

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

САОБРАЋАЈНИ ФАКУЛТЕТ

Бранимир Стојиљковић

**МЕТОДОЛОГИЈА ЗА СТРАТЕШКО  
ПЛАНИРАЊЕ И ОДЛУЧИВАЊЕ У ПРОЦЕСУ  
ОДРЖАВАЊА ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА**

докторска дисертација

Београд, 2016

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Branimir Stojiljković

**METHODOLOGY FOR STRATEGIC PLANNING  
AND DECISION MAKING IN THE PROCESS OF  
TURBOFAN ENGINE MAINTENANCE**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

---

**Ментор:** **др Љубиша Васов**, редовни професор,  
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

**Чланови комисије:** **др Љубиша Васов**, редовни професор,  
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

**др Оља Чокорило**, ванредни професор,  
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

**др Небојша Петровић**, ванредни професор,  
Универзитет у Београду – Машински факултет

**Датум одбране:** \_\_\_\_\_

---

*МИХАЈЛУ, који је научио да тата у свом лап-топу поред игрица има  
„неки докторат“ и иде на „посао“ да би постао „доктор за авионе“,  
ЛИДИЈИ, која се у ретким приликама увек обрадује када ме види,  
МИЛЕНИ, која је успешно преузела све обавезе и бригу о деци,  
БОЖИДАРУ и ВЕРИ, који су ми омогућили ово путовање,  
ЉУБИШИ, који је имао превише стрпљења за мене,  
НАЈБЛИЖИМА, који су све време били уз мене,  
И СВИМА, који су ми помогли на овом путу,  
ХВАЛА ВАМ НА ПОДРШЦИ И СТРПЉЕЊУ!*

---

# МЕТОДОЛОГИЈА ЗА СТРАТЕШКО ПЛАНИРАЊЕ И ОДЛУЧИВАЊЕ У ПРОЦЕСУ ОДРЖАВАЊА ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА

## Резиме

У овој дисертацији се истражује могућност унапређења квалитета одлучивања у процесу радионичког одржавања турбофенских мотора, стратешким планирењем обима и садржаја радова на унапред изабраном броју разматраних посета радионици.

Приказан је основни концепт одржавања турбофенских мотора и обрађене су технике за утврђивање и праћење стања мотора и тренда перформанси. Погоршање перформанси главних модула мотора и истрошеност ресурса делова са ограниченим радним веком су идентификовани као главни узроци скидања мотора са авиона који се користе на краћим дужинама лета.

Изложена је структура трошкова одржавања мотора и изведен је аналитички израз за трошкове делова са ограниченим радним веком у функцији каталожке цене делова, одлука о замени делова на претходним посетама радионици и остварених циклуса рада у појединим категоријама потиска.

На основу података о реализованим скидањима мотора типа *CFM56-3*, применом вишеструке линеарне регресије, формиран је модел за предвиђање очекиваних циклуса рада до скидања ради обнове перформанси у функцији планираног начина оперативне употребе авиона.

---

Направљен је модел за доношење оптималних одлука о замени делова са ограниченим радним веком и обиму радова над модулима, којима се минимизирају будући очекивани директни трошкови радионичког одржавања за претходно изабрани број разматраних посета радионици и планирани начин оперативне употребе мотора.

**Кључне речи:** турбофен, одржавање, посета радионици, доношење одлука, стратешко планирање, трошкови одржавања, делови са ограниченим радним веком, погоршање перформанси, праћење стања.

**Научна област:** Ваздушни саобраћај и транспорт

**Ужа научна област:** Ваздухопловна превозна средства

**УДК број:** 629.7.036.3:628.147.2(043.3)

---

# METHODOLOGY FOR STRATEGIC PLANNING AND DECISION MAKING IN THE PROCESS OF TURBOFAN ENGINE MAINTENANCE

## **Abstract**

This thesis explores the possibilities of improving the quality of decision making in the process of turbofan engine shop maintenance, through strategic planning of workscopes on the pre-selected number of analysed shop visits.

The basic concept of turbofan engine maintenance and techniques for identifying and monitoring engine condition are described. Performance deterioration of the main engine modules and expiry of the life limited parts have been identified as the main causes of removals for engines operating on short-haul operations.

The structure of engine maintenance costs is presented. Analytical expression for the cost of life limited parts as a function of the list price, the decision to replace parts on previous shop visits and the cycles accumulated in the appropriate engine thrust category is derived.

Based on the data of *CFM56-3* engine performance removals, multiple linear regression model is formed to predict the expected number of cycles until next performance removal as a function of a planned operational use of aircraft.

---

A model for making optimal decisions about the replacement of life limited parts and module worksopes, which minimizes the future expected direct engine shop maintenance costs for the considered pre-selected number of shop visits and planned operational use of engine is developed.

**Keywords:** turbofan, maintenance, shop visit, decision making, strategic planning, maintenance cost, life limited parts, performance deterioration, condition monitoring.

**Scientific Field:** Air Transport and Traffic

**Field of Academic Expertise:** Aircraft

**UDC Number:** 629.7.036.3:628.147.2(043.3)



---

# САДРЖАЈ

---

САДРЖАЈ.....	IX
СПИСАК СЛИКА.....	XII
СПИСАК ТАБЕЛА.....	XIV
СПИСАК СКРАЋЕНИЦА.....	XV
<b>1 УВОД.....</b>	<b>1</b>
1.1 НАУЧНИ ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА.....	4
1.2 ПРЕГЛЕД РАСПОЛОЖИВЕ ЛИТЕРАТУРЕ И ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА У ОБЛАСТИ ОДРЖАВАЊА.....	6
1.3 СТРУКТУРА РАДА.....	12
<b>2 ОДРЖАВАЊЕ ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА.....</b>	<b>15</b>
2.1 РАЗВОЈ ОДРЖАВАЊА ТУРБИНСКИХ МОТОРА.....	16
2.2 ПРИМАРНИ ПРОЦЕСИ ОДРЖАВАЊА.....	24
2.3 MSG-3 МЕТОДА.....	25
2.4 КОНЦЕПТ ОДРЖАВАЊА ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА.....	31
2.5 ПРОГРАМ ОДРЖАВАЊА И ПОУЗДАНОСТИ.....	33
2.6 РАДОВИ НА ОДРЖАВАЊУ ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА.....	34
<b>3 УТВРЂИВАЊЕ И ПРАЂЕЊЕ СТАЊА ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА.....</b>	<b>36</b>
3.1 ПРИКУПЉАЊЕ ПОДАКА.....	37
3.2 УРЕЂАЈИ ЗА ПРАЂЕЊЕ СТАЊА.....	38
3.3 ТЕХНИКЕ ЗА ДИЈАГНОСТИКУ СТАЊА МОТОРА.....	40
3.3.1 БОРОСКОПИЈА.....	41
3.3.2 АНАЛИЗА УЉА.....	44
3.3.3 ПРАЂЕЊЕ ВИБРАЦИЈА.....	48
3.3.4 ПРАЂЕЊЕ ТРЕНДА ПЕРФОРМАНСИ.....	50
3.4 РЕАЛИЗАЦИЈА СИСТЕМА ЗА ПРАЂЕЊЕ СТАЊА.....	54
<b>4 АНАЛИЗА ГЛАВНИХ УЗРОКА СКИДАЊА МОТОРА СА АВИОНА.....</b>	<b>56</b>
4.1 ДЕЛОВИ СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКОМ.....	57
4.2 EGT МАРГИНА.....	60

---

4.2.1	СЕРТИФИКАЦИЈА И УТВРЂИВАЊЕ EGT ЛИМИТА.....	61
4.2.2	ДЕФИНИЦИЈА EGT МАРГИНЕ.....	62
4.2.3	ФАКТОРИ КОЈИ УТИЧУ НА ВРЕДНОСТ EGT НА ПОЛЕТАЊУ.....	64
4.2.4	РАЗЛОЗИ ТРОШЕЊА EGT МАРГИНЕ.....	68
4.2.5	ИНТЕНЗИТЕТ ТРОШЕЊА EGT МАРГИНЕ.....	70
4.2.6	ОГРАНИЧЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ОКОЛНОГ ВАЗДУХА.....	73
4.2.7	ПРАЂЕЊЕ EGT МАРГИНЕ.....	75
4.2.8	ПРЕКОРАЧЕЊА EGT ОГРАНИЧЕЊА.....	76
4.3	ИНТЕНЗИТЕТ ПОСЕТЕ МОТОРСКОЈ РАДИОНИЦИ.....	78
<b>5</b>	<b>ТРОШКОВИ ОДРЖАВАЊА МОТОРА.....</b>	<b>83</b>
5.1	СТРУКТУРА ТРОШКОВА ОДРЖАВАЊА МОТОРА.....	86
5.2	ТРОШКОВИ РАДИОНИЧКОГ ОДРЖАВАЊА МОТОРА.....	87
5.3	ТРОШКОВИ ЗАМЕНЕ ДЕЛОВА СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКООМ.....	89
5.3.1	ОДРЕЂИВАЊЕ БРОЈА ПРЕОСТАЛИХ ЦИКЛУСА РАДА ДЕЛОВА СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКООМ.....	93
5.3.2	ОДРЕЂИВАЊЕ ТРОШКОВА ЗАМЕНЕ ДЕЛОВА СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКООМ ПРИ ПОСЕТИ МОТОРСКОЈ РАДИОНИЦИ.....	95
5.3.3	ТРОШКОВИ ИСКОРИШЋЕНОГ И НЕИСКОРИШЋЕНОГ РЕСУРСА ДЕЛОВА СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКООМ ПРИ ПОСЕТИ РАДИОНИЦИ.....	96
<b>6</b>	<b>АНАЛИЗА ОПЕРАТИВНИХ ФАКТОРА КОЈИ УТИЧУ НА ЧАСОВЕ РАДА МОТОРА НА АВИОНУ.....</b>	<b>100</b>
6.1	МАКСИМАЛНИ ПОТИСАК НА ПОЛЕТАЊУ.....	101
6.2	СТЕПЕН РАДНОГ ОПТЕРЕЂЕЊА МОТОРА.....	104
6.2.1	ДУЖИНА ЛЕТА.....	105
6.2.2	НИВО СМАЊЕЊА МАКСИМАЛНОГ ПОТИСКА НА ПОЛЕТАЊУ.....	107
6.2.3	ТЕМПЕРАТУРА ОКОЛНОГ ВАЗДУХА.....	112
6.2.4	ТИП РАДНЕ СРЕДИНЕ.....	113
6.3	КРИВЕ РАДНОГ ОПТЕРЕЂЕЊА МОТОРА.....	114
<b>7</b>	<b>МЕТОДОЛОГИЈА ЗА СТРАТЕШКО ПЛАНИРАЊЕ И ОДЛУЧИВАЊЕ У ПРОЦЕСУ РАДИОНИЧКОГ ОДРЖАВАЊА ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА.....</b>	<b>117</b>
7.1	ПОЛАЗНЕ ПРЕТПОСТАВКЕ.....	119
7.2	ПРЕДВИЂАЊЕ ОЧЕКИВАНИХ ЦИКЛУСА РАДА ДО СКИДАЊА РАДИ ОБНОВЕ ПЕРФОРМАНСИ.....	121
7.2.1	ПРВА ПОСЕТА РАДИОНИЦИ.....	125
7.2.2	ЗРЕЛЕ ПОСЕТЕ РАДИОНИЦИ.....	128
7.3	МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ОДЛУЧИВАЊА.....	132
7.3.1	ПРЕДВИЂАЊЕ ОЧЕКИВАНИХ ТРОШКОВА РАДИОНИЧКОГ ОДРЖАВАЊА МОТОРА CFM56-3 У ФУНКЦИЈИ РАЗМАТРАНИХ ОДЛУКА.....	134
7.3.2	ПРЕДВИЂАЊЕ ОЧЕКИВАНИХ ЦИКЛУСА РАДА ДО СКИДАЊА МОТОРА CFM56-3 У ФУНКЦИЈИ РАЗМАТРАНИХ ОДЛУКА.....	135
7.4	МАТЕМАТИЧКИ ОПИС МОДЕЛА ОДЛУЧИВАЊА.....	137
7.5	ПРИКАЗ ПРИМЕНЕ МОДЕЛА ОДЛУЧИВАЊА НА ПРАКТИЧНОМ ПРИМЕРУ.....	144
<b>8</b>	<b>ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА.....</b>	<b>157</b>

---

<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>159</b>
<b>ПРИЛОГ 1 .....</b>	<b>167</b>
<b>ПРИЛОГ 2 .....</b>	<b>178</b>
<b>БИОГРАФИЈА АУТОРА .....</b>	<b>179</b>

---

## СПИСАК СЛИКА

---

Слика 1.1 Модуларна конструкција мотора CFM56-3.....	2
Слика 2.1 Хронологија раста времена између ревизије P&W JT4 мотора [36].....	19
Слика 2.2 Логички дијаграм одлучивања првог нивоа MSG-3 анализе.....	27
Слика 2.3 Логички дијаграм одлучивања другог нивоа MSG-3 анализе.....	29
Слика 3.1 Основни елементи типичне конструкције крутог бороскопа.....	42
Слика 3.2 Шематски приказ RDE спектрометра за анализу уља .....	46
Слика 3.3 Промена одступања моторских параметара са временом .....	52
Слика 3.4 Шаблони теоријских промена одступања параметара мотора серије CFM56.....	53
Слика 4.1 Делови са ограниченим радним веком на мотору CFM56-3 .....	57
Слика 4.2 Типични приказ мисије мотора CFM56-3B1 са 20.1Klbs потиска на авиону B737-300 .	58
Слика 4.3 Испитивање издржљивости мотора.....	61
Слика 4.4 Максимални потисак мотора и EGT маргина .....	63
Слика 4.5 Промена броја обртаја %N1 и температуре издувних гасова EGT са висином по притиску и температуром околног ваздуха OAT.....	65
Слика 4.6 Прелазне карактеристике мотора са механичким и дигиталним системом управљања	67
Слика 4.7 Типични механизми погоршања перформанси турбофенских мотора [75].....	68
Слика 4.8 Типична промена интензитета трошења EGT маргине са циклусима рада мотора.....	70
Слика 4.9 Обнова EGT маргине приликом посета моторској радионици.....	71
Слика 4.10 Пораст EGT у крстарењу са порастом циклуса рада новог мотора типа CFM56-3.....	72
Слика 4.11 Копенова класификација климатских области.....	72
Слика 4.12 EGT маргина и OATL .....	73
Слика 4.13 Тренд промене EGT маргине .....	75
Слика 4.14 Области прекорачења EGT ограничења код мотора типа CFM56-3 .....	77
Слика 4.15 Укупни популарни (SVR) и обновљени (RSVR) интензитет посете радионици.....	80
Слика 4.16 Главни узроци скидања мотора.....	82
Слика 5.1 Расподела укупних оперативних трошкова (55 авиопревозиоца, 2013. година).....	84
Слика 5.2 Директни трошкови одржавања према сегментима (48 авиопревозиоца, 2013. година) .....	85
Слика 5.3 Структура трошкова одржавања мотора .....	86
Слика 5.4 Поређење делова са ограниченим радним веком мотора CFM56-3 према јединичним трошковима по циклусу лета.....	92
Слика 5.5 Годишњи раст цене сета делова са ограниченим радним веком за мотор CFM56-3 .....	92
Слика 6.1 Оцењене вредности потиска мотора и иницијалне вредности EGT маргине.....	102
Слика 6.2 Утицај максималног потиска на полетању на интензитет трошења EGT маргине и циклусе рада мотора на авиону .....	103

---

Слика 6.3 Поређење профила оперативне употребе мотора на кратким и средњим дужинама лета .....	105
Слика 6.4 Утицај дужине лета на директне трошкове радионичког одржавања мотора .....	106
Слика 6.5 Парцијални утицај смањења потиска у фазама полетања, пењања и крстарења на радно оптерећење фамилије мотора CFM56 у функцији дужине лета .....	107
Слика 6.6 Оперативни и парцијални ниво смањења потиска фамилије мотора CFM56 .....	108
Слика 6.7 Утицај смањења потиска на директне трошкове одржавања мотора.....	108
Слика 6.8 Одређивање вредности претпостављене температуре околног ваздуха.....	110
Слика 6.9 Процедура избора смањеног нивоа одобреног потиска мотора.....	111
Слика 6.10 Расположива EGT маргина у функцији OAT код мотора типа CFM56-3.....	113
Слика 6.11 Криве радног оптерећења за моторе фамилије CFM56 .....	114
Слика 6.12 Утицај оперативног смањења потиска на полетању на очекиване уштеде трошкова одржавања мотора фамилије CFM56.....	116
Слика 7.1 Подела дужине лета на интервале .....	123
Слика 7.2 Дијаграм расипања за прве посете радионици .....	125
Слика 7.3 Обновљени интензитет посете нових мотора радионици .....	128
Слика 7.4 Дијаграм расипања за зреле посете радионици .....	129
Слика 7.5 Обновљени интензитет посете зрелих мотора радионици .....	131
Слика 7.6 Основни параметри стања мотора на улазу и излазу из посета радионици.....	140

---

## СПИСАК ТАБЕЛА

---

ТАБЕЛА 2.1 КАТЕГОРИЗАЦИЈА MSI ДЕЛОВА ПРЕМА ЕФЕКТИМА ОТКАЗА.....	27
ТАБЕЛА 2.2 КРИТЕРИЈУМИ ЗА ИЗБОР ЗАДАТАКА ОДРЖАВАЊА ПРЕМА MSG-3.....	30
ТАБЕЛА 2.3 УПОТРЕБА ПРИМАРНИХ ПРОЦЕСА ОДРЖАВАЊА МОТОРА.....	32
ТАБЕЛА 4.1 РЕСУРС ДЕЛОВА СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКОМ НА МОТОРУ CFM56-3.....	59
ТАБЕЛА 5.1 КАТАЛОШКА ЦЕНА ДЕЛОВА СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКОМ И ЈЕДИНИЧНА ЦЕНА ПО ЦИКЛУСУ ЛЕТА ЗА МОТОР CFM56-3.....	90
ТАБЕЛА 5.2 АНАЛИЗА ТРОШКОВА ЗАМЕНЕ ДЕЛОВА У НРС МОДУЛУ МОТОРА CFM56-3.....	91
ТАБЕЛА 6.1 СТЕПЕН РАДНОГ ОПТЕРЕЂЕЊА ЗА CFM56 ФАМИЛИЈУ МОТОРА.....	115
ТАБЕЛА 6.2 АНАЛИЗА ПОТЕНЦИЈАЛНИХ УШТЕДА ТРОШКОВА РАДИОНИЧКОГ ОДРЖАВАЊА МОТОРА CFM56..	115
ТАБЕЛА 7.1 УКУПАН БРОЈ ПОДАТАКА О СКИДАЊИМА МОТОРА CFM56-3 РАДИ ОБНОВЕ ПЕРФОРМАНСИ.....	122
ТАБЕЛА 7.2 ТЕСТИРАНИ МОДЕЛИ ВИШЕСТРУКЕ ЛИНЕАРНЕ РЕГРЕСИЈЕ ЗА ПРВЕ ПОСЕТЕ РАДИОНИЦИ.....	126
ТАБЕЛА 7.3 ПРЕДИКТОРСКЕ ВАРИЈАБЛЕ ЗА ОЦЕНУ RSVR ЗА ПРВЕ ПОСЕТЕ РАДИОНИЦИ.....	126
ТАБЕЛА 7.4 РЕГРЕСИОНА СТАТИСТИКА ЗА ПРВЕ ПОСЕТЕ РАДИОНИЦИ.....	127
ТАБЕЛА 7.5 ОЦЕЊЕНЕ ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТАРА ЗА ПРВЕ ПОСЕТЕ РАДИОНИЦИ.....	127
ТАБЕЛА 7.6 ТЕСТИРАНИ МОДЕЛИ ВИШЕСТРУКЕ ЛИНЕАРНЕ РЕГРЕСИЈЕ ЗА ЗРЕЛЕ ПОСЕТЕ РАДИОНИЦИ.....	129
ТАБЕЛА 7.7 ПРЕДИКТОРСКЕ ВАРИЈАБЛЕ ЗА ОЦЕНУ RSVR ЗА ЗРЕЛЕ ПОСЕТЕ РАДИОНИЦИ.....	130
ТАБЕЛА 7.8 РЕГРЕСИОНА СТАТИСТИКА ЗА ЗРЕЛЕ ПОСЕТЕ РАДИОНИЦИ.....	130
ТАБЕЛА 7.9 ОЦЕЊЕНЕ ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТАРА ЗА ЗРЕЛЕ ПОСЕТЕ РАДИОНИЦИ.....	131
ТАБЕЛА 7.10 ОДЛУКЕ О ЗАМЕНИ ДЕЛОВА СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКОМ И ОБНОВИ ПЕРФОРМАНСИ МОТОРА CFM56-3 ПРИ ПОСЕТИ РАДИОНИЦИ.....	133
ТАБЕЛА 7.11 ПРОЦЕЊЕНЕ ВРЕДНОСТИ ТРОШКОВА ОБНОВЕ ПЕРФОРМАНСИ МОТОРА CFM56-3.....	134
ТАБЕЛА 7.12 РАСПОЛОЖИВЕ КОМБИНАЦИЈЕ ЗА ИНТЕГРАЦИЈУ СЕРИЈЕ МОТОРА НА МОДЕЛИМА АВИОНА.....	139
ТАБЕЛА 7.13 ВРЕДНОСТИ УЛАЗНИХ ПАРАМЕТАРА У МОДЕЛ ЗА РАЗМАТРАНИ НУМЕРИЧКИ ПРИМЕР.....	145
ТАБЕЛА 7.14 ПРЕОСТАЛИ LLP РЕСУРС НА УЛАЗУ У АКТУЕЛНУ ПОСЕТУ РАДИОНИЦИ REMAININGIN[3].....	145
ТАБЕЛА 7.15 КОЕФИЦИЈЕНТ ПРЕОСТАЛОГ LLP РЕСУРСА НА УЛАЗУ У АКТУЕЛНУ ПОСЕТУ РАДИОНИЦИ RSLC[3] .....	146
ТАБЕЛА 7.16 ОСТВАРЕНИ LLP ЦИКЛУСИ НА УЛАЗУ У АКТУЕЛНУ ПОСЕТУ РАДИОНИЦИ OPERATEDIN[3].....	146
ТАБЕЛА 7.17 МИНИМАЛНИ ПРЕОСТАЛИ LLP РЕСУРС НА ИЗЛАЗУ ИЗ ТРЕЋЕ ПОСЕТЕ РАДИОНИЦИ STUBOUT[3] .....	151
ТАБЕЛА 7.18 УКУПН ДИРЕКТНИ ТРОШКОВИ НА ПРВОМ НИВОУ ОДЛУЧИВАЊА SVCTOTALPERCYCLE[1].....	153
ТАБЕЛА 7.19 ОПТИМАЛНЕ ОДЛУКЕ О ОБИМУ И САДРЖАЈУ РАДОВА НА РАЗМАТРАНОМ ПРИМЕРУ.....	155

