

# Mogućnosti primjene koncepta Industrije 4.0 u zrakoplovstvu

---

Juroš, Marinel

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:623409>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Marinel Juroš**

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Tihomir Opetuk, dipl. ing.

Student:

Marinel Juroš

Zagreb, 2022. godina

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Tihomiru Opetuku na pruženoj pomoći tijekom pisanja rada.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na pruženoj podršci tijekom studiranja.

Marinel Juroš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marinel Juroš** JMBAG: **0035215793**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mogućnosti primjene koncepta Industrije 4.0 u zrakoplovstvu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Possibilities of application of the Industry 4.0 concept in aviation**

Opis zadatka:

Područje industrijskog inženjerstva je interdisciplinarno područje koje obuhvaća projektiranje i planiranje proizvodnje, upravljanje proizvodnjom, održavanje, logistiku itd. S druge strane, područje zrakoplovstva također je interdisciplinarno područje koje uključuje projektiranje i konstrukciju zrakoplova, proizvodnju i održavanje zrakoplova te organizaciju transporta ljudi i dobara. S obzirom na navedeno, područje zrakoplovstva prednjači u primjeni naprednih tehnologija u području djelovanja. Primjenom koncepta Industrije 4.0 dolazi do novog zakreta vezanog uz primjenu koncepta unutar zrakoplovstva.

U radu je potrebno:

- opisati i definirati koncept Industrije 4.0,
- prikazati primjenu koncepta Industrije 4.0 u područjima unutar zrakoplovstva (konstrukcija, projektiranje, proizvodnja, održavanje, organizacija transporta ljudi i dobara itd.),
- odabrati i prikazati studiju slučaja za gore navedena područja primjene.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Tihomir Opetuk

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.  
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.  
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS KRATICA .....	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. INDUSTRIJA 4.0 .....	2
2.1. Povijest razvoja industrije.....	2
2.2. Međupovezanost .....	4
2.3. Transparentnost informacija .....	4
2.4. Tehnička podrška .....	4
2.5. Decentralizirane odluke .....	5
2.6. Temeljni koncepti i tehnologije Industrije 4.0 .....	5
2.6.1 Internet stvari (IoT) [4] .....	5
2.6.2 Kibernetско-fizički sustav (CPS).....	6
3. INDUSTRIJA 4.0 U ZRAKOPLOVSTVU.....	10
3.1. Povijest razvoja Industrije 4.0 u zrakoplovstvu .....	10
3.2. Primjeri primjene Industrije 4.0 u zrakoplovstvu .....	13
3.2.1 Automatsko letenje [11].....	13
3.2.2 Prediktivno održavanje zrakoplova [11].....	14
3.2.3 Sigurnosni kognitivni računalni sustavi koji pomažu pilotskoj kabini [11] .....	16
3.2.4 Poboľšane usluge traženja i spašavanja, posebno u oceanskim ili udaljenim područjima [11].....	18
3.2.5 Praćenje/uzbunjivanje ljudskih performansi [11] .....	18
3.2.6 Roboti [17].....	19
3.2.7 Aditivna proizvodnja [17].....	21
3.2.8 Strojno učenje .....	22
3.2.9 Blockchain tehnologija .....	23
4. STUDIJA SLUČAJA .....	25
4.1. Studija slučaja za aditivnu proizvodnju [24].....	25
4.2. Studij slučaja proširene stvarnosti [24].....	29
4.3. Studija slučaja strojnog učenja.....	33
4.4. Studij slučaja za blockchain tehnologiju.....	36
5. ZAKLJUČAK.....	40
LITERATURA.....	41

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Razvoj industrijskih revolucija [3].....	3
Slika 2.	Povezivanje uređaja s internetom i drugim uređajima [5] .....	6
Slika 3.	Komunikacija stroja i proizvoda [6].....	6
Slika 4.	Veliki podaci [7].....	7
Slika 5.	Računalni oblak [9] .....	8
Slika 6.	Primjer 3D printera [10] .....	9
Slika 7.	PFD i ND sa zrakoplova Airbus A320 [12] .....	12
Slika 8.	Prikaz EGPWS zaslona [13].....	14
Slika 9.	Upotreba Google Glass tehnologije u održavanju [14] .....	16
Slika 10.	IBM-ov prototip kognitivnog računalnog sustava Watson [15].....	17
Slika 11.	Uniforma s nosivim tehnologijama tvrtke EasyJet [16].....	19
Slika 12.	Primjeri korištenja robota u zrakoplovnoj industriji [17].....	20
Slika 13.	Suradnja robota s ljudima [17] .....	21
Slika 14.	Printanje sloj po sloj [18] .....	22
Slika 15.	Strojno učenje u zrakoplovstvu [20] .....	23
Slika 16.	Blockchain u zrakoplovstvu [23] .....	24
Slika 17.	Nosač na Airbusu A300 [24].....	25
Slika 18.	Prikaz tlocrta nosača [24] .....	26
Slika 19.	Različiti oblici nosača [24].....	27
Slika 20.	Prikaz opterećenja [24].....	27
Slika 21.	Cessna 337 i vrata podvozja [24] .....	31
Slika 22.	Meni zadatka 5-42h [24] .....	32
Slika 23.	Izlazni podaci [25].....	35
Slika 24.	Proces održavanja zrakoplova[27] .....	36
Slika 25.	Početna i krajnja deformacija dijelova u slučaju neplaniranog održavanja [27]...	37
Slika 26.	Transakcije između različitih sudionika u slučaju neplaniranog održavanja [27]	39

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Zrakoplovne industrije [11].....	10
Tablica 2. Vrijednosti indeksa za aditivno proizvedene strukture[24].....	28
Tablica 3. Stupnjevi degradacije rada motora [25] .....	34



---

**POPIS KRATICA**

ACARS	eng. Aircraft Communications, Addressing and Reporting System- sustav za prijenos kratkih poruka između zrakoplova i zemaljskih stanica putem zračnog radija ili satelita
ADS-C	eng. Automatic Dependent Surveillance-sustav za nadzor
AFR	eng. Autonomous Flight Rules-automatska pravila letenja
CAD	eng. Computer-aided design-računalni softver za projektiranje
CPS	eng. Cyber-physical systems-kibernetičko-fizički sustavi
CRT	eng. Cathode Ray Tube-vrsta zaslona(ekran,monitor)
DS-B	eng. Double Side Band-tehnologija-elektronika, radio
EADI	eng. Electronic Attitude display indicator-indikator držanja
ECAM	eng. Electronic centralised aircraft monitor-elektronički centralizirani nadzor zrakoplova
EGPWS	eng. Enhanced Ground proximity warning system-sustav za upozoravanje na blizinu tla
EHSI	eng. Electronic horizontal situation indicator-indikator horizontalne situacije
EICAS	eng. Engine-indicating and crew-alerting system-sustav upozoravanja motora i upozoravanja posade
FEM	Finite Element Method-Metoda konačnih elemenata
GADSS	eng. Global Aeronautical Distress and Safety System-globalni zrakoplovni sustav za pomoć i sigurnost
IBM	eng. International Business Machines-američka IT tvrtka
IFR	eng.Instrumental flight rules-let pomoću instrumenata
IIoT	eng. Industrial Internet of thing-Industrijski internet stvari
ILS	eng.Instrumental landing system-instrumentalni sustav za slijetanje
IoT	eng. Internet of things-Internet stvari
LCD	eng. Liquid-crystal display-ekran sastavljen od piksela

---

LSWM	eng. Legacy System Migration Workbench-Radna površina za migraciju naslijeđenog sustava
M2M	eng. Machine to machine-komunikacija stroj-stroj
MMEL	eng. Master Minimum Equipment Lists-popis minimalne opreme
ND	eng. Navigation display-navigacijski zaslon
OEM	eng. Original Equipment Manufacturer-tvrtka koja se bavi održavanjem i proizvodnjom dijelova za zrakoplove
PFD	eng. Primary flight display-primarni prikaz leta
PLC	eng. Programmable logic controller-Programljivi logički kontroler
TCAS	eng. Traffic collision avoidance system-sustav za izbjegavanje sudara
VFR	eng. Visual flight rules-vizualno letenje
VOR	eng. Very high frequency-jako velike frekvencije

---

**SAŽETAK**

Industrija 4.0 podrazumijeva digitalizaciju proizvodnje. Njen utjecaj na sve grane industrijske proizvodnje je sve veći pa tako i na zrakoplovstvo. Industrija 4.0 svojom automatizacijom ubrzava samu proizvodnju, doprinosi uštedi te omogućuje sigurniji rad za ljude. Doprinosi pronalazaženju problema prije nego što se oni uopće pojave. Brojne nove tehnologije kao što su IoT, big data, umjetna inteligencija, aditivna proizvodnja i tako dalje, nalaze svoje mjesto u zrakoplovnoj industriji. Njihova primjena vidljiva je u održavanju, konstrukciji, proizvodnji, komunikaciji i raznim drugim granama zrakoplovstva. Sigurnost kao jedna od najvažnijih stvari u zrakoplovnoj industriji povećana je razvojem novih tehnologija koje omogućuju da se na vrijeme reagira i spriječi nesreća. Sama izrada aviona i njegovih komponenti je preciznija i kvalitetnija. Sve nabrojane stvari samo su neke od prednosti koje sa sobom donosi utjecaj novih tehnologija. Industrija 4.0 sa sobom nosi veliki broj mogućnosti, a njen utjecaj u budućnosti bit će sve veći i veći.

Ključne riječi: Industrija 4.0, zrakoplovstvo, tehnologije

---

**SUMMARY**

Industry 4.0 implies digitisation of production. Its influence on all branches of industrial production is increasing, including aviation. Industry 4.0 with its automation speeds up production itself, contributes to savings and enables safer work for people. Contributes to finding problems before they even occur. Numerous new technologies such as IoT, big data, artificial intelligence, additive manufacturing and so on, find their place in the aviation industry. Their application is visible in maintenance, construction, production, communication and various other branches of aviation. Safety as one of the most important things in the aviation industry has been increased by the development of new technologies that allow to react in time and prevent an accident. The manufacturing of the airplane and its components is more precise and of better quality. All the listed things are just some of the advantages brought by the influence of new technologies. Industry 4.0 brings with it a large number of opportunities, and its influence will be greater and greater in the future.

Key words: Industry 4.0, aviation, technologies

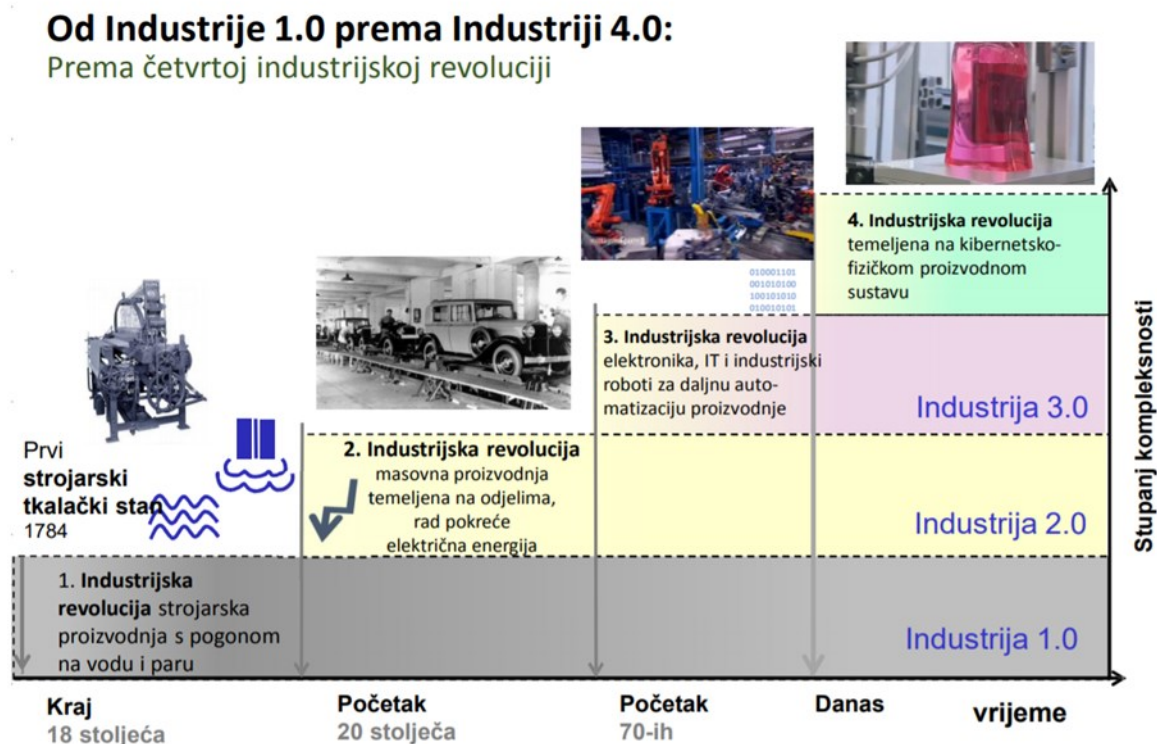
## 1. UVOD

Industrija 4.0 je pojam za četvrtu industrijsku revoluciju koja uključuje digitalizaciju i automatizaciju proizvodnje. Donosi velike promjene u načinu proizvodnje proizvoda te je duboko povezana s budućnošću Interneta stvari (IoT). Industrijski procesi su poboljšani napretkom u umrežavanju, strojnom učenju, analizi podataka, robotici, 3D printanju i drugim tehnologijama te se tako smanjila ovisnost o čovjeku i donošenju odluka. Uz pomoć digitalnih rješenja, proizvodnja može smanjiti ljudske pogreške, trajanje izlaska na tržište te ubrzati industrijske procese da se prilagode novim informacijama. Iskorištavanjem industrijskog interneta stvari (IIoT), kibernetičkih fizičkih sustava i interneta usluga, "pametne tvornice" mogu olakšati donošenje odluka na temelju podataka ili čak samostalno pokrenuti radnje. Ove tvornice omogućuju precizno praćenje proizvoda dok prolaze kroz pogon uz pomoć komunikacije strojeva te koriste senzore za bilježenje napretka i prikupljanje vrijednih informacija. Pametne tvornice mogu masovno proizvoditi proizvode sa svojom infrastrukturom, a da pritom ostanu dovoljno efikasne za profitabilno stvaranje proizvoda u malim serijama na temelju individualnih zahtjeva kupaca. Također su sposobne brzo reagirati na nepredviđene situacije koje bi mogle značajno poremetiti proizvodnju, na primjer promjena dobavljača u zadnji čas. [1] Utjecaj je vidljiv i na zrakoplovnoj industriji gdje se primjenjuju dosad spomenute grane Industrije 4.0. Njen utjecaj promatrat ćemo u svim dijelovima proizvodnje zrakoplova. Posebno olakšava održavanje zrakoplova te njegovu samu konstrukciju, kao i komunikaciju s pilotima te ostalim zrakoplovnim osobljem. Izrada dijelova za zrakoplove sve je preciznija i kvalitetnija. Sve nabrojane stvari uvelike pridonose sigurnosti i rasterećenju čovjeka, čiji rad sve više zamjenjuju roboti. Tako sigurnost kao jedna od najvažnijih stvari u zrakoplovstvu postaje sve veća.

