računalniki in stikala so prav tako »razmetani« po letalu. Uporabljajo se štirje računalniki za vodenje in spremljanje. Od tega že eden zadošča za nadzor nad letalom. V normalnem delovanju eden od računalnikov (PRIM1) kontrolira zibanje letala (z enim servokontrolom zelene barve na sliki 15, za levo višinsko krmilo, z drugim za desno višinsko krmilo in z električnim motorjem (No.1) za horizontalni stabilizator). Drugi računalniki kontrolirajo preostale kontrolne površine. Če odpove računalnik PRIM1 ali kateri izmed aktuatorjev, prevzame njegove naloge PRIM2 (s pritiskom na modri servokontrol za levo višinsko krmilo, na rumenega za desno višinsko krmilo in z električnim motorjem (No.2) za horizontalni stabilizator). Če odpove tudi PRIM2, se nato izroči nadzor SEC1 računalniku. Prav tako se lahko nadzor prenese iz SEC1 na SEC2, odvisno od števila kontrolnih površin, s katerimi lahko eden izmed računalnikov ravna. Omeniti je treba, da so trije (delujoči) računalniki dovolj za izpolnitev varnostnih pogojev. Dodatni računalnik je popolnoma prilagojen operacijskim zahtevam in omejitvam letala, ki tolerirajo možnost vzleta letala z enim pokvarjenim oziroma nedelujočim računalnikom. To je definirano v seznamu minimalne opreme (MEL).

3.10.3 Rekonfiguracija zakonov krmiljenja letala in zaščita ovojnice letenja

Treba je upoštevati, da so zakoni močni, strogi in natančno določeni ter oblikovani z zadostno mejo stabilnosti. Poleg tega, če je vhodni vektor sistema daleč izven maksimalne potrjene ovojnice letala, se aktivira preprost zakon, ki uporablja položaj krmilne palice in položaj

krmilne površine ob vnosu (ta zakon je podoben vrsti nadzora, ki je na voljo na večini komercialnih letal).

Zakoni morajo biti preurejeni oziroma rekonfigurirani v primeru, če se določeni senzori izgubijo (zlasti ADIRU, angl. *Air Data Inertial Reference Unit*). Posadka je jasno opozorjena in seznanjena s statusom zakonov o kontroli. Če so na voljo tri ADIRU enote, ima pilot polna pooblastila znotraj varne ovojnice letenja. Ta varna ovojnica je izdelana na osnovi zaščit, ki se uporabljajo v nadzornih zakonih ter na osnovi navodil za varovanje, ki so dana pilotom. Nadzor letenja je v G-faktor načinu. Če je na voljo samo en ADIRU, se ga delno spremlja in primerja z drugimi neodvisnimi viri informacij (zlasti merilcem pospeška). V tem primeru so opozorila glede varne ovojnice letenja enake kot na konvencionalnih letalih. Nadzor letenja je še vedno v G-faktor načinu obremenitve. Če se izgubijo vse ADIRU enote, je izgubljena tudi varna ovojnica letala in zakon o kontroli letenja se spremeni v neposreden način. Ta zakon ima prednosti, saj med drugim omogoča spreminjanje določenih funkcij (položaj sprednjih in zadnjih zakrilc) in krmiljenje letala podobno tistim na ostalih običajnih letalih.

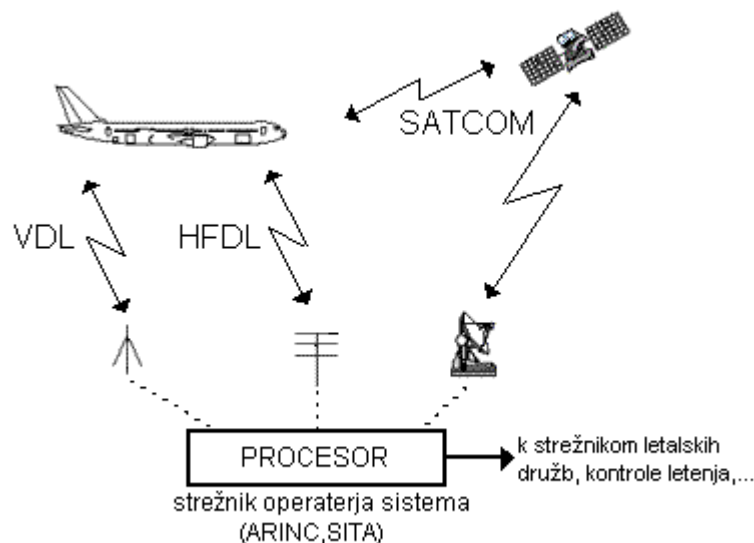
3.11 Komunikacija

Vzporedno z govornimi načini komunikacije poteka v Airbusu A330/A340 in nasploh letalstvu tudi vedno bolj živahen podatkovni promet. ACARS je sistem podatkovnih povezav, razvit posebej v letalske namene, med letalom in zemeljskimi službami. V sedemdesetih letih ga je razvila korporacija ARINC. Čeprav ni predviden in ne izpolnjuje zahtev kot del bodočega letalskega telekomunikacijskega omrežja, se je lepo uveljavil in ga uporablja veliko letalskih družb po celem svetu. Dejansko je še vedno edini polno operativni sistem podatkovnega prenosa v letalstvu. Temelji na prenosu sporočil, katera si izmenjujejo letalo ter zemeljske službe – kontrola letenja (za enkrat še v manjši meri) in administrativne ter operativne službe letalskih prevoznikov. Prav slednje so dodobra izkoristile prednosti sistema. To je komercialni sistem in s podatkovno povezavo je opremljena le določena podmnožica letal – veliko letalskih družb je ustrezno opremljenih, nekatere imajo opremljenih samo nekaj letal, so pa tudi take, ki sistema ne uporabljajo. Groba ocena opremljenosti je več kot 7000 letal po celem svetu.