---

## СПИСАК СКРАЋЕНИЦА

---

<b>ACARS</b>	Aircraft Communication and Reporting System
<b>ACMS</b>	Aircraft Condition Monitoring System
<b>AD</b>	Airworthiness Directive
<b>AEA</b>	Association of European Airlines
<b>AFM</b>	Aircraft Flight Manual
<b>AIAA</b>	American Institute of Aeronautics and Astronautics
<b>AIDS</b>	Aircraft Integrated Data System
<b>AMM</b>	Aircraft Maintenance Manual
<b>ATA</b>	Air Transport Association of America
<b>ATOW</b>	Actual Take-Off Weight
<b>CCD</b>	Charge-Coupled Device
<b>CM</b>	Condition Monitoring
<b>CP</b>	Corner Point
<b>CPCP</b>	Corrosion Prevention and Control Program
<b>CSLSV</b>	Cycles Since Last Shop Visit
<b>CSN</b>	Cycles Since New
<b>DI</b>	Detailed Inspection
<b>DMC</b>	Direct Maintenance Cost

<b>DOC</b>	Direct Operating Cost
<b>DS</b>	Discard
<b>EASA</b>	European Aviation Safety Agency
<b>ECM</b>	Engine Condition Monitoring
<b>EFC</b>	Engine Flight Cycles
<b>EFH</b>	Engine Flight Hours
<b>EGT</b>	Exhaust Gas Temperature
<b>EHM</b>	Engine Health Monitoring
<b>EMC</b>	Engine Maintenance Cost
<b>EPR</b>	Engine Pressure Ratio
<b>ESM</b>	Engine Shop Manual
<b>ESR</b>	Engine Standard Repair
<b>EVMS</b>	Engine Vibration Monitoring System
<b>EVMU</b>	Engine Vibration Monitoring Unit
<b>EZAP</b>	Enhanced Zonal Analysis Procedures
<b>FAA</b>	Federal Aviation Administration
<b>FADEC</b>	Full Authority Digital Engine Control
<b>FEC</b>	Failure Effect Category
<b>FF</b>	Fuel Flow
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>FL</b>	Fligh Length
<b>FMC</b>	Flight Management Computer
<b>FR</b>	First-Run
<b>GVI</b>	General Visual Inspection
<b>HPC</b>	High Pressure Compressor



<b>HPT</b>	High Pressure Turbine
<b>HSI</b>	Hot Section Inspection
<b>HT</b>	Hard Time
<b>IATA</b>	International Air Transport Association
<b>ICS</b>	Industry Steering Comitee
<b>IFSD</b>	In Flight Shut Down
<b>IMC</b>	Indirect Maintenance Cost
<b>IN/FC</b>	Inspection/Functional Check
<b>IOC</b>	Indirect Operating Cost
<b>ISA</b>	International Standard Atmosphere
<b>L/HIRF</b>	Lightning/High Intesity Radiated Fields
<b>LLP</b>	Life Limited Parts
<b>LPC</b>	Low Pressure Compressor
<b>LU/SV</b>	Lubricating/Servicing
<b>MCD</b>	Magnetic Chip Detector
<b>MEC</b>	Mechanical Engine Control
<b>MR</b>	Mature-Run
<b>MSI</b>	Maintenance Significant Items
<b>MTOW</b>	Maximum Take-Off Weight
<b>MWG</b>	Maintenance Working Group
<b>NDT</b>	Non Destructive Test
<b>OATL</b>	Outside Air Temperature Limit
<b>OC</b>	On Condition
<b>OH</b>	Overhaul
<b>OP/VC</b>	Operational/Visual Check

<b>PEM</b>	Performance Engineers Manual
<b>PSRP</b>	Propulsion System Reliability Program
<b>RCM</b>	Reliability Centered Maintenance
<b>RDE</b>	Rotating Disk Electrode
<b>RS</b>	Restoration
<b>RSVR</b>	Restored Shop Visit Rate
<b>RTOW</b>	Regulated Take-Off Weight
<b>SDI</b>	Special Detailed Inspection
<b>SFC</b>	Specific Fuel Consumption
<b>SOAP</b>	Spectrometric Oil Analysis Program
<b>SV</b>	Shop Visit
<b>SVC</b>	Shop Visit Cost
<b>SVR</b>	Shop Visit Rate
<b>TBO</b>	Time Between Overhaul
<b>TETCP</b>	Turbine Engine Time Control Program
<b>TOC</b>	Total Operating Cost
<b>TOW</b>	Time On-Wing
<b>TSLSV</b>	Time Since Last Shop Visit
<b>TSN</b>	Time Since New
<b>WG</b>	Working Group
<b>WPG</b>	Workscope Planning Guide
<b>EMSG</b>	European Maintenance System Guide
<b>MSG</b>	Maintenance Steering Group
<b>OAT</b>	Outside Air Temperature

---

# 1 УВОД

---

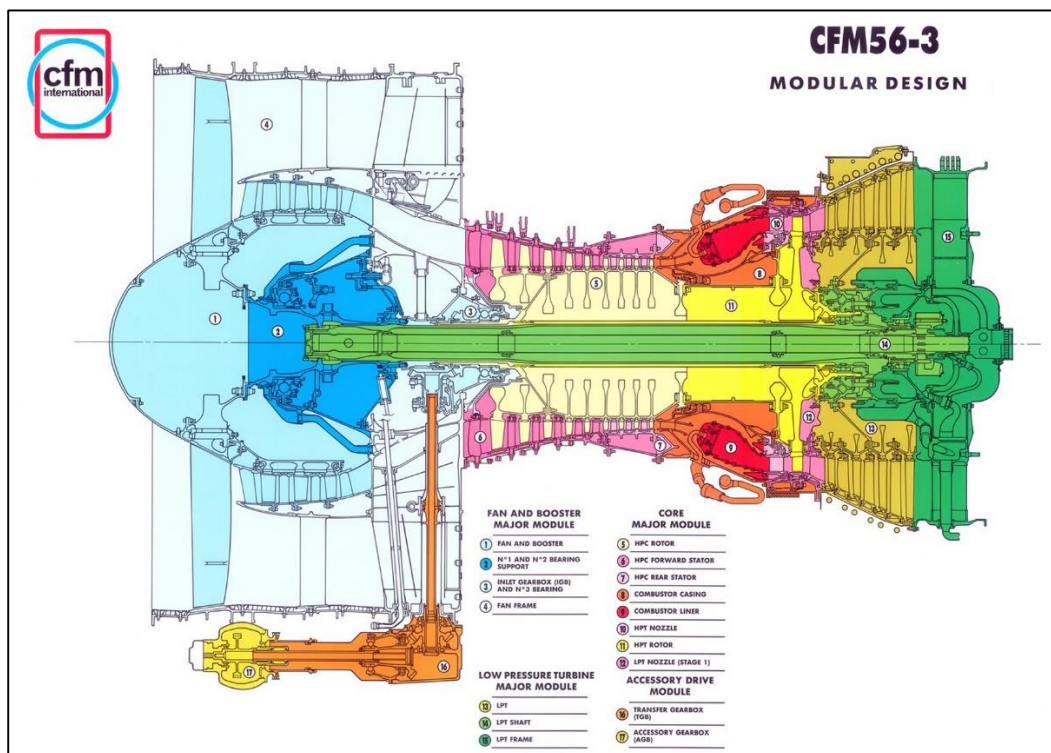
Фаза оперативне употребе представља фазу животног века цивилних транспортних ваздухоплова, током које авиопревозиоци обављају превоз путника и робе у систему ваздушног саобраћаја и остварују профит. Спровођење ове основне намене ваздухопловних превозних средстава није могуће без имплементације система одржавања ваздухоплова. У циљу систематизације радова на одржавању ваздухоплова, узимајући у обзир начин коришћења, радна оптерећења и утицаје на безбедност и економичност, врши се подела ваздухоплова на три целине, које се одржавају према различитим програмима одржавања: структуру, погонску групу / системе и компоненте ваздухоплова.

Поред израженог утицаја на безбедност ваздухоплова, откази ваздухопловних мотора могу довести до пада оперативне расположивости, застоја у обављању планираног реда летења и генерисања великих трошкова одржавања, па је у систему одржавања ваздухоплова потребно посветити посебну пажњу одржавању погонских група ваздухоплова.

Под појмом одржавања уопште, подразумева се спровођење свих захтеваних активности, у циљу обнове или одржања уређаја у исправном стању, укључујући опслуживање, оправку, модификацију, ревизију, преглед и утврђивање стања. Одржавање ваздухопловних мотора обухвата све врсте радова над мотором, који се спроводе током радног века мотора, у циљу безбедног, поузданог и са аспекта трошкова исплативог коришћења мотора.

Турбофенски мотори представљају најзаступљенији тип погонских група ваздухоплова у цивилном ваздушном саобраћају и транспорту. Посматрано кроз историјски развој турбомлазних мотора, примени данас опште прихваћеног концепта превентивног одржавања према стању су претходиле:

- имплементација метода за праћење стања у програму одржавања мотора и потврда поузданости њихове примене,
- оспособљеност ваздухопловно-техничких организација за организовање и примену програма за праћење стања мотора,
- технолошки развој уређаја за дијагностику стања,
- емпиријска потврда разлика у интензитетима погоршања перформанси главних модула мотора и
- примена модуларне конструкције ваздухопловних мотора.



Слика 1.1 Модуларна конструкција мотора CFM56-3

Типичан изглед модуларне конструкције турбофенског мотора приказан је на Слици 1.1. Главни модули мотора чине основне подсклопове, над којима се појединачно могу спроводити даље активности одржавања, уз минимални ниво растављања осталих главних модула. Модуларна конструкција мотора је допринела смањењу трошкова и времена за обављање задатака одржавања.

Током радног века, турбофенски мотори остваре неколико посета моторској радионици, које су првенствено резултат погоршања перформанси модула мотора и истрошености ресурса делова са ограниченим радним веком. Интензитет посете радионици зависи од начина коришћења, зрелости и радних оптерећења мотора, али исто тако и од стратешких одлука о обиму и садржају обављених радионичких радова приликом посета радионици.

Постоји потреба да се на нивоу радног века мотора спроведе стратешко планирање скидања мотора са авиона, разматрањем начина коришћења (годишњи налет, просечна дужина лета, ниво смањења потиска на полетању) и избора стратегије за доношење оперативних одлука о садржају и обиму радова радионичког одржавања (радови над модулима, замене делова са ограниченим радним веком). Намеће се питање избора стратегије за доношење одлуке о начину искоришћења ресурса делова са ограниченим радним веком и економских ефеката примењене стратегије. Данашњи тренд је да се одржавање ваздухопловних мотора поверава ваздухопловно-техничким организацијама „ван куће“, са којима се склапају различити типови уговора за одржавање. Овај вид организовања одржавања мотора повећава потребу за већим квалитетом доношења одлука.

Проблем доношења одлука о томе које делове са ограниченим радним веком заменити, колики ресурс уградити у мотор и који ниво радова извршити над појединачним модулима турбофенских мотора, при датој посети моторској радионици је недовољно изучен у расположивој научној и стручној литератури, упркос бројним моделима за оптимизацију одржавања. Један од разлога малог броја објављених радова у области радионичког одржавања турбофенских мотора може бити у присутној конкуренцији између произвођача мотора, ваздухопловно-техничких организација за одржавање мотора и консултантских фирми. Тиме се јавља потреба за додатним истраживањима у циљу пружања подршке процесу радионичког одржавања ваздухопловних мотора, што представља један од мотива за избор теме докторске дисертације.

Поред тога, имајући у виду да се радионичким одржавањем ваздухопловних мотора врши обнова перформанси и враћање мотора у пловидбено стање, што представља предуслов за коришћење мотора на авиону и одвијање ваздушног саобраћаја и транспорта, овај проблем ће увек бити актуелан.

## **1.1 НАУЧНИ ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА**

---

Тема дисертације третира проблеме управљања процесом радионичког одржавања турбофенских мотора. Предмет истраживања је стратешко планирање скидања мотора са авиона, са освртом на моделирање погоршања перформанси мотора и управљање ресурсима делова са ограниченим радним веком. У том смислу, посебну пажњу је потребно посветити избору и примени стратегија за доношење одлука у процесу радионичког одржавања турбофенских мотора, као и анализи економских ефеката примене изабраних стратегија на директне трошкове радионичког одржавања. Имајући у виду да начин коришћења, старост и радна оптерећења ваздухопловних мотора утичу на интервале између посета моторској радионици, предмет истраживања је и утицај оперативних фактора (планирани начин коришћења мотора, процедуре за смањење потиска у полетању) на број остварених часова рада мотора на авиону.

Током истраживања разматрана је структура директних трошкова одржавања турбофенских мотора. Удео трошкова одржавања ваздухоплова у директним оперативним трошковима креће се око 10-15%, док стварне вредности трошкова одржавања зависе од врсте ваздухоплова, типа мотора и начина њихове употребе. Трошкови радионичког одржавања мотора достижу трећину вредности укупних трошкова одржавања ваздухоплова. Смањење директних трошкова радионичког одржавања мотора може се остварити повећањем броја часова рада мотора на авиону.

Научни циљ истраживања обухвата:

- идентификацију утицаја кључних оперативних параметара и начина употребе ваздухоплова на време рада мотора до скидања са авиона,
- развој методологије за стратешко планирање скидања мотора,
- израду модела за доношење одлука о обиму и садржају радова радионичког одржавања турбофенских мотора.

Процес планирања скидања турбофенских мотора са авиона потребно је посматрати у контексту укупног радног века мотора. При томе, претпоставља се да су оперативни услови рада и начини коришћења мотора унапред познати. Планирањем скидања мотора под наведеним претпоставкама, отвара се могућност за ефикасним искоришћењем ресурса мотора.

Са аспекта планирања одржавања не постоји јединствен модел за одређивање оптималне стратегије одржавања мотора. Основне полазне хипотезе истраживања су:

- При посетама моторској радионици постоји низ правилно изабраних одлука о обиму и садржају радова радионичког одржавања мотора, којима се могу смањити директни оперативни трошкови радионичког одржавања мотора.
- Компаративном анализом економских ефеката примене различитих стратегија за доношење одлука у процесу радионичког одржавања може се унапредити процес планирања скидања турбофенских мотора са авиона.

При изради докторске дисертације, поред општих метода научног истраживања као што су анализа, синтеза, апстракција и конкретизација, генерализација, индукција и дедукција, научно посматрање и аналогија, коришћене су и методе статистичке анализе, програмирања, теорије поузданости и теорије одржавања. За решавање проблема истраживања и формирање модела одлучивања примењени су доступни и проверени рачунарски програми.

---

## 1.2 ПРЕГЛЕД РАСПОЛОЖИВЕ ЛИТЕРАТУРЕ И ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА У ОБЛАСТИ ОДРЖАВАЊА

---

Стручна литература из области планирања и управљања одржавањем обухвата огроман број објављених научних радова, књига, магистарских теза и докторских дисертација. Научни приступ проблемима одржавања утемељен је развојем првих модела за оптимизацију одржавања током 60-их година XX века, захваљујући радовима аутора *Barlow* [1], *Hunter* [1], *Jorgenson* [2] [3] [4] [5], *Radner* [2] [3] [5] и *McCall* [4] [5]. Модели оптимизације одржавања у суштини представљају математичке моделе за одређивање оптималног баланса између трошкова и користи одржавања или прикладног тренутка за спровођење одржавања [6]. Према *Dekker*-у [7], модели за оптимизацију одржавања поседују четири основна аспекта:

- опис техничког система, његове функције и значаја,
- моделирање погоршања стања система са временом и могућих последица на систем,
- опис расположивих информација о систему и активности које стоје на располагању за управљање системом,
- функција циља и примењена техника оптимизације за проналажење оптималног баланса.

Пораст сложености модерних система иницирао је потребу за развојем софистициранијих математичких модела и стратегија управљања за решавање проблема одржавања, са циљем побољшања поузданости, превенције отказа и смањења трошкова. Паралелно са истраживањима у области одржавања, повремено се објављују и радови који дају преглед остварених резултата истраживања у одређеном временском периоду. Међу првим радовима издваја се књига аутора *Barlow* и *Proschan* [8] и преглед стратегија за планирање одржавања опреме са стохастичким отказима, у раду аутора *McCall* [9]. Детаљни преглед модела превентивног одржавања од 1965. до 1975. године, под општом поделом на дискретне и континуалне, објавили су *Pierskalla* и *Voelker* [10].



У прегледу литературе који обухвата период од 1976. до 1981. године, *Sherif* и *Smith* [11] класификују моделе за оптимизацију одржавања система са једним, или више елемената, према начину моделирања погоршања стања на:

- детерминистичке,
- стохастичке (према ризику и према неизвесности).

Детерминистички модели одржавања претпостављају да расположиве акције одржавања обнављају систем на почетно стање и да исход сваке акције одржавања није случајна величина. За разлику од стохастичких модела према неизвесности, стохастички модели одржавања према ризику подразумевају познавање расподеле отказа елемената.

Примењене технике за оптимизацију обухватају методе линеарног и нелинеарног програмирања, динамичког програмирања, мешовитог целобројног програмирања, теорије управљања, теорије одлучивања, технике претраге и хеуристичке приступе [11].

Циљеви примене техника за оптимизацију одржавања могу бити [7]:

- оцена и поређење разматраних стратегија одржавања на основу трошкова и поузданости,
- проналажење структуре оптималних стратегија одржавања,
- утврђивање оптималних интервала одржавања.

У прегледу модела за оптимизацију оправке, замене и прегледа система са једним елементом који подлеже случајном отказу, развијених у периоду од 1976. до 1989. године, *Valdez-Flores* и *Feldman* [12] примењују следећу класификациону шему за моделе превентивног одржавања:

- модели прегледа (енг. *inspection models*),
- модели минималне оправке (енг. *minimal repair models*),
- модели удара (енг. *shock models*), и
- модели замене (енг. *replacement models*).

Код модела прегледа, стање система није познато и може се једино утврдити прегледом. Претпоставка је да су прегледи система савршени, у смислу да се њима открива стварно стање система. Модели прегледа решавају проблеме доношења одлука о избору расположивих акција одржавања и оптималним интервалима за обављање прегледа.

Концепт минималне оправке развили су *Barlow* и *Hunter* [1], разматрањем модела периодичне замене са минималном оправком између замена. Минимална оправка отказалог елемента подразумева оправку којом се обнавља функција система тако да интензитет отказа система остаје исти као и пре отказа. Основни циљ модела минималне оправке је утврђивање оптималног интервала замене елемента, којим се минимизира збир очекиваних трошкова замене и минималне оправке по јединици времена. Откази пре утврђеног интервала замене иницирају минималну оправку, док се по истеку интервала врши замена елемента.

Модели удара посматрају оштећење система (погоршање стања) као резултат појаве удара на систем. Време између појаве удара и резултујуће оштећење система представљају случајне променљиве, чије кумулативне функције расподеле зависе од акумулираног нивоа оштећења у посматраном тренутку времена. Дејство сваког удара на систем доводи до кумулативног раста оштећења, при чему отказ система наступа по достизању граничног нивоа оштећења. Већина модела удара решава проблем одређивања контролне границе оштећења, која иницира одлуку о замени система.

Истраживање модела оптималне замене елемената који подлежу случајним отказима везано је за примену стратегија блок замене (енг. *block replacement*) и замене према старости (енг. *age replacement*). Модели замене према старости утврђују оптималну старост елемената када је потребно извршити њихову замену. Модели блок замене одређују оптимални временски период за замену елемената, независно од старости, при чему је допуштена и замена елемената при њиховом отказу.

Почетком 80-их година XX века, дошло је до пораста интересовања за моделирањем и оптимизацијом одржавања система са већим бројем елемената. Преглед литературе о моделима одржавања вишекомпонентних система приказан је у радовима аутора *Cho* и *Parlar* [13], *Dekker et al.* [14], *Wang* [15] и *Nicolai* и *Dekker* [16]. Интеракција између елемената система има значајан утицај на доношење одлука о одржавању система. Модели одржавања система са већим бројем елемената праве разлику између три основна типа интеракције (зависности):

- економска зависност (енг. *economic dependence*),
- структурална зависност (енг. *structural dependence*),
- стохастичка зависност (енг. *stochastic dependence*).

Економска зависност имплицира могућност уштеде трошкова истовременим одржавањем више елемената система. Структурална зависност између елемената система постоји када елементи конструктивно образују склоп, тако да одржавање отказалог елемента условљава одржавање осталих елемената. Стохастичка зависност је присутна када стање једног елемента утиче на интензитет отказа осталих елемената. Већина модела одржавања система са већим бројем елемената разматра само једну од поменутих зависности, будући да комбинација више од једне зависности значајно компликује решавање и анализу модела одржавања [14].

Упркос огромном броју теоријски истражених модела за оптимизацију одржавања, број успешних примена модела је мали. *Dekker* [7] даје преглед примена модела за оптимизацију и идентификује шест кључних аспеката који спутавају практичну примену модела:

- моделе одржавања је тешко разумети и интерпретирати,
- многи радови су написани искључиво ради математичких потреба,
- компаније нису заинтересоване за објављивање радова,
- одржавање обухвата мноштво различитих аспеката,
- оптимизација није увек неопходна,
- модели се често фокусирају на погрешан тип одржавања.

---

Једна од првих примена теоријских модела за оптимизацију одржавања турбофенских мотора односи се на стратегију оптималне замене главних модула мотора *F-100-PW-100* на војном авиону *F-15* [17]. Одржавање наведеног типа мотора, модуларне конструкције, било је засновано на концепту ограниченог радног века. Сваком модулу мотора било је прописано максимално време рада, тако да се ревизија модула мотора обављала по истеку радног века модула или након отказа мотора. При скидању истрошеног или отказалог модула разматрана је могућност замене других исправних модула. Развијен је алгоритам за одређивање оптималне стратегије опортунистичке замене исправних модула мотора у облику  $(n, N)$ , где  $N$  означава максимално време рада модула, а  $n$  старост модула, након које је економски оправдано обавити замену модула.