## 2. INDUSTRIJA 4.0

### 2.1. Povijest razvoja industrije

Tijekom prve tri industrijske revolucije ljudi su razvijali mehaničke, električne i informacijske tehnologije kako bi unaprijedili industrijske procese. Oslanjali su se na hidroenergiju, pokretne trake, masovnu proizvodnju i mehanizirane alate. Za vrijeme prve industrijske revolucije otkrićem struje bitno je unaprijeđena industrijska proizvodnja. Nastala je krajem osamnaestog stoljeća u Velikoj Britaniji otkrićem parnog stroja koji je omogućio da se zamijeni rad čovjeka i životinja energijom vode i pare. Preciznost proizvodnje značajno je poboljšana upotrebom stroja. Tijekom druge industrijske revolucije koja se također smatra tehnološkom revolucijom izgrađene su velike željeznice i telefonske mreže koje su omogućile da ljudi lakše i brže komuniciraju. Bilo je to vrijeme snažnog gospodarskog razvoja i povećane učinkovitosti što je dovelo do sve veće upotrebe strojeva umjesto ljudi. U tvornicama se koristio benzin, plin, dizel i električna energija. Upotrebom električne energije, poboljšanjem komunikacije i određenom količinom automatizacije proizvodnje znatno je unaprijeđena učinkovitost i masovna proizvodnja. Nakon dva svjetska rata pojavljuje se treća industrijska revolucija poznata i pod nazivom digitalna revolucija. Počela je proizvodnja i upotreba računala. Široka upotreba računala i komunikacijskih tehnologija u fazi proizvodnje doprinijela je automatizaciji tehnologije. Digitalizacija tvornica nastavljena je instalacijom PLC strojeva za automatizaciju proizvodnje, prikupljanjem i dijeljenjem podataka. Četvrta industrijska revolucija poznata je kao Industrija 4.0 ili revolucija proizvodnje temeljena na podacima. Fleksibilnost je poboljšana kako bi se omogućilo proizvođačima da pravilno odgovore na zahtjeve potrošača putem masovne prilagodbe, u određenim slučajevima s puno učinkovitosti. Pametna tvornica omogućuje bolje izbore prikupljanjem više podataka iz tvornice i njihovim integriranjem s drugim informacijama. Industrija 4.0 predstavlja modernizaciju konvencionalne industrije i inženjerske prakse koristeći nove inteligentne tehnologije. M2M i Internet of Things (IOT) kombiniraju se za poboljšanje automatizacije, povećanje povezanosti i samonadzora. Sve veći razvoj pametnih modernih računala omogućuje dijagnosticiranje problema bez ikakvog ljudskog djelovanja. Slika 1 prikazuje razvoj industrije te dočarava kompleksnost koja je sve veća. [2]



Slika 1. Razvoj industrijskih revolucija [3]

Njemački izraz "Industrie 4.0" nastao je od strane njemačke vlade. Predstavljen je 2011. godine, a predstavljao je rastuće tijelo koje se bavilo istraživanjem i razvojem kompjuterizacije proizvodnje. Grupa njemačkih istraživača osnovana je da bi istražila stanje proizvodnje i odredila položaj Njemačke u njoj. Radna skupina za Industriju 4.0 kako su nazvani, izradila je popis preporuka za vladu 2012. godine te su ga potom predstavili na sajmu u Hannoveru 2013. godine. Preporuke su sadržavale istraživanja i razvoj koje je trebalo provesti da bi se uspješno prešlo na Industriju 4.0. Istaknuli su sljedeće: „Prve tri industrijske revolucije nastale su kao rezultat mehanizacije, električne energije i IT-a. Sada, uvođenje Interneta stvari (IoT) i usluga u proizvodno okruženje predstavlja uvod u četvrtu industrijsku revoluciju. Od tada se pojam i preporuke Radne skupine za Industriju 4.0 šire diljem svijeta, unapređujući budućnost proizvodnje. [1]

Dokumentom iz 2016. godine donesena su četiri ključna načela Industrije 4.0:

1. Međusobno povezivanje
2. Transparentnost informacija
3. Tehnička podrška
4. Decentralizirane odluke

## 2.2. Međupovezanost

Jedan od najvažnijih dijelova Industrije 4.0 je komunikacija stroj-stroj i stroj-osoba. Internet stvari omogućuje donošenje odluka temeljenih na podacima i smanjuje ovisnost o ljudskom djelovanju uz pomoć tvornica i industrijskih procesa koji dobro funkcioniraju zbog međudjelovanja hardvera i softvera koji su uključeni u proizvodnju. Putem baze podataka pristupa se informacijama sa strojeva i opreme te se tako omogućuje proizvođačima da prikupe informacije. Napretkom u mrežnoj tehnologiji (naročito u mobilnom IoT-u), moguće je povezati tisuće uređaja u koncentriranom području i održavati pouzdanu pokrivenost u zatvorenom prostoru. To premašuje strojeve koji omogućuju internet. Hardverski i softverski dijelovi moraju biti ugrađeni na smislene načine da bi mogli prenositi podatke. Kako bi upravljali proizvodnom linijom i analizirali podatke operatori se ne bi trebali prebacivati između velikog broja aplikacija. Tehnologija Industrije 4.0 treba jednostavno aplikacijsko programsko sučelje da bi se uspostavila dobra međupovezanost. [1]

## 2.3. Transparentnost informacija

Klasičnu proizvodnju usporava nedovoljan uvid u proizvodnju. Potreban je čovjek da bi prenio informaciju i ručno označio stanje. Operateri se suočavaju s problemima nedostataka podataka koji su im potrebni da bi se poboljšali procesi. Međupovezanost Industrije 4.0 omogućuje proizvođačima prikupljanje velikih količina podataka svakog dijela proizvodnje te transparentnost informacija. Koristeći ove skupne informacije, operateri dobivaju bolji uvid u probleme, neučinkovitost te stvari koje prije nisu bile toliko vidljive. Proizvođači nakon što određeni proizvod plasiraju na tržište, mogu taj proizvod dalje optimizirati te ispravljati određene greške uz pomoć prikupljanja informacija (IoT). [1]

## 2.4. Tehnička podrška

Strojno učenje osigurava uređajima i aplikacijama skeniranje i analizu podataka puno brže i preciznije od čovjeka. Za neke zahtjevne procese za koje je još uvijek potreban čovjek, Industrija 4.0 uz pomoć tehnologija pruža pomoć, upozorenje i obavijest za uočavanje kvarova, padova u kvaliteti ili mana u određenom proizvodnom ciklusu. Proširena stvarnost i računalstvo u oblaku su tehnologije koje također omogućuju identificiranje problema prije nego što postanu skupe pogreške te pomažu razvijanju rješenja koja se mogu primijeniti. Industrijska tehnologija pomaže ljudima u teškim i nesigurnim poslovima. Na primjer, održavanje je ključno za održavanje performansi i povećanje vijeka opreme. Dio Industrije 4.0 prelazi na prediktivno



održavanje. Ljudi mogu ručno prikupljati informacije i ponekad prepoznati potrebu za održavanjem, ali u većini slučajeva se to događa kada se nešto pokvari ili zakaže, što može dovesti do zastoja u proizvodnji. Industrijski IoT, Big Data i strojno učenje omogućuju uređajima i aplikacijama da na vrijeme otkriju kada je potrebno održavanje i prije pojave samog kvara. Tako operateri na vrijeme mogu isplanirati popravak. Industrijska poduzeća nastoje osigurati sigurno radno okruženje za svoje ljude, ali još uvijek postoje poslovi koji se ne mogu obaviti bez čovjeka. Industrija 4.0 uvelike pridonosi tome. Sve se više koriste roboti u poslovima kojim uključuju jake kemikalije, rastaljene materijale, uske prostore, podizanje teških stvari itd. [1]

## **2.5. Decentralizirane odluke**

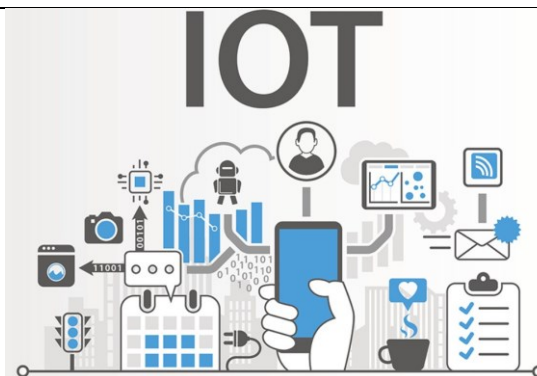
Industrija 4.0 omogućuje strojevima da samostalno donose jednostavne, rutinske odluke. Ako se tijekom proizvodnje sve usmjeri na zaposlenika koji može donositi samo jednu po jednu odluku, u žurbi s donošenjem odluka može se povećati broj pogrešaka. Strojevi umjetnom inteligencijom mogu prepoznati uzroke i biti isprogramirani da reagiraju kao što bi u datom trenutku i čovjek. Na taj način se rasterećuje zaposlenika te svoju pažnju mogu posvetiti puno zahtjevnijim situacijama. [1]

## **2.6. Temeljni koncepti i tehnologije Industrije 4.0**

Industrija 4.0 obuhvaća jako veliki broj tehnologija. Kao što i sam naziv kaže četvrta industrijska revolucija donijela je sa sobom revoluciju u proizvodnji te potpuno promijenila način na koji smo do sada proizvodili razne proizvode. Prikazat ćemo neke od temeljnih koncepata i tehnologija koji ispunjavaju načela dizajna Industrije 4.0. [1]

### **2.6.1 Internet stvari (IoT) [4]**

Internet stvari je koncept povezivanja bilo kojeg uređaja (sve dok ima prekidač za uključivanje/isključivanje) s internetom i drugim povezanim uređajima. IoT je velika mreža koja povezuje stvari i ljude. Platforma Internet of Things povezuje uređaje i objekte, prikuplja podatke s uređaja te dijeli informacije s aplikacijama koje su napravljene za rješavanje specifičnih zahtjeva. IoT platforme mogu točno razlučiti korisne od beskorisnih informacija. Informacije mogu otkriti uzroke, dati upute i otkriti moguće probleme prije nego što se pojave.



Slika 2. Povezivanje uređaja s internetom i drugim uređajima [5]

### 2.6.2 Kibernetско-fizički sustav (CPS)

Kibernetско-fizički sustav povezuje robotiku, IoT i strojno učenje. CPS je mehanički proces kojeg automatski kontrolira softver. Softver pokreće algoritme koji određuju kako treba kontrolirati strojeve, opremu ili infrastrukturu koristeći svoje senzore i druge ulazne mehaničke komponente. CPS reagira na promjene u svojoj okolini i radi u različitim prostorima i konfiguracijama te se tako prilagođava promjenjivim potrebama proizvođača. [1]



Slika 3. Komunikacija stroja i proizvoda [6]

### 2.6.3 Big data analitika (analitika velikih podataka)

"Veliki podaci" kao što i sama riječ kaže su podaci koji su veliki ili složeni te ih je jako teško obraditi, čak i uz korištenje softvera. Jedan IoT uređaj može proizvesti ogromne količine podataka za analizu. Veliki broj povezanih uređaja može izazvati velike probleme prilikom pronalaženja najboljih načina za prikupljanje, pohranu, analizu i korištenje podataka. Da bi se

razumjelo korisnika i moglo na pravi način upotrijebiti prediktivno održavanje potrebna je velika količina podataka. Proizvođači moraju razviti sustave za učinkovito izdvajanje vrijednih informacija i upravljanje velikim količinama prikupljenih podataka. [1]



Slika 4. Veliki podaci [7]

#### 2.6.4 Horizontalna i vertikalna integracija sustava

Horizontalna integracija sustava u Industriji 4.0 označava implementaciju različitih softvera i hardvera koji se koriste u proizvodnji. Oprema i aplikacije moraju raditi savršeno. Pametne tvornice omogućuju da se brzo reagira na nove proizvodne zahtjeve te olakšavaju prediktivno održavanje. Ako proizvođač posjeduje više infrastruktura, horizontalna integracija sustava olakšava upravljanje proizvodnje među njima. Kada su ti sustavi povezani, poduzeće može učinkovitije koristiti proizvodne resurse. Tako se tvrtka može automatski prilagoditi kašnjenjima, promjenama u procesima proizvodnje i drugim stvarima koje mogu utjecati na proizvodnju.

Vertikalna integracija sustava u Industriji 4.0 podrazumijeva spajanje različitih odjela proizvođača, od proizvodnje preko IT-a pa do osiguranja kvalitete i prodaje. Umjesto da se donose odluke na temelju ograničenih podataka, svaki sloj poslovanja može pristupiti relevantnim informacijama od drugih slojeva. Na taj način odluke se uvijek donose s obzirom na podatke koji su dostupni. [1]

### 2.6.5 Računalni oblak

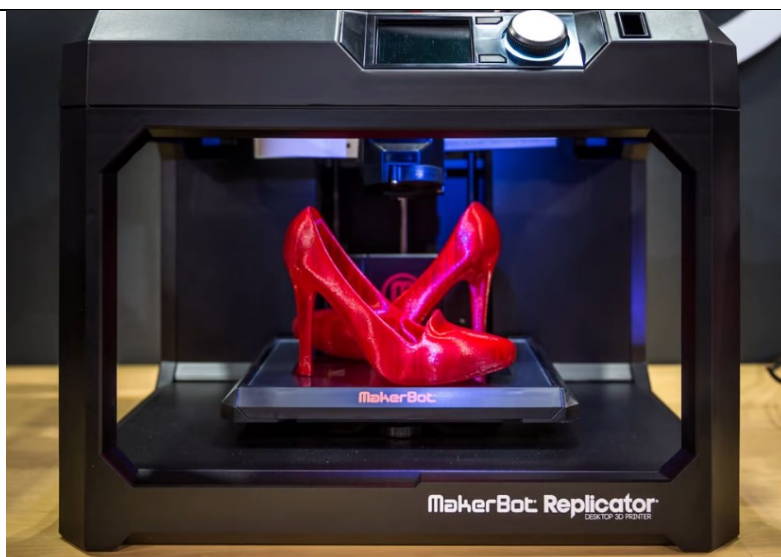
Računalni oblak je dobio ime jer se informacije do kojih se želi doći, nalaze u daljini (u oblaku) ili virtualnom prostoru. Tvrtke koje pružaju usluge u oblaku omogućuju da korisnici na daljinu putem interneta pristupe podacima te spremljenim datotekama i aplikacijama. Premješta cijeli posao u ogromne računalne klastere (skup usko povezanih računala koji rade zajedno tako da se mogu gledati kao jedno računalo) daleko u kibernetičkom prostoru. Tako svi podaci i aplikacije postaju dostupni uz pomoć interneta koji ima ulogu oblaka. Računalstvo u oblaku može biti javno, privatno te hibridno. Javni servisi u oblaku pružaju svoje usluge uz plaćanje naknade, dok su usluge privatnog oblaka dostupne samo određenom broju ljudi. Postoji i hibridna opcija, koja kombinira elemente javnih i privatnih usluga. [8]



Slika 5. Računalni oblak [9]

### 2.6.6 Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja omogućuje proizvođačima brzu proizvodnju malih serija proizvoda prema specifičnim prohtjevima kupaca. Tvornice mogu isplativo stvarati jednokratne proizvode koristeći 3D printer i digitalno modeliranje. 3D printeri printaju sloj po sloj te tako stvaraju proizvod. Za kratko vrijeme se dobije iznimno učinkovit proizvod jako dobrih svojstava. [1]



Slika 6. Primjer 3D printera [10]

### 3. INDUSTRIJA 4.0 U ZRAKOPLOVSTVU

Utjecaj Industrije 4.0 sve je veći u zrakoplovnoj industriji. Uvelike je doprinijela sigurnosti i kvaliteti same proizvodnje zrakoplova te komunikacije. Nesigurne i teške poslove preuzimaju roboti pa se ljudi sve više mogu posvetiti bitnijim stvarima u proizvodnji. Novi uređaji i tehnologije omogućuju pravovremeno signaliziranje i reakciju. Njenim utjecajem povećana je sigurnost te su spriječene brojne nesreće.