Prenos podatkov gre lahko preko VHF, HF ali satelitske radijske zveze. Glavno "težo" sistema nosijo VHF povezave (na njih bo tudi poudarek v opisu), medtem, ko so satelitske zveze ter zveze preko kratkih valov (HFDL, High Frequency Data Link, visokofrekvenčna podatkovna povezava) mišljene kot dopolnilo tam, kjer ni implementirano oziroma možno pokrivanje z VHF radijskimi signali.

Daleč najbolj uporabljan je VHF sistem prenosa, zato nekateri ACARS kar enačijo z pojmom VDL (VHF data link, VHF podatkovna povezava). Mreža zemeljskih postaj zagotavlja radijsko pokritost na določenem geografskem področju. Uporabljajo se določene frekvence znotraj letalskega VHF področja. Tako je v Evropi primarna frekvenca, predvidena za komunikacijo med letalom in zemeljskimi VHF ACARS postajami 131,725 MHz, sekundarna

131,550 MHz, na največjih letališčih oziroma področjih, kjer je gostota prometa zelo velika pa imajo še dodatne. Modulacija je AM-MSK (Minimum Shift Keying, modulacija z najmanjšim preskokom), z zamikom 1200Hz/2400Hz ter bitno hitrostjo 2400 bit/s, dostop do kanala pa je CSMA (Carrier Sense Multiple Access, sodostop z zaznavo nosilca). 1200Hz pomeni spremembo bita, 2400Hz pa njegovo ohranitev. Koda znakovno orientiranega protokola pa je 7-bitna ASCII s paritetnim bitom.



Slika 18: Potek prenosa podatkov oziroma komunikacije [19].

3.11.1 Struktura ACARS sistema

Tri komponente ACARS sistema so:

- oprema na letalu,
- ponudnik storitev s svojo infrastrukturo,
- zemeljski sistem obdelave podatkov.

Oprema na letalu

Srce sistema na letalu je upravna enota (MU, Management Unit). Ta računalnik je povezan z vrsto drugih naprav na letalu. To so vmesnik za posadko (MCDU, Multi-functional Cockpit Display Unit, večfunkcijski prikazovalnik, sestavljata ga tekstovni zaslon ter tipkovnica), tiskalnik, sistem za nadzor stanja letala (ACMS, Aircraft Conditions Monitoring System), računalnik za upravljanje poleta (FMC, Flight Management Computer), HF, VHF ter satelitski sprejemniki in oddajniki, itd.

Ponudnik storitve s svojo infrastrukturo

Naloga ponudnika storitve je posredovanje sporočila od letala do strežnika letalske družbe (oz. kontrole letenja) in obratno. Zemeljske postaje ponudnika storitev so locirane na letališčih in ostalih točkah, ki omogočajo radijsko pokrivanje določenega področja, kjer letalo leti. V svetu je nekaj konkurirajočih ponudnikov storitev, z nekaj področji, kot je Evropa, kjer se njihove storitve prekrivajo. Dominantni sta korporaciji ARINC ter SITA, ki imata postavljeno mrežo VHF zemeljskih postaj praktično na vseh celinah (okrog 700 postaj v 150 državah), čeprav je ponekod pokrivanje le delno. V Evropi je pokrit praktično ves prostor z razvejano mrežo okoli 180 zemeljskih postaj obeh omenjenih korporacij.

Strežnik letalske družbe – sistem obdelave podatkov

To je "pajek v mreži" za ves podatkovni promet namenjen npr. eni letalski družbi. Opravlja vse funkcije, povezane s podatkovno povezavo. Strežnik je povezan z računalniškimi sistemi vzdrževalcev, administracije, načrtovalcev poletov, informacij o vremenu, preračunavanja vzletnih karakteristik, določanje posadk, itd. Strežnik v kombinaciji z ostalimi deli ACARS sistema omogoča neprekinjeno komunikacijo v skoraj realnem času med omenjenimi računalniškimi sistemi in letali. To pa je tisto, kar prinaša največ operativnih prednosti ter ekonomsko upravičenost.

ACARS sistem se je hitro razširil po svetu. Tako je mogoče sprejemati ali oddajati podatke tudi sredi oceanov, redko naseljenih samotnih mest, ipd. ACARS ne skrbi samo za sporočila med letalom in kontrolnim stolpom, ampak posadki sporoča tudi ATC (Air Traffic Control) sporočila, vremenske razmere itd.

Leta 1998 je ACARS sistem zamenjal ATSU (Air Traffic Services Unit), ki ima še večji poudarek na varnih ATC sporočilih, ki jih dobiva preko ATN-ja (Aeronautical Telecommunications Network).