Применом опортунистичког приступа одржавању, *Epstein* и *Wilamowsky* [18] су дефинисали оптималну стратегију замене делова са ограниченим радним веком. У њиховом моделу откази компресора ваздухопловних мотора прате експоненцијалну расподелу, при чему су скидања мотора резултат отказа компресора или истрошености ресурса дискова компресора. Разматрањем трошкова транспорта мотора до радионице, монтаже и демонтаже компресора и замене дискова, *Epstein* и *Wilamowsky* дефинишу оптималну стратегију замене дискова компресора у облику правила  $(X_1, X_2)$ , где је  $(X_1 \leq X_2)$ :

- уколико се при отказу мотора може приступити диску, извршити његову замену под условом да је преостали број часова рада мањи од  $X_2$ ,
- уколико се при отказу мотора не може приступити диску, извршити његову замену под условом да је преостали број часова рада мањи од  $X_1$ ,
- у свим случајевима заменити диск након  $Y$  часова употребе.

Оптимална стратегија замене дискова, изложена на примеру два диска, не разматра ефекте донетих одлука о замени на будуће трошкове и употребу мотора. Проширење проблема замене дискова на већи број делова са ограниченим веком, захтева постављање додатних ограничења и може довести до искоришћења посматраног система, које је близу оптималног.

*Kumar, Crocker* и *Knežević* [19] уводе и дефинишу концепт еволутивног одржавања ваздухопловних мотора, који се заснива на познавању расподеле времена отказа свих модула мотора и ресурса делова са ограниченим радним веком. Концепт еволутивног одржавања мотора подразумева да се након сваке обављене активности одржавања врши подешавање интервала планираног одржавања мотора, тако да ризик од појаве отказа остане исти.

*Horr* и *Kuo* [20] су разматрали проблем одржавања лопатица компресора ваздухопловних мотора. Применом модела удара, аутори пружају доказ да оптимална стратегија за планирање одржавања лопатица компресора поседује јасно дефинисану структуру.

У другом ауторском чланку, *Horr* и *Kuo* [21] анализирају проблем групне (здружене) замене компонената (a) система са већим бројем не-критичних компонената и (b) система са једном критичном компонентом и више не-критичних компонената. Имајући у виду да оптимална стратегија замене делова посматраних система не мора имати дефинисану структуру, аутори предлажу три хеуристичка приступа за проналажење добре стратегије за практичну употребу. Поред тога, приказ различитих развијених метода за оптимизацију стратегија групне замене критичних делова мотора може се наћи у радовима аутора *Tu* [22], *Luh* [22] [23] [24], *Zhao* [22] [23] [24] [25] [26], *Tomastik* [22] [23] [24], *Sun* [23] [24], *Jia* [25] [26] и *Xia* [26].

Применом технике динамичког програмирања, *Domitrović* [27] [28] [29] презентује математички модел оптималне замене модула мотора *CFM56*, који је написан у програмском језику C++. Планирање замене модула мотора је посматрано као вишеетапни процес одлучивања, при чему је основни циљ стратегије оптималне замене дефинисан низом одлука, које резултују минималним трошковима одржавања. Под претпоставком да је свим модулима мотора додељен ресурс, скидања мотора су иницирана истеком ресурса неког од модула. Приликом скидања мотора, разматрана је стратегија опортунистичке замене једног или више модула са преосталим ресурсом.

На основу статистичке анализе података о скидањима 15 мотора типа *CF6-80C2* у једној авиокомпанији, *Petcharin* и *Ren* [30] показују да времена реализованих посета моторској радионици прате дво-параметарску Вејбулову расподелу. Коришћењем оцењених вредности параметара, формиран је модел за одређивање времена рада мотора до посете радионици у функцији поузданости. На основу модела поузданости, аутори врше подешавања оригиналних интервала за обављање ревизија, према усвојеном критеријуму исказане оперативне поузданости мотора.

Сложена природа процеса радионичког одржавања мотора отежава примену модела поузданости, заснованих на статистичкој анализи отказа компонената и често диктира примену метода симулације за решавање проблема оптимизације одржавања. Примери симулационих модела, везаних за предмет истраживања ове дисертације, могу се наћи у радовима [31] и [32].

### **1.3 СТРУКТУРА РАДА**

---

У складу са предметом и циљем истраживања, у наставку је дат опис и сажети приказ структуре рада:

У другом поглављу приказана је хронологија развоја концепта одржавања турбофенских мотора, од почетка увођења млазних мотора у оперативну употребу, до примене савременог приступа за израду иницијалног програма одржавања, оријентисаног на задатке одржавања. У наставку је представљен актуелни метод логичке MSG-3 анализе система и погонске групе ваздухоплова, који претходи изради иницијалног програма одржавања ваздухоплова. Уз осврт на класификацију примарних процеса одржавања ваздухоплова и захтеве за спровођењем програма одржавања и поузданости, изложена је општа подела радова на одржавању турбофенских мотора.

У трећем поглављу презентовани су основни елементи процеса утврђивања и праћења стања гасо-турбинских мотора. Наглашавањем предности успешне примене система за праћење стања мотора, приказана је подела праћених моторских параметара и дат је опис расположивих уређаја и средстава за бележење вредности параметара. Посебна пажња је посвећена опису и приказу кључних техника за утврђивање и праћење физичког стања моторских компонената, као и за идентификацију и анализу тренда перформанси мотора.

У четвртном поглављу акценат је стављен на анализу главних разлога скидања мотора са авиона. Погоршање перформанси главних модула мотора и истрошеност ресурса делова са ограниченим радним веком су идентификовани као главни узроци скидања мотора који се користе на краћим дужинама лета. Сходно томе, описан је поступак за утврђивање ресурса делова са ограниченим радним веком и анализиране су присутне разлике у ресурсима делова између категорија потиска мотора. У наставку су обрађени различити аспекти EGT маргине као кључног моторског параметра перформанси, почев од сертификације и утврђивања EGT лимита, преко анализе утицајних фактора, приказа типичног интензитета трошења EGT маргине, до њеног праћења и анализе узрока прекорачења оперативних EGT ограничења. На крају поглавља, представљен је начин праћења поузданости флоте мотора помоћу тзв. популарног и обновљеног интензитета посете радионици и дат је сумарни приказ анализе главних разлога скидања мотора.

У петом поглављу изложена је општа класификација укупних оперативних трошкова авиопревозиоца, уз акценат на значај директних трошкова радионичког одржавања мотора. У оквиру приказа структуре трошкова одржавања мотора, анализиран је просечан годишњи раст цене делова са ограниченим радним веком и на практичном примеру приказано одређивање трошкова замене делова. Као финални резултат разматрања трошкова, изведене су једначине за одређивање трошкова искоришћеног и неискоришћеног LLP ресурса при посети моторској радионици.

У шестом поглављу извршена је анализа оперативних фактора који утичу на број остварених часова рада мотора на авиону. Размотрен је утицај вредности максималног потиска на полетању на директне трошкове одржавања мотора. Приказане су методе за оперативно смањење потиска мотора на полетању и дата је оцена парцијалних утицаја оперативног нивоа смањења потиска мотора у фазама полетања, пењања и крстарења на радно оптерећење мотора. Коришћењем степена радног оптерећења мотора изложена је анализа потенцијалних уштеда трошкова радионичког одржавања мотора.

У седмом поглављу формиран је методолошки оквир за израду модела за стратешко планирање и доношење одлука у процесу радионичког одржавања турбофенских мотора. У складу са претходно изложеним полазним претпоставкама, дефинисан је модел за предвиђање очекиваних циклуса рада мотора до скидања ради обнове перформанси, заснован на статистичкој анализи расположивих података. Моделирањем процеса доношења одлука о обиму и садржају радионичких радова, дата су предвиђања очекиваних трошкова радионичког одржавања и очекиваних циклуса рада мотора до скидања у функцији разматраног скупа одлука. У наставку је описан математички модел одлучивања и на практичном примеру су презентовани резултати истраживања.

На крају, у осмом поглављу дата су закључна разматрања и могући правци даљег истраживања у овој области.



---

## 2 ОДРЖАВАЊЕ ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА

---

Турбофенски мотори су током експлоатације изложени комбинованом дејству различитих спољашњих (радни услови околине) и унутрашњих фактора (режими рада), који доводе до трошења конструктивних елемената и промене стања мотора. Различити облици трошења делова (ерозија, хабање, корозија, замор материјала, остали видови оштећења), изазвани сложеним дејством механичких, топлотних и хемијских утицаја, доводе до промене конструктивних карактеристика компонената, пада ефикасности и погоршања перформанси мотора. Поред тога, искуства потврђују чињеницу да трошење механичких делова може изазвати појаву одређених типова отказа (изненадни откази, откази услед замора материјала), који имају директан утицај на безбедност лета ваздухоплова.

Одржавање мотора подразумева све оне радове који се морају обавити на мотору и моторским системима да би мотор био пловидбен, односно све оне радове који се морају извести на мотору који није исправан да би се поправио и постао пловидбен. Под пловидбеношћу се подразумева способност мотора да поуздано и безбедно изврши рад за који је пројектован [33].

Будући да отказ мотора може утицати на безбедност лета, одржавање ваздухопловних мотора се заснива на превентивном концепту одржавања. Превентивно одржавање турбофенских мотора обухвата све неопходне активности за спречавање појаве отказа и очување параметара стања мотора у границама дозвољених одступања.

## 2.1 РАЗВОЈ ОДРЖАВАЊА ТУРБИНСКИХ МОТОРА

---

У почецима развоја ваздухопловства, одржавање није било засновано на научним теоријама и посматрано је као вештина која се стиче искуством. Уз помоћ произвођача, механичари су били носиоци израде првих програма одржавања [34]. Након формирања авио-компанија, јавила се потреба за увођењем нових прописа у области одржавања, којима би се извршило усаглашавање захтева за одржавањем. Произвођачи авиона су преузели израду иницијаних програма одржавања, са увођењем великих млазних авиона у цивилни ваздушни саобраћај [35].

Традиционални приступ одржавању у ваздухопловној индустрији био је заснован на концепту да за сваки део постоји адекватни временски интервал када је неопходно извршити његову ревизију и да се на тај начин може очувати безбедност и поузданост. Ово уверење било је засновано на претпоставкама да постоји директна веза између планираног одржавања делова мотора и њихове поузданости, као и да је поузданост увек везана за безбедност [36].

Првобитни концепт и категорија у оквиру које су одржавани гасо-турбински мотори (превентивно одржавање према фиксном времену рада) били су засновани на до тада стеченим искуствима у коришћењу и одржавању клипних мотора [37]. Након истека дефинисаног периода рада, турбински мотори су скидани са авиона и одвођени у радионицу, где се вршила потпуна ревизија мотора (ОН – *Overhaul*). Ревизија обухвата комплетно растављање мотора, преглед свих делова, замену или оправку делова, склапање мотора и поновну уградњу на авион. Радни век мотора на авиону, познатији као време између ревизије мотора (ТВО – *Time Between Overhaul*), био је резултат договора између оператера, цивилних ваздухопловних власти и произвођача, којим су била разматрана искуства оператера у експлоатацији датог типа мотора, начин коришћења, просечан годишњи налет и климатски услови рада.

Због конструктивних предности у односу на клипне моторе, гасо-турбински мотори су имали знатно дужи иницијални радни век [37]. На почетку употребе, турбински мотори су имали релативно малу вредност иницијалног радног века, због недостатка искуства и немогућности предвиђања адекватног ревизионог интервала за сваки саставни део мотора. Паралелно са стицањем искустава у експлоатацији, време између ревизија је било повећавано, по захтевима корисника и уз одобрење ваздухопловних власти.

Продужетак иницијалног радног века је одобриван у малом износу, уз велику опрезност. Америчке ваздухопловне власти (FAA – *Federal Aviation Administration*) су увеле ограничење повећања радног века за највише 100 часова и захтевале минимални временски период од три месеца за сукцесивно повећање ревизионих интервала [36]. Већина оператера је реализовала сукцесивна повећања радног века током знатно дужих временских периода.

Продужење времена између ревизија мотора било је засновано на налазима са прегледа бројних делова комплетно растављеног мотора и процени могућности исправног рада мотора до предложеног новог старосног ограничења. Након одобреног повећања ТВО, континуална исправност делова је тестирана праћењем интензитета и типова отказа, како би се осигурало да продужетак радног века не утиче негативно на поузданост. Основна претпоставка је била да се процесом инкременталног продужетка радног века може коначно утврдити адекватни радни век.

FAA су 1960. године последњи пут примениле подешавање ревизионих интервала као средство за контролу оперативне поузданости, издавањем програма за контролу времена рада турбинских мотора (TETCP – *Turbine Engine Time Control Program*) [36]. TETCP програмом је предвиђено да се подешавање времена између ревизија мотора врши на основу тромесечне вредности коефицијента гашења мотора у лету (IFSD – *In Flight Shut Down*), а не у складу са препорукама, заснованим на налазима стања делова при ревизији мотора.

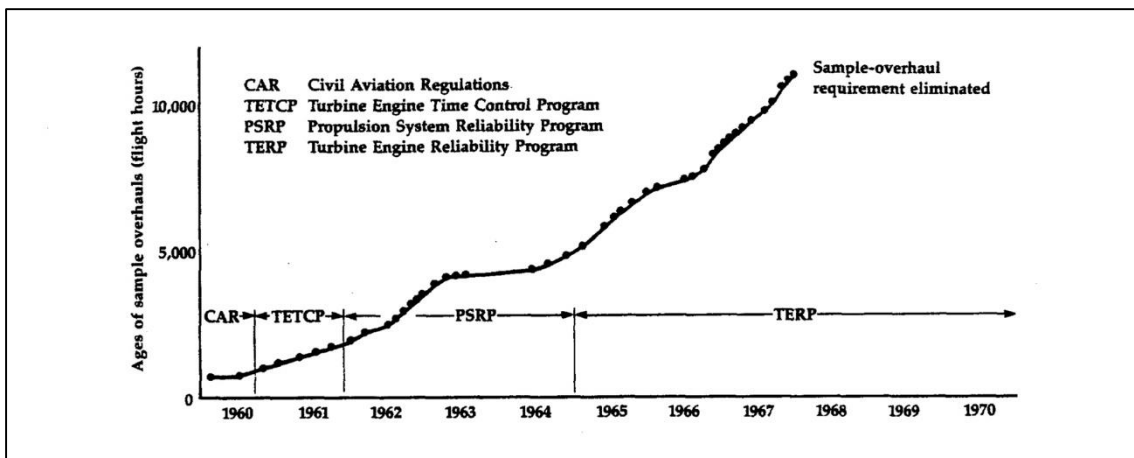
Међутим, авиопревозиоци су пријавили појаву варијација вредности интензитета гашења мотора у лету, које су биле пре свега резултат ефекта узорковања мотора, па је ТЕТСР програм је био кратког века. Крајем 50-их година прошлога века, довољан број прикупљених података о коришћењу ваздухоплова омогућио је спровођење интензивних студија за процену ефективности дотадашњих метода планираног одржавања. Овим студијама је утврђено да постоји велики број делова чија вероватноћа отказа не расте са временом рада и код којих ограничење времена рада нема никаквог утицаја на поузданост [36]. У том периоду, једно од забрињавајућих искустава у одржавању је указивало на немогућност контроле интензитета отказа клипно-елисног мотора типа *Wright R-3350* било каквим променама садржаја или фреквенције планираних ревизија [36] [38].

Због потребе за побољшаном стратегијом одржавања турбинских мотора и ефикаснијом методом за утврђивање захтева за планираним одржавањем, 1960. године је формирана радна група (енг. *task force*) за истраживање могућности превентивног одржавања [35]. Радну групу су чинили представници америчких ваздухопловних власти (FAA) и удружења ваздухопловних превозилаца (ATA – *Air Transport Association*). Радна група је дошла до следећих налаза [39]:

- планирана ревизија има мали утицај на поузданост комплексне опреме, осим у случајевима постојања доминантног типа отказа опреме,
- постоји велики број делова код којих није могућа ефективна примена планираног одржавања према фиксном времену рада.

На основу резултата истраживања радне групе, FAA је 1961. године објавила програм поузданости у ваздухопловној индустрији (*FAA/Industry Reliability Program*), који се пре свега односио на моторе. Констатована је чињеница да не постоји директна веза између контроле интервала ревизије мотора и поузданости, те да би наведене предмете требало третирати одвојено. Ова публикација је одобрила пробни период у оквиру којег су оператери могли да уведу програм за праћење поузданости пропульзивног система (*PSRP – Propulsion System Reliability Program*).

Програм поузданости је предвиђао успостављање упозоравајућих (енг. *alert*) вредности интензитета гашења мотора у лету за сваки тип мотора. У случају прекорачења упозоравајућих IFSD вредности захтевано је истраживање узрока прекорачења и спровођење одговарајућих акција одржавања у складу са резултатима истраживања. Основ за продужетак радног века су и даље били налази инспекције делова комплетно растављеног мотора, док је број захтеваних узорка мотора (енг. *sample engine*) за продужетак радног века зависио од величине флоте и кретао се у распону од 1 до 6 [36]. Због смањеног броја мотора обухваћених процесом ревизије дошло је до смањења трошкова одржавања. Поред тога, елиминисање захтева за минималним календарским периодом између сукцесивних екстензија интервала довело је до бржег продужетка времена између ревизије (ТВО). На основу искустава разних оператера у спровођењу пробног програма поузданости, америчке ваздухопловне власти су 1964. године издале саветодавни циркулар (FAA AC 120-17, *Handbook for Maintenance Control by Reliability Methods*). Овај приручник за контролу одржавања методама поузданости је пружао стандарде за утврђивање временских ограничења и служио као водич за израду и развој програма поузданости. Програми поузданости турбинских мотора (TERP – *Turbine Engine Reliability Program*), засновани на AC 120-17, омогућили су брзи раст времена између ревизије (ТВО). На Слици 2.1 је приказан раст времена између ревизије P&W JT4 мотора у флоти оператера *United Airlines*, у функцији календарског времена и примењених програма одржавања.



Слика 2.1 Хронологија раста времена између ревизије P&W JT4 мотора [36]

Основна карактеристика TERP програма била је смањење захтеваног броја узоркованих мотора над којима се обавља ревизија, све док 1968. године овај захтев није био у потпуности елиминисан [36]. Разматрањем дотадашњих метода одржавања утврђена је потреба за развојем ефективнијег концепта одржавања, који ће бити примењен на нове широкотрупне ваздухоплове са турбофенским моторима великог степена двострујности [40]. На скупу америчког ваздухопловног института (AIAA – *American Institute of Aeronautics and Astronautics*), 1967. године је представљена методологија логичког одлучивања за потребе развоја планираног програма одржавања у одсуству оперативног искуства [34]. Удружење ваздухопловних превозилаца (ATA) је 1968. године формирало групу за израду почетног програма одржавања (MSG – *Maintenance Steering Group*), сачињену од представника авиопревозилаца, произвођача и FAA. Радна група је имала мандат да формулише процес логичког одлучивања који ће бити употребљен за развој иницијалних захтева за планираним одржавањем новог типа авиона [39]. На основу резултата рада MSG групе, ATA је 1968. године објавила приручник за оцену и развој програма одржавања авиона *Boeing 747*, под називом „*Maintenance Evaluation and Program Development*“, познатији као MSG-1 документ. Пре издавања MSG-1 документа, процес одржавања према стању је већ био препознат од стране FAA и био примењен на компоненте, док је новина MSG-1 била увођење трећег процеса одржавања праћењем стања. MSG-1 документ представља први покушај примене концепта одржавања према поузданости, који је користио логичко одлучивање у циљу развоја планираног одржавања [35].

Захваљујући универзалним искуствима стеченим у изради програма одржавања авиона *Boeing 747*, закључено је да се MSG-1 приручник може лако прилагодити за примену на нове типове ваздухоплова, елиминисањем задатака одржавања специфичних за *Boeing 747* [37]. ATA је 1970. године израдила нову верзију приручника MSG-2, под називом „*Airline/Manufacturer Maintenance Program Planning Document*“, који је коришћен за израду иницијалних програма одржавања авиона *DC-10* и *L-1011*, произведених 70-их година прошлога века.

При изради програма одржавања према MSG-1 и MSG-2, извршена је подела авиона на структуру, системе и компоненте, и погонску групу [37]. MSG-2 документ је био усмерен на процесе одржавања и анализирао је типове отказа, почев од делова ка већим склоповима (енг. *bottom-up*). Филозофија MSG-2 је заснована на теорији да сви авиони и њихове компоненте достижу временски период када је потребно извршити њихову ревизију [35].

Удружење европских авиопревозилаца (AEA – *Association of European Airlines*) је 1972. године припремило побољшану верзију MSG-2 документа, пре свега у области структуралне и зоналне анализе, под називом „*European Maintenance System Guide*“. Европска верзија MSG методологије, познатија као EMSG, је коришћена за израду програма одржавања авиона *Airbus A300* и *Concorde* [37].

Након развоја MSG методологије за израду програма одржавања, одржавање структуре авиона је преведено на одржавање према стању, одржавање електричних компонената на одржавање праћењем стања, док је одржавање турбинских мотора и даље остало у категорији ограниченог радног века.

Искуствима са прегледа гасо-турбинских мотора, који су спровођени након истека повећаног радног века, утврђене су значајне разлике у нивоима оштећења топлог и хладног дела мотора. Оштећења топлог дела мотора су била знатно већа у поређењу са хладним делом мотора. Као резултат тих налаза, продужен је радни век хладног дела мотора и уведен је преглед топлог дела мотора (HSI – *Hot Section Inspection*), у циљу смањења трошкова и непотребног броја радова. При обављању HSI, растављан је само топли део мотора, над којим су вршени радови ревизије, док се над нерастављеним хладним делом мотора вршио само визуелни преглед ради провере општег стања. Код појединих типова мотора су увођени додатни радови радионичког одржавања, као што је велики преглед мотора (енг. *Engine Heavy Maintenance*), или тзв. стандардна оправка мотора (ESR – *Engine Standard Repair*). Стандардна оправка мотора (ESR) је обухватала радове на прегледу топлог дела мотора (HSI), као и детаљне прегледе и оправке других делова мотора [37].

Програм радова на превентивном одржавању турбофенских мотора, у категорији ограниченог радног века, био је сачињен комбиновањем топлог прегледа мотора (HSI) или стандардне оправке мотора (ESR) са ревизијом мотора (OH).