#### 3.1. Povijest razvoja Industrije 4.0 u zrakoplovstvu

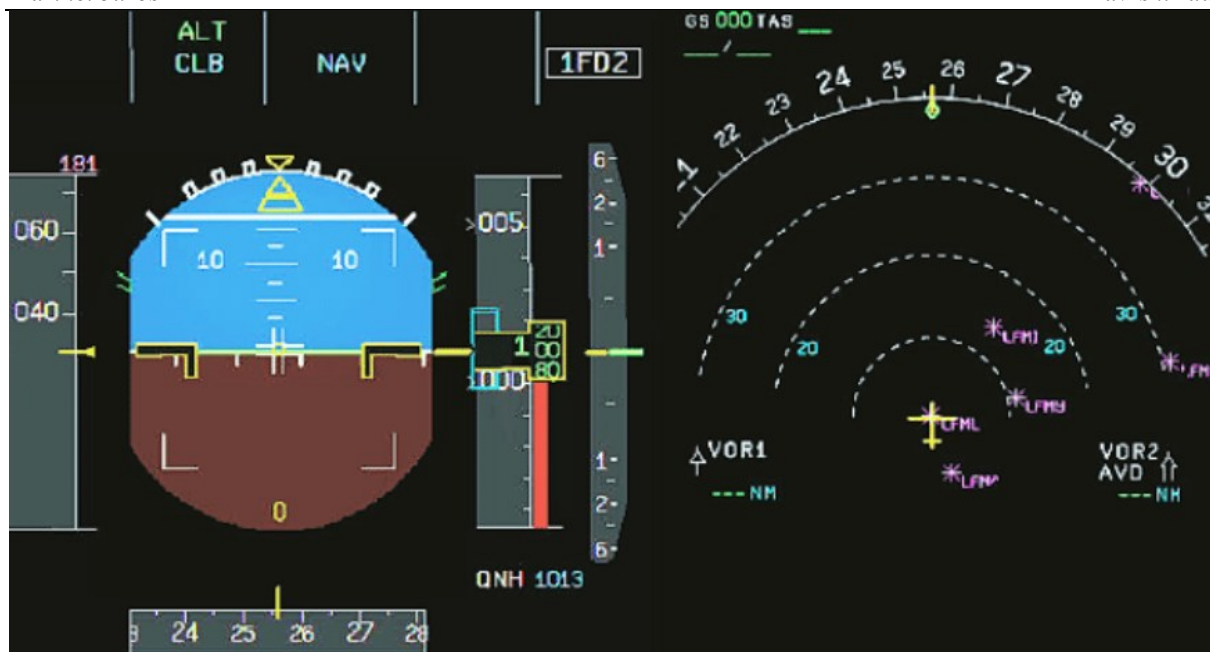
Već je ponešto rečeno i obrađeno po pitanju industrijske revolucije općenito, sljedeća tablica prikazuje kako se to sve odrazilo na zrakoplovnu industriju.

**Tablica 1. Zrakoplovne industrije [11]**

STADIJ INDUSTRIJE	KARAKTERISTIKE	SIGNALNE KARAKTERISTIKE	IZAZOVI
Prva revolucija	Zračni prostor	Vizualni signali	Izgradnja i let
Druga revolucija	Frekventni prostor	Analogni signali	Meteorološki uvjeti i promet
Treća revolucija	Podatkovni prostor	Procesiranje digitalnih podataka i digitalna komunikacija	Razumljivo i vizualni prikaz esencijalni podataka i informacija
Četvrta revolucija	Kibernetički prostor	Kibernetičko-fizički sustavi	Produžena ruka čovjeku, pripomoć ili autonomija

Izazovi postavljeni u prvoj industrijskoj revoluciji bili su kako izgraditi i letjeti zrakoplovom. U to doba jedva da je bilo instrumenata u pilotskoj kabini, tek oni najosnovniji koji bi pružili stabilan let u VFR (eng. Visual Flight Rules - vizualno letenje) uvjetima, to jest uvjetima vizualnog leta. Tako su se mogli pronaći pneumatski instrumenti kao što su brzinomjeri, visinomjeri, žiroskopski instrumenti položaja zrakoplova s umjetnim horizontom i bazični autopilot da osigura pravocrtan let. U ovom stadiju razvoja piloti su se orijentirali i letjeli po vlastitim intuitivnim vizualnim signalima u zračnom prostoru. S obzirom na to da se iz godine u godinu proizvodilo sve više zrakoplova, populariziralo se i putovanje zračnim prometom. Također, let u zamršenim meteorološkim uvjetima kao i u sve gušćem zračnom prometu bili su

izazovi koji su postavljeni na drugu industrijsku revoluciju. IFR (eng. Instrument Flight Rules - let pomoću instrumenata) način leta omogućili su meteorološki radari (ugrađeni u avione) koji bi dali vizualnu indikaciju padalina, ILS (eng. Instrument Landing System - instrumentalni sustav za slijetanje) instrumenti (eng. Localizer - za horizontalna navigacija, eng. glideslope – vertikalna navigacija) koji bi omogućili sigurno slijetanje u složenim uvjetima, VOR (eng. Very High Frequency Omnidirectional Radio Range - radio raspon velike frekvencije u svim smjerovima) za snalaženje i navigaciju u zračnim putevima te TCAS (eng. Traffic collision avoiding system - sustav za izbjegavanje sudara) kako bi se zrakoplovi mogli kretati u prostoru bez kolizije s ostalim zrakoplovima u prometu. U ovom stadiju razvoja pilotsko osoblje imalo je znatno više instrumenata te time i znatno veću raspodjelu pažnje. Orijehtacija i navigacija leta bila je na frekventnoj razini, odnosno piloti su mogli upravljati zrakoplovom a da pritom samo prate indikacije instrumenata. Tako je treća industrijska revolucija u zrakoplovstvu pojednostavila brojne analogne instrumente s digitalnim, tako da je nekoliko instrumenata integrirano u jedan ekranski prikaz što je značajno olakšalo praćenje informacija i usmjeravanje pažnje posade. Stari analogni instrumenti zamijenili su se s CRT (eng. Cathode Ray Tube - vrsta zaslona,ekran) i LCD (eng. Liquid crystal display - ekran sastavljen od piksela) obojenim prikazima. Pojavili su se instrumentalni sustavi kao što su Boeingov EICAS (eng. Engine - indicating and crew alerting system-sustav za upozoravanja motora i posade) i Airbusov ECAM (eng. Electronic centralised aircraft monitor - elektronički centralizirani nadzor zrakoplova) uz bitne integriranim digitalnim instrumentima PFD (eng. Primary flight display - primarni prikaz leta) i kod Boeinga ND (eng. Navigation display - navigacijski zaslon) i EADI (eng. Electronic Attitude display indicator - indikator držanja) i kod Airbusa EHSI (eng. Electronic horizontal situation indicator - indikator horizontalne situacije) i još mnogo drugih. Razvoj sa sobom nosi i veću razinu složenosti sustava pa je i razumijevanje istog kompleksnije. Stoga su vjerojatnije pogreške izazvane ljudskim faktorom bilo u normalnoj ili kriznoj situaciji. [11]



Slika 7. PFD i ND sa zrakoplova Airbus A320 [12]

S obzirom na to da je riječ o industriji u kojoj je sigurnost na prvom mjestu te je prostor za razvoj novih tehnologija izrazito uzak zbog vrlo strogih regulativa koji osiguravaju sigurnost zračnog prometa. Četvrta industrijska revolucija u zrakoplovstvu temelji se na istim principima kao i općenita Industrija 4.0, sinergija fizičkog i kibernetičkog svijeta. I u ovoj industriji uvode se nove prethodno spomenute tehnologije kao što su IoT, big data, umjetna inteligencija, pametne tvornice i dr. Zrakoplovstvo trenutno predstavlja vrhunac kompleksnosti u tehničkom i podatkovnom smislu stoga bi svako pojednostavljenje i smanjenje napora letačkom ili tehničkom osoblju dobro došlo. U zračnom prometu imamo visoko sofisticirane i sigurne autopilote s kojima je danas praksa odraditi gotovo cijeli let dok su piloti zaduženi za najkritičnije faze leta a to su polijetanje i slijetanje. Važno je napomenuti da je svakako moguće i sigurno slijetati autopilotom no to još uvijek nije široko prihvaćena praksa. Ovo nije primjer potpune autonomije jer piloti zapravo moraju upravljati s nekoliko bitnih parametara leta s autopilotom.

Neki od zadataka Industrije 4.0 u zrakoplovstvu su:

1. Povećati transparentnost (stanje, prognoza)
2. Smanjiti ljudski faktor (umor, komunikacija)
3. Ubrzati proizvodne procese (povećati broj komada mjesečno)
4. Smanjiti troškove transporta (mogućnost sklapanja na jednoj lokaciji)
5. Povećati prometnu i tehničku sigurnost (kibernetičke sugestije, autonomnost)



### 3.2. Primjeri primjene Industrije 4.0 u zrakoplovstvu

#### 3.2.1 Automatsko letenje [11]

Razni događaji u prošlosti naveli su da se istraži koncept AFR-a (eng. Autonomous Flight Rules - automatska/autonomna pravila letenja). To je automatsko letenje u unaprijed definiranim situacijama po određenim pravilima.

2002. godine dogodio se sudar letova DHL-a Flight 611 i Bashkirian Airlines Flight 2937 na 36.000 stopa (10972.8 metara) iznad njemačkog grada Überlingena. Nakon nesreće ustanovljeni su nedostaci u službi kontrole zračnog prometa i pogreška jednog člana posade koji nije slijedio upute sustava za izbjegavanje sudara u zrakoplovu (sustav za izbjegavanje sudara u prometu - TCAS). TCAS je predvidio sudar te signalizirajući obavijestio posadu. Odredio je putanje koje bi dovele do izbjegavanja sudara. Da su obje posade postupile po pravilima i da su poslušale signale koje je poslao TCAS, ne bi se dogodila nesreća.

Sljedeća tragedija dogodila se 2015. godine kada se let German Wings Flight 4 U 9525 srušio u francuskim Alpama. Zrakoplov je slijedio putanju spuštanja koju je odredio pilot, koji je postavio autopilota da se spusti na 100 stopa (30 m) te povećao brzinu spuštanja zrakoplova. Minutu prije nego što će zrakoplov udariti u tlo, sustav koji upozorava na opasno približavanje zrakoplova tlu (EGPWS - eng. Enhanced Ground Proximity Warning System - unaprijeđeni sustav upozorenja na blizinu tla) poslao je upozorenje pilotu da se uzdigne kako bi izbjegao sudar s tlom. U oba slučaja sustavi zrakoplova su pravilno i pravovremeno ukazali na opasnost. Nesreće su se dogodile jer članovi posade nisu reagirali na vrijeme i po pravilima. Ovi događaji doveli su do toga da se razvije ideja gdje će kiberfizički zrakoplovni sustav Aviation 4.0 (Zrakoplovstvo 4.0) automatski slijediti upozorenje, u slučaju da se dogodi situacija kao u gore navedenim slučajevima gdje posada nije reagirala kako treba.

Korištenjem automatskog letenja u unaprijed definiranim situacijama po određenim pravilima može uvelike doprinijeti eliminiranju raznih sigurnosnih nedostataka. Da bi se to ostvarilo potrebno je još poraditi na:

- Identifikaciji i definiciji pravila automatskog/autonomnog leta
- Predviđanje situacije, da se definira kada će se automatsko letenje uključiti i isključiti nakon što prođe opasna situacija
- Podaci koji se dobiju uz pomoć senzorskih signala koji javljaju postoji li opasnost
- Sigurnosna analiza za Zrakoplovstvo 4.0.
- Rješavanje regulatornih pitanja i pitanja odgovornosti.



Slika 8. Prikaz EGPWS zaslona [13]

### 3.2.2 Prediktivno održavanje zrakoplova [11]

Posljednji ugrađeni sustavi održavanja mlaznih zrakoplova omogućuju usluge preventivnog održavanja strukture. Sustav preventivnog održavanja A380 može otkriti popis stvari koje trebaju čekati na popravak da bi se spriječili sljedeći kvarovi koji mogu dovesti do problema s MMEL-om (eng. Master Minimum Equipment Lists - glavni popis minimalne opreme). Zemaljska statistička analiza povijesti zrakoplovne flote i praćenja stanja zrakoplova koristi se za pokretanje preventivnih akcija održavanja. Ovi sustavi ne mogu pružiti informacije o tome koliko je vremena ostalo prije pojave sljedećeg utjecaja na MMEL stavku. Dolaskom Zrakoplovstva 4.0, mogućnosti učinkovitog prediktivnog održavanja u stvarnom vremenu postaju novo tržište za zrakoplovnu industriju. A350 može zabilježiti 400.000 parametara tijekom leta, što u kombinaciji s analitikom velikih podataka ima potencijal da shvati zrakoplov dovoljno detaljno te da se provedu intervencije održavanja prije nego što dođe do kvarova. Airbus i Rolls-Royce su uspostavili partnerstvo kako bi ponudili globalnu stručnost u prediktivnom održavanju A350. Uz pomoć prediktivnog održavanja moguće je izbjeći nesreće i produljiti životni vijek zrakoplova jer omogućuje da se predvide problemi prije nego što se prošire te izazovu neku veću štetu. Omogućuju čak i programiranje održavanja te zamjenu

neposredno prije kvara ili problema. IoT u Zrakoplovstvu 4.0 ima pozitivan utjecaj i na troškove goriva te učinkovitost. Senzori motora zrakoplova mogu analizom otkriti i ispraviti neefikasnost rada koja dovodi do povećane potrošnje goriva. Potencijal prediktivnog održavanja u kombinaciji sa sinkroniziranom logistikom omogućit će poboljšanje vremena obrade, smanjenje intervencija održavanja te vrijeme i broj neaktivnih zrakoplova u hangarima dok čekaju dijelove i servis. Pristizanje informacija omogućit će timovima za održavanje na zemlji da imaju spremne dijelove i tehničare prije slijetanja zrakoplova, tako da se tehničke intervencije mogu obaviti u minimalnom vremenu. Na taj način se neće poremetiti raspored letova. Ako se dodatno kombinira digitalnim tehnologijama, rad na održavanju mogao bi jako olakšati rješavanje problema jer bi tehničari na jednom mjestu imali sve potrebne informacije o održavanju za određeni problem. To bi dovelo do smanjenja ljudskih pogrešaka tijekom održavanja, smanjila bi se mogućnost pojave nesreće zbog pogrešaka u održavanju, poboljšala bi se učinkovitost i ekonomičnosti. Ove informacije su korisne za održavanje tek nakon slijetanja aviona. Oni se preuzimaju i procjenjuju. Podaci koje prima osoblje zaduženo za održavanje na zemlji čekajući letove omogućit će timovima za održavanje da predvide sve probleme prije slijetanja, a tehničarima će omogućiti da dijelovi i stručnjaci budu spremni za brzu intervenciju. Analitika podataka i međusobno povezani pametni senzori omogućit će kombiniranje prediktivnog održavanja sa sinkroniziranim logističkim sustavom. To će smanjiti rizik od kvara tijekom leta i troškove zrakoplova koji čekaju dijelove i servis. Tehničari održavanja su upozoreni na problem održavanja putem ACARS (eng. Aircraft Communications, Addressing and Reporting System - komunikacijski sustav adresiranja i izvještavanja zrakoplova) poruka, glasovnih poruka, dnevnika posade zrakoplova i/ili razgovora s letačkom posadom. Do sada to nije bio slučaj jer su informacije o rješavanju problema bile teže dostupne za tehničare koji su radili na rampi i na avionu. Google Glass tehnologija pruža mogućnost stvaranja složenih dijagrama i tehničkih informacija u 3D okruženju koje ukazuju tehničaru o mogućem problemu i njegovom rješenju.