3.12 Prilagodljivost in posodabljanje v notranjih storitvah

Prve generacije letal z obsežnimi digitalnimi signali, kot so A300FF, A310 in Boeing 767, so utrpeli škodo zaradi nekaterih pomanjkljivosti, enako seveda tudi predhodna letala z analognimi sistemi, saj njihova avionika ni dopuščala nenačrtovanih sprememb. Ko je bilo recimo treba uvesti neko spremembo ali dodati nek del, je bilo treba vse odstraniti z letala in nato, s to spremembo, ponovno namestiti nazaj. Še vseeno pa je bilo cenejše in tudi lažje to, kot pa da bi kupili celoto, z že nameščenimi novi deli. S serijama A330/A340 so to izboljšali, in sicer tako, da se lahko te spremembe oziroma posodobitve namestijo digitalno (prek LRU-ja - Line Replaceable Unit), s čimer so seveda zmanjšali tudi stroške.

Za digitalno nameščanje posodobitev se uporabljata dva načina:

- 1.) Z OBRM-ji (angl. *On-Board Replaceable Memories*), ki so pomnilniški moduli, ki se nahajajo na (dostopni) sprednji plošči LRU-ja. Na voljo so v standardno industrijskih velikostih, stanejo precej manj kot sam LRU »reciklirajo«, se pa lahko večkrat. Vidni del OBRM-ja vsebuje številčno oznako programske opreme LRU-ja. OBRM-ji ustrezajo vsem kritičnim kriterijem. Njihova konfiguracija pa ne zahteva nobenega posebnega orodja. Na Airbusu A320 so jih začeli uporabljati leta 1988.
- 2.) Drugi način je uporaba 3,5 palčnih disket. Ta način je nekoliko počasnejši od prvega, vendar pa je cenejši. Druga slabost tega načina je ta, da potrebujemo tudi nek nalagalnik podatkov (angl. *data loader*), ki mora biti nameščen na letalu, prek katerega poteka tudi konfiguracija. Isti nalagalnik podatkov se uporablja tudi za baze podatkov FMS-ja (angl. *Flight Management System*).

Oba načina omogočata posodabljanje programske opreme, ki je, tako rekoč, lahko izvedena čez noč za celo floto.

Drugi vidik pa je prilagodljivost pri spreminjajočih potrebah letalskih prevoznikov. Osnovna (programska) oprema za letalo je zasnovana na programabilnih funkcijah, ki ustrezajo pogostim zahtevam teh prevoznikov in ostalim sistemom, kot na primer FMS-ju, kjer letalska družba naloži podatkovno bazo, ki ustreza njihovim preferencam. Te značilnosti omogočajo letalskim družbam, da združijo podatkovne baze in standardne rezerve in vseeno obdržijo takšno vrsto operacij, kakršno potrebujejo. Druga značilnost je particionirana oziroma razdeljena programska oprema, kjer se močno prilagojeni sistemi, kot je ACARS, potrdijo samo enkrat za vse uporabnike z enim jedrom programske opreme. Letalski prevozniki lahko nato svojo lastno programsko opremo, pripravljeno za izvajanje, naložijo na vrh tega jedra in s tem odražajo svoje lastne potrebe.

Nekateri določeni opcijski sistemi, kot je na primer ACMS (angl. *Aircraft Condition Monitoring System*), ki je bil v preteklosti v veliki meri narejen po meri, uporabljajo kombinacije teh tehnik, da bi letalski prevoznik izbral tiste funkcije, ki jih potrebuje iz zelo širokega in močnega nabora, ki tvori »superniz« potreb vseh strank.

3.13 Razvojno okolje

Razvoj vsakega Airbusovega letala poteka postopoma pod natančno določenimi pogoji, vendar kljub temu dopušča, da določeni procesi lahko potekajo sočasno brez čakanja na dokončanje prejšnjega. Tudi A330/A340 ni bil izjema in za izdelavo tega so bila prav za to ustvarjena določena nova podjetja. To metodo izdelav letala uporablja večina letalskih proizvajalcev.

Pravilen razvoj programske opreme je bistven del razvoja celotnega sistema, ki poteka prek celega letala. V ta namen so bila razvita številna programska orodja, predvsem na področju formalnih metod, hitre izdelave prototipov, avtomatskega kodiranja, hitre obnovitve podatkov

in analize. Te dopolnjuje veliko in hitro beleženje podatkov in telemetričnih objektov na testni floti letal. To je povezano s prikazovalcem podatkov v realnem času in »rapidplayback« testu, ki koristi opazovalcem na krovu testnih letal in za teste ter sistemske inženirje na zemlji.

Rezultat tega okolja, z uporabo pravih funkcij iz prejšnjih programov, pravih upravljanja testnega pretoka podatkov in rezultatov procesa odločanja, je letalo, ki je imelo oziroma ima pri sami predstavitvi zelo malo problemov. To velja tako v smislu zadovoljstva strank, kot tudi skrajšanih zamudnih rokov, ki predvidevajo kdaj bo letalo lahko začelo opravljati svoje »delo«.