Развој програма за праћење поузданости и рада мотора, омогућио је увођење одступања од фиксних временских интервала рада, за потребе обављања појединих прегледа. Дефинисањем временског опсега, унутар којег је био омогућен избор тренутка за обављање прегледа, уведен је појам прегледа са прагом (енг. *Threshold Inspection*). Моторима је био одобрен рад на авиону унутар интервала прага, уз захтевано праћење деградације перформанси. На овај начин, оператерима је пружена флексибилност у планирању радионичких радова, заснована на индивидуалној способности мотора да очувају захтевани ниво перформанси.

Предности превентивног одржавања турбинских мотора према фиксном времену рада огледале су се у једноставном планирању одржавања и предвидивим вредностима трошкова радионичког одржавања. Негативна страна оваквог приступа одржавању били су велики трошкови радионичког одржавања због обављања радова над деловима чије стање није захтевало одржавање и чињенице да је време између ревизија мотора било условљено најкраћим радним веком дела који је у њега уграђен [41].

У почетку пробни програм поузданости пропулзивног система, касније је прерастао у стални програм и довео је до значајног слабљења традиционалног наглашавања ревизије у фиксним интервалима као главног фактора поузданости мотора [36].

Утврђивањем разлика у интензитетима погоршања перформанси између појединих делова мотора и развојем метода за праћење стања мотора, отворен је пут примени концепта превентивног одржавања турбофенских мотора према стању.



У извештају америчке компаније *United Airlines* из 1978. године, под називом одржавање према поузданости (RCM – *Reliability Centered Maintenance*), приказана је нова методологија за израду програма одржавања, која се заснивала на провереним и тестираним праксама авиопревозилаца. Деценију након објављивања MSG-2 документа и убрзо након RCM извештаја, АТА је 1979. године формирала нову радну групу са циљем да изврши преглед дотадашњих искустава са MSG-2. Захваљујући заједничком напору стручњака из FAA, АТА, АЕА, и произвођача ваздухоплова из Европе и Америке, дефинисане су нове процедуре анализе и логичког одлучивања, које је АТА објавила 1980. године, у новом документу „*Airline/Manufacturer Maintenance Program Development Document*“, познатијем као MSG-3.

Објављивање MSG-3 документа је довело до значајних промена у поступку израде иницијалног програма одржавања, будући да је методологија одржавања према поузданости употребљена као основ за његову израду.

MSG-3 приступ је оријентисан на задатке одржавања, који се спроводе из безбедоносних, оперативних и економских разлога. Дефинисање задатака одржавања обавља се на основу логичког дијаграма за анализу узрока и последица функционалних отказа на нивоу система, почев од већих склопова ка деловима (енг. *top-down*). За израду програма одржавања уведена је подела ваздухоплова на структуру и системе, при чему се у системе убраја и погонска група. MSG-3 документ представља тренутни индустријски стандард за израду иницијалних програма одржавања ваздухоплова и даљи развој MSG методологије везан је за објављивање ревизија MSG-3 документа. Ревизијама MSG-3 филозофије додата је методологија за побољшано покривање свих типова отказа, као што је увођење програма за превенцију и контролу корозије (CPCP – *Corrosion Prevention and Control Program*), побољшаних процедура зоналне анализе (EZAP – *Enhanced Zonal Analysis Procedures*) и процедура за заштиту од зрачења високог интензитета (L/HIRF – *Lightning/High Intesity Radiated Fields*) [35]. До данас је објављено укупно 10 ревизија, док последња ревизија MSG-3 документа датира из 2013. године.

Објављивањем MSG-3 документа завршен је период интензивног развоја ваздухопловне регулативе и значајних промена у програму одржавања ваздухоплова. Паралелно са развојем и применом нових технологија градње савремених ваздухоплова, у будућности се могу очекивати нови приступи за израду побољшаних програма одржавања.

## 2.2 ПРИМАРНИ ПРОЦЕСИ ОДРЖАВАЊА

---

Примарни процес одржавања представља процес којим се осигурава очување инхерентне поузданости [42]. Цивилне ваздухопловне власти препознају три примарна процеса (категорије) одржавања структуре авиона, компонената, авионских система и мотора:

- према фиксном времену (НТ – *Hard Time*),
- према стању (ОС – *On Condition*),
- праћење стања (СМ – *Condition Monitoring*).

**Одржавање према фиксном времену (НТ)** је примарни процес одржавања који захтева скидање елемената пре или по истеку претходно дефинисаног времена [42]. Временски период за обављање активности одржавања према фиксном времену рада се поклапа са интервалима прегледа авиона или се задаје вредношћу одређеног измеритеља рада (календарско време, часови лета, циклуси лета, итд.).

**Одржавање према стању (ОС)** је примарни процес одржавања, који обухвата периодичне прегледе и/или редовно прикупљање података ради утврђивања стања уређаја, система, или делова структуре, у погледу континуалне исправности [42] [43]. У зависности од утврђеног стања уређаја спроводе се додатне акције одржавања ради очувања континуалне исправности уређаја.

**Одржавање праћењем стања (СМ)** је примарни процес одржавања у оквиру којег се прикупљају и анализирају подаци о отказима читаве популације одређеног типа компоненте, ради утврђивања потребе за алокацијом техничких ресурса [42]. Под ресурсима се подразумевају установе, опрема, људство, резервни делови, потрошни делови и средства која стоје на располагању за потребе одржавања.

Одржавање према фиксном времену (НТ) и одржавање према стању (ОС) спадају у превентивне процесе одржавања, који имају за циљ скидање компонената или уређаја пре појаве отказа. Одржавање праћењем стања (СМ) је корективни процес одржавања, који допушта појаву отказа и примењује се код компонената чији откази немају директан утицај на безбедност лета ваздухоплова.

## 2.3 MSG-3 МЕТОДА

---

MSG-3 анализа система/погонске групе је процес у коме се:

- идентификују сви потенцијални откази сваког система ваздухоплова,
- процењују последице сваког отказа,
- утврђују ефективни задаци одржавања којима се спречава или редукује појава отказа,
- идентификују интервали за обављање изабраних задатака одржавања.

Основни кораци у MSG-3 анализи су:

- подела ваздухоплова на главне функционалне области према АТА,
- селекција делова важних за одржавање на основу последица отказа,
- примена логике за анализу сваког од делова важних за одржавање,
- додела ефективних задатака одржавања и интервала.

Дефинисање иницијалних захтева за одржавањем ваздухоплова (структуре, система/мотора) применом MSG-3 методе почиње класификацијом делова на:

- делове важне за одржавање (MSI – *Maintenance Significant Items*),
- остале делове.

Према важећој АТА спецификацији, произвођач врши поделу ваздухоплова на главне функционалне области, које обухватају АТА системе и подсистеме. Применом тзв. *top-down* приступа, произвођач ваздухоплова формира листу делова, за које је потребно утврдити да ли спадају у делове значајне за одржавање. За сваки део из листе потребно је дати одговор на следећа питања:

- да ли посада лета не може детектовати отказ или је мало вероватно да детектује отказ при обављању редовних задатака?
- да ли отказ утиче на безбедност (на земљи и у ваздуху)?
- да ли отказ има значајан оперативан утицај?
- да ли отказ има значајан економски утицај?

Потврдан одговор на било које од наведених питања захтева спровођење MSG-3 анализе над датим делом. Након разматрања и потврде изабраног нивоа дела у оквиру поделе ваздухоплова, произвођач предлаже Индустијском управном одбору (ICS – *Industry Steering Comitee*) листу MSI делова. ICS обавља преглед листе MSI делова и прослеђује је радним групама (WG – *Working Group*) на верификацију, како би се осигурало да ниједан део од значаја за одржавање није занемарен. Након утврђивања коначне листе MSI делова, следи анализа функције MSI делова, у оквиру које је за сваки MSI део неопходно утврдити:

- функције у нормалном раду (опис функционисања и везе са другим деловима),
- функционалне отказе (отказ дела у обављању своје функције у оквиру дефинисаних ограничења),
- последице отказа (како функционални отказ утиче на друге делове),
- узроке отказа (због чега долази до отказа).

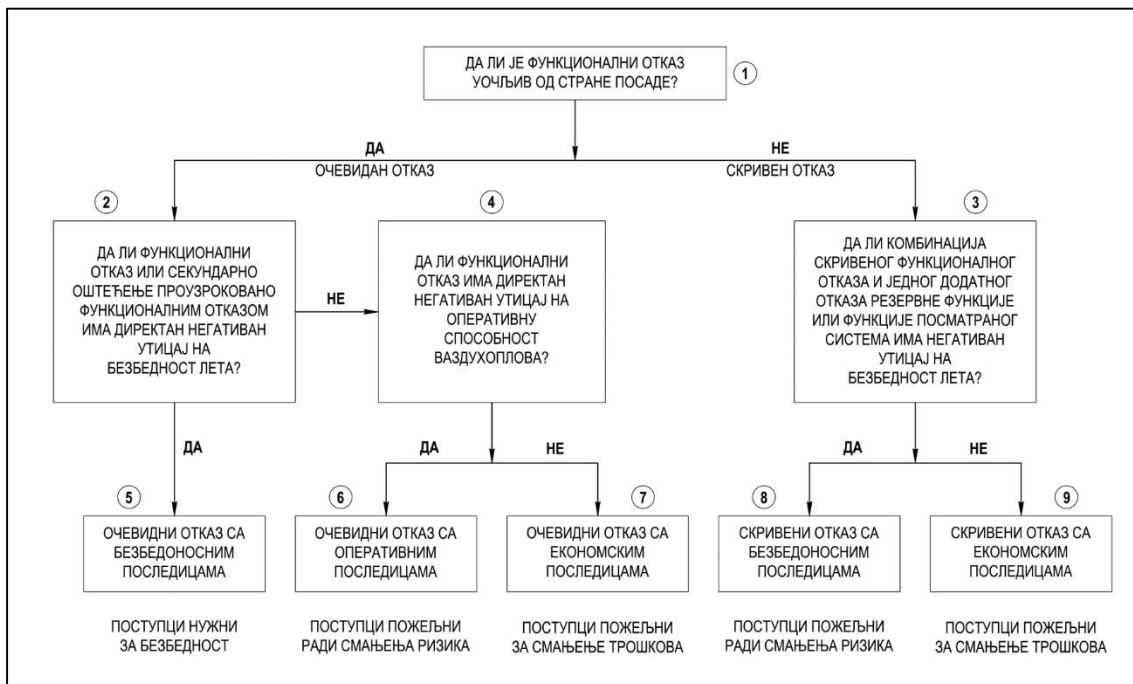
За сваки MSI део формира се радни лист, на коме се поред јасно дефинисаних функција, функционалних отказа, последица отказа и узрока отказа, могу наћи и додатни подаци о делу, као што су серијски број, очекивани интензитет отказа, скривене функције, редувантност, итд.

MSG-3 анализа система/погонске групе ваздухоплова обавља се на два нивоа, коришћењем логичког дијаграма. На првом нивоу одлучивања врши се процена свих функционалних отказа MSI дела, на основу које се MSI део класификује у једну од пет категорија према последицама (ефектима) отказа (FEC – *Failure Effect Category*), које су приказане у Табели 2.1.

Табела 2.1 Категоризација MSI делова према ефектима отказа

КАТЕГОРИЈА (FEC)	ПОСЛЕДИЦЕ ОТКАЗА ( <i>FAILURE EFFECTS</i> )
Категорија 5	Очевидан отказ са безбедносним последицама (енг. <i>Evident Safety</i> )
Категорија 6	Очевидан отказ са оперативним последицама (енг. <i>Evident Operational</i> )
Категорија 7	Очевидан отказ са економским последицама (енг. <i>Evident Economic</i> )
Категорија 8	Скривени отказ са безбедносним последицама (енг. <i>Hidden Safety</i> )
Категорија 9	Скривени отказ са небезбедносним последицама (енг. <i>Hidden Non-Safety</i> )

Поступак класификације делова спроводи се давањем одговора на питања 1, 2, 3, и 4, и пролазом кроз први део логичког дијаграма, који је дат на Слици 2.2.



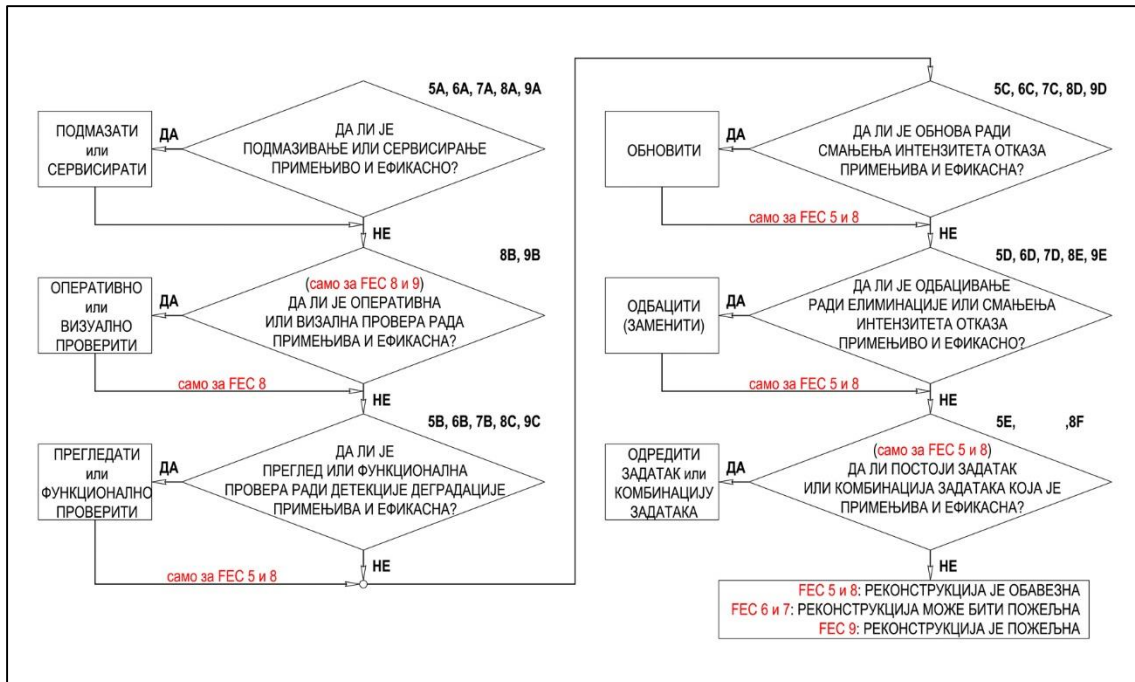
Слика 2.2 Логички дијаграм одлучивања првог нивоа MSG-3 анализе

На другом нивоу MSG-3 анализе врши се одређивање задатака одржавања разматрањем свих узрока сваког функционалног отказа MSI дела, у зависности од FEC категорије којој MSI део припада.

Задаци одржавања који су примењиви на дату FEC категорију MSI дела, бирају се из утврђене генеричке листе задатака одржавања. Генеричка листа задатака одржавања обухвата:

- **Подмазивање/сервисирање** (LU/SV – *Lubricating/Servicing*) – задаци одржавања који су примењиви на све FEC категорије делова са циљем очувања инхерентних способности делова.
- **Оперативна/визуелна провера** (OP/VC – *Operational/Visual Check*) – задаци проналажења отказа који су примењиви на делове у категорији скривених функционалних отказа, како би се утврдило да ли део остварује своју намену.
- **Преглед/функционална провера** (IN/FC – *Inspection/Functional Check*) – задаци проналажења потенцијалних отказа који су примењиви на све FEC категорије делова. Функционалним проверама се квантитативним путем утврђује функционисање делова у захтеваним границама. Примењују се три нивоа прегледа, којима се утврђује да ли део испуњава своју намену:
  - **Општи визуелни преглед** (GVI – *General Visual Inspection*)
  - **Детаљни преглед** (DI – *Detailed Inspection*)
  - **Специјални детаљни преглед** (SDI – *Special Detailed Inspection*)
- **Обнова** (RS – *Restoration*) – оправка којом се део враћа у наведени стандард, намењена свим FEC категоријама делова.
- **Одбацивање** (DS – *Discard*) – повлачење дела из употребе након истека дефинисаног радног века, примењиво на све FEC категорије делова.
- **Комбинација горњих задатака** - намењена искључиво категоријама очевидних и скривених отказа са безбедоносним последицама.

За MSI делове који су класификовани у категорији очевидних (5) или скривених (8) отказа са безбедоносним последицама, потребно је дати одговоре на сва постављена питања, при пролазу кроз логички дијаграм одлучивања другог нивоа MSG-3 анализе, који је приказан на Слици 2.3.



Слика 2.3 Логички дијаграм одлучивања другог нивоа MSG-3 анализе

Уколико се јави већи број позитивних одговора на постављена питања, конкретном MSI делу из безбедоносних категорија (5 и 8) ће сходно томе бити додељен и већи број задатака одржавања. Независно од одговора на прво питање (A), везано за подмазивање/сервисирање, следеће питање (B) из другог дела логичког дијаграма мора бити постављено свим категоријама делова. Потврдан одговор на друго питање (6B, 7B и 9B), које је примењиво на остале категорије делова (6, 7 и 9), омогућава излазак из другог дела логичког дијаграма.

У недостатку расположивих информација за давање одговора на питања у другом делу логичког дијаграма, MSG-3 логика диктира избор негативног одговора и прелазак на наредно питање, које обично нуди избор конзервативнијег и захтевнијег задатка одржавања са аспекта трошкова.

Радна група за одржавање (MWG – *Maintenance Working Group*) у последњем кораку MSG-3 анализе одређује праг и интервал за обављање сваког планираног задатка одржавања, у складу са дефинисаним критеријума примењивости и ефективности, који су приказани у Табели 2.2.

Табела 2.2 Критеријуми за избор задатака одржавања према MSG-3

ЗАДАТАК	КРИТЕРИЈУМ ПРИМЕЊИВОСТИ ЗАДАТКА	КРИТЕРИЈУМ ЕФЕКТИВНОСТИ ЗАДАТКА		
		БЕЗБЕДНОСНИ	ОПЕРАТИВНИ	ЕКОНОМСКИ
LU/SV	- замена потрошног материјала мора смањити интензитет погоршања функције	- смањује ризик појаве отказа	- смањује ризик појаве отказа на прихватљив ниво	- мора бити економски исплатив
OP/VC	- постојање могућности за идентификацију отказа	- обезбеђује адекватну расположивост скривене функције ради смањења ризика појаве вишеструког отказа		- обезбеђује адекватну расположивост скривене функције ради елиминације економских последица вишеструког отказа и мора бити економски исплатив
IN/FC	- смањена отпорност појави отказа мора бити детектабилна - постоји разумно конзистентан интервал између погоршања стања и функционалног отказа	- смањује ризик појаве отказа ради осигурања безбедног рада	- смањује ризик појаве отказа на прихватљив ниво	- мора бити економски исплатив (трошкови задатка морају бити мањи од трошкова отказа)
RS	- део показује карактеристике деградације функције до утврђеног века и већи део популације мора достићи тај век - постојање могућности обнове дела на специфицирани стандард отпорности на отказ	- смањује ризик појаве отказа ради осигурања безбедног рада	- смањује ризик појаве отказа на прихватљив ниво	- мора бити економски исплатив (трошкови задатка морају бити мањи од трошкова отказа)
DS	- део показује карактеристике деградације функције до утврђеног века и већи део популације мора достићи тај век	- безбедни радни век смањује ризик појаве отказа ради осигурања безбедног рада	- смањује ризик појаве отказа на прихватљив ниво	- економски радни век мора бити економски исплатив (трошкови задатка морају бити мањи од трошкова отказа)

Избор адекватног интервала заснива се на расположивим информацијама које обухватају: испитивања, податке и препоруке произвођача, захтеве корисника, оперативна искуства у коришћењу сличних или идентичних делова или најбољу инжењерску процену.



Први корак у избору интервала за обављање задатка одржавања је идентификација адекватног измеритеља рада, који најбоље описује изложеност MSI дела условима који узрокују појаву његовог отказа. Након избора адекватног измеритеља рада MSI дела (календарско време, часови лета, циклуси лета, часови и циклуси рада мотора), MWG врши избор интервала разматрањем детаљних препорука, које су наведене за сваки од задатака одржавања.

У оквиру анализе система и погонске групе ваздухоплова може се увести и процедура узорковања, будући да се пре почетка употребе опреме обично не располаже са довољним бројем информација потребним за утврђивање адекватних интервала за обављање планираних задатака одржавања. Узорковањем се врши испитивање одређеног броја делова у дефинисаним интервалима, како би се потврдило одсуство појаве неочекиваних погоршања функције дела. Преостали број делова, над којима се не спроводи узорковање, може наставити своју оперативну употребу, све док резултати узорковања не укажу на потребу за додатним планираним одржавањем.

## 2.4 КОНЦЕПТ ОДРЖАВАЊА ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА

---

Турбофенски мотор великог степена двострујности је данас најзаступљенији тип гасо-турбинског мотора у цивилном ваздушном саобраћају. Већина делова турбофенских мотора се одржава према стању (ОС), изузев критичних делова мотора који се одржавају према фиксном времену рада (НТ). Одржавање праћењем стања (СМ) примењује се на нивоу целог мотора као секундарни процес одржавања. Њиме се обезбеђује скидање мотора са авиона пре појаве отказа, на основу континуалног праћења стања бројних радних параметара мотора, кроз практичну примену програма за праћење стања мотора (ЕСМ – *Engine Condition Monitoring*).

Може се констатовати да је превентивно одржавање засновано на стању основни концепт одржавања турбофенских мотора, у оквиру којег је мотор предмет контроле примарних процеса одржавања (НТ, ОС, СМ).

Примарни процеси одржавања су међусобно повезани и подједнако важни за програм одржавања мотора. У већини случајева скидање мотора је диктирано концептом одржавања према стању (ОС), али су сва три примарна процеса одржавања једнако важна и приоритет њихове примене зависи искључиво од типа догађаја који прво наступи [43].

У Табели 2.3 је приказана употреба примарних процеса одржавања за контролу употребе и одржавања мотора [43].