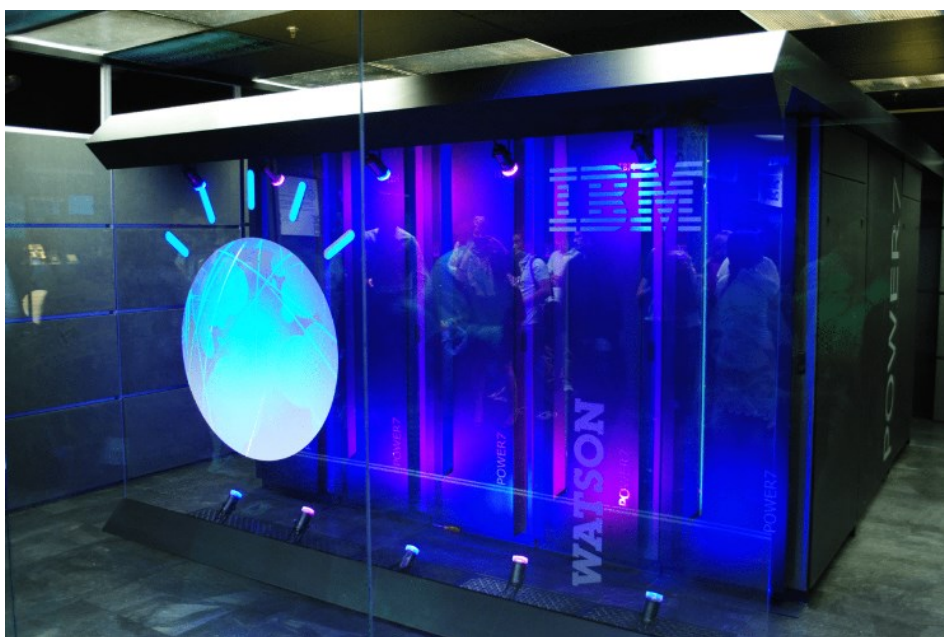
Slika 9. Upotreba Google Glass tehnologije u održavanju [14]

### 3.2.3 Sigurnosni kognitivni računalni sustavi koji pomažu pilotskoj kabini [11]

Kognitivno računalstvo predstavlja računalni sustav koji oponaša ljudski mozak. To podrazumijeva:

- Upravljanje i skladištenje ogromnih količina podataka i informacija kao što su: slike, zvukovi, tekst, simboli, razgovori, itd.
- Pronalaženje optimalnih rješenja i procesuiranje situacija koje se nikada prije nisu dogodile
- Obrađivanje informacija i unos bez potrebe da podaci budu organizirani ili usklađeni
- Organiziranje podataka i informacija kako bi se pronašli obrasci i dobili naknadni uvidi iz informacija
- Implementaciju i kombiniranje novih podataka s prethodno stečenim znanjima i iskustvima
- Učenje iz iskustva, zadržavajući prethodna pitanja i kontekste
- Donošenje odluke i pružanje inteligentnih odgovora na pitanja na temelju zaključaka iz primljenih informacija
- Pročišćavanje i ažuriranje odluka i odgovora kontinuiranim prikupljanjem i obradom informacija.

Dobar predstavnik kognitivnog računalnog sustava je IBM-ov Watson. Watson može obraditi pitanja izražena prirodnim ljudskim jezikom te prikupiti i analizirati nestrukturirane informacije i pomoći operaterima da donesu poboljšane osjetljive odluke. On uči iz prethodnog iskustva, prethodnih informacija i pitanja te iz konteksta u kojemu su ta pitanja postavljena. Sustav je u stanju obrazložiti na što se oslanja te time i objasniti svoje preporuke. Sposobnosti za tumačenje, procjenu i preporuku rješenja koje pružaju Watson i drugi slični kognitivni računalni sustavi doprinose značajnom poboljšanju sigurnosti u zrakoplovstvu. Airbus Group radi na razvoju Watson Cockpit Mentora, odnosno proučava kako koristiti Watson tehnologiju za pomoć pri vođenju pilota kroz krizne situacije i kako doprinijeti smanjenju preopterećenosti pilota informacijama tijekom hitne situacije. U slučaju pojave leta, sustav će moći interpretirati ne samo informacije o statusu i performansama sustava zrakoplova, već i pilotov opis problema na jednostavnom govornom prirodnom jeziku te relevantne tehničke materijale i dokumente. Watsonova pomoć posadi protumačit će problem i dati preporuke pilotu. Preporuke se mogu odnositi na promjene rada zrakoplova kako bi se smanjio problem, upute za rješavanje problema itd. Sustav bi se mogao pobrinuti za automatsku kontrolu manje kritičnih odluka, te bi tako oslobodio posadu manje bitnih aktivnosti. Na taj način bi se piloti mogli posvetiti ozbiljnijim problemima. Ovaj projekt je rezultat suradnje Airbusa i IBM-a (eng. International Business Machines - američka IT tvrtka). Airbus također razvija kognitivne računalne aplikacije u drugim poljima rada zrakoplova kao što su učinkovitost goriva, mogućnosti održavanja i operativna optimizacija zrakoplova.



**Slika 10. IBM-ov prototip kognitivnog računalnog sustava Watson [15]**

### **3.2.4 Poboľšane usluge traženja i spašavanja, posebno u oceanskim ili udaljenim područjima [11]**

Nesreće koje su se događale prouzrokovale su nestanak zrakoplova, ponekad iznad oceana bez obavijesti ili komunikacije. Nesreća MF370 potakla je aeronautičku zajednicu da razvije koncept operacija za GADSS (eng. Global Aeronautical Distress Safety System - Globalni zrakoplovni sustav za pomoć i sigurnost). Ovaj sustav će pratiti zrakoplov posvuda i u svim uvjetima, locirati zrakoplov kada je u nevolji i osigurat će pravovremeni oporavak od leta te glasovne podatke pilotske kabine.

Zahtjevi za ove sustave uspostavljeni su za normalne uvjete praćenja i za lociranje zrakoplova u uvjetima opasnosti. Uspostavljen je vremenski interval praćenja zrakoplova od 15 minuta kad god službe zračnog prometa dobiju informacije o položaju zrakoplova u intervalima većim od 15 minuta za zrakoplove s kapacitetom većim od 19 sjedala.

Lokaciju zrakoplova u nevolji dobije se od samog zrakoplova koji samostalno šalje informacije iz kojih se može odrediti položaj najmanje jednom svake minute. To će omogućiti veliku vjerojatnost lociranja mjesta nesreće u krugu od 6 Nm (oko 11km). Ovaj prijenos se može aktivirati:

- Automatski, pokreću ga nenormalni ili specifični događaji
- Ručno od strane posade zrakoplova
- Ručno sa zemlje

Zahtjevi se primjenjuju na novim zrakoplovima kojima je težina pri polijetanju veća od 27 000 kg. Odredbe koje se odnose na praćenje u slučaju opasnosti u roku od jedne minute temelje se na performansama, a ne na tehnologiji, što znači da zrakoplovne tvrtke i proizvođači zrakoplova mogu razmotriti sve dostupne i nove tehnologije koje mogu isporučiti naveden zahtjev za praćenje lokacije od jedne minute. Već postoji veliki broj instaliranih zrakoplovnih tehnologija/usluga koje se mogu koristiti u tu svrhu u bliskoj budućnosti (ADS-C (eng. Automatic Dependent Surveillance - sustav za nadzor), DS-B(eng. Double Side Band - elektronika,radio), itd.).

### **3.2.5 Praćenje/uzbunjivanje ljudskih performansi [11]**

Interneta stvari (IoT) nudi široki spektar nosivih uređaja. Primjene se mogu razlikovati, a pogotovo u području zrakoplovstva. EasyJet je prva zrakoplovna tvrtka koja je dizajnirala i proizvela napredne uniforme u koje je ugrađena nosiva tehnologija za članove posade i osoblje na zemlji, s ciljem povećanja sigurnosti u radu. Air New Zealand koristi nosive uređaje za



lociranje djece bez pratnje na kratkim i dugim letovima. Ova tehnologija omogućuje očitavanje, pohranjivanje, tumačenje i prenošenje informacija o tijelu korisnika ili okoline pomoću pouzdanih, jeftinih i nenametljivih senzora i uređaja. Ugrađivanje senzora i signala u kombinaciji s kontekstualnim informacijama nudi veliki potencijal za rješavanje problema povezanih s jednim od kamena temeljaca sigurnosti u zrakoplovstvu, ljudskim faktorom. Ova bi tehnologija mogla pomoći u otkrivanju ljudske neučinkovitosti (umor, stres), razvijanju automatizacije ljudskih performansi, poboljšavanju vještina i brzina učenja na temelju neuro procjene učenja u zrakoplovstvu itd.



Slika 11. Uniforma s nosivim tehnologijama tvrtke EasyJet [16]

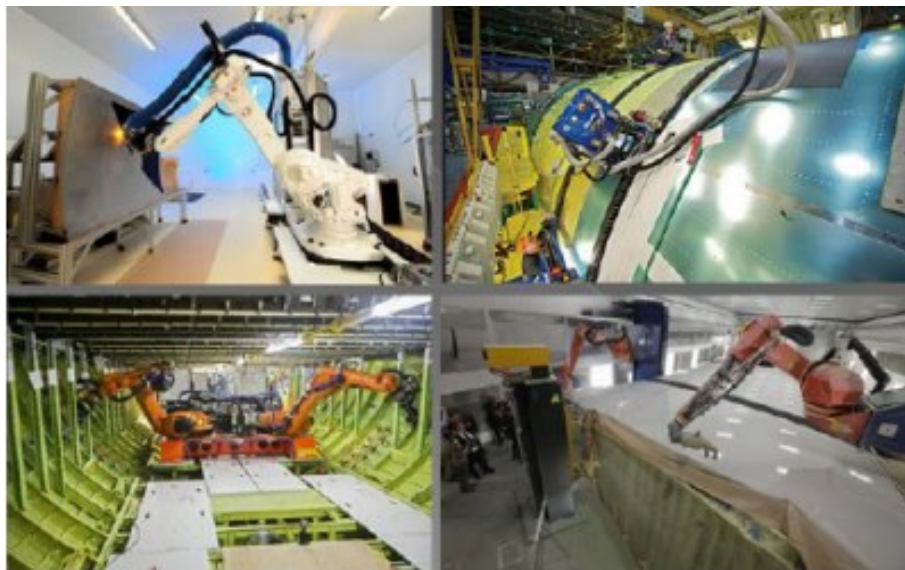
### 3.2.6 Roboti [17]

Roboti poboljšavaju produktivnost doprinoseći uštedi proizvodnje te rješavaju problem nedostatka kvalificirane radne snage. Služe za opasne, zamorne i prljave poslove koji nisu mogući ili sigurni za ljude. Razvijen je poseban softver za robotiku koji pomaže u poboljšanju ponovljivosti i točnosti pozicioniranja robota. Ova značajka doprinosi ispunjavanju zahtjeva proizvodnog zrakoplovstva. Zrakoplovna industrija obično koristi metode montaže koje su se dokazale kao uspješne u prošlosti. Zadnjih nekoliko godina se to mijenja u zrakoplovnoj industriji. Proizvođači zrakoplova obično koriste robote u proizvodnji gdje se zahtijeva preciznost i krutost na velikim dijelovima.

Roboti se u zrakoplovnoj proizvodnji koriste za:

- Bušenje,

- Pričvršćivanje,
- Inspekcija,
- Slikanje,
- Postavljanje vlakana,
- Brtvljenje,
- Manipulaciju.



**Slika 12. Primjeri korištenja robota u zrakoplovnoj industriji [17]**

Industrija 4.0 razvila je robote koji surađuju s ljudima. Ovi inteligentni roboti počeli su automatizirati nova područja. Pa tako otkrivaju tolerancije pozicioniranja obratka, rade s dijelovima koji nisu kruti, otvaraju vrata na strojevima, prepoznaju komponentu vrste i obavljaju beskonačan broj drugih zadataka. Raspon primjene je beskonačan. Na slici 13 prikazana je suradnja robota i čovjeka. Roboti se više ne izoliraju od ljudi već normalno pripomažu ljudima u industrijskoj proizvodnji. Ugrađeni sustav senzora omogućuje besprijekornu implementaciju i podjelu zadataka između čovjeka i stroja.

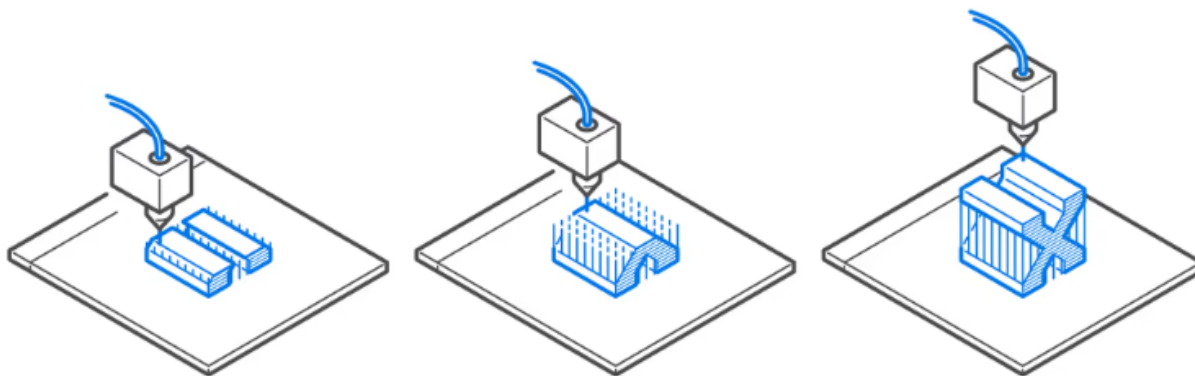




Slika 13. Suradnja robota s ljudima [17]

### 3.2.7 Aditivna proizvodnja [17]

Dodatna proizvodnja koja se naziva i proces 3D printanja pruža novi pristup industrijskoj proizvodnji. Za razliku od konvencionalnih proizvodnih procesa gdje se dijelovi dobiju od sirovine, aditivna proizvodnja radi na principu iznutra prema van. Konstruira se sloj po sloj. Opetovano, aditivni proces printa vrlo tanke slojeve materijala preko drugih tako da se dobije čvrsta komponenta. Koriste se različiti materijali kao što su plastika, aluminij, titan, staklo i beton visoke kvalitete. Na slici 14 prikazan je postupak printanja, sloj po sloj. Aditivna proizvodnja ne zahtijeva nikakav alat za razliku od konvencionalnih metoda proizvodnje. To pomaže u smanjenju vremena i troškova proizvodnje te pojednostavljuje upravljanje zalihama. Tvrtke koriste 3D printanje za izradu prototipova i proizvodnju pojedinačnih komponenti. Zrakoplovna industrija se trudi stvarati nove dizajne koji će smanjiti težinu zrakoplova, smanjujući tako troškove sa sirovinama kao što je titan. Isprintani dijelovi se najviše koriste kod platformi iako predstavljaju samo 1% ukupnih dijelova u komercijalnom zrakoplovu. Elektronska ili laserska zraka koristi se za modeliranje željenih metalnih materijala uz pomoć računalnog softvera CAD-a. Dijelovi dizajnirani i proizvedeni aditivnim postupkom mogu imati prirodan i pouzdan oblik, što bi bilo jako teško dobiti od čvrstog bloka materijala. Takvi dijelovi su lakši, brže se proizvode i u konačnici puno jeftiniji od konvencionalnih. Tvrtka Boeing je svjesna kako tehnologija nudi potencijal za promjenu zrakoplovne industrije na bolje. Dakle, 3D ispis daje mogućnost poboljšanja rezervnih dijelova. Njihovim korištenjem smanjuje se vrijeme i troškovi proizvodnje, što također doprinosi kraćem vremenu održavanja i manjoj potrošnji sirovina.