3.14 Podporno okolje

Airbus A330/A340 ima številne edinstvene podporne razširitve, poleg že prej omenjenih funkcij. Kot tudi pri drugih Airbusovih serijah letal, je tudi tu na voljo kupcem ATE (angl. *Automatic Test Equipment*) skupaj s pripadajočo programsko opremo. Tu je treba povedati, da te testne opreme ne ponuja nobeden drug letalski prevoznik. Skrbno načrtovana sta priročnik za vzdrževanje letala in priročnik za odpravljanje napak, ki sta povezana s CMS-jem za lažje in hitrejše popraviljanje napak. Za tiste letalske družbe, ki želijo uporabljati ta dva priročnika je na voljo tudi v obliki programskega paketa, ki seveda prek računalnika omogoča hitrejše iskanje. Ta dokumentacija je izdelana tudi tako, da je združljiva s standardnimi računalniki, oziroma zanjo ni potrebno imeti posebnih računalnikov in programov.

4. Teorija zanesljivosti v računalniških sistemih

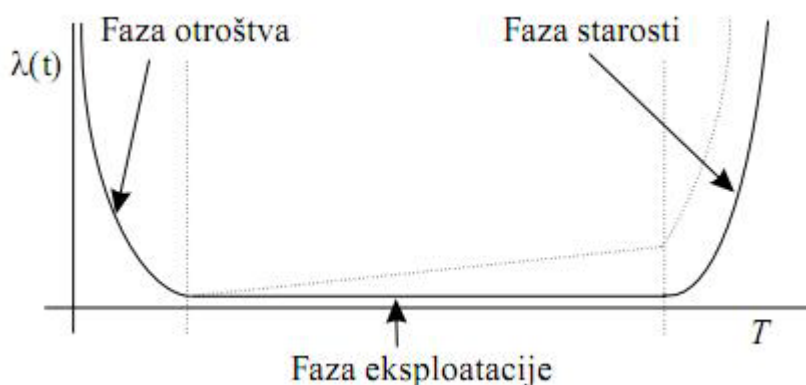
Pri arhitekturi je za zanesljivost delovanja poskrbljeno z različnimi tehnikami in pristopi. V tem poglavju si bomo podrobneje ogledali, kje je uporabljena katera izmed njih in kakšen je njen vpliv na zanesljivost celotnega sistema.

4.1 Faze življenjske dobe računalniškega sistema

Življenjsko dobo posameznih računalniških sistemov in njihovih posameznih sestavnih delov v splošnem in tudi pri Airbusu A330 razdelimo na tri faze:

- Faza otroštva: v tej fazi intenzivnost odpovedovanja $\lambda(t)$ v času hitro upada zaradi testiranja, ki iz populacije eliminira okvarjene entitete (če niso popravljive), ali pa se omenjene entitete popravljajo (podsklopi in programska oprema),
- Faza eksploatacije: v tej fazi imamo opravka s konstantno ali večinoma počasi (npr. linearno) rastočo intenzivnostjo odpovedovanja $\lambda(t)$ (tipičen primer konstantne $\lambda(t)$ najdemo pri elektronskih komponentah, kot so integrirana vezja, tipičen primer linearne rasti pa pri obrabljivih produktih, kot so npr. avtomobilске gume),
- Faza starosti: v tej fazi začne intenzivnost odpovedovanja $\lambda(t)$ zelo hitro rasti predvsem pri strojnih komponentah, kjer prihaja do dotrajanosti materialov.

Vse tri faze so prikazane na sliki 19, pri čemer je v fazi eksploatacije linearna rast narisana s prekinjeno črto.



Slika 19: Različne življenjske dobe sestavnih delov računalniških sistemov [20].

Konstantna $\lambda(t)$ je v zrelosti ali eksploatacijski dobi predvsem za elektronske komponente kot so tranzistorji, upori, kondenzatorji in integrirana vezja. Za slednje velja, da traja faza otroštva približno 10^4 delovnih ur, kar je približno eno delovno leto. V fazi testiranja posameznih komponent se ta doba umetno zmanjšuje s slabšanjem delovnih pogojev (angl. *burn-in procedures, accelerated testing*), ki nadomeščajo relativno dolgotrajno

izpostavljanje običajnim pogojem. Funkcija intenzivnosti odpovedovanja (v literaturi se ponekod imenuje tudi za funkcijo hazarda) se tako v eksploatacijski dobi izraža z izrazom

$$\lambda(t) = \lambda, \quad (1)$$

pri čemer je λ konstanta. Od tod sledi, da je funkcija gostote verjetnosti časa odpovedi