**Табела 2.3 Употреба примарних процеса одржавања мотора**

Примарни процес одржавања	Метод	Методологија примене	Акција	Примери
Према фиксном времену рада (НТ)	Превентивни	Ограничење рада мотора на авиону према: - броју часова, - броју циклуса, - календарском времену.	Посета радионици ради: - замене делова са ограниченим радним веком, - ревизије, - осталих задатака радионичког одржавања.	- Делови са ограниченим радним веком, - Примена пловидбених директива.
Према стању (ОС)	Превентивни	Прегледи, провере или верификације: - стања компонената - параметара перформанси	Провера и/или корекција дефеката: - линијска замена компонената, - остали задаци линијског одржавања. или Посета радионици.	- Потрошња уља, - Бороскопска инспекција, - EGT маргина, - Вибрације роторског склопа,
Праћењем стања (СМ)	Предиктивни	- Праћење тренда параметара перформанси, - Процена промене тренда параметара.	- Утврђивање узрока промене тренда, - Корекција дефеката, - Провера вредности параметара наспрам постављених ограничења.	- Промена тренда EGT маргине на полетању, - EGT маргина на полетању, - Број обртаја N1 - Подаци произвођача мотора и оператера о поузданости

## 2.5 ПРОГРАМ ОДРЖАВАЊА И ПОУЗДАНОСТИ

---

Ваздухопловни оператери спроводе одржавање мотора према сопственом програму одржавања, који мора бити одобрен од стране надлежних цивилних ваздухопловних власти. Израда иницијалног програма одржавања заснива се на примени једног од два основна приступа одржавању:

- приступ усмерен на процесе одржавања (енг. *Process Oriented*),
- приступ оријентисан на задатке одржавања (енг. *Task Oriented*).

Данас се за израду иницијалних програма одржавања нових ваздухоплова користи приступ усмерен на задатке одржавања. Оператери могу прилагодити иницијални програм одржавања својим потребама у складу са специфичностима оперативних и климатских услова употребе. Након акумулације оперативног искуства, могу се начинити додатна подешавања програма одржавања од стране ваздухопловне индустрије.

Поред програма одржавања, ваздухопловне власти захтевају од оператера да поседују и спроводе програм за праћење поузданости своје флоте [43]. Свеобухватни програм поузданости обухвата сва три примарна процеса управљања одржавањем и делује као кров под којим се они спроводе. Програм поузданости је секундарни процес управљања одржавањем који служи за процену ефикасности примарних процеса и утврђивање НТ и ОС интервала. Програмом поузданости могу се захтевати измене примарног процеса одржавања дате компоненте или временских интервала за обављање одређених задатака одржавања, као што су скидања или прегледи [43].

У оквиру програма поузданости прикупљају се подаци о налету, примедбе пилота, записи о раду ваздухопловних система, прегледи и испитивања, налази радионице, и остали подаци о употреби авиона и спроводе се статистичка анализа и техничка процена у циљу процене укупне ефикасности програма одржавања и предузимања корективних акција [43].

## 2.6 РАДОВИ НА ОДРЖАВАЊУ ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА

---

Према месту извођења радова, одржавање турбофенских мотора може се поделити на **линијско** и **радионичко**. Линијско одржавање (енг. *On-Wing Maintenance*) се обавља без скидања мотора са авиона и обухвата радове на очувању ваздухопловне пловидбености мотора и његових система [44]. Задаци линијског одржавања мотора се обављају у складу са прописаним процедурама и ограничењима, објављеним у Упутству за одржавање авиона (АММ – *Aircraft Maintenance Manual*). Радионичко одржавање (енг. *Shop Maintenance*) се спроводи у специјализованим моторским радионицама, након скидања мотора са авиона, и обухвата радове на враћању мотора у стање ваздухопловне пловидбености. Линијским одржавањем се врши делимична обнова перформанси, док се радионичким одржавањем обавља делимична или потпуна обнова перформанси мотора, на ниво близак нивоу са почетка експлоатације.

Упутство за радионичко одржавање мотора (ESM – *Engine Shop Manual*) садржи све неопходне информације за обављање радова у моторској радионици. Поред овог документа, произвођачи мотора издају и Водич за планирање радионичких радова (WPG – *Workscope Planning Guide*), који садржи препоруке за дефинисање оптималног програма радова при посети радионици. Над појединачним модулима у моторској радионици може се извршити један од три обима радова, који су дефинисани за сваки тип мотора у WPG:

- Минимални
- Обнова перформанси
- Ревизија

Минимални обим радова односи се на визуелни преглед главног модула мотора који се том приликом не раставља. Обнова перформанси спроводи се над главним модулима мотора. Планирана ревизија главног модула врши се при замени делова са ограниченим радним веком у датом модулу мотора.

Модуларно одржавање мотора се обавља у ваздухопловно-техничким организацијама које немају могућност и компетенције за вршење оправки мотора. Модуларно одржавање је везано само за замену модула мотора. Оправке делова, балансирање ротационих склопова или машински радови који захтевају употребу специјалних алата се не спроводе у установи која обавља модуларно одржавање [45].

---

### **3 УТВРЂИВАЊЕ И ПРАЂЕЊЕ СТАЊА ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА**

---

Прађење стања мотора (ЕНМ – *Engine Health Monitoring*) је процес ажурирања тренутног стања компонената мотора у складу са насталим или могућим појавама погоршања перформанси, током времена израженог преко остварених часова/циклуса рада мотора, коришћењем података добијених током експлоатације мотора [46].

Основни циљ прађења стања мотора је доношење одлука о одржавању мотора, којима се може извршити оптимизација часова рада мотора на авиону са аспекта трошкова, превенција катастрофалних отказа мотора и смањење броја непланираних скидања мотора са авиона. Прађење стања мотора се обавља периодичним сакупљањем података о вредностима радних параметара мотора коришћењем расположивих инструмената и обрадом прикупљених података [47]. Примена система за прађење стања мотора је од виталног значаја за управљење одржавањем мотора и пружа низ могућности као што су: предвиђање отказа компонената мотора пре њиховог настанка, спречавање појаве гашења мотора у лету, смањење броја техничких кашњења и максимизација времена рада мотора на авиону [47].

Примена система одржавања према стању омогућена је развојем техника за дијагностику стања турбинских мотора, савременим приступом начину прикупљања података и интеграцијом уређаја за прађење стања мотора са комуникационим и другим системима [47].

Основни конструктивни захтеви који омогућавају примену одржавања према стању обухватају модуларни тип конструкције, обезбеђивање рупа за бороскопске прегледе и имплементацију система за праћење и дијагностику рада мотора и моторских система [45].

Праћење стања мотора омогућава [47]:

- предвиђање отказа пре њиховог настанка ради обезбеђења довољног времена за спровођење корективних мера,
- продужење коришћења мотора на авиону и смањење броја непотребних скидања мотора или акција одржавања.

Успешно праћење стања турбомлазних мотора се заснива на коришћењу [47]:

- система за прикупљање података,
- техника за дијагностику и
- техника за прогнозу стања.

### 3.1 ПРИКУПЉАЊЕ ПОДАТАКА

---

Прикупљање података о механичком стању компонената и перформансама мотора током коришћења мотора на авиону је основни корак у примени система за праћење стања мотора. Прикупљање података са уграђеног мотора на авиону (енг. *on-wing*) се може вршити током лета авиона (енг. *in-flight*) или при линијском одржавању на земљи (енг. *on-ground*). Основна предност прикупљања података током лета авиона огледа се у могућности праћења стања мотора у реалном времену, која се заснива на употреби комуникационог система ваздухоплова за слање прикупљених података до рачунарског центра, стационараног у инжењерској бази оператера. На тај начин, омогућено је планирање радова на одржавању мотора и активирање потребне логистичке подршке пре самог завршетка лета авиона [47].

Посматрано са аспекта целокупног радног века турбомлазног мотора, одређена количина података о стању компонената мотора прикупља се приликом посета моторској радионици (*SV – Shop Visit*). Завршна фаза сваке посете мотора радионици је испитивање на пробном столу, током које се бележе и прикупљају подаци о перформансама мотора у циљу провере испуњености пловидбених захтева [47].

У данашње време, код модерних ваздухоплова у комерцијалном ваздушном саобраћају бележи се око 30 моторских параметара [47]. Поред моторских параметара, прате се и параметри о стању спољашње средине и режиму рада мотора. Моторски параметари који се прате се могу поделити на [48]:

- параметре гасне струје:
  - укупни однос притисака у мотору (*EPR – Engine Pressure Ratio*),
  - број обртаја ротационог склопа ниског притиска (*N1*),
  - број обртаја ротационог склопа високог притиска (*N2*),
  - температура издувних гасова (*EGT – Exhaust Gas Temperature*),
  - масени проток горива (*FF – Fuel Flow*), итд.
- параметре механичког стања мотора:
  - вибрације фена и језгра мотора,
  - притисак уља,
  - температура уља,
  - потрошња уља, итд.

## 3.2 УРЕЂАЈИ ЗА ПРАЋЕЊЕ СТАЊА

---

У уређаје и средства за праћење стања мотора спадају [49]:

- индикатори у пилотској кабини (енг. *Flight deck indicators*),
- уређаји за бележење параметара током лета (енг. *In-flight indicators*) и
- земаљски индикатори (енг. *Ground indicators*).



Уређаји за праћење стања мотора треба да пруже индикацију о погоршању стања мотора у што је могуће ранијој фази развоја погоршања и омогуће идентификацију модула или области мотора у којој је настало погоршање [47].

Индикатори који се налазе на инструменталној табли у пилотској кабини, односно моторски инструменти, користе се за приказивање вредности параметара рада мотора и пратећих моторских система. Обично се приказују радни параметри, као што су: бројеви обртаја ротационог склопа ниског и високог притиска, температура гасова на турбини, притисак и температура уља за подмазивање, количина и проток горива, итд. Свакако, број и тип моторских индикатора у пилотској кабини зависи од типа ваздухоплова и мотора и специфичних захтева система погонске групе [47].

Поред стандардних индикатора, за праћење стања мотора се могу користити и други уређаји, као што су радијациони пирометри за мерење температуре турбинских лопатица или детектори пумпања и гушења компресора мотора.

Коришћење индикатора у пилотској кабини за потребе праћења стања мотора заснива се на читавању показивања моторских инструмената у условима устаљеног лета, обично током крстарења и ручном бележењу очитаних вредности током сваког лета [47].

Уређаји за бележење моторских параметара током лета, омогућавају аутоматско прикупљање и складиштење вредности изабраних параметара у циљу њихове касније анализе и утврђивања значајних трендова који указују на почетак отказа. Данас се користи систем за праћење стања авиона (*ACMS – Aircraft Condition Monitoring System*) или систем интегрисаних података са авиона (*AIDS – Aircraft Integrated Data System*). Ови системи, поред бележења параметара рада мотора приказаних на индикаторима у пилотској кабини, могу да забележе и додатне параметре, као што су одређене вредности притисака, температура и протока [47].

Подаци које ACMS/AIDS забележи током лета се могу одштампати у пилотској кабини, пребацити на PCMCIA меморијску картицу или флорру диск након лета или бежичним путем емитовати до земаљске станице преко авионског комуникационог система за размену кратких порука (ACARS – *Aircraft Communication and Reporting System*). На рачунарима земаљског особља врши се обрада прикупљених података и идентификација свих случајева рада мотора изван оперативних ограничења [47].

Под земаљским индикаторима се подразумевају уређаји за утврђивање физичког стања унутрашњих делова мотора на земљи. Бороскопи су често коришћени оптички уређаји за визуелни преглед површинског стања унутрашњих компонената мотора. Утврђивање стања лежајева ротационих склопова врши се анализом морфолошких карактеристика феромагнетних честица, које се прикупљају на магнетном детектору (MCD – *Magnetic Chip Detector*), постављеном у повратном воду уљне инсталације. Поред тога, инспекција уљних и појединих горивних филтера на земљи даје шири увид у стање мотора [47].

### 3.3 ТЕХНИКЕ ЗА ДИЈАГНОСТИКУ СТАЊА МОТОРА

---

За потребе утврђивања, праћења и предвиђања исправности компонената мотора примењује се велики број разноврсних дијагностичких техника.

Технике за дијагностику стања турбинских мотора се према концепту могу поделити на [47]:

- технике засноване на утврђивању и праћењу физичког стања компонената мотора,
- технике засноване на праћењу и анализи тренда промене перформанси мотора.

Класично схватање дијагностике стања мотора односи се на директну процену механичког стања компонената. За ту намену најчешће се користе технике за испитивање материјала без разарања (NDT – *Non Destructive Test*), као што су бороскопија, магнетоскопија, пенетрантска инспекција, радиографија, анализа вибрација, итд. Неке NDT технике се могу применити за испитивање компонената мотора при линијском одржавању, док је примена осталих NDT техника ограничена на радионичко одржавање. Уобичајена дијагностика и праћење механичког стања мотора подразумева коришћење техника визуелне инспекције и анализе уља и вибрација [47].

Увођењем методе анализе гасне струје омогућен је развој дијагностике стања засноване на праћењу и анализи перформанси мотора. Анализа гасне струје се користи за детекцију погоршања перформанси мотора која су резултат уочљивих промена мерљивих термодинамичких параметара рада мотора. Идентификација погоршања стања или отказа компонената омогућена је чињеницом да предстојећи откази компонената резултују променом моторских параметара. При томе, одређени типови отказа мотора резултују специфичним променама вредности моторских параметара. Праћењем вредности параметара мотора могуће је установити основни узрок предстојећег отказа. Технике за дијагностику стања, базиране на анализи праћења перформанси мотора, обухватају линеарну и нелинеарну методу анализе гасне струје, методе вештачке интелигенције (неуронске мреже, генетски алгоритми, експертски системи) и методу фази логике [50].

### **3.3.1 БОРОСКОПИЈА**

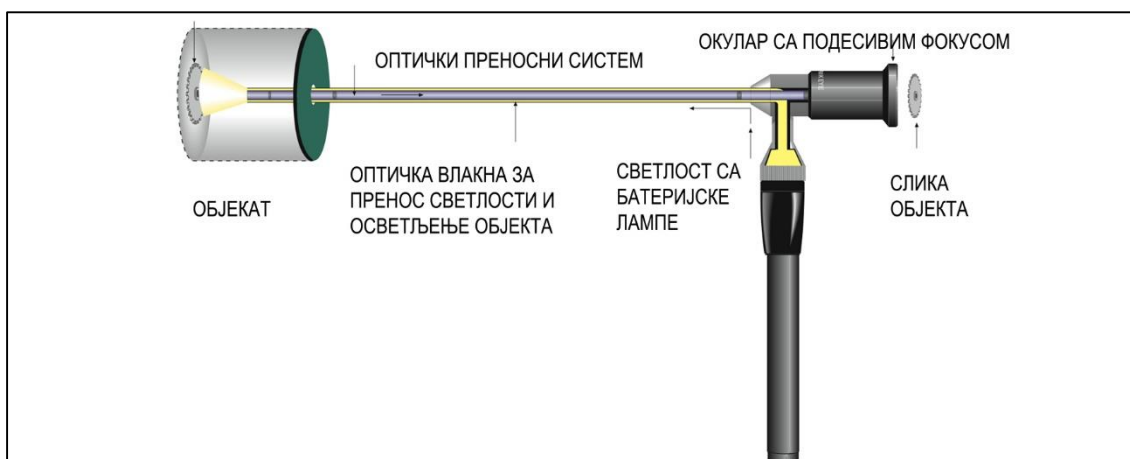
Визуелна инспекција представља основни начин прегледа лако доступних области мотора ради детекције видљивих оштећења, коришћењем осветљења и помоћних алата као што су лупе, сочива и огледала. Бороскопија је у основи визуелна инспекција унутрашњих делова мотора, која се заснива на примени бороскопских оптичких инструмената.

Поједини прегледи мотора, који су некада захтевали скидање мотора, данас се обављају приликом линијског одржавања, захваљујући приступним бороскопским отворима. У почецима примене бороскопије, топлом делу мотора се приступало кроз рупу, након уклањања свећице из система за паљење [51]. Пројектовањем бороскопских отвора за потребе инспекције унутрашњих делова мотора побољшана је ефикасност одржавања и смањени су трошкови одржавања турбинских мотора. Бороскопски отвори, пречника око 9мм [49], постављају се на стратешким локацијама и омогућавају бороскопску инспекцију критичних унутрашњих области мотора, без растављања [52]. Развој бороскопије омогућио је коришћење бороскопских отвора за пролаз алата, којима се могу оправити почетна оштећења на лопатицама компресора и турбина.

У одржавању турбинских мотора користе се три типа инструмената за бороскопску инспекцију унутрашњих делова [52]:

- крути бороскопи,
- флексибилни бороскопи (фиберскопи) и
- флексибилни видео бороскопи (видеоскопи).

Крути бороскоп се састоји из цеви, на чијим крајевима се налазе сочиво објектива и окулар, који су међусобно повезани оптичким преносним системом. Типична конструкција крутог бороскопа је приказана на Слици 3.1.



Слика 3.1 Основни елементи типичне конструкције крутог бороскопа

Оптички преносни систем крутих бороскопа се састоји од система сочива, који служи за пренос примарне слике објекта, формиране на задњој страни сочива објектива, до окулара. Оптички преносни систем је обично окружен оптичким влакнима, која су намењена за пренос светлости са батеријске лампе и осветљење објекта испитивања. Унутрашња слика осветљеног објекта се формира и увећава у сочиву објектива, а затим додатно увећава у окулару, у коме се представља оку посматрача. Основни недостатак крутих бороскопа се огледа у томе што приступ делу који се посматра мора бити дуж праве линије.

За преглед делова који се не могу видети крутим бороскопом, користе се флексибилни бороскопи, код којих се слика преноси оптичким влакнима. Оптичка влакна деле слику посматраног објекта на пикселе, па квалитет слике зависи од броја оптичких влакана и њихове конструкције. Повезивањем фото или видео камере са окуларом, помоћу адаптера, може се обезбедити трајни запис стања унутрашњих делова мотора [52]. Флексибилни бороскопи се нарочито примењују за преглед лопатица, комора за сагоревање, заптивки и других тешко доступних делова турбинских мотора.

Видеоскопи су слични флексибилним бороскопима, с тим што на крају цеви имају минијатурну видео камеру која се може покретати џојстиком, док се на другом крају налази LCD монитор. Екран за приказ слике је интегрални део бороскопског уређаја и омогућава кориснику да управља сондом и прати приказ слике [49]. Захваљујући сензору видео камере са CCD чипом (CCD – *Charge-Coupled Device*), оптички преносни систем флексибилних бороскопа је код видеоскопа замењен електричним каблом, који смањује цену видеоскопа и пружа могућност боље резолуције, у зависности од карактеристика камере.

Дигитални модели видеоскопа нуде прављење видео и фото записа на SD меморијским картицама или директно на хард диску компјутера путем USB кабла, у стандардним дигиталним форматима. На овај начин се добија објективни документ о стању мотора.

Бороскопске инспекције мотора могу бити планиране, специјалне или непланиране [49]. Планиране бороскопске инспекције се врше у регуларним интервалима и део су одобреног програма одржавања мотора. Коморе сагоревања и турбине су најчешћи предмет планираних бороскопских инспекција, због високих температура и напона којима су изложени. Уколико се планираном бороскопском инспекцијом детектује погоршање стања одређене компоненте мотора, приступа се процени погоршања и избору једне од расположивих одлука одржавања [49]:

- одобрава се коришћење мотора уз скраћење инспекцијског интервала,
- захтева се скидање мотора након одређених циклуса или часова рада,
- захтева се моментално скидање мотора ради отклањања дефеката.

Специјалне бороскопске инспекције су намењене праћењу одређених врста дефеката, уочених током коришћења мотора или при посети радионици [49]. Непланиране бороскопске инспекције се често примењују за процену степена оштећења и могућности оправке мотора након одређених инцидената, као што су усисавање страних објеката, пумпање компресора или прекорачења дозвољених вредности температуре издувних гасова и броја обртаја [49].

### **3.3.2 АНАЛИЗА УЉА**

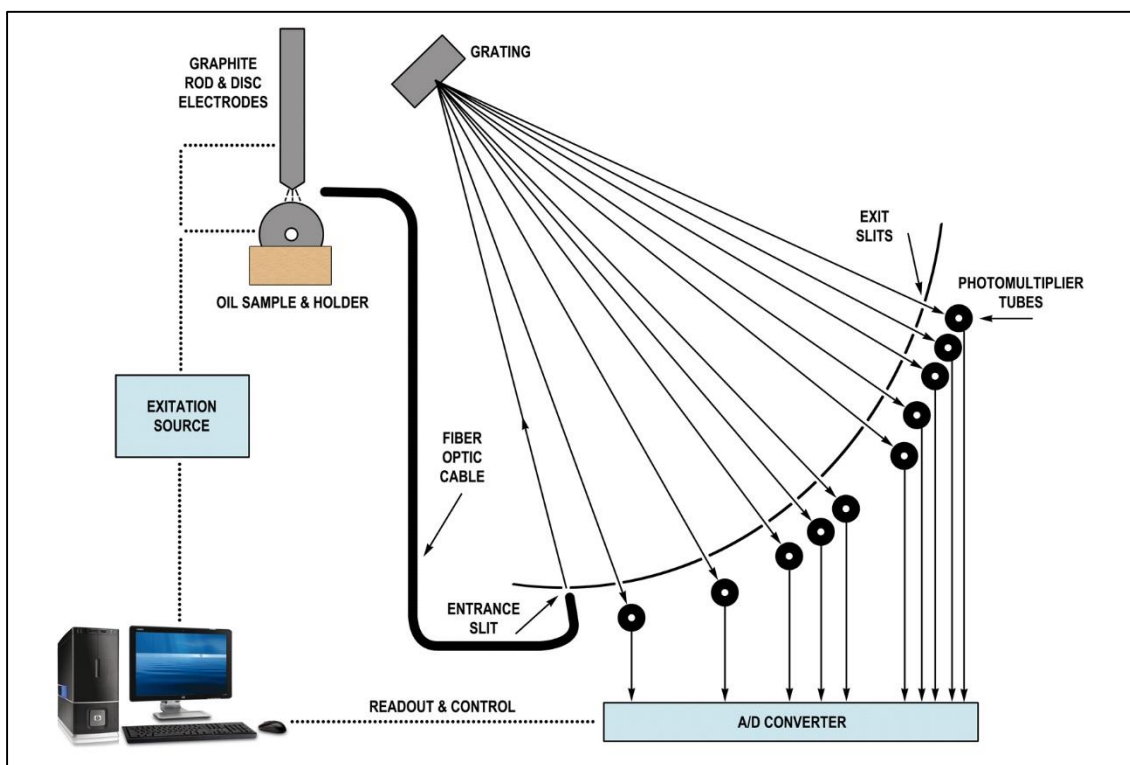
Трење на додирним површинама и хабање материјала са површина у међусобном деловању су основни процеси, који су истовремено присутни при релативном кретању елемената кинематског пара свих механичких система. Иако се трење код турбинских мотора смањује подмазивањем, долази до хабања делова који се подмазују. Процес хабања се најчешће одвија споро и карактерише се константним губитком материјала у јединици времена [53]. Због своје микроскопске величине, честице похабаног метала се не могу видети голим оком, нити осетити прстима, па као такве слободно протичу кроз уљне филтере, остају суспендоване у уљу и присутне су у свим деловима затвореног система за подмазивање [54].