Slika 14. Printanje sloj po sloj [18]

### 3.2.8 Strojno učenje

Strojno učenje pronašlo je veliku primjenu u raznim industrijama pa tako i u zrakoplovnoj. Kako je zrakoplovna industrija vodeća industrija u uvođenju novih trendova i strategija održavanja ne začuđuje da se strojno učenje koristi od samog početka razvoja do promatranja sustava u eksploataciji.

Korištenjem strojnog učenja u ranoj fazi konstruiranja nekog proizvoda, npr. aviona, olakšava se donošenje odluka. Sama faza konstruiranja veoma je kompleksan proces. Potrebno je donijeti odluke o mnogobrojnim dijelovima, pronaći optimalno rješenje, imajući u vidu primjerice ponuđene materijale, karakteristike pojedinih materijala, ekonomsku isplativost korištenja materijala itd., odnosno potrebno je koristiti podatke iz različitih disciplina. Najčešće ti podaci nisu potpuni, ali i oni podaci koje posjedujemo nisu potpuno sigurni. Kako postoji mnogo dijelova koji sačinjavaju samo jedan sustav unutar aviona vrlo je lako predvidjeti nešto i tu dolazi do izražaja strojno učenje. Strojno učenje omogućava pronalaženje skrivenih korelacija između podataka iz različitih disciplina, omogućava stvaranje prediktivnih modela koji smanjuju nesigurnost koja nastaje pri odabiru iz nepotpunih i nesigurnih podataka. Strojno učenje stvara aproksimacijske modele i tako ubrzava cjelokupni proces razvoja. Na temelju tih modela moguće je napraviti brojne simulacije kako bi se utvrdilo optimalno rješenje. Faza razvoja i dalje ostaje kompleksna, no korištenjem strojnog učenja omogućena je velika ušteda na vremenu što je ekonomski pogodno. [19]



Slika 15. Strojno učenje u zrakoplovstvu [20]

### 3.2.9 Blockchain tehnologija

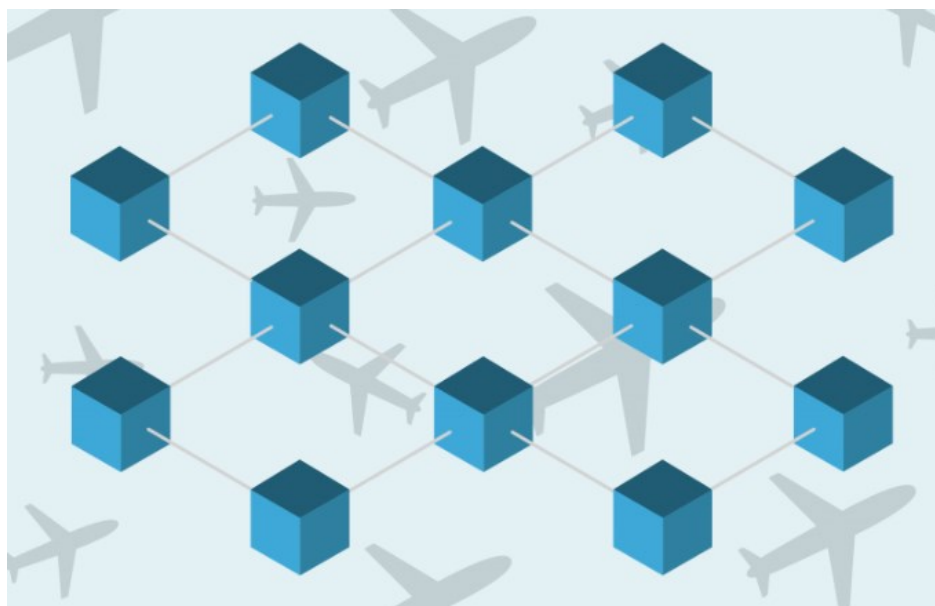
Blockchain tehnologija primjenjuje se u svim dijelovima zrakoplovne industrije, posebice u financijskom dijelu. Kako je i sama blockchain tehnologija zasnovana na financijskim temeljima ne začuđuje kako najveću primjenu ima upravo u tom sektoru.

Blockchain tehnologija je najviše zastupljena je u dijelu iznajmljivanja zrakoplova, odnosno leasingu. Korištenjem pametnih ugovora omogućeno je da se obje stranke drže dogovora, odnosno u slučaju da nepoštovanja dogovora automatski dolazi do sankcija. Osim velike uštede novca jer nije potreban posrednik, osigurava se da će se, ukoliko bude te potrebe, sankcije zaista izvršiti. Osim toga, pri iznajmljivanju zrakoplova, ako se koristi blockchain tehnologija, iznajmitelj ima uvid u cjelokupan životni vijek zrakoplova te može provjeriti kako je zrakoplov bio održavan i u kakvom je trenutno stanju. [21]

Blockchain se može koristiti u zračnim lukama na više načina: za identifikaciju putnika, izdavanje novčanica, praćenje imovine, upravljanje programima ili surađivati u poboljšanju suradnje između članova industrije. Ono što je doista korisno u Blockchain tehnologiji je to što omogućuje pokretanje multi-poslovnih aplikacija gdje se podaci izvršavaju zajedno putem blokova, umjesto da izolirane aplikacije izvršavaju podatke pojedinačno. Trenutačno više od polovice zračnih prijevoznika ima Blockchain programe. Najčešća upotreba koja se očekuje od Blockchaina je identifikacija putnika, iako bi od njega mogli imati koristi i u drugim

slučajevima. Zrakoplovna industrija ima dugu povijest razmjene informacija između uključenih strana, a tehnologija Blockchain mogla bi biti prekretnica jer će zahvaljujući biometrijskim identifikacijskim sustavima putnici moći putovati bez pokazivanja putovnice službenoj osobi, čime se pojednostavljuje postupak. To će biti omogućeno putem mobilnog telefona i sustava za provjeru identiteta, pomoću otiska prsta ili prepoznavanja lica. Ova provjera omogućit će pristup aplikaciji koja upravlja identitetom putnika i dijeliti podatke sa zainteresiranim stranama. To podrazumijeva odbacivanje niza postupaka provjere koji su se do sada koristili i koji mogu biti opterećujući i neučinkoviti. Pri korištenju biometrijskih sustava, putnici moraju podijeliti svoje osobne podatke sa zrakoplovnom kompanijom i određnom carinskom službom putem svog mobilnog telefona prije dolaska. Prilikom dolaska u zemlju odredišta, putnici će morati proći kroz biometrijski sustav koji skenira njihovo lice ili otisak prsta i uspoređuje ih s podacima putem Blockchaina, putem mobilnog telefona.

Još jedan aspekt od kojeg putnici mogu imati koristi korištenjem Blockchain tehnologije je mogućnost kontrole svoje prtljage. Putnici često provjeravaju svoju prtljagu jer se boje da će se ona izgubiti na putu. Kada koristite Blockchain sustave zajedno s uređajem za praćenje prtljage, nemaju brige oko nestanka. Umetanjem tehnološkog uređaja tvrtke Bagtrax na svoj kovčeg, putnici će znati gdje se nalazi njihova prtljaga jednostavnim pogledom na mobitel. Ako se ona izgubi, zajamčena je trenutna odšteta putem Blockchaina, koji je odgovoran za povezivanje svih tvrtki s korisnikom: zrakoplovnih prijevoznika, uprave zračne luke, osiguravajućih društava i tako dalje. [22]



**Slika 16. Blockchain u zrakoplovstvu [23]**

## 4. STUDIJA SLUČAJA

### 4.1. Studija slučaja za aditivnu proizvodnju [24]

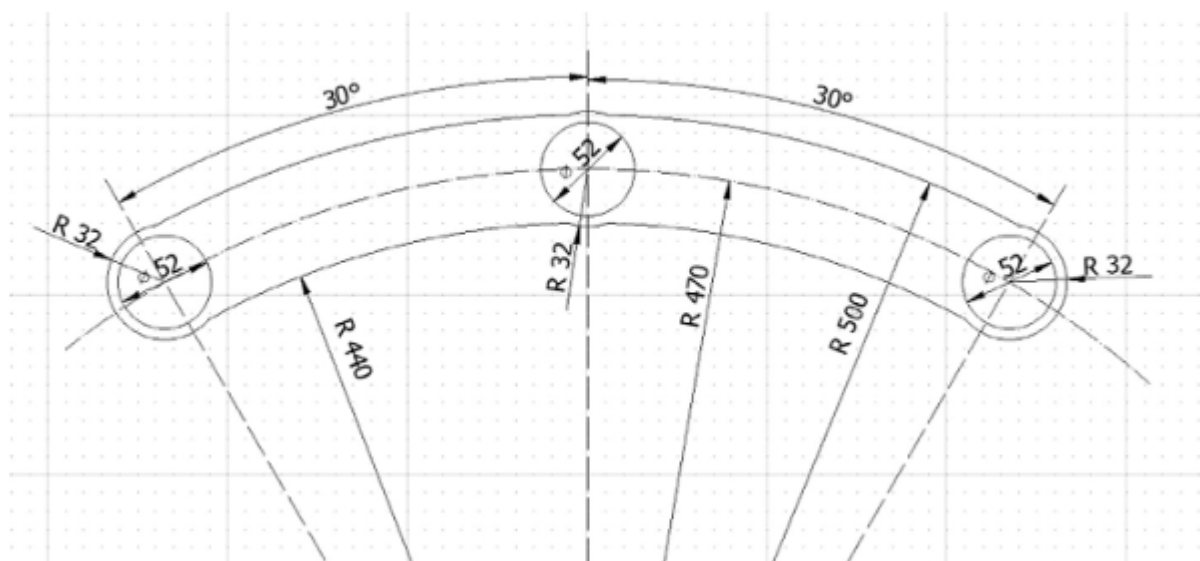
Studija slučaja uključena u ovaj rad pokazuje potencijal aditivne proizvodnje u aeronautici: opisuje kako se nosač produžnog mehanizma može zamijeniti novom učinkovitijom konstrukcijom, iste funkcionalnosti te manje ili jednake mase. Nosač o kojemu govorimo prikazan je na slici 17. Detalj je prikazan na krilu komercijalnog Airbusovog zrakoplova A300.



Slika 17. Nosač na Airbusu A300 [24]

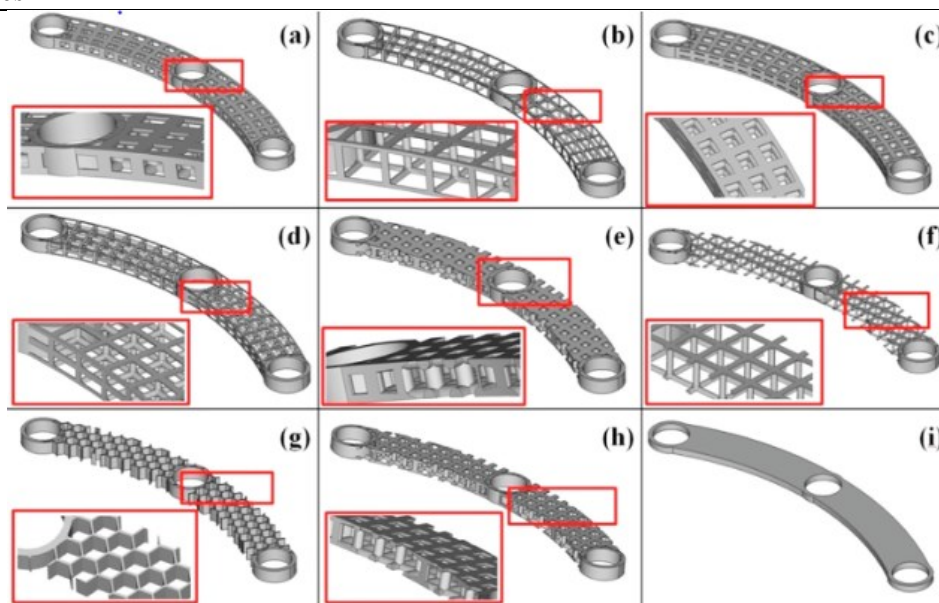
Slika 18 prikazuje dimenzije tlocrtnog prikaza nosača koji predstavlja komponentu zrakoplova. Prikazan je zakrivljena ploča radijusa zakrivljenosti 470 mm, kuta  $60^\circ$ , debljine 60mm. Svaka izbočina ima promjer 64 mm i duga je oko 500 mm. Svaki čep promjera 52 mm drži rupu.





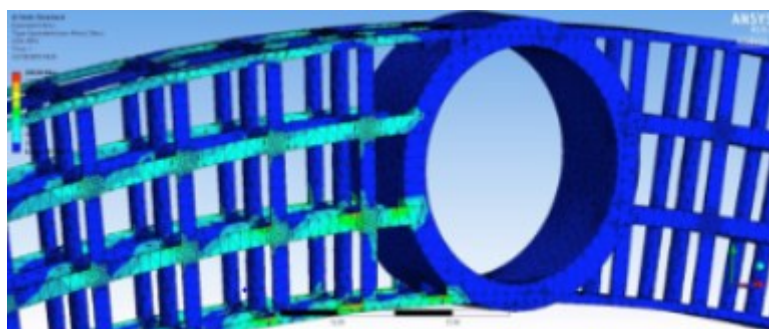
Slika 18. Prikaz tlocrta nosača [24]

Korištenjem tradicionalnog procesa proizvodnje može se dobiti komponenta kao na slici 19 koja je dobivena u CAD programu. Učinkovitiji dizajn mogao bi se dobiti pomoću rešetkastih struktura. LSWM (eng. Legacy System Migration Workbench - Radna površina za migraciju naslijeđenog sustava) alat korišten je za dizajniranje dijelova s nekonvencionalnom geometrijom (vidi sliku 19). Sve ove strukture predstavljaju isti raspored tlocrta i dimenzije čvrstog dijela, ali njihova debljina je 20 mm, a temelji se na različitim geometrijskim rasporedima koji se mogu proizvesti samo putem aditivnih tehnologija. Strukture (a), (b), (c), (d) temelje se na konformnoj strukturi. Rešetkasti kubni elementi su jednako razmaknuti duž zakrivljene osi nosača. Čelija se sastoji od cilindra polumjera 5 mm i kuglica s radijusom 6 mm postavljenih na mjesto gdje cilindri sijeku cilindre (strukture (a), (c), (e)). Rješenja temeljena na rešetki (b), (d), (f) temelje se na cilindrima polumjera 3 mm i kuglama polumjera 4 mm. Strukture (c) i (d) sastoje se od staničnih struktura visine 10 mm, dok ostale strukture čine čelije visine 20 mm. Struktura (g) temelji se na šesterokutnoj strukturi, a strukturu (h) čine kubični elementi bez sfera na sjecištima.