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

funkcija zanesljivosti pa

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

4.2 *N*-modularna redundanca

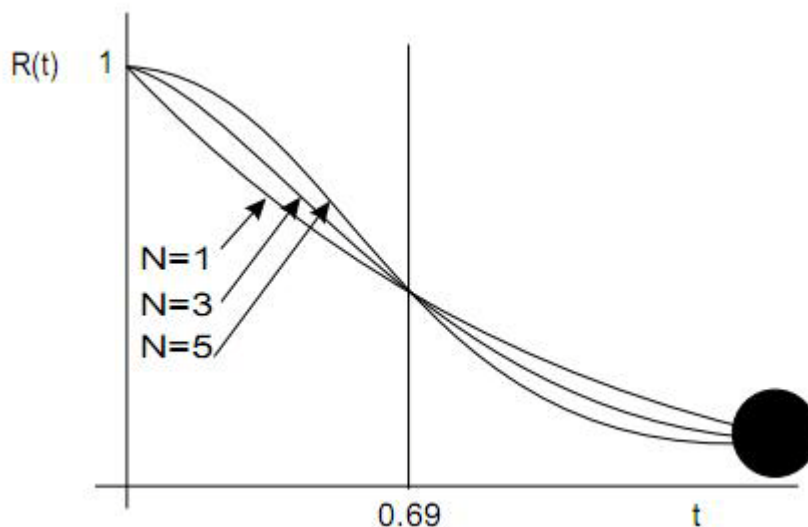
N-modularna redundanca temelji na glasovalnih tehnikah, od tod tudi ime glasovalna redundanca. Ideja temelji na predpostavki, da se dva enaka sistema na isti vhod odzivata enako. V tem primeru lahko predpostavljamo, da se oba odzivata pravilno (delujeta normalno), ali pa se oba odzivata napačno (sta oba odpovedala na isti način). Sistem kot celota je preko različnih odzivov lahko sposoben detektirati napako, ne zna pa je odpraviti. Najverjetnejši sta inačici, ko oba sistema delujeta pravilno (enak odziv), ali en sistem deluje pravilno, drugi pa je v odpovedi (različna odziva). Tretja inačica - oba sistema sta v enaki odpovedi (enak odziv), je najmanj verjetna. Seveda imamo poleg 2-modularne redundance z glasovalno tehniko tudi 3-modularne, itd. V primeru, ko večina modulov da eno odločitev, manjši preostanek pa drugačno, se večinoma zanašamo na večinsko odločitev, pri čemer prehajamo na korekcijske mehanizme in pa na koncept večinske glasovalne redundance.

Število *N* je praviloma liho in v nekaterih primerih tudi večje od tri, za glasovalnik pa se predpostavi, da je še vedno idealen (čemur v praksi ni tako). Za tovrstne sisteme veljata naslednja izraza:

$$N = 2n + 1, \quad (4)$$

$$R = \sum_{i=n+1}^{2n+1} B(i : 2n + 1) = \sum_{i=n+1}^{2n+1} \binom{2n+1}{i} p^i * (1-p)^{2n+1-i}. \quad (5)$$

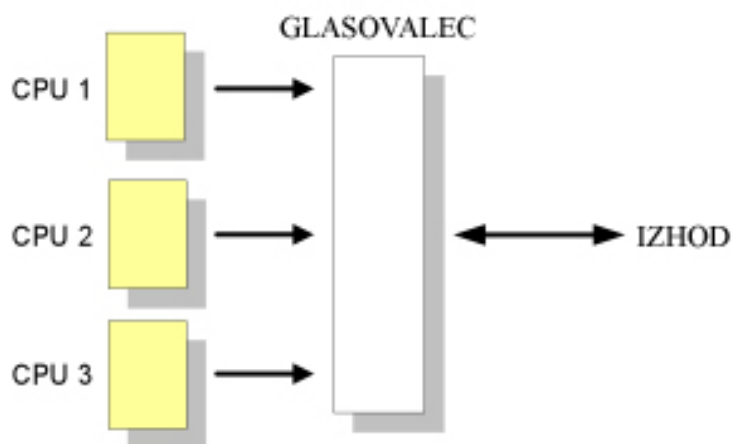
Ob predpostavljani konstantni vrednosti intenzivnosti odpovedovanja $\lambda(t)$ dobimo sliko 20, ki prikazuje poteke funkcije zanesljivosti v odvisnosti od izbranega *N*-ja v času.



Slika 20: Potek zanesljivosti v odvisnosti od števila N [21].

»Triple« modularna redundanca (TMR)

Najpogostejši sistemi modularne redundance temeljijo na treh podsistemih ($N=3$). Na sliki 21 je prikazan tovrstni sistem. Podsistemi, v našem primeru CPU1, CPU2 in CPU3, so neodvisni in ekvivalentni, glasovalec (angl. *Voter*) pa predstavlja glasovalni podsistem, kjer se primerjajo izhodi vseh treh elementov in za rezultat določi večinski izhod.



Slika 21: TMR sistem.

Tako se zanesljivost sistema s TMR (R_{TMR}) glede na zanesljivost posameznega elementa (p) spremeni, kot vidimo v izrazu (6).

$$R_{TMR} = 3p^2 - 2p^3. \quad (6)$$

Za splošen primer redundantnega sistema z r od n (za pravilno delovanje mora delovati r elementov od n možnih) elementov, velja izraz (7)

$$R_{(r:n)} = \binom{n}{r} p^r (1-p)^{n-r}. \quad (7)$$

V praksi je mnogo bolj uporaben in bolj splošen primer redundantnega sistema, kjer mora za pravilno delovanje delovati vsaj r od n (lahko tudi več kot r) elementov, za katerega velja izraz (8)

$$R_{(r:n)} = \sum_{k=r}^n \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}. \quad (8)$$

Seveda je možno na ta način povezati poljubno mnogo elementov, ob tem pa je potrebno omeniti, da je zaradi zahtevnosti izvedbe glasovalca ugodno, če je to število liho. Tako se izognemo primeru, ko imamo izenačeno glasovanje.