Свако стање мотора, које доводи до промене или пораста нормалне вредности трења између покретних делова у међусобном контакту, резултује повећањем интензитета хабања и количине честица похабаног метала. Уколико се поменуто стање мотора не региструје и отклони на време, даљи пораст прираштаја губитка материјала најчешће доводи до секундарног оштећења других делова система и евентуалног отказа целокупног система [53] [54].

Програм анализе уља турбинских мотора састоји се из спектрометријске анализе уља и евалуације садржаја на филтеру уља и магнетним детекторима. Спектрометријском анализом уља врши се идентификација и одређивање елементарне концентрације микроскопских честица метала, контаминаната и адитива, суспендованих у узорку коришћеног уља за подмазивање мотора. Познавање састава и концентрације метала присутних у узорку уља омогућава утврђивање идентитета и процену стања компонената мотора изложених хабању, као што су лежајеви, уљне пумпе, зупчаници и остали метални делови. У најчешће детектоване елементе спадају: гвожђе, бакар, никл, хром, сребро, магнезијум, алуминијум, калај, олово, бронза, силикон, титанијум, молибден и фосфор [52] [54] [55]. Концентрација идентификованих честица се изражава у милионитим деловима (ppm – *parts per million*) према маси, при чему је један милионити део еквивалентан једном милиграму честице по килограму уља. Максимална дозвољена концентрација се утврђује за сваки метал и назива прагом или границом контаминације [54]. Прекорачење границе контаминације одређених метала може да индицира појаву интензивног хабања или наступајућег отказа компоненте мотора.

Спектрометријска анализа уља заснива се на употреби атомских емисионих спектрометара [56]. Принцип рада атомског емисионог спектрометра се заснива на чињеници да сваки елемент, због своје јединствене атомске структуре, емитује светлост на карактеристичним таласним дужинама, након што се довођењем енергије изврши његова побуда. Мерењем интензитета емитоване светлости, који је пропорционалан количини елемента присутног у узорку, омогућено је одређивање концентрације датог елемента.

За потребе спектрометријске анализе узорака уља најчешће се користи спектрометар са ротирајућом графитном електродом, високе чистоће, у облику диска (RDE – *Rotating Disk Electrode*), који је приказан на Слици 3.2 [56].



Слика 3.2 Шематски приказ RDE спектрометра за анализу уља

Спектрометром типа RDE може се регистровати концентрација честица мањих од 10 $\mu$ m [56]. Након што диск захвати слој уља на свом ободу и донесе га до зазора са вертикалном електродом, иницира се варница између електрода. Услед варнице долази до сагоревања уља и емитовања светлости. Систем сочива или оптичких влакана сакупља и фокусира енергију зрачења са извора, преко улазног прореза на конкавну дифракциону решетку, која врши дисперзију светлости на различите спектралне линије елемената, присутних у узорку уља. Положај излазних прореза је прецизно подешен, тако да одговара таласној дужини светлости одговарајућих метала чије се присуство прати. Фотомултипликаторске цеви детектују и конвертују енергију зрачења у електричну струју, која даје меру концентрације сваког метала присутног у узорку. Резултат мерења се може приказати на екрану, послати на штампу или снимити на хард диск.



Програм спектрометријске анализе уља (SOAP – *Spectrometric Oil Analysis Program*) обухвата периодично узорковање уља и праћење тренда концентрације метала са часовима рада мотора. Узорци уља се обично узимају одмах након престанка рада мотора, док је уље још увек врело [52]. Ради потпуније анализе, при сваком узорковању уља бележи се количина досипаног уља од претходног узорковања и број часова рада мотора од претходне замене уља и филтера.

Код исправног мотора би требало да се утврди спори и константан пораст количине похабаних метала са часовима рада мотора [52]. При свакој замени уља долази до пада концентрације метала и тренд раста започиње са благо повишеним интензитетом [52]. Било какав стрми раст концентрације метала у уљу индицира прекомерно хабање компоненте [52].

Уколико се анализом детектује нагли скок концентрације датог типа метала, потребно је донети једну од следећих одлука, на основу историје одржавања мотора и искуства у анализи уља [54]:

- скратити интервал узорковања,
- заменити уље и размотрити скраћење интервала узорковања,
- истражити области мотора у којима се налази пронађени тип метала.

Програм спектрометријске анализе уља омогућава предвиђање отказа компонената пре њиховог наступања, чиме је повећана безбедност и економичност коришћења мотора [53] [55]. Прави значај анализе уља не лежи у утврђивању количине присутних честица, већ у промени количине појединих честица током времена. Када се правилно и конзистентно користи, и анализира заједно са инспекцијом филтера, разматрањем укупног времена рада, SOAP представља вредан алат у одржавању [52].

Поред тога, спектрометријска анализа уља може се користити као алат за контролу квалитета одржавања, уколико се узорковање уља врши након обављених задатака одржавања [53].

### 3.3.3 ПРАЋЕЊЕ ВИБРАЦИЈА

Нормалан рад турбинских мотора праћен је појавом вибрација. Ниво вибрација зависи од стања ротационих компонената (вратила, лопатице, дискови, лежајеви, зупчаници) и динамичке уравнотежености ротационог склопа. Промена динамичке уравнотежености главног ротационог склопа, изазвана различитим типовима погоршања стања или отказа делова ротирајућег склопа мотора, доводи до постепене или тренутне промене нивоа вибрација. Откази мотора који резултују тренутном неуравнотеженошћу ротационог склопа, као што је лом турбинске лопатице, доводе до нагле промене нивоа вибрација, док други типови отказа, као што је наступајући отказ лежајева, доводе до постепене промене нивоа вибрација [57].

Праћење вибрација је неопходно ради детекције опасних осцилаторних стања турбинских мотора и спречавања појаве секундарних оштећења, узрокованих погоршањем стања компонената. У циљу пружања правовремене индикације о порасту нивоа вибрација мотора користи се систем за праћење вибрација мотора (EVMS – *Engine Vibration Monitoring System*). У систему за праћење вибрација мотора врши се континуално мерење и обрада сигнала о вибрацијама мотора. Основне компоненте система за праћење вибрација су:

- сензори вибрација (енг. *vibration transducers*),
- уређај за обраду сигнала (EVMU – *Engine Vibration Monitoring Unit*), и
- показивач амплитуде вибрација.

За мерење вибрација турбинских мотора могу се користити се два типа сензора: електро-механички сензор брзине вибрација или пиезо-електрични акцелерометар [58]. Код новијих генерација турбинских мотора најчешће се примењују пиезо-електрични акцелерометри. На прикладно одабраним локацијама на мотору се обично уграђују два сензора вибрација у радијалном правцу (управно на осу обртања), тако да један мери вибрације турбинског склопа, а други вибрације фена. Код појединих мотора се на изабраној локацији уграђује један пар сензора, ради повећања поузданости мерења.

Сензори вибрација генеришу електрични (аналогни) сигнал, који је пропорционалан промени амплитуде вибрација са временом. Уређај за праћење вибрација (EVMU) врши пријем и обраду електричних сигнала добијених са сензора вибрација и сензора броја обртаја ротационог склопа ниског N1 и високог притиска N2. Обрада сигнала обухвата следеће кораке:

- појачавање сигнала,
- интеграцију сигнала,
- филтрирање сигнала проласком кроз нископропусни филтер,
- семпловање и конвертовање аналогног сигнала у дигитални,
- брзу Фуријеову трансформацију (FFT – *Fast Fourier Transform*) дигиталног сигнала из временског у фреквентни домен,
- припрему и слање процесираних сигнала за приказ на LCD монитору и снимање података.

Праћење вибрација мотора током лета авиона врши се континуалним приказом измерених амплитуда вибрација при фреквенцији обртаја роторског склопа и њиховим поређењем са прописаним ограничењима из техничких упутстава произвођача. Прекорачење дозвољеног нивоа вибрација активира поруку упозорења и омогућава посади лета да предузме корективне мере пре настанка прекомерног оштећења мотора. Праћењем вибрација мотора је могуће спречити појаву катастрофалних механичких отказа, који могу озбиљно угрозити безбедност лета [59].

На основу података о балансираности мотора, прикупљених током лета, савремени модели уређаја за праћење вибрација (EVMU) могу да прорачунају оптимални распоред корекционих маса и пруже инструкције техничком особљу за замену маса на прорачунатим локацијама. Унапређењем процедуре балансирања фена (енг. *fan trim balance*), која је захтевала покретање мотора на земљи ради прикупљања података о балансираности мотора, прорачун оптималног распореда корекционих маса и накнадно покретање мотора ради верификације, смањени су трошкови горива и емисија буке и штетних гасова.

Уређаји за обраду сигнала могу да прикупе и сниме ограничену количину података, па је забележене податке неопходно пренети на рачунаре земаљског особља, како би се формирала дугорочна база података и омогућила даља анализа и праћење тренда вибрација.

Додатна анализа регистрованих вибрација мотора обавља се применом софтвера произвођача. Идентификација наступајућег отказа ротационих компонента мотора заснива се на анализи амплитуде вибрација у временском и фреквентном домену. С обзиром да одређена компонента мотора поседује сопствени спектар вибрација, описан амплитудом и фреквенцијом вибрација, могуће је детектовати и изоловати компоненту мотора која је узрок промене нивоа вибрација, уколико се промене нивоа региструју при одређеним фреквенцијама.

Ограничења вибрација, карактеристичних за дату компоненту мотора, се задају на основу очекиваних екстремних вредности амплитуда вибрација при релевантним фреквенцијама и средњих вредности параметара вибрација које су добијене праћењем вибрација. За дефинисање ограничења вибрација спроводе се статистичке студије и користи се искуство у експлоатацији мотора [59].

### **3.3.4 ПРАЋЕЊЕ ТРЕНДА ПЕРФОРМАНСИ**

Праћење тренда перформанси врши се поређењем измерених вредности моторских параметара са референтним вредностима, карактеристичним за дати тип мотора. Референтне вредности радних параметара мотора су засноване на подацима добијеним током испитивања мотора у лету, које произвођачи авиона објављују у специјалном упутству за инжењере перформанси (РЕМ – *Performance Engineers Manual*). Идентификација и праћење тренда перформанси мотора обавља се на рачунарима, на којима се врши унос, обрада, приказ и анализа прикупљених података.

Праћење тренда перформанси мотора омогућено је редовним прикупљањем података о радним вредностима авионских и моторских параметара. Бележење вредности авионских параметара (фаза лета, висина, Махов број, тотална температура ваздуха, режим рада система за одвођење ваздуха са компресора мотора и система за спречавање залеђивања) је неопходно ради утврђивања услова оперативне употребе мотора. Прикупљање података о раду турбофенског мотора обухвата бележење бројева обртаја ротационог склопа ниског N1 и високог притиска N2, температуре издувних гасова EGT и масеног протока горива FF. Подаци се обично класификују према фази лета, на податке прикупљене током полетања, пењања или крстарења.

Могућност детектовања промене тренда перформанси мотора зависи од тачности показивања инструмената и тачности забележених података. Због тога произвођачи мотора дефинишу критеријуме за аквизицију података у фазама полетања, пењања и крстарења, који се разликују у зависности од тога да ли се бележење података остварује ручним или аутоматским путем.

Подаци о перформансама мотора се обично генерализују ради једноставнијег приказа утицаја променљивих услова оперативне употребе на вредност одговарајућег радног параметра мотора. Генерализација моторских параметара врши се корекцијом вредности температуре издувних гасова, бројева обртаја, масеног протока горива и потиска мотора.

У циљу праћења тренда перформанси мотора, врши се поређење коригованих вредности забележених моторских параметара са референтним вредностима, при чему се корекција параметара врши на основу забележених вредности авионских параметара. На тај начин се добијају одступања праћених моторског параметра од њихових референтних вредности. Праћење тренда перформанси се заправо остварује праћењем промене вредности одступања моторских параметара током оперативне употребе. Детекција наступајућих отказа делова, погоршања перформанси или инструменталних грешака заснива се на интерпретацији тренда промене моторских параметара.

Почетни корак у праћењу тренда је иницијализација моторских параметара, која се врши рачунањем аритметичке средње вредности неколико првих забележених вредности одступања током полетања и крстарења. Након тога, применом технике експоненцијалног изравнавања временских серија (енг. *exponential smoothing*), добија се експоненцијално отежана покретна средња вредност одступања моторских параметара. За разлику од покретне средње вредности, која обухвата неколико последњих вредности временског низа, експоненцијално отежана покретна средња вредност узима у обзир све вредности временског низа, при чему највећи тежински утицај носе најновији подаци. Експоненцијално изглађивање података врши се према следећој формули [60]:

$$\bar{X}_{NEW} = \bar{X}_{OLD} + \alpha \cdot (X_{NEW} - \bar{X}_{OLD}) \quad (3.1)$$

где су:

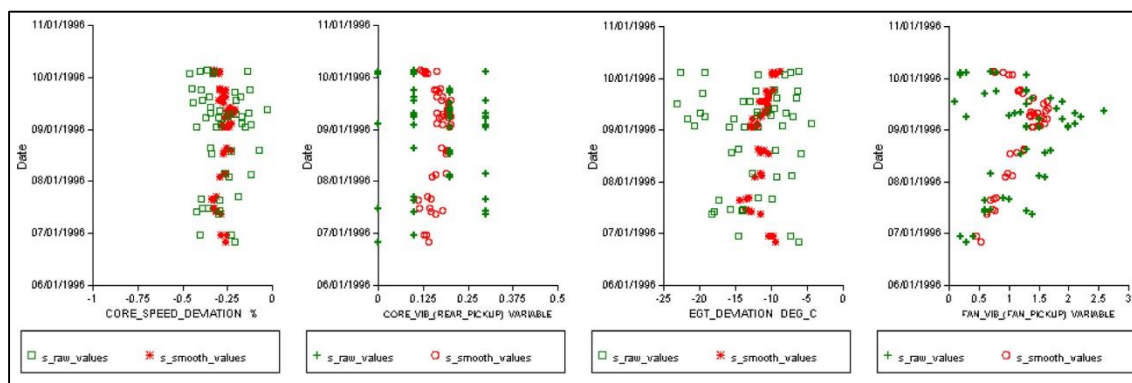
$\alpha$  – коефицијент експоненцијалног изглађивања,

$X_{NEW}$  – нова забележена и коригована вредност одступања параметра мотора,

$\bar{X}_{NEW}$  – нова пондирана вредност одступања параметра мотора,

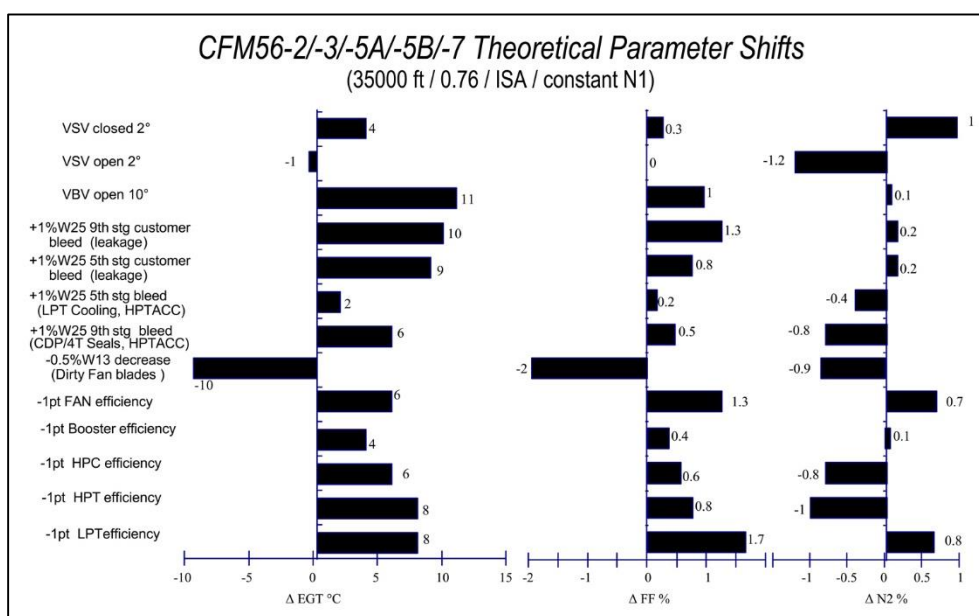
$\bar{X}_{OLD}$  – претходна пондирана вредност одступања параметра мотора.

Усредњавање података има за циљ да смањи колебања забележених одступања моторских параметара и омогући идентификацију тренда промене њихових вредности. Промена нових (енг. *raw*) и експоненцијално отежаних покретних средњих вредности (енг. *smoothed*) одступања параметара мотора у функцији времена може се приказати дијаграмима, као на Слици 3.3 [61].



Слика 3.3 Промена одступања моторских параметара са временом

Одређени типови стања компонента и погоршања перформанси мотора резултују специфичним променама праћених моторских параметара. Произвођачи мотора пружају оператерима информацију о карактеристичним шаблонима промене моторских параметара, који су резултат одређених типова оштећења и погоршања стања компонента. Моторски инжењери оператера користе поменуте шаблоне при интерпретацији тренда и утврђивању стања мотора. На Слици 3.4 су дате теоријске вредности промене параметара мотора CFM56-3, при константним вредностима висине лета, Маховог броја и задатог потиска (N1) у условима стандардне атмосфере [62].



Слика 3.4 Шаблони теоријских промена одступања параметара мотора серије CFM56

Рачунарским програмима се генеришу упозорења о тренду погоршања перформанси који може довести до прекорачења ограничења [47]. Оперативна ограничења одступања параметара мотора дају произвођачи мотора на основу прорачунских модела перформанси мотора и корисници мотора на основу искуства у експлоатацији датих типова мотора.

Праћење тренда перформанси даје увид оператерима у стање и горивну ефикасност свих мотора у флоти, омогућава примену оптималне стратегије за скидање мотора са авиона са аспекта трошкова и процену ефеката примењених модификација на мотору [47].

### 3.4 РЕАЛИЗАЦИЈА СИСТЕМА ЗА ПРАЋЕЊЕ СТАЊА

---

Рана и прецизна дијагностика стања мотора је омогућена редовним ажурирањем информација о стању мотора. Авио-превозиоци обављају анализу стања мотора коришћењем рачунарских програма произвођача мотора, као што су SAGE (*General Electric*) и COMPASS (*Rolls-Royce*). Програми дају извештаје о перформансама мотора у крстарењу, полетању и пењању. Анализом извештаја моторски инжењери врше процену стања и у случају детекције погоршања стања издају захтев механичарима да изврше преглед или спроведу корективну акцију одржавања како би спречили појаву отказа. Последњи корак у реализацији програма за праћење стања мотора је доношење ефикасне одлуке којом се иницира права акција одржавања [47].

Практична примена система за дијагностику и праћење стања мотора је отежана великим бројем проблема. При имплементацији система потребно је утврдити минимални број параметара који ће се пратити, на основу познатог скупа могућих отказа, забележених током вишегодишње експлоатације. Због високих трошкова имплементације, број расположивих сензора на мотору за потребе праћења стања мотора током лета авиона је недовољан, а количина прикупљених података је ограничена услед великих трошкова преноса и складиштења. Са друге стране, појаве лажних упозорења о погоршању стања мотора резултат су недовољно поузданих алгоритама за детекцију релевантних индикатора погоршања стања. Упркос проблемима, континуално праћење стања мотора се успешно примењује у пракси и нуди као услуга великих компанија које се баве одржавањем мотора [47].

Ефективно одржавање мотора је засновано на познавању стања мотора, узрока погоршања стања компонената и спровођењу адекватних корективних акција. Прикупљањем и анализом података омогућена је дијагностика стања мотора која упозорава оператере на појаву проблема које је могуће отклонити док је мотор још увек на авиону [47].



Примена система за праћење стања мотора обезбеђује значајно смањење трошкова експлоатације мотора и представља основну смерницу у развоју система одржавања мотора [47]. Напредне дијагностичке технике омогућавају прецизно утврђивање стања мотора, доношење одлука о одржавању и ефективно искоришћење радног века компонената мотора. Дијагностика стања мотора заснована на анализи перформанси представља најмоћнији алат код кога анализа параметара гасне струје мотора пружа информацију о степену деградације компонената мотора [47].

---

## **4 АНАЛИЗА ГЛАВНИХ УЗРОКА СКИДАЊА МОТОРА СА АВИОНА**

---

Током оперативне употребе мотора долази до погоршања перформанси, трошења ресурса делова са ограниченим радним веком, појаве различитих облика трошења компонената мотора, као и до настанка непредвидивих отказа делова мотора у појединим случајевима. Погоршање перформанси мотора је повезано са променом ефикасности компресора или турбина, погоршањем стабилности рада компресора или повећањем вредности температуре издувних гасова. Применом програма за праћење стања мотора може се детектовати и пратити погоршање перформанси и трошење компонената мотора. Маргина температуре издувних гасова је најчешће коришћени параметар за праћење погоршања перформанси мотора. Ресурс делова са ограниченим радним веком поставља ограничење рада мотора на авиону према фиксном броју циклуса и може се једноставно пратити бележењем оствареног налета мотора.

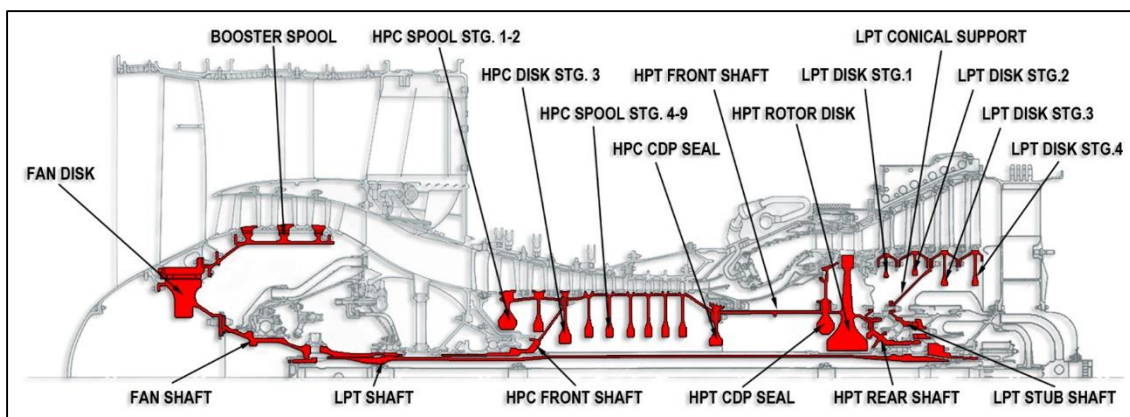
Уколико се приликом спровођења програма за праћење стања утврди да одређени модул мотора више не задовољава дефинисане захтеве по питању перформанси, потребно га је заменити са резервним модулом или приступити обнови његових перформанси. Због разлика у интензитету погоршања перформанси међу модулима мотора, обнова перформанси неких модула, као што је језгро мотора, обавља се након краћих интервала рада мотора на авиону. Замена делова са ограниченим радним веком се врши након истека њиховог ресурса. Интервали замене делова са ограниченим радним веком се такође разликују због различитих оптерећења којима су делови изложени.