**Slika 19. Različiti oblici nosača [24]**

Struktura na bazi izrađena je od aluminija gustoće  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ , modula elastičnosti  $E=71000 \text{ N/mm}^2$  i Poissonovog koeficijenta 0,33. Aluminijev prah je dostupan za aditivne strojeve, a dijelovi aditivne proizvodnje imaju slična svojstva onima dobivenim mljevenjem čvrstih metalnih blokova ili lijevanih komponenti. Nekoliko FEM analiza je provedeno za sve strukture koje su prikazane na slici 19, snimanjem maksimalnog naprezanja i pomaka u svakom slučaju. Na slici 20 prikazano je uvećanje naprezanja za (d) slučaj studija u najopterećenijoj zoni nosača koja je u središtu.



**Slika 20. Prikaz opterećenja [24]**

Kada se radi o generičkoj strukturi, opterećenje se mora kontrolirati kako bi se osigurao odgovarajući životni vijek. Pretjerane deformacije mogu dovesti do neželjenih kontakata ili blokadi. Vlastite frekvencije se moraju izbjegavati u blizini izlaznih opterećenja zbog pojave rezonancije, posebno u dizajnu helikoptera. U ovoj studiji slučaja, za zahtjev dizajna koji se odnosi na pomak razmotreni su sljedeći parametri konstrukcije: maksimalni pomak - analiza je manje osjetljiva na veličinu mreže i broj čvorova nego analiza opterećenja, tako da podaci mogu biti pouzdani i dosljedno dobiveni. U nastavku analize o tradicionalnoj strukturi (i) provedena

je promjena debljine komponente. Debljina i masa nosača osiguravaju slične pomake kao i aditivno proizvedena komponenta kroz interpolaciju. Ako, pretpostavimo jednake mase tradicionalnog dijela i svake aditivno proizvedene konfiguracije (a–h), dobijemo maksimalne pomake. Na kraju, izračunata su dva vrijedna indeksa za procjenu strukturne učinkovitosti struktura. Prvi je MIM koji se dobiva računanjem omjera između rešetkaste strukture i tradicionalnog gušćeg dijela mase koji osigurava jednaki pomak, dok je drugi MID koji je dobiven dijeljenjem maksimalnog pomaka. Odnose se na aditivno proizvedeni dio i tradicionalnu konfiguraciju jednakih masa.

**Tablica 2. Vrijednosti indeksa za aditivno proizvedene strukture[24]**

Konfiguracije	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)	h)
Debljina tradicionalnog dijela [mm]	16.88	6.64	15.50	8.35	16.23	5.29	4.27	12.02
Masa tradicionalnog dijela [kg]	1.208	0.475	1.109	0.598	1.161	0.378kg	0.306	0.860
Maksimalni pomak tradicionalnog dijela [mm]	3.16	25.4	1.55	12.7	1.83	20.35	9.28	5.50
MIM indeks	0.525	0.564	0.633	0.559	0.594	0.745	1.227	0.622
MID indeks	0.137	0.182	0.354	0.200	0.266	0.403	1.634	0.156

Tablica 2 prikazuje vrijednosti MIM i MID koeficijenta. Iz tablice 2 se vidi da je moguće postići velika poboljšanja u smislu krutosti uz pomoć rešetkastih struktura. Eksperimentalna analiza bi trebala na precizan način potvrditi opterećenje i pomake. Međutim, s kvalitativnog gledišta, čini se da (a) struktura daje bolji dobitak u smislu krutosti u odnosu na tradicionalni dio s jednakom masom i pomakom s istom masom. Ovaj primjer govori u prilog činjenici da aditivna proizvodnja može biti strateški način smanjenja strukturnih težina u zrakoplovima: ako se krutost kao kriterij koristi tijekom faze projektiranja, korištenjem aditivno proizvedenih struktura se može smanjiti težina komponenti za 50%. Daljnje studije za procjenu ponašanja struktura umorom pokazuju prednost rešetkastih i nekonvencionalnih struktura. Detaljna analiza dijelova zrakoplovnih vozila optimizirane rešetkaste strukture pokazuje složenost pri preciznoj procjeni smanjenja težine. Javljaju se brojna pitanja uključujući svojstva materijala prije i nakon aditivne proizvodnje, ponašanje na zamor, otkrivanje nedostataka te regulacija.



Takva analiza ne zahvaća ovaj rad. Ponuđene su procjene troškova. Trošak proizvodnje koji obuhvaća interni dio bez dobiti tvrtke za (a) rešetkasti dio je bio procijenjen na 1890 € korištenjem izravnog metalnog laserskog stroja za sinteriranje (DMLS) i praha AlSi7Mg0.6 (A357). Vrijeme potrebno za proizvodnju nosača iznosi 18 sati. Tradicionalno gušći dio koji pruža istu funkcionalnost može se proizvesti od aluminija AA2024 s tehnikama uklanjanja strugotine u 4 sata uz internu cijenu za oko 150 €. Nakon FEM analize, uštedena masa dijelova dobivenih aditivnom proizvodnjom se procjenjuje na 0,547 kg (1,208 kg mase za gusti dio, 0,634 kg za aditivno proizvedeni dio). Pretpostavljajući prosječni životni vijek komercijalnog zrakoplova (H) na 1200000 sati leta, aerodinamičnu učinkovitost leta (E) na 15, specifičnu potrošnju goriva za potisak (TSFC) na 10 g/kN/s, emisiju CO<sub>2</sub> (COE) na 2,52 kg/litra, gustoću mlaznog goriva (q) na 0,85 kg/litra, gravitaciju (g) 9,81 m/s<sup>2</sup>, razliku u potisku motora (TDT) s aditivno proizvedenim dijelom je:  $\Delta T = \frac{g \cdot \Delta m}{E} = \frac{9,81 \cdot 0,547}{15} = 0,358N$

Masa goriva (mf) potrebna za postizanje ovog potiska duž životnog vijeka zrakoplova može se grubo procijeniti (koristeći konstantni TSFC = 0,036 Kg/N/h):

$$m \cdot f = TSFC \cdot H \cdot \Delta T = 0,0358 \cdot 120000 \cdot 0,36 = 1546 \text{ kg}$$

Ušteda emisije CO<sub>2</sub> (DC) korištenjem aditivno proizvedenog dijela duž zrakoplovnog

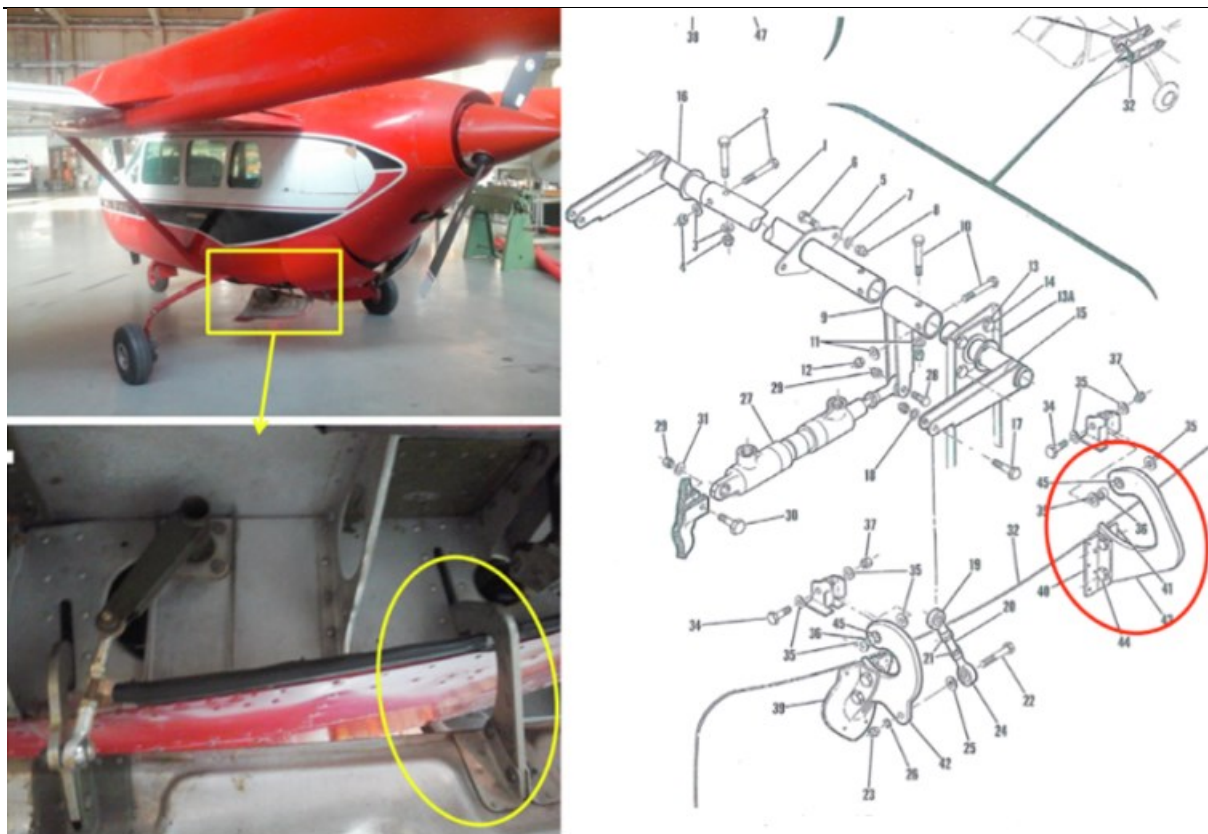
$$\text{životnog vijeka je: } \Delta C = \frac{m \cdot f \cdot COE}{\rho} = \frac{1546 \cdot 2,52}{0,85} = 4,583 \text{ t}$$

Mogu se dobiti još impresivnije brojke smanjenja težine konstrukcije ako je ona jednaka većem smanjenju (do čak 2-3 puta) maksimalne težine pri polijetanju gdje treba uzeti u obzir i proračun potiska, budući da je korisni teret isti. Za očekivati je da će se troškovi aditivne tehnologije značajno smanjiti u sljedećih godina, donoseći veće uštede.

#### 4.2. Studij slučaja proširene stvarnosti [24]

Proširena stvarnost se može koristiti u zrakoplovstvu kao podrška održavanju na nekoliko načina. Ilustrirani katalogi dijelova temeljeni na proširenoj stvarnosti, proširena stvarnost baziran na priručnicima za održavanje, softver za daljinsko održavanje temeljen na alatima proširene stvarnosti, podržane operacije sklapanja/rastavljanja samo su neke od stvari koje pruža proširena stvarnost. Proširena stvarnost može biti korisna za izbjegavanje problema između tradicionalnog priručnik s listovima gdje pojednostavljene dvodimenzionalne skice predstavljaju složene komponente i stvarnost gdje su složeni 3D oblici (ponekad skriveni oblogama ili drugim komponentama) koji se moraju otkriti i sastaviti pomoću alata i pravilnog

rukovanja. Zrakoplovi, helikopteri, brodovi, automatski strojevi mogu biti sastavljeni od milijuna dijelova s tisuće nizova održavanja koji uključuju nekoliko dijelova koji se moraju sastavljati i rastavljati pa proširena stvarnost može biti korisna u naprednim granama inženjerstva gdje je teško raditi na ispravan način. CAA (eng. Corporate Aircraft Association - uprava za civilno zrakoplovstvo) je otkrila da su glavni uzroci kvarova u održavanju: netočna ugradnja komponenti, ugradnja pogrešnih dijelova, električna nedosljednosti u ožičenju, labavi predmeti (alati, itd.) ostavljeni u zrakoplovu, neadekvatno podmazivanje, ne osigurani poklopci, pristupne ploče i oplata te igle za zaključavanje tla stajnog trapa koje nisu uklonjene prije polijetanja. Pozivajući se na SHELL pristup, sve ove pogreške mogu biti objašnjene lošom vezom hardver ili softvera s ljudima koji koriste računalo. Proširena stvarnost može biti korisna za rješavanje oba ova problema. Prošireni CAD modeli mogu biti korisni za proizvodnju, smanjenje pogreški gdje su položaj i vrsta dijelova neusklađeni. S druge strane, virtualni izbornici u kojima operater može kontrolirati redosljed operacija koje treba učiniti, što pomaže u smanjenju preskakanja faza i operacija. Za procjenu učinka uvođenja proširene stvarnosti u održavanje zrakoplova, provedena je studija slučaja na Sveučilištu u Bologni. U ovoj se aplikaciji proširena stvarnost koristi za superponiranje vanjskog prikaza kamere koja prenosi različite vrste informacija: CAD modela, simbola, natpisa, gumba koje operater može pritisnuti. Realni 3D CAD model komponenti koje treba održavati prikazane su na video prijenosu. Hardver koji se koristi u ovom testu su: Hololensove naočale i po izboru ručni upravljač. Kursor se može pomicati na virtualnom ekranu i kada se pritisne upravljač (koji se naziva Hololens kliker) dogodi se radnja. Na taj je način moguće implementirati virtualne izbornike kojima korisnik može upravljati pokretima glave i pritiskom prsta na kontroler. Postupak održavanja za zrakoplov općeg zrakoplovstva Cessna 337 u vlasništvu Sveučilišta Bologne proveden je za "Uklanjanje vrata kotača glavnog zupčanika i aktivatora na dijelu 5-41(desni dio slike 23)".



**Slika 21. Cessna 337 i vrata podvozja [24]**

Sljedeća slika 21 (desno) prikazuje originalni Cessnin katalog ilustriranih dijelova gdje su označeni i skicirani dijelovi za održavanje. Lijevi dio slike 21 prikazuje sliku zrakoplova Cessna 337 i uvećani dio vrata podvozja. Zaokruženi dio naziva se stražnji zglob. Proširena stvarnost se iskorištava na dva načina. Integriran je interaktivni izbornik koji prikazuje indeks odjeljaka priručnika za održavanje (od "1-Općenito" do „18-Dijagrami ožičenja") i faze zadatak 5–41 (od a do i). Kada je zadatak baviti se posebnim dijelom, njegov CAD model superponiran je na video prijenosu u stvarnom vremenu pomoću kamere Hololens kako bi pomogao vođitelju održavanja u otkrivanju dijelova. Slika 21 lijevo prikazuje implementaciju odjeljka 1–3 ručnog održavanja Cessne 337, dok su desno prikazane sekvence 4–6. Svi nazivi odjeljaka mogu se pomicati pritiskom na desni i lijevi trokutasti gumb na dnu izbornika. Pritiskom na jedan od gumbi koji opisuju odjeljak, izbornik druge razine prikazuje popis zadataka navedenih u odjeljku. Također, u ovom slučaju pritiskom na desni i lijevi trokutasti gumbi zadaci se mogu pomicati. Jednom kada je odabran određeni zadatak održavanja (npr. 5–41), popis faza koje se trebaju provesti (npr. 5–41-a 5–41-i) navedene su u izborniku. Središnji gumb M otvara popis odjeljaka 1–3 i može se koristiti za postavljanje drugih zadataka koje treba izvršiti u različitim odjelima. Gumb označena brojem i nazivom odjeljka (npr. odjeljak 5 START) pokazuje popis prvih zadataka odjeljka. Kada faza zadataka zahtijeva rad na određenom dijelu, virtualne

oznake, CAD modeli i strelice postavljene su kako bi podržali korisnika u otkrivanju komponenti i predlaganju ispravnih načina rada.