4.3 »Consecutive k out of n:F« konfiguracija sistema

V tem poglavju si bomo pogledali odpovedi k ali več komponent, ki vodijo do odpovedi sistema kot celote. Termin »Consecutive« usmerja opazovanje na odpovedovanje sklopa fizično sosednjih entitet. Tako za »Consecutive k out of n:F« sistem velja, da preide iz delovanja v stanje odpovedi, ko odpove najmanj k sosednjih od n serijsko vezanih entitet. Tipičen primer tovrstnih sistemov so konfiguracije satelitskih sistemov v sekvence, preko katerih se emitirajo signali. Običajno so sateliti postavljeni tako, da izpad enega satelita ne pomeni prekinitve komunikacije, če le ne pride istočasno tudi do odpovedi kakšnega od njegovih sosedov. Gre torej za »Consecutive 2 out of n:F« konfiguracijo sistema.

Izraz (9) prikazuje način izračuna zanesljivosti tovrstnih sistemov, pri čemer predpostavljamo, da so verjetnosti pravilnega delovanja posameznih entitet v serijski konfiguraciji enake

$$R(p,2,n) = \sum_{j=0}^{(n+1)/2} P [\text{sistem deluje in } j \text{ entitet je v odpovedi}]. \quad (9)$$

Iz tega izraza dobimo izraz za zanesljivost

$$R(p,2,n) = \sum_{j=0}^{(n+1)/2} \binom{n-j+1}{j} (1-p)^j p^{n-j}. \quad (10)$$

Omenjeni izraz velja le za primer, ko so verjetnosti delovanja entitet enake, algoritem za primer, ko pa so verjetnosti različne, pa je dosti kompleksnejši.

5. Izračuni

V pričujočem poglavju sem opravil nekaj hipotetičnih izračunov za posamezne sisteme letalskega plovila Airbus A330.

5.1 Sistemska verjetnost delovanja motorjev za Airbus A330

Sistemska verjetnost delovanja motorjev za obe zračni plovili bom izračunal s pomočjo izrazov (3) in (10).

Ob predpostavki, da za obratovanje Airbusa A330 zadostuje delovanje enega od obeh motorjev uporabimo enačbo »1 out of 2«:

$$R_{Sys(t)} = \binom{2}{1} p(1-p) + \binom{2}{2} p^2(1-p)^0, \quad (11)$$

pri čemer je p verjetnost delovanja posameznega motorja. Le-to lahko enačimo s funkcijo zanesljivosti (3).

$$p = R(t), \quad (12)$$

$$R_{i=1,2}(t) = e^{-\lambda t} \Rightarrow R_{Sys(t)} = \binom{2}{1} e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^1 + \binom{2}{2} e^{2(-\lambda t)} (1 - e^{-\lambda t})^0. \quad (13)$$

λ -je oznaka za intenzivnost odpovedovanja posameznega motorja, ki ima enoto [število odpovedi / delovne ure]. Ker nikjer nisem našel točnega podatka intenzivnosti odpovedovanja motorjev za Airbusova letala, sem omenjen podatek izračunal na naslednji način. Predpostavimo, da deset identičnih motorjev testiramo dokler ne dosežejo tisoč delovnih ur ali pa odpovejo.

Motor	Ure	Odpoved
Motor 1	1000	Ni odpovedi
Motor 2	1000	Ni odpovedi
Motor 3	840	Odpoved
Motor 4	970	Odpoved
Motor 5	1000	Ni odpovedi
Motor 6	1000	Ni odpovedi
Motor 7	630	Odpoved

Motor 8	790	Odpoved
Motor 9	550	Odpoved
Motor 10	1000	Ni odpovedi
SKUPAJ	8780	5

Formula za izračun intenzivnosti odpovedovanja se glasi:

$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)}, \quad (14)$$

Kjer je $f(t)$ skupno število odpovedi, $R(t)$ pa je zanesljivost delovanja. Od tu sledi:

$$\lambda = \frac{5}{8780} = 0,0005695 = 569,5 \times 10^{-6} \text{ [odpovedi / delovne ure]} \quad (15)$$

To pomeni 569,5 odpovedi na vsak milijon opravljenih delovnih ur. Ta rezultat vstavimo v formulo in dobimo:

$$p = e^{-0,0005695 \times t} \quad (16)$$

Iz literature sem razbral, vendar gre vseeno za predpostavko, da vsako letalo zamenjajo po približno dvajsetih letih delovanja oziroma letenja. Ker so natančni podatki zaupni in mi jih ni bilo mogoče dobiti, bom spodaj za t vstavil tri predpostavke: $t_1 = 100$, $t_2 = 1000$ in $t_3 = 10000$ delovnih ur. Dobim rezultate:

$$\begin{aligned} R_{(100)} &= e^{-0,0005695 \times 100} = 0,94464 \\ R_{(1000)} &= e^{-0,0005695 \times 1000} = 0,56581 \\ R_{(10000)} &= e^{-0,0005695 \times 10000} = 0,00336 \end{aligned} \quad (17)$$

Iz tega dobimo rezultate za sistemsko verjetnost delovanja motorjev Airbus A330:

$$\begin{aligned} R_{\text{Sys}(t_1)} &= 2 \times 0,94464 - (0,94464)^2 = 1,88928 - 0,89234 = 0,99694 \\ R_{\text{Sys}(t_2)} &= 2 \times 0,56581 - (0,56581)^2 = 1,13162 - 0,32014 = 0,81148 \\ R_{\text{Sys}(t_3)} &= 2 \times 0,00336 - (0,00336)^2 = 0,006709. \end{aligned} \quad (18)$$

Vsaka od verjetnosti predstavlja verjetnost delovanja v časovni točki t_i .