Обнова перформанси појединачних модула мотора, замена делова са ограниченим радним веком и оправке оштећења компонената спроводе се у специјализованим моторским радионицама и захтевају скидање мотора са авиона. У главне узроке скидања мотора са авиона спадају:

- погоршање перформанси главних модула мотора,
- истрошеност ресурса делова са ограниченим радним веком,
- трошење компонената мотора и
- појава непланираних догађаја (оштећења страним објектима, неконтролисана гашења мотора у лету, удар птица, итд.)

#### 4.1 ДЕЛОВИ СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКОМ

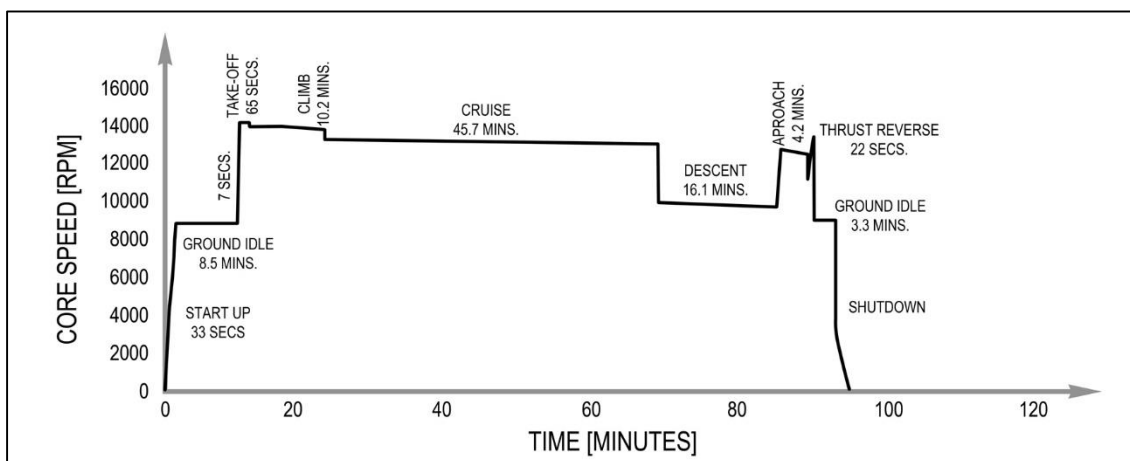
Иако се данашњи ваздухопловни гасо-турбински мотори одржавају према стању или праћењем стања, неке од њихових критичних компонената, у које углавном спадају дискови, вратила и ротирајуће заптивке, и даље подлежу фиксним ограничењима времена рада. Поменуте компоненте се називају деловима са ограниченим радним веком (LLP – *Life Limited Parts*) и дефинишу као „*роторски и главни статорски делови структуре мотора, чији ће отказ вероватно имати опасне последице по мотор*“ [63]. На Слици 4.1 је дат илустративни приказ делова са ограниченим радним веком на мотору типа CFM56-3.



Слика 4.1 Делови са ограниченим радним веком на мотору CFM56-3

Будући да се делови са ограниченим радним веком посматрају као компоненте мотора са фиксним временом рада, они се морају заменити након истека ресурса. Ресурс делова са ограниченим радним веком је дефинисан дозвољеним (максималним) бројем циклуса рада на мотору. Иако се неки од делова могу заменити „на крилу“, замена већине делова са ограниченим радним веком захтева скидање мотора са авиона, што са собом носи високе трошкове посете радионици, који су пре свега резултат високих трошкова материјала. Према томе, преосталим ресурсом делова са ограниченим радним веком одређен је интервал рада и тренутак скидања мотора са авиона.

Ресурс делова са ограниченим радним веком је резултат детаљне анализе топлотних и механичких оптерећења критичних делова мотора, коју обавља произвођач мотора. Одређивање безбедног радног века критичних делова цивилних мотора заснива се на карактеристикама ниско-цикличног замора материјала и претпоставци да је појава прскотина неприхватљива [41].



Слика 4.2 Типични приказ мисије мотора CFM56-3B1 са 20.1Klbs потиска на авиону B737-300

За типични профил мисије (Слика 4.2) утврђују се максималне вредности температура и напона у сваком од критичних делова мотора, а затим се применом крива ниско-цикличног замора материјала израчунава минимални прорачунски радни век делова у циклусима. Ресурс делова са ограниченим радним веком је обично краћи од прорачунског радног века. Овако утврђен ресурс објављује се у упутству за одржавање мотора (енг. *Manual Limit*) и захтева одобрење од надлежних ваздухопловних власти.

Ресурс већине делова са ограниченим радним веком се креће између 15000 и 30000 циклуса рада [64]. У сваком од главних модула мотора је уграђен извештај број делова са ограниченим радним веком. На пример, у мотору типа CFM56-3 се налази укупно 19 делова са ограниченим радним веком, чији су ресурси приказани у Табели 4.1.

Табела 4.1 Ресурс делова са ограниченим радним веком на мотору CFM56-3

NO.	MODULE	DESCRIPTION	LIFE LIMIT [CYCLES]		
			Cat A	Cat B	Cat C
1	FAN & BOOSTER	Booster Spool	30000	30000	30000
2		Fan Disk	30000	24900	20100
3		Fan Shaft	30000	30000	30000
4	HPC	HPC Front Shaft	20000	20000	20000
5		HPC Spool Stg. 1-2	20000	20000	20000
6		HPC Disk Stg. 3	20000	20000	20000
7		HPC Spool Stg. 4-9	20000	20000	15800
8		HPC CDP Seal	20000	18000	15000
9	HPT	HPT Front Shaft	20000	17300	17000
10		HPT CDP Seal	20000	15800	15100
11		HPT Rotor Disk	20000	18500	16600
12		HPT Rear Shaft	20000	20000	20000
13	LPT	LPT Disk Stg. 1	25000	25000	25000
14		LPT Disk Stg. 2	25000	25000	25000
15		LPT Disk Stg. 3	25000	25000	25000
16		LPT Disk Stg. 4	25000	25000	25000
17		LPT Conical Support	25000	25000	25000
18		LPT Shaft	30000	30000	30000
19		LPT Stub Shaft	25000	25000	25000

Три дела са ограниченим радним веком се налазе у FAN & BOOSTER модулу мотора CFM56-3 и имају радни век од 30000 циклуса. Пет делова са ограниченим радним веком у HPC, и четири дела у HPT модулу имају радни век од 20000 циклуса. Преосталих седам делова у LPT модулу имају радни век од 25000 циклуса. Произвођачи мотора настоје да деловима са ограниченим радним веком у конкретном модулу мотора обезбеде приближно исти ресурс. Поједини серијски бројеви делова ограниченог радног века (енг. *part number*) могу имати краћи радни век, који им је наметнут Налозима за пловидбеност (AD – *Airworthiness Directive*) или другим техничким проблемима, као што су промена карактеристика замора или чврстоће материјала [65].

Ресурс делова са ограниченим радним веком зависи од модула у коме се делови налазе, као и од категорије потиска у којој се мотор користи. Радни век модула мотора је заправо одређен најкраћим ресурсом дела са ограниченим радним веком који је у њега уграђен. Најкраћи ресурс имају делови са ограниченим радним веком у језгру мотора, док је у хладном делу мотора ресурс делова највећи. Због поменутих разлика у ресурсима делова по модулима мотора, при конкретној посети радионици се најчешће спроводи замена делова са ограниченим радним веком у једном, или у два главна модула, док је случај замене комплетног сета делова изузетно редак. Ресурс делова са ограниченим радним веком одражава тежину радних услова којима је део изложен. Због тога је појединим деловима са ограниченим радним веком, који се користе на моторима са већим максималним потиском на полетању, смањен максимално дозвољени број циклуса рада. Поменуто смањење, поред скраћења радног века модула мотора у већим категоријама потиска, уводи додатне разлике у ресурсима делова са ограниченим радним веком унутар модула мотора и тиме доприноси порасту комплексности проблема управљања ресурсима делова са ограниченим радним веком на нивоу флоте оператера. У циљу смањења трошкова посете радионици и директних трошкова радионичког одржавања потребно је спровести пажљиву анализу планирања замене делова са ограниченим радним веком.