**Slika 22. Meni zadatka 5-42h [24]**

Slika 22 predstavlja zadatak 5–41-h. CAD model stražnjeg zgloba bio je superponiran na vanjski kako bi se odmah otkrili dijelovi koje treba doraditi. Opterećenje održavatelja značajno je smanjeno u usporedbi s onim koji koristi priručnik. Točnosti operacija i ušteda vremena značajno su povećani pri obavljanju zadatka. Ovaj dobitak može biti još dramatičniji za velike komercijalne zrakoplove/helikoptere, gdje su složene operacije potrebne, kao i mnoge komponente (ponekad su teško prepoznatljive na papirnatom priručniku) koje se moraju upravljati ispravnim redoslijedom u sklopu postupaka sastavljanja i rastavljanja. Za podršku korisnosti proširene stvarnosti u zrakoplovnom održavanju i pružanju podataka, procjena vremena potrebnog za pronalaženje specifičnog zadatka održavanja je ostvarena. Grupa od 10 ljudi vještih u aeronautici zamoljeni su da pronađu proceduru 5–41 u papiru Cessna 337 priručnika za održavanje. Priručnik uključuje preko 800 stranica A4 i A3 listova. U nastavku, nakon kraćeg informiranja o Hololensovim radnim procedurama, korisnici su zadržali naočale i potreban postupak procedure je napravljen pomoću implementiranih virtualnih izbornika za ovaj cilj. Prosječno vrijeme potrebno za pronalaženje zadatka 5–41 s papirnatih priručnika bilo je 26,5 s, a uz korištenje Hololensovih naočala (i klikera kontrolera) prosječno vrijeme je smanjeno na 19,4 s, s padom od oko 27% u vremenu.

### 4.3. Studija slučaja strojnog učenja

U ovom primjeru korištene su numeričke metode koje su implementirane u sustav kako bi pratile rad motora u optimalnim uvjetima i kreirale bazu podataka očekivanih vrijednosti praćenih parametara. Cilj je bio povezati mjerljive vrijednosti motora sa stanjem motora („zdravljem“). Glavne vrijednosti koje najbolje prikazuju promjene u mlaznom motoru su: maseni protok i efikasnost. Strojno učenje je korišteno kako bi se predvidjele performanse mlaznog motora i kako bi se provjeravalo stanje motora u svim uvjetima. Uspoređivanjem poznatih vrijednosti parametara, s trenutnim vrijednostima parametara pratilo bi se dolazili do smanjenja performansi motora.

Najčešće pojave smanjenja performansi mlaznog motora uzrokovane su erozijom, prljavštinom te otpadanjem krhotina, tj. njihovim utjecajem na aerodinamiku lopatica.

Prljavština je najčešći razlog pogoršanja stanja kompresora. Čak 70-85% degradacije rada mlaznog motora uzrokovano je njome. Izvori stvaranja prljavštine su: prašina, zemlja, pijesak, pepeo, čestice ugljika i ulja i slično. Pozitivna stavka ovog problema je ta što je moguć povratak na optimalno radno stanje motora. Čišćenjem onečišćenih dijelova može se smanjiti njihov utjecaj na stanje mlaznog motora ili čak u potpunosti eliminirati.

Drugi uzrok je erozija. Erozija je uzrokovana abrazivnim česticama koje se nalaze u zraku ili plinu koji prolazi kroz mlazni motor ili ulaze u motor putem goriva (posebno opasan slučaj). Ona mijenja hrapavost površine, povećava razmak između vrhova lopatica, otupljuje napadne rubove lopatica itd., te tako smanjuje performanse motora.

U sljedećem dijelu teksta ukratko će biti opisana primjena strojnog učenja na konkretnom primjeru obrađenom u literaturi. [25]

Motor korišten za ispitivanje je Rolls Royce VIPER 632-43. Korištena su podaci tijekom tri leta, skupovi podataka prvog i drugog leta kao podaci za treniranje, te skup podataka trećeg leta za testiranje. Svaki skup podataka sastoji se od 75 referentnih točaka, po 25 točaka korišteno je za svaku od tri faze leta: fazu polijetanja, krstarenja i slijetanja. Uvedeni su stupnjevi degradacije za dva glavna dijela mlaznog motora, kompresora i turbine, te su uvedeni instrumenti koji su trenirani za detekciju kvara, odnosno promjena, na tim dijelovima.

Korišteni ulazni podaci za trening i testiranje, Xtrain i Xtest, su:

- visina leta – Alt,
- Machov broj –Mach,

- postotak rotacijske brzine - %N a dobiveni izlazni podaci za trening i testiranje,

$Y_{\text{train}}$  i  $Y_{\text{test}}$  su:

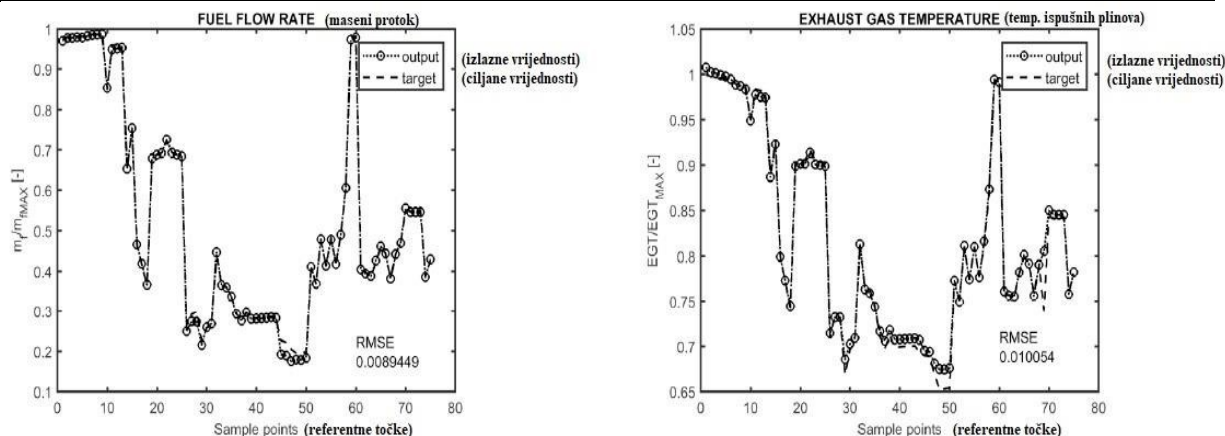
- maseni protok –  $m$  ,
- temperatura ispušnih plinova – EGT .

Degradacija u radu motora s obzirom na promatrane dvije komponente moguća je u tri slučaja kako je prikazano u tablici

**Tablica 3. Stupnjevi degradacije rada motora [25]**

<b>RADNO STANJE</b>	<b>OZNAKA SLUČAJA</b>	<b><math>\eta_{\text{kompresor}}</math></b>	<b><math>\eta_{\text{turbina}}</math></b>
optimalno („zdrav“)	0	0.90	0.89
degradacija rada kompresora	1	0.85	0.89
		0.80	
		0.77	
degradacija rada turbine	2	0.90	0.84
			0.79
			0.76
degradacija rada kompresora i turbine	3	0.85	0.84
		0.85	0.79
		0.80	0.84

U tablici 3. prikazana su četiri slučaja radnog stanja motora, optimalno radno stanje, degradacija jedne od komponenti te degradacija obje komponenti istovremeno. U drugom stupcu nalazi se oznaka slučaja pojave degradacije. Korištenjem izlaznih podataka, vrijednosti masenog protoka i temperature ispušnih plinova, može se odrediti o kojem slučaju degradacije se radi. U posljednja dva stupca vidljiva je promjena stupnja efikasnosti kompresora i turbine. Vidljivo je da pri degradaciji jedne od komponenti druga promatrana komponenta zadržava optimalni stupanj efikasnosti. U konačnici rezultat koji dobijemo provođenjem strojnog učenja na ovom primjeru prikazan je na slici 3.



Slika 23. Izlazni podaci [25]

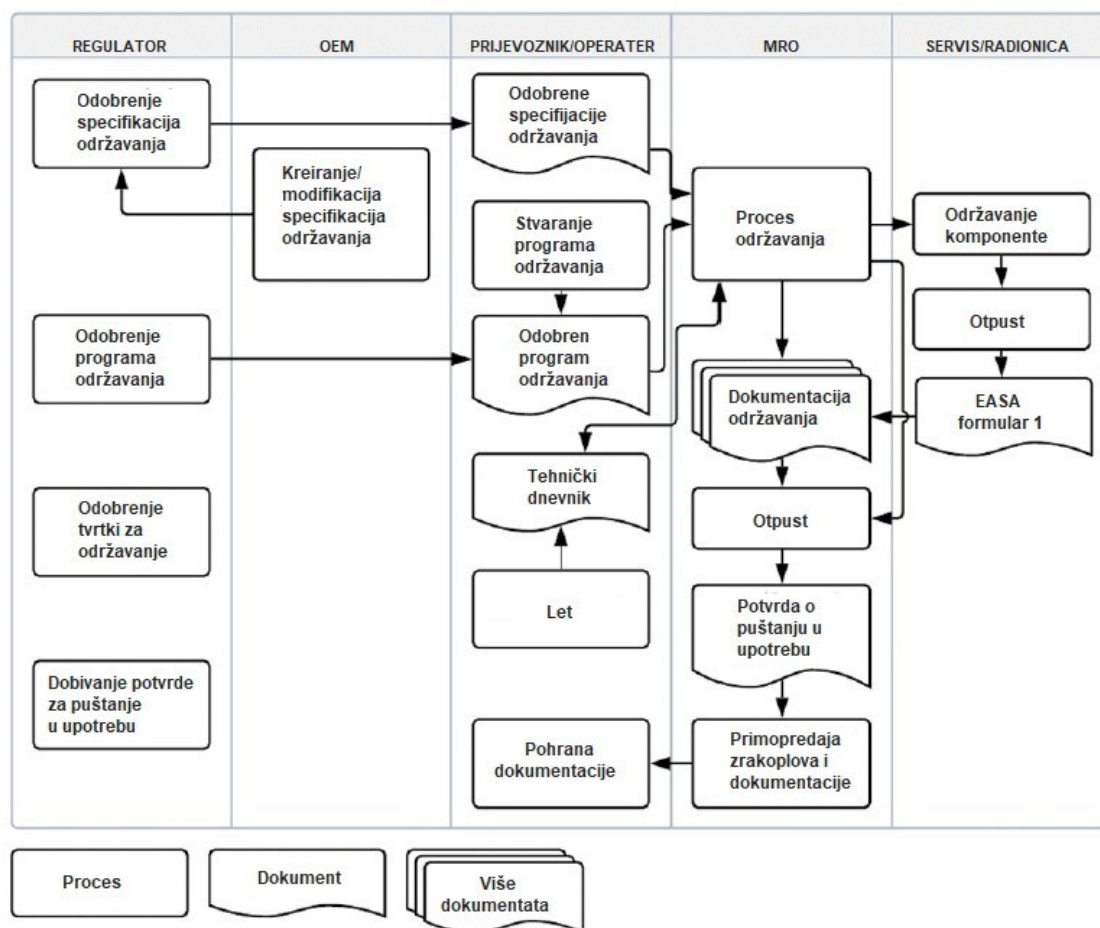
Kako je vidljivo sa slike 23., dobivene izlazne vrijednosti u referentnim točkama odgovaraju očekivanim vrijednostima na temelju izlaznih podataka za treniranje. S obzirom na prikazane rezultate može se zaključiti da ovakav model dobro predviđa stanje sustava, odnosno komponenti sustava. S obzirom da se u ovom slučaju koristila relativno mala količina podataka, možemo pretpostaviti da bi se i pri većim količinama podataka dobili dobri rezultati, ako ne i bolji.

Rolls Royce je već 2018. započeo s implementacijom strojnog učenja na svoje motore. Kako oni svojim kupcima nude ugovore pri kojima kupac plaća s obzirom na koliko sati motor leti, njima je u cilju da njihovi motori što duže vremena provedu u eksploataciji. Dijelovi motora s vremenom se sve više troše, pa se tako i efikasnost motora s vremenom smanjuje. Problem na koji je naišla tvrtka Rolls Royce je kako odlučiti kada je vrijeme da se motori skinu i da se obavi održavanje. Također, potrebno je znati i koje komponente trebaju popravak ili zamjenu. S obzirom da je u tadašnje vrijeme Rolls Royce imao oko 13000 motora u eksploataciji, a sada vjerojatno i više, svaka i najmanja nadogradnja u načinu održavanja donosi velike uštede. Upravo uvođenjem i korištenjem strojnog učenja oni su unaprijedili svoje poslovanje. Inženjeri sada, uz redovne inspekcije, u stvarnom vremenu prate razinu trošenja dijelova te rad motora. [26]



#### 4.4. Studij slučaja za blockchain tehnologiju

Kako se blockchain tehnologija svakoga dana sve više razvija i napreduje, bilo je za očekivati kako će ubrzo početi prodirati u druge industrije. Tako se blockchain tehnologija počela implementirati u zrakoplovnu industriju, posebice u dijelove vezane uz održavanje zrakoplova. Održavanje zrakoplova kompleksan je proces koji zahtjeva mnogo planiranja i organizacije, ali i potrebnih stručnjaka za izvršavanje poslova održavanja. Kako zrakoplovi stvaraju profit samo dok lete, vrlo je važno ograničiti njihovo vrijeme na zemlji. Zbog svoje kompleksnosti upravo je primjena blockchain tehnologije prigodna za implementaciju kako bi se cijeli proces ubrzao i olakšao. Problemi poput gubitka zapisnika o održavanju ili ugrađivanja neodgovarajućih zamjenskih dijelova bili bi stvar prošlosti. Kako održavanje zrakoplova zahtijeva suradnju velikog broja tvrtki, dolazi do problema nesinkroniziranih podataka. Na slici 24. prikazan je tijek procesa održavanja zrakoplova koji uključuje suradnju velikog broja tvrtki. [27]

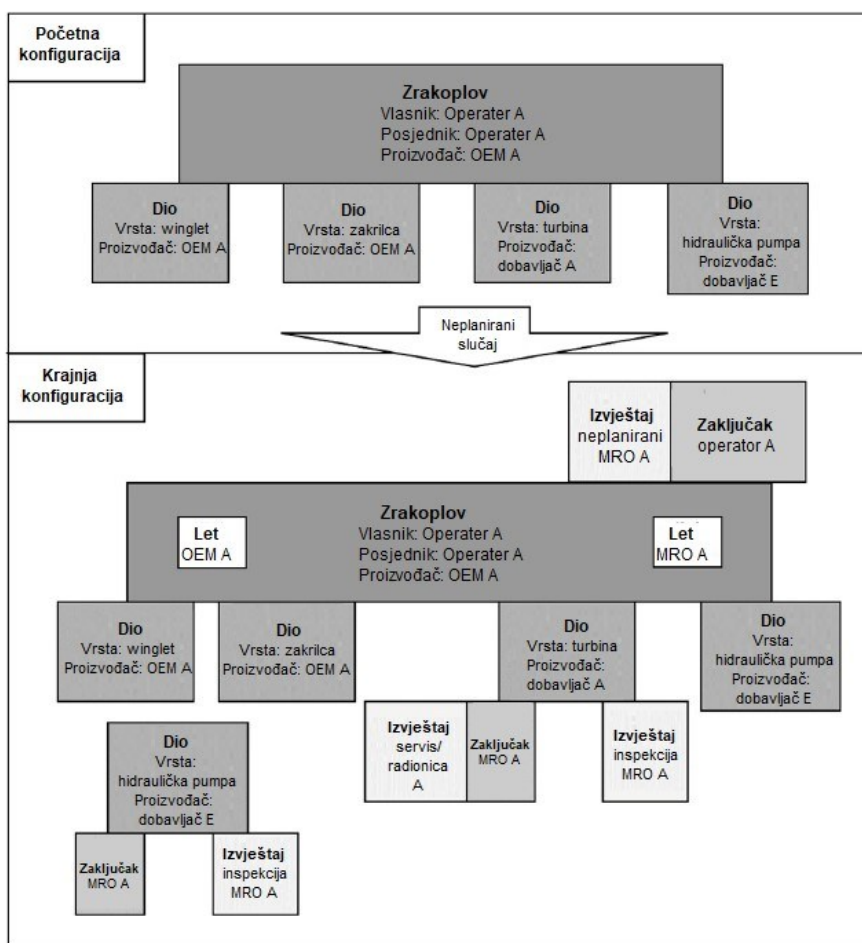


Slika 24. Proces održavanja zrakoplova[27]