5.2 Sistemska verjetnost delovanja spojlerjev za Airbus A330 zračno plovilo

Na podoben način kot sem izračunal sistemsko verjetnost motorjev, lahko izračunamo tudi sistemsko verjetnost spojlerjev. Ob predpostavki, da za obratovanje letala zadostuje delovanje treh od šestih spojlerjev na enem krilu se formula glasi:

$$R_{Sys(t)} = \binom{6}{3} p^3 (1-p)^3 + \binom{6}{4} p^4 (1-p)^2 + \binom{6}{5} p^5 (1-p) + \binom{6}{6} p^6 (1-p)^0 \quad (19)$$

Če predpostavim, da so intenzivnosti odpovedovanja enake kot pri motorjih (p_1 , p_2 in p_3) dobim rezultate:

$$\begin{aligned} R_{Sys(t_1)} &= 20 (0,94464)^3 (1-0,94464)^3 + 15 (0,94464)^4 (1-0,94464)^2 + \\ &+ 6 (0,94464)^5 (1-0,94464) + (0,94464)^6 (1-0,94464)^0 = 20 \times 0,8429 \times 0,00017 + \\ &+ 15 \times 0,7963 \times 0,0031 + 6 \times 0,7522 \times 0,05536 + 0,7106 = 0,99999 \\ R_{Sys(t_2)} &= 20 (0,56581)^3 (1-0,56581)^3 + 15 (0,56581)^4 (1-0,56581)^2 + \\ &+ 6 (0,56581)^5 (1-0,56581) + (0,56581)^6 (1-0,56581)^0 = 20 \times 0,1811 \times 0,0819 + \\ &+ 15 \times 0,1025 \times 0,1885 + 6 \times 0,058 \times 0,43419 + 0,0328 = 0,7704 \\ R_{Sys(t_3)} &= 20 (0,00336)^3 (1-0,00336)^3 + 15 (0,00336)^4 (1-0,00336)^2 + \\ &+ 6 (0,00336)^5 (1-0,00336) + (0,00336)^6 (1-0,00336)^0 = 7,53 \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (20)$$

5.3 Sistemska zanesljivost računalnikov računana s TMR

TMR bom izračunal na osnovi treh primarnih računalnikov kontrole leta (FCPC-jev). Če predpostavim, da je verjetnost delovanja $p=0,9$ lahko to vstavimo v izraz (4) in dobim:

$$R_{Sys} = 3p^2 - 2p^3 = 0,972 \quad (21)$$

Sistemska verjetnost takšnega sistema je torej 97,2%. V tem primeru sem verjetnost delovanja predpostavil kot konstantno vrednost, ker točnega podatka nisem našel v nobeni literaturi. Lahko bi pa p izračunal, kot sem ga pri sistemski verjetnosti delovanja motorjev.

5.4 Sistemska zanesljivost spojlerjev in hidravličnega napajanja Airbusa A330

Na sliki 10 se vidi, da ima Airbus A330 šest spojlerjev, ki dobivajo energijo iz treh hidravličnih napajalnikov. Predpostavka, da za obratovanje letala zadostuje delovanje vsaj dveh spojlerjev in vsaj dveh hidravlik pripelje do sledečega izračuna:

A	C	D	E	F	H	B	G	Y	PSY _{SON}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
.
.
.
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Slika 22: Tabela spojlerjev in sistemov hidravlike

Na zgornji sliki so z A, C, D, E, F in H predstavljeni spojlerji, ter z B, G in Y sistemi hidravlik. Skupno to pomeni, da je devet elementov. Iz tega dobim, da je to 2^9 kombinacij, torej 512 kombinacij. Ob zgornji predpostavki je torej treba izračunati koliko je takšnih kombinacij, pri katerih sistem še deluje, kar pomeni delovanje vsaj dveh spojlerjev in vsaj dveh sistemov hidravlike.

To pripelje do izračuna: na desni strani je možnih pet kombinacij delovanja hidravlike (011, 101, 110, 110 in 111). Na levi strani pri spojlerjih imamo 57 možnosti oziroma kombinacij, ki jih dobimo na način:

$$\binom{6}{2} + \binom{6}{3} + \binom{6}{4} + \binom{6}{5} + \binom{6}{6} = 57 \quad (22)$$

Število ugodnih kombinacij je tako: $p_{\text{spojlerji}} \times p_{\text{hidravlika}}$ (23)

Izračun: $p_{\text{spojlerji}} \times p_{\text{hidravlika}} = 5 \times 57 = 285$.

Torej obstaja 285 ugodnih kombinacij, ki zadostujejo pogoju, da morata delovati vsaj dva spojlerja in hkrati vsaj dva sistema hidravlike.