Bitno je naglasiti da svaka od tih tvrtki posjeduje samo podatke koji su nužni za izvršavanje njihovih dužnosti, a u stvarnosti bi mogli poboljšati svoje poslovanje ukoliko bi im bile

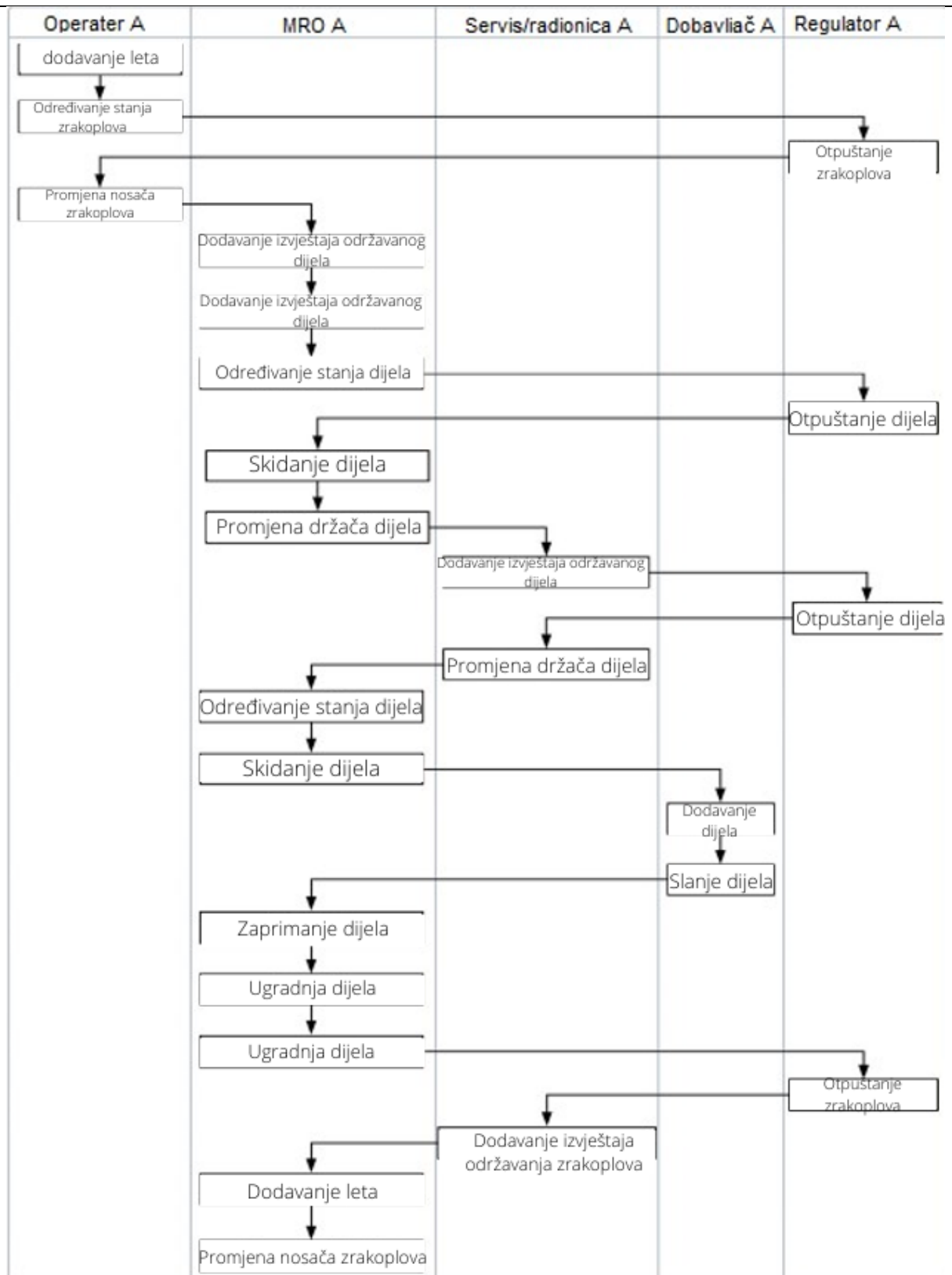


dostupne dodatne informacije. Naravno, što je tvrtka veća i odrađuje više poslova, npr. poslove održavanja i ujedno je proizvođač originalnih dijelova za zrakoplove ili skraćeno OEM (eng. Original Equipment Manufacturer), ta tvrtka posjeduje više podataka od manjih tvrtki na istom području te samim time ima veću mogućnost da monopolizira tržište. S primjenom blockchain tehnologije ovaj problem bi se riješio i manje tvrtke bi dobile mogućnost za proširivanje svog poslovanja. Jedna od mreža koja se počinje koristiti u ovu svrhu je Hyperledger Fabric. Hyperledger Fabric je privatna konzorcijska blockchain mreža i razvijena je za korištenje u poslovnom sustavu te pruža mogućnost prilagođavanja potrebnom sustavu. [21] Kako je već navedeno, cilj održavanja je što manje zadržati zrakoplov na zemlji te se zbog toga svako potrebno održavanje mora isplanirati kako bi bilo učinjeno u što kraćem roku uz što manje troškove. Problem nastaje kada dođe do neplaniranog održavanja. U tom slučaju je vrlo teško doći do potrebnih dijelova u vrlo kratkom roku te samim time avionske kompanije imaju velike gubitke. Prikaz početne i krajnje konfiguracije dijelova u slučaju neplaniranog održavanja zbog udara ptice prikazan je na slici 25. [26]



Slika 25. Početna i krajnja deformacija dijelova u slučaju neplaniranog održavanja [27]

Kako je vidljivo na slici 25., nakon udara ptice avion je maknut iz službe i nema dozvolu za daljnje letenje dok se ne obavi popravak. Tvrtka za održavanje preuzima avion i pronalazi oštećenja na turbini i hidrauličkoj pumpi. Hidraulička pumpa mora biti zamijenjena, a turbina mora biti poslana u servis na popravak. Kako tvrtka za održavanje nema hidrauličke pumpe na skladištu potrebno ju je naručiti od dobavljača i zatim ugraditi u avion. U međuvremenu je turbina popravljena, potvrđena je njena plovidbenost i turbina je poslana natrag tvrtki za održavanje na ugradnju. Nakon što je probni let napravljen izdaje se potvrda plovidbenost aviona. U konačnici zrakoplov se vraća vlasniku aviona. Primjenom blockchain tehnologije ovaj problem bi se brže riješio. Naime, ukoliko bi se koristila blockchain tehnologija na način da se svaki proizvedeni dio uvede u blockchain. Npr., kada OEM proizvede dio uvede ga u blockchain i od tog trenutka nadalje svako kretanje tog dijela (premještanje iz jednog skladišta u drugo, dostava kupcu) i rad na tom dijelu unosilo bi se u kao novi blok. Tako uveden dio u blockchain pruža svim korisnicima da u svakom trenutku mogu vidjeti gdje se dio nalazi, kakve su promijene napravljene na njemu i kada. U navedenom slučaju bile bi izvršene 24 transakcije između različitih sudionika kako je prikazano na slici 26. [27]



**Slika 26. Transakcije između različitih sudionika u slučaju neplaniranog održavanja [27]**

Transakcije prikazane na slici 26. pohranjene su u blockchainu i na taj način postaju trajne. Transakcije na slici 26. ostavljene su u izvornom obliku (na engleskom jeziku) jer se tako unose u blockchain mrežu.

## 5. ZAKLJUČAK

Četvrta industrijska revolucija nosi brojne nove tehnologije (IoT, big data, umjetna inteligencija, aditivna proizvodnja itd.) koje će izmjenjivati i obrađivati podatke, povezati i pratiti gotovo sve aspekte naših života, optimizirati sve vrste sustava, sugerirati i autonomno izvršavati brojne zadatke koji bi mogli biti korisni, teški, stresni ili opasni za ljude. Zrakoplovstvo kao stroga grana industrije po pitanju sigurnosti će tu tehnologiju najprije morati dovesti do praktički savršenstva prije njene same implementacije, naročito se to odnosi na zračni promet. Danas već možemo vidjeti kako koncepti industrije 4.0 pomažu u proizvodnji i održavanju zrakoplova i za vjerovati je da će se kroz nekoliko godina zrakoplovna industrija razvijati u smjeru industrije 4.0 poprimajući mnoge beneficije koje ona nudi. Prije svega potrebno je odgovoriti na mnoga pitanja. Do koje mjere se treba prepustiti kibernetско-fizičkom sustavu? Može li taj sustav uvijek raditi bez greške? Do koje mjere su računala u mogućnosti zamijeniti čovjeka? Ova i mnoga druga slična pitanja pokazuju da još uvijek ima mjesta za napredak i da nijedan sustav nije savršen i bez mane. Život bez današnjih uređaja je nezamisliv te je izrazito važno biti u korak s tehnologijom radi poboljšanja kvalitete života i boljeg snalaženja u svakodnevnim aktivnostima i zadacima. Budućnost je nepredvidiva, sve veći broj pametnih uređaja i strojeva nagovještava potpunu automatizaciju i digitalizaciju. Tu se u pitanje dovodi i funkcija samog čovjeka. Ljudi će trebati biti sve obrazovaniji i stručniji da bi mogli pratiti razvoj budućih tehnologija. Slijedom okolnosti otvaraju se mogućnosti i 5.industrijske revolucije. Koliko daleko će stići tehnologija, pokazat će samo vrijeme.

**LITERATURA**

- [1] [https://www.emnify.com/blog/industry-4-0?utm\\_term=&utm\\_campaign=SEA-EN-EUR\\_EN-MC-DSA-NoFu-DSA\\_Pilot&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&hsa\\_acc=2935385868&hsa\\_cam=13920402211&hsa\\_grp=141955398888&hsa\\_ad=596982389444&hsa\\_src=g&hsa\\_tgt=dsa-1656931467777&hsa\\_kw=&hsa\\_mt=&hsa\\_net=adwords&hsa\\_ver=3&gclid=EAIAIQobChMIytaTptX7-QIVRBV7Ch1I4A18EAAYAyAAEgKjG\\_D\\_BwE](https://www.emnify.com/blog/industry-4-0?utm_term=&utm_campaign=SEA-EN-EUR_EN-MC-DSA-NoFu-DSA_Pilot&utm_source=google&utm_medium=cpc&hsa_acc=2935385868&hsa_cam=13920402211&hsa_grp=141955398888&hsa_ad=596982389444&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-1656931467777&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=EAIAIQobChMIytaTptX7-QIVRBV7Ch1I4A18EAAYAyAAEgKjG_D_BwE), pristupljeno 5.9.2022.
- [2] Sharma, A. K., Bhandari, R., Pinca-Bretotean, C., Sharma, C., Dhakad, S. K., & Mathur, A. (2021). *A study of trends and industrial prospects of Industry 4.0. Materials*
- [3] [https://bib.irb.hr/datoteka/830338.Strojarski\\_izazov\\_SB\\_Veza.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/830338.Strojarski_izazov_SB_Veza.pdf), pristupljeno 8.9.2022.
- [4] <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/what-is-the-iot/>, pristupljeno 8.9.2022.
- [5] <https://seecontrol.com/what-is-iot-the-internet-of-things-explained>, pristupljeno 8.9.2022.
- [6] <https://www.vectorstock.com/royalty-free-vector/cyber-physical-systems-icon-set-four-elements-vector-27540415>, pristupljeno 9.9.2022.
- [7] <https://marketplace.inti.co.id/product/big-data-analytics/>, pristupljeno 11.9.2022.
- [8] <https://www.investopedia.com/terms/c/cloud-computing.asp>, pristupljeno 11.9.2022.
- [9] <https://www.cis.hr/www.edicija/LinkedDocuments/NCERT-PUBDOC-2010-03-293.pdf>, pristupljeno 12.9.2022.
- [10] <https://all3dp.com/1/what-is-3d-printing/>, pristupljeno 13.9.2022.
- [11] <https://www.intechopen.com/chapters/59838>, pristupljeno 13.9.2022.
- [12] [https://www.researchgate.net/figure/A-primary-flight-display-PFD-of-Airbus-A320\\_fig1\\_337510742](https://www.researchgate.net/figure/A-primary-flight-display-PFD-of-Airbus-A320_fig1_337510742), pristupljeno 14.9.2022.
- [13] [http://hibdz.skydiving.co.uk/757/767\\_tech/warning\\_systems/gpws.htm](http://hibdz.skydiving.co.uk/757/767_tech/warning_systems/gpws.htm), pristupljeno 14.9.2022.
- [14] <https://www.theagilityeffect.com/en/article/smart-glasses-aid-maintenance/>, pristupljeno 14.9.2022.
- [15] <https://www.aviationtoday.com/2016/11/28/can-ibms-watson-fit-in-the-cockpit-of-the-future/>, pristupljeno 14.9.2022.

- [16] <https://www.digitaltrends.com/wearables/easyjet-wearable-tech-uniforms/>, pristupljeno 14.9.2022.
- [17] <https://www.hilarispublisher.com/open-access/advances-of-industry-40-concepts-on-aircraft-construction-an-overviewof-trends-2472-0437-1000125.pdf>, pristupljeno 14.9.2022.
- [18] <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>, pristupljeno 14.9.2022.
- [19] <https://www.designsociety.org/publication/40651/MODEL-BASED+DECISION+SUPPORT+FOR+VALUE+AND+SUSTAINABILITY+ASSESSMENT%3A+APPLYING+MACHINE+LEARNING+IN+AEROSPACE+PRODUCT+DEVELOPMENT>, pristupljeno 14.9.2022.
- [20] <https://medium.com/analytics-vidhya/combining-data-science-and-machine-learning-with-the-aviation-industry-a-personal-journey-through-132e59d8380b>, pristupljeno 15.9.2022.
- [21] <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ie/Documents/Tax/Airfinance%20Journal%201.pdf>, pristupljeno 15.9.2022.
- [22] <https://aertecsolutions.com/en/2021/09/20/blockchain-in-airports/>, pristupljeno 16.9.2022.
- [23] <https://datascience.aero/blockchain-enhance-aircraft-maintenance/>, pristupljeno 16.9.2022.
- [24] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2288430018302781>, pristupljeno 17.9.2022.
- [25] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218304028>, pristupljeno 17.9.2022.
- [26] <https://digital.hbs.edu/platform-rctom/submission/rolls-royce-optimising-jet-engine-maintenance-with-machine-learning/>, pristupljeno 17.9.2022.
- [27] <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/209382/1/hicl-2019-27-469.pdf>, pristupljeno 18.9.2022.