6. Zaključek

Letalski promet z vsebovanimi letalskimi povezavami je celovit sistem z veliko podsistemi, ki so nepogrešljivi dejavniki. Podsistemi, kot so kontrola letenja, postopki pri pripravi letala na vzlet oziroma vzdrževanje in čiščenje letalskih stez, zaščita pred zamrzovanjem, carinski postopki in tako dalje, tvorijo eno veliko celoto oziroma sistem, ki ga danes poznamo kot letalski promet. Avionika z računalniškim nadzorom je eden izmed pomembnejših sistemov letalskih plovil. Kot se je že dogajalo v zgodovini, lahko ena majhna napaka v takšnem sistemu privede do katastrofe.

V diplomski nalogi sem podrobno preučil avioniko letalskega plovila Airbus A330. Glavni poudarek sem namenil »fly-by-wire« konceptu, ki je v novejši zgodovini postal nepogrešljiv sistem ne samo Airbusvih, ampak vseh zračnih plovil, tako komercialnih kot tudi vojaških. V najbolj obširnem, tretjem poglavju, sem se osredotočil na zanesljivostne vidike Airbusa A330. Temeljito sem preučil zgodovino, razvoj, primarne in sekundarne sisteme za krmiljenje letala, računalniško arhitekturo, redundanco in druge strukture tega obširnega sistema. Sledita četrto in peto poglavje, ki vsebujeta teoretični in računski del zanesljivosti računalniških sistemov zračnega plovila. Pri računskem delu sem imel nekaj težav, saj določenih podatkov praktično ni mogoče dobiti, ker so težko dosegljivi oziroma »top-secret«.

Zanesljivost računalniških sistemov Airbusa A330 dokazuje ogromno število že opravljenih poletov po celem svetu ter ne nazadnje še vedno sama uporaba tega letala. Kljub posameznim odpovedim računalnikov oziroma katerega drugega sistema so Airbusova letala še vedno v samem vrhu med letali kar se tiče zanesljivosti. Dejstvo je za večina nezgod, ki zahtevajo življenje kriva človeška napaka in ne računalniški sistem.

Pri iskanju virov za diplomsko delo sem se znašel pred dokaj zahtevno nalogo. Res da je virov kar veliko, vendar se ti bolj ali manj ponavljajo. Prav tako je bil velik problem oziroma skoraj nemogoče pridobiti kakršnekoli podatke o problemih in odpovedih posameznih komponent letala. Ti podatki so seveda zaupni in podobne družbe jih seveda ne posredujejo. Predvidevam, da bodo ti podatki lažje dosegljivi po tem, ko bodo to letalo umaknili iz obratovanja. Takrat bodo tudi na voljo bolj podrobne analize teh problemov oziroma odpovedi. Analiza, ki sem jo opravil je tako predvsem ocena, in ne dejanski rezultat, zanesljivosti računalniških sistemov Airbusa A330.

Izpostavil bi tudi težave, ki sem jih imel pri prevajanju mnogih strokovnih izrazov iz angleščine. Večina virov je namreč zapisana v angleškem jeziku. Pri izboru slovenskih prevodov sem si tako pomagal s slovensko različico Wikipedie [22] in Evrokorporus slovarjem [23].

7. Viri in literatura

- [1] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a4/F8C_VMF334_1966.JPEG
- [2] J. Orehek, Analiza zanesljivostnih vidikov računalniškega sistema vesoljskega plovila Space Shuttle, 2008, str. 6
- [3] <http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/802741.stm>
- [4] <http://www.airbus.com/en/aircraftfamilies/>
- [5] <http://www.airbus.com/en/aircraftfamilies/a330a340>
- [6] C. R. Spitzer, The Avionics Handbook, 2001, str. 11-1 do 18-1
- [7] <http://www.globalgiants.com/archives/media/AirbusA330-200.jpg>
- [8] N. Storey, Safety Critical Computer Systems, 1996, str. 391, slika 15.11
- [9] N. Storey, Safety Critical Computer Systems, 1996, str. 391, slika 15.12
- [10] N. Storey, Safety Critical Computer Systems, 1996, str. 393
- [11] N. Storey, Safety Critical Computer Systems, 1996, str. 394
- [12] N. Storey, Safety Critical Computer Systems, 1996, str. 395
- [13] N. Storey, Safety Critical Computer Systems, 1996, str. 396
- [14] P. Traverse, I. Lacaze, J. Souyris, Airbus Fly By Wire: A total approach to dependability, 2004, str. 195, slika 1a
- [15] P. Traverse, I. Lacaze, J. Souyris, Airbus Fly By Wire: A total approach to dependability, 2004, str. 195, slika 1b
- [16] P. Traverse, I. Lacaze, J. Souyris, Airbus Fly By Wire: A total approach to dependability, 2004, str. 197, slika 2
- [17] P. Traverse, I. Lacaze, J. Souyris, Airbus Fly By Wire: A total approach to dependability, 2004, str. 197, slika 3a
- [18] P. Traverse, I. Lacaze, J. Souyris, Airbus Fly By Wire: A total approach to dependability, 2004, str. 198
- [19] G. Požar, Telekomunikacijski sistemi v letalstvu, 2002, str. 44
- [20] M. Mraz, Teorija zanesljivosti, 2009, str. 4
- [21] M. Mraz, Teorija zanesljivosti, 2009, str. 16

[22] http://sl.wikipedia.org/wiki/Glavna_stran

[23] <http://evrokorpus.gov.si/>