## 4.2 EGT МАРГИНА

~~~~~

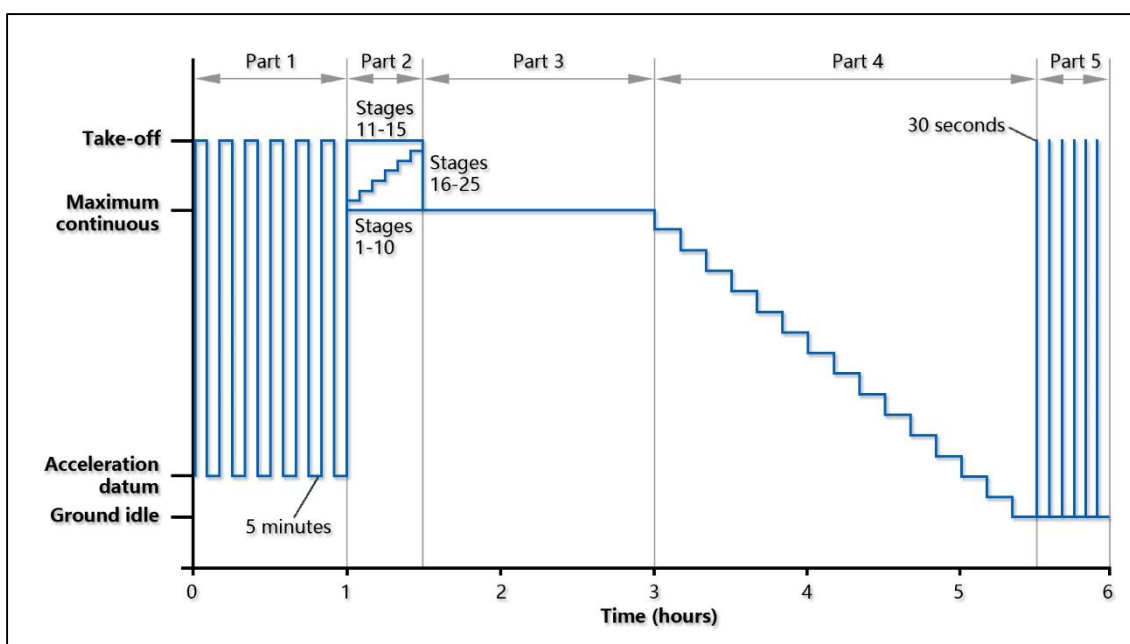
Вредност EGT маргине опада са погоршањем перформанси мотора, услед пораста радне температуре издувних гасова, и захтева скидање мотора са авиона ради обнове перформанси. Не разматрајући остале разлоге скидања, мотор се може користити на авиону све док се EGT маргина не истроши. Према томе, EGT маргина представља један од кључних моторских параметара, чије праћење има суштински значај за оцену општег стања мотора.

#### 4.2.1 СЕРТИФИКАЦИЈА И УТВРЂИВАЊЕ EGT ЛИМИТА

Максимално дозвољена вредност температуре издувних гасова утврђује се током сертификације датог типа мотора и представља једно од најважнијих оперативних ограничења турбинских мотора. У поступку сертификације према FAR33/EASA прописима обавља се низ захтеваних испитивања, којима се демонстрира конструктивна и оперативна способност датог типа мотора. Тест издржљивости мотора (енг. *Endurance Test*) је једно од захтеваних испитивања, којим се демонстрира конструктивни интегритет мотора и утврђују максималне дозвољене вредности радних параметара мотора:

- оперативно ограничење бројева обртаја (*N1 Limit, N2 Limit*), и
- оперативно ограничење температуре издувних гасова (*EGT red line*).

Типичан програм испитивања издржљивости мотора [49], који је приказан на Слици 4.3, састоји се из серије од 25 покретања мотора (блокова рада мотора), у трајању од по 6 часова, током којих мотор укупно оствари 150 часова рада. Један блок рада је подељен на 5 различитих делова (енг. *Part*), који обухватају рад мотора на режимима максималног потиска на полетању, максималног континуалног потиска, режиме рада са инкременталним повећањем или смањењем потиска, као и убрзања и успорења роторског склопа.



Слика 4.3 Испитивање издржљивости мотора

Блокови рада се међусобно разликују према другом делу (*Part 2*), где се мотор ставља 10 пута на режим максималног континуалног потиска (*Stages 1-10*), 5 пута на режим максималног потиска на полетању (*Stages 11-15*) и 10 пута на режиме инкременталне промене потиска, између максималног континуалног и максималног на полетању (*Stages 16-25*). При сваком покретању, мотор у просеку ради око 40 минута у режиму максималног потиска, са просечним вредностима EGT једнаким оперативном ограничењу EGT. По завршетку испитивања издржљивости, мотор се раставља ради прегледа компонената, чије стање мора да задовољава услове за безбедан наставак рада [66].

Мотори који се сертифицију према FAR33 прописима, морају да прођу и тест тоplotног преоптерећења (енг. *Overtemperature test*), којим се демонстрира способност мотора да издржи петоминутни рад на максималним бројевима обртаја роторског склопа ниског %N1 и високог притиска %N2, при вредностима EGT за најмање 42°C већим од оперативног ограничења EGT. Мотор успешно пролази испитивање уколико се након растављања утврди да је стање компонента мотора унутар дозвољених граница поправке.

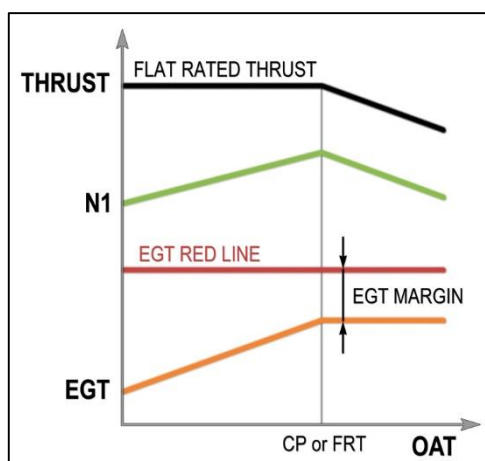
Према томе, модерни турбофенски мотори су пројектовани и сертифицирани према екстремним радним условима. Вредности EGT које се остварују током оперативне употребе мотора су знатно ниже од вредности EGT којима се мотори излажу у поступку сертификације, у циљу добијања Потврде о типу (енг. *Engine Type Certificate*).

#### **4.2.2 ДЕФИНИЦИЈА EGT МАРГИНЕ**

Систем за управљање радом цивилних турбофенских мотора је пројектован да пружи константну вредност максималног потиска на полетању са повећањем температуре околног ваздуха (OAT – *Outside Air Temperature*) до одређене вредности температуре (CP – *Corner Point*), како би се задовољили захтеви за перформансама ваздухоплова [67].



CP температура<sup>1</sup> представља највећу температуру околног ваздуха при којој је могуће остварити максимални потисак на датој надморској висини. Даљи пораст температуре околног ваздуха изнад CP, доводи до пада максималног потиска због температурног ограничења рада мотора (Слика 4.4). Управљање радом мотора се врши задавањем вредности броја обртаја роторског склопа ниског притиска %N1 (код GE и CFM мотора) или задавањем вредности односа притисака у мотору EPR (код P&W и RR мотора) [68]. Са повећањем OAT до CP, због пада густине ваздуха потребно је повећавати број обртаја %N1 да би се остварила иста вредност максималног потиска. Повећање броја обртаја %N1 се остварује повећањем масеног протока горива до коморе сагоревања, што доводи до раста EGT. На температурама већим од CP потребно је смањивати број обртаја %N1 да би се остварила константна EGT [67]. Главни разлог пада носивости авиона на OAT већим од CP је одржање константне вредности EGT, које је условљено топлотним ограничењем рада мотора [69].



Слика 4.4 Максимални потисак мотора и EGT маргина

**EGT маргина** (Слика 4.4) представља пројекцију разлике између оперативног (сертификованог) ограничења EGT и процењене максималне EGT коју би мотор остварио на полетању са максималним потиском, при референтним условима [69]. Референтни услови су дефинисани температуром околног ваздуха једнакој или већој од CP и притиском на нивоу мора. CP зависи од типа мотора и већа је од стандардне ISA вредности температуре за око +15°C.

<sup>1</sup> У литератури се ова температура често назива и FRT - *Flat Rate Temperature*

Стварна максимална вредност EGT на полетању мери се на улазу у турбину ниског притиска (код *CFM*, *EA*, *GE*, и *RR* мотора), или на излазу из турбине ниског притиска (код *P&W* и *IAE* мотора) [70] и читава се са EGT показивача на инструменталној табли. Очитана вредност максималне EGT се затим, коришћењем упутства произвођача, пројектује на очекивану вредност EGT, која би се јавила у случају да се полетање са максималним потиском заиста десило при референтним условима.

Према томе, EGT маргина не представља просту разлику између очитане максималне EGT на полетању и сертификованог EGT ограничења, јер се полетања авиона обично изводе са смањеним вредностима потиска, док услови околне средине често одступају од референтних услова [70].

#### **4.2.3 ФАКТОРИ КОЈИ УТИЧУ НА ВРЕДНОСТ EGT НА ПОЛЕТАЊУ**

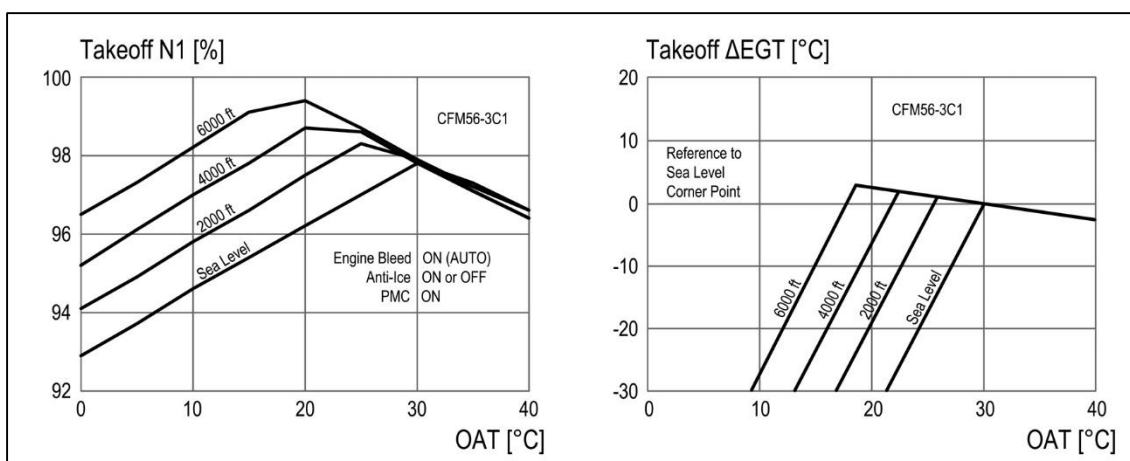
Максимална вредност EGT на полетању зависи од [71]:

- стварне вредности температуре околног ваздуха OAT,
- задатог броја обртаја %N1 (или односа притисака EPR),
- типа уређаја за управљање радом мотора, и
- стања мотора.

При полетању са максималним потиском, EGT линеарно расте са повећањем OAT до CP (област ограничења потиска према максималној разлици притисака), а након CP остаје приближно константна (област ограничења потиска према максималној температури). Код мотора типа *CFM56-3*, градијент пораста EGT са повећањем OAT до CP износи око 3.2, а CP температура на нивоу мора износи 30°C [72]. То значи да би на полетању са максималним потиском на нивоу мора, максимална вредност EGT била већа за 32°C, уколико би у области ограничења потиска мотора према максималној разлици притисака, температура околног ваздуха порасла за 10°C (на пример са 15°C на 25°C).

EGT такође расте са повећањем задатог броја обртаја %N1, до броја обртаја који одговара максималном потиску на полетању, при датој вредности ОАТ. Примера ради, за константне вредности температуре околног ваздуха и Маховог броја на полетању, повећање броја обртаја N1 за 1% је еквивалентно повећању EGT за приближно 10°C, код мотора типа CFM56-3 [73].

За задату вредност броја обртаја %N1, потисак мотора опада са повећањем висине по притиску. Да би надоместили губитак потиска са висином, произвођачи мотора одобравају мало повећање броја обртаја %N1 на већим надморским висинама, које је резултат компромиса између потреба за бољим перформансама авиона на полетању, наспрам конструктивних ограничења и трошкова одржавања мотора [74]. На Слици 4.5 је дата промена задатог броја обртаја %N1 у функцији температуре околног ваздуха и висине по притиску за остваривање максималног потиска на полетању мотора типа CFM56-3C1.



Слика 4.5 Промена броја обртаја %N1 и температуре издувних гасова EGT са висином по притиску и температуром околног ваздуха OAT

Висина по притиску на аеродрому полетања, сама по себи, не утиче на вредност EGT [71]. Њен утицај на EGT је заправо резултат одобреног повећања броја обртаја %N1, које је инплементирано у систем за управљање радом мотора. Према томе, полетања са максималним потиском на већим надморским висинама резултоваће порастом EGT и падом EGT маргине, због повећања броја обртаја %N1 (Слика 4.5). Вредности пораста EGT и пада EGT маргине зависе од надморске висине, типа мотора и система за управљање његовим радом.

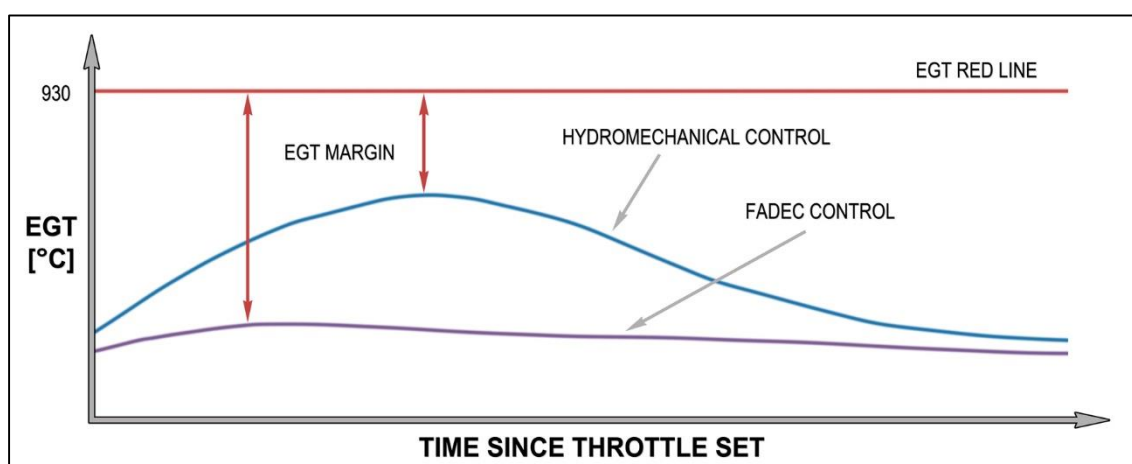
Број обртаја %N1, који је потребно задати да би се остварио максимални потисак на полетању зависи и од режима рада (*Auto/High/Off*) система за одвођење ваздуха са компресора мотора (*Engine Bleeds*). Одвођење одређене количине ваздуха са компресора мотора за потребе рада авионског система за климатизацију и пресуризацију довешће до пада потиска мотора и смањења броја обртаја %N1. Да би се надокнадио пад потиска, потребно је повећати масени проток горива, што резултује повећаном EGT.

Систем за управљање радом мотора је обично подешен да у режиму максималног потиска на полетању минимизира пораст EGT при укључењу система за одвођење ваздуха са компресора мотора (*Bleeds ON*), путем незнатног смањења броја обртаја %N1. Резултат оваквог начина управљања мотором је да избор радног стања система за одвођење ваздуха са компресора мотора (*Bleeds ON* или *Bleeds OFF*), при полетању са максималним потиском, практично не утиче на вредност EGT. Међутим, при полетању са смањеним потиском, систем за управљање радом мотора је подешен да повећањем масеног протока горива надомести пад броја обртаја због одвођења ваздуха са мотора, што доводи до повећања вредности EGT.

Према томе, коришћење процедура за полетање са смањеним потиском у комбинацији са искључењем одвођења ваздуха са компресора мотора (*Bleeds OFF*) омогућава остваривање мањих вредности EGT и повећава радни век мотора на авиону.

Одвођење ваздуха за потребе спречавања залеђивања нападне ивице уводника мотора (*Engine Anti-Ice*) не доводи до пада задатог броја обртаја мотора. Када је укључено загревање уводника мотора (*Engine Anti-Ice ON*), систем за управљање радом мотора повећањем масеног протока горива одржава задати број обртаја уз пратећи пораст EGT. Међутим, наведено повећање EGT нема штетно дејство на мотор, будући да се систем за спречавање залеђивања мотора користи само при ниским вредностима температуре околног ваздуха.

Приликом полетања авиона, мотори раде у прелазном режиму рада, током којег се роторски склоп убрзава до задатог броја обртаја. Паралелно са убрзањем роторског склопа расте и EGT. Након достизања броја обртаја, задатог ручицом гаса, EGT наставља да постепено расте, достиже максималну вредност и у зависности од типа система за управљање радом мотора, пада на 5-20°C нижу вредност од максималне [69]. Описана појава прескока EGT (*EGT Overshoot* или *EGT Bloom*) је приказана на Слици 4.6 и представља прелазну карактеристику мотора, која се узима у обзир приликом одређивања броја обртаја N1, потребног за остваривање перформанси авиона на полетању. Максимална вредност EGT обично настаје током иницијалног пењања, пре преласка на режим рада мотора на потисак при пењању [69].



Слика 4.6 Прелазне карактеристике мотора са механичким и дигиталним системом управљања

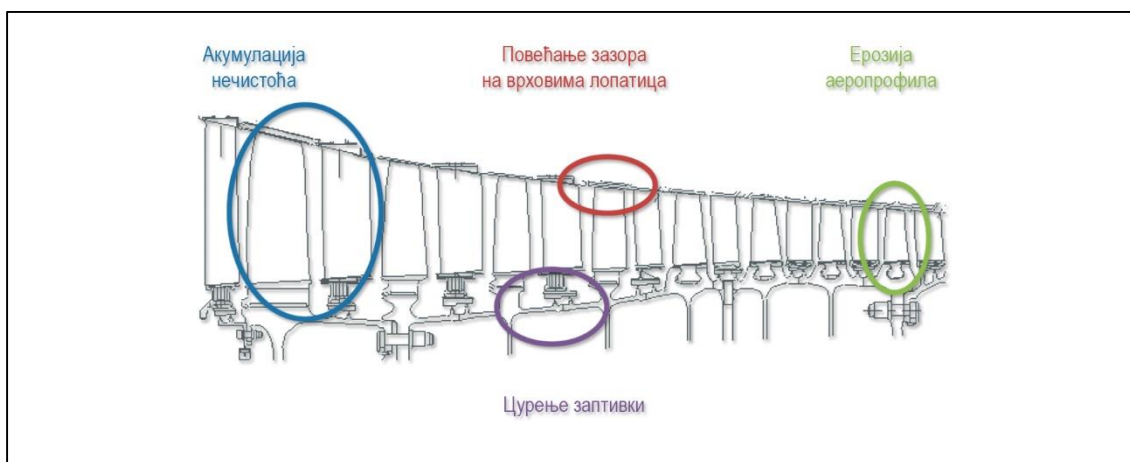
Код CFM мотора, хидромеханички систем за управљање радом мотора (*MEC – Mechanical Engine Control*) контролом масеног протока горива одржава број обртаја роторског склопа високог притиска N2, који одговара задатом положају ручице гаса [73]. Услед различитог топлотног ширења статичких и ротационих компонената мотора, долази до пада ефикасности језгра, па је неопходно повећање масеног протока горива ради одржања вредности N2, при чему расте и EGT. Због веће расположиве енергије на улазу у турбину ниског притиска, долази и до повећања броја обртаја роторског склопа ниског притиска N1. Након стабилизације топлотног ширења компонената језгра мотора долази до побољшања ефикасности језгра и пада вредности EGT и N1.

Дигитални систем за управљање радом CFM мотора (FADEC – *Full Authority Digital Engine Control*) одржава задату вредност броја обртаја N1 и настоји да максимизује ефикасност компонената за време прелазних и стационарних режима рада мотора, тако што управља положајима вентила за одвођење ваздуха, вентила за активну контролу зазора и окретних статорских лопатица [73]. Као резултат побољшане ефикасности мотора долази до смањења вредности EGT прескока. Радне вредности EGT зависе и од стања и истрошености компонената мотора. Мотори временом бивају све више топлотно оптерећени, вредности моторских параметара се приближавају граничним вредностима и захтевају радионичку обнову перформанси мотора.

#### 4.2.4 РАЗЛОЗИ ТРОШЕЊА EGT МАРГИНЕ

Паралелно са акумулирањем циклуса рада мотора долази до погоршања перформанси из различитих разлога. Типични узроци погоршања перформанси мотора, приказани на Слици 4.7, углавном настају као резултат:

- прљања и акумулације нечистоћа на лопатицама фена и компресора,
- повећања зазора на врховима лопатица компресора и турбина услед хабања и ерозије,
- цурења оштећених ваздушних заптивки услед хабања и ерозије, и
- ерозије аеропрофила.



Слика 4.7 Типични механизми погоршања перформанси турбофенских мотора [75]

Трошење уљних заптивки доводи до истицања уља из кућишта лежајева, које се разлива дуж лопатица фена и компресора под дејством центрифугалне силе. На тај начин се формира лепљива површина која привлачи нечистоће из атмосфере. Акумулација нечистоћа и трошење абразивног материјала облоге фена доводе до повећања степена запрљаности, што резултује повећаним губицима перформанси [76]. Постепени пораст зазора између врхова роторских лопатица компресора и турбине и кућишта мотора доводи до повећаних губитака масеног протока и преливања пропулзивног флуида, које резултује падом укупне ефикасности мотора и повећањем специфичне потрошње горива [65]. Ерозија представља абразивно хабање материјала које настаје као резултат судара микронских честица прашине и унутрашњих делова мотора [76]. Под дејством ерозије долази до промене облика аеропрофила лопатица и оштећења финално обрађених аеродинамичких површина [77], што постепено доводи до пада аеродинамичких перформанси. Лопатице фена и компресора су изложене дугорочној ерозији, док је појава ерозије на турбинским лопатицама обично резултат дејства угљеничних честица, које могу настати услед непотпуног сагоревања горива.

Наведене појаве доводе до нежељених промена ефикасности компонената и масеног протока главне струје пропулзивног флуида. Због погоршања перформанси мотора неопходна је употреба веће количине горива за генерисање истог нивоа потиска мотора, што доводи до повећања температуре издувних гасова и пада EGT маргине. Примера ради, губитак EGT маргине у износу од 15°C повећава специфичну потрошњу горива (SFC – *Specific Fuel Consumption*) за приближно 1% [67].

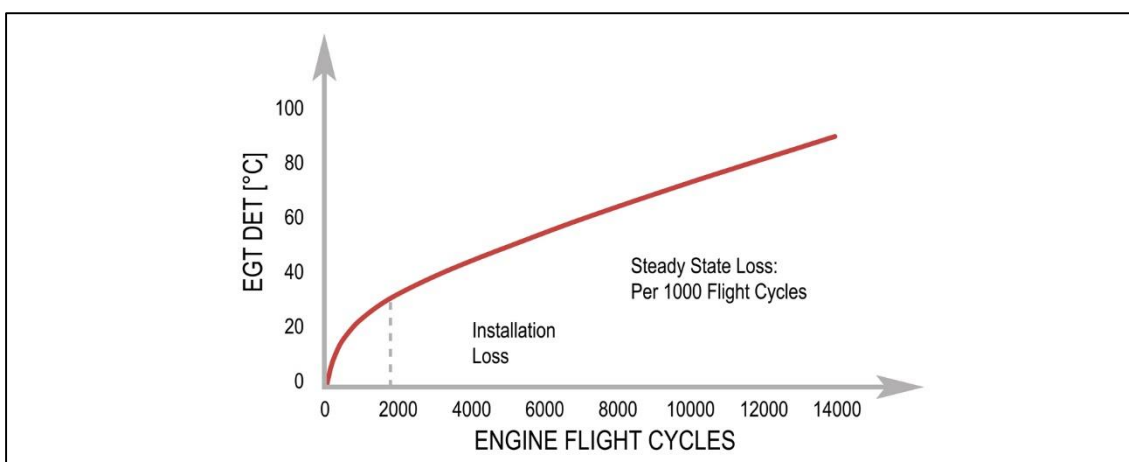
Погоршању перформанси мотора не доприносе сви модули подједнако. Највећи допринос погоршању перформанси имају компресор високог притиска (HPC – *High Pressure Compressor*) и турбина високог притиска (HPT – *High Pressure Turbine*) [70]. Код неких турбофенских мотора са високим степеном двострујности, компресор ниског притиска (LPC – *Low Pressure Compressor*) може такође значајано допринети погоршању перформанси.

Релативни удео појединачних модула мотора у укупном паду перформанси се разликује у зависности од конкретног типа турбофенског мотора.

#### 4.2.5 ИНТЕНЗИТЕТ ТРОШЕЊА EGT МАРГИНЕ

Трошење EGT маргине, као резултат нормалног процеса погоршања перформанси, дешава се постепено са акумулацијом циклуса рада мотора. Нагли пад EGT маргине обично индицира појаву квара код система за управљање радом или оштећења/отказа конструктивних делова мотора [69].

На почетку коришћења новог мотора, или мотора коме је извршена обнова перформанси у радионици, интензитет трошења EGT маргине има највећу вредност. Током првих 1000 до 2000 циклуса рада, интензитет трошења EGT маргине се мења великом брзином (опада), што се може видети на Слици 4.8. Након успостављања радних вредности зазора на врховима лопатица долази до стабилизације интензитета трошења EGT маргине, који се након почетних инсталационих губитака може сматрати приближно константним.

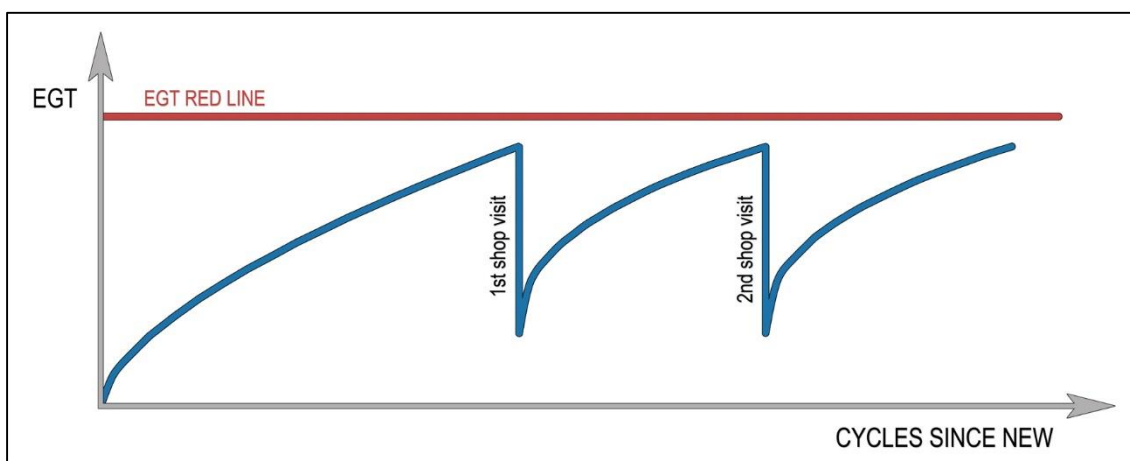


Слика 4.8 Типична промена интензитета трошења EGT маргине са циклусима рада мотора

Произвођачи испоручују оператерима нове моторе са адекватним вредностима EGT маргине, које омогућавају полетања са максималним потиском при различитим условима околине и прихватљиво време коришћења мотора на авиону, пре него што погоршање компонената услови скидање мотора ради обнове перформанси [78].



Циклуси рада мотора на авиону између две узастопне посете радионици зависе од почетне вредности EGT маргине, као и од интензитета њеног трошења. Највеће почетне вредности EGT маргине имају нови мотори. Приликом посета моторској радионици врши се обнова EGT маргине, што је приказано на Слици 4.9. Ниво обнове EGT маргине зависи од квалитета и обима спроведених радова, као и од типа и стања мотора на улазу у моторску радионицу. Након обнове перформанси у радионици, мотори обично имају мању вредност почетне EGT маргине и већи интензитет трошења EGT маргине у поређењу са новим моторима, због трајног губитка одређеног дела перформанси, које није могуће обновити радионичким путем.



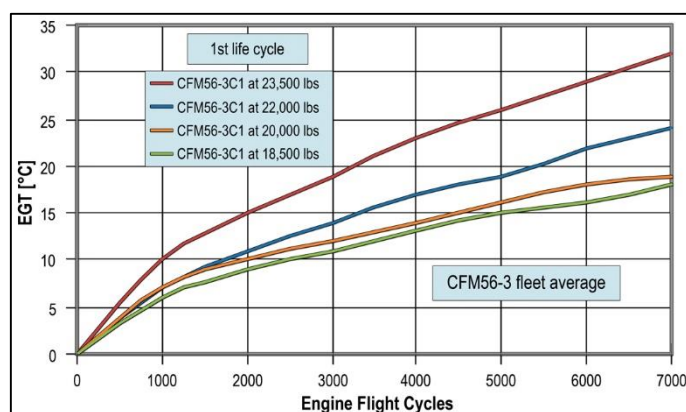
Слика 4.9 Обнова EGT маргине приликом посета моторској радионици

На интензитет трошења EGT маргине највећи утицај има начин коришћења мотора. У главне оперативне факторе, који утичу на интензитет трошења EGT маргине, могу се уврстити:

- ниво смањења максималног потиска,
- дужина лета, и
- климатска област оперативне употребе мотора.

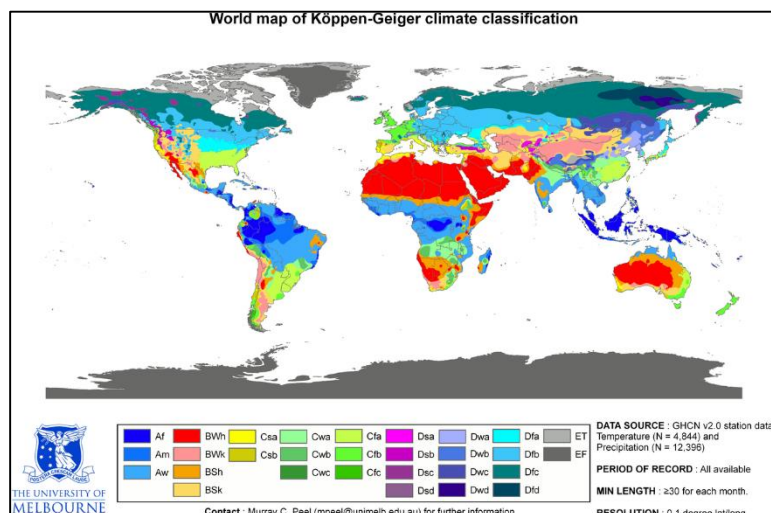
Коришћење мотора са смањеним вредностима потиска у фазама полетања, пењања и крстарења, доприноси смањењу степена радног оптерећења мотора по циклусу лета. У поменутом случају, због нижих вредности радних параметара мотора (притисци, бројеви обртаја и температуре) долази и до пада интензитета трошења EGT маргине.

На Слици 4.10 дата је промена EGT у крстарењу са акумулисањем циклуса рада новог мотора типа CFM56-3C1, за различите оцењене вредности максималног потиска на полетању. Код поменутог типа мотора се може узети да промени EGT у крстарењу од 1°C, одговара промена EGT маргине на полетању од приближно 1.2°C [79]. За исти годишњи налет авиона у часовима лета, већи интензитет трошења EGT маргине имаће мотори који се користе на краћим рутама, због већег броја цикличних оптерећења.



Слика 4.10 Пораст EGT у крстарењу са порастом циклуса рада новог мотора типа CFM56-3

Климатска област оперативне употребе мотора може значајно утицати на интензитет трошења EGT маргине. Најчешће коришћена, Копенова класификација климатских области дата је на Слици 4.11 [80]. Мотори који се користе у врућим, пустињским климатским срединама (BWh) имаће свакако већи интензитет трошења EGT маргине у односу на моторе који се користе у хладним, умерено континенталним климатским подручјима (Dfc).

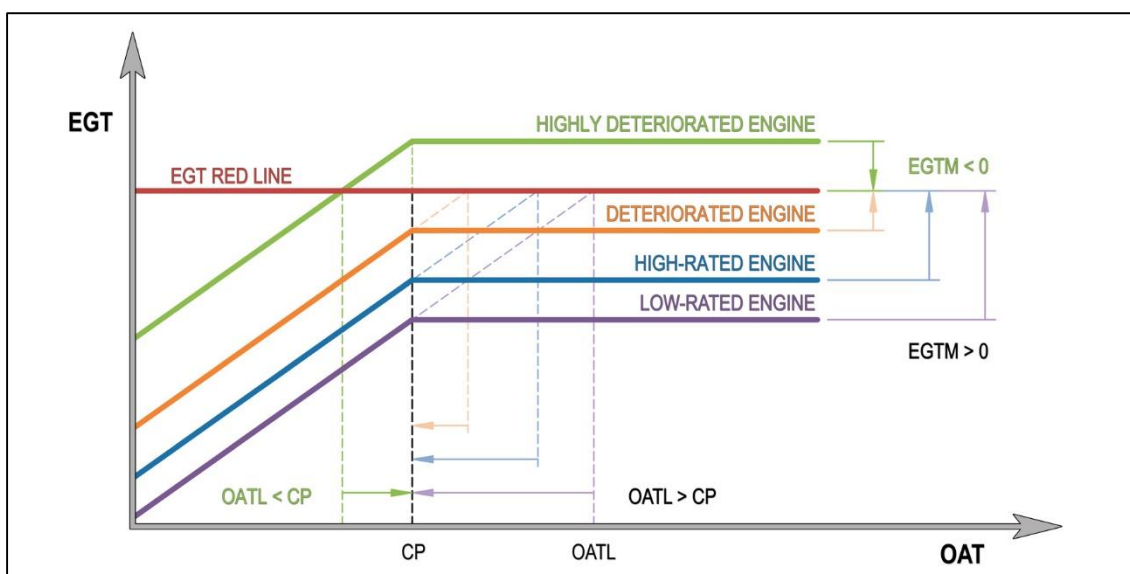


Слика 4.11 Копенова класификација климатских области

#### 4.2.6 ОГРАНИЧЕЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ОКОЛНОГ ВАЗДУХА

За потребе представљања оперативног стања мотора на полетању може се користити још један индикатор стања, сличан EGT маргини, који се назива ограничење температуре околног ваздуха. **Ограничење температуре околног ваздуха** (OATL – *Outside Air Temperature Limit*) представља максималну вредност температуре околног ваздуха, при којој би мотор био у стању да генерише максимални потисак на полетању, а да притом не прекорачи оперативно ограничење EGT.

Графичка интерпретација вредности OATL је приказана на Слици 4.12. Уколико би систем за управљање радом мотора дозволио остваривање маскималног потиска на полетању на температурама околног ваздуха OAT већим од CP, тада би EGT наставила да расте са истим градијентом. Теоријски пораст EGT на температурама већим од CP означен је са испрекиданим линијама на Слици 4.12. Температура околног ваздуха OAT, при којој би EGT достигла вредност оперативног ограничења EGT, налази се у пресеку разматраних правих линија и означава вредност OATL. У општем случају, мотори са већим оцењеним вредностима максималног потиска на полетању имају мање почетне вредности EGT маргине.



Слика 4.12 EGT маргина и OATL

EGT маргина и OATL представљају сличне мере оперативног стања мотора на полетању [70], којима су перформансе мотора представљене на другачији начин. Веза између EGT маргине и OATL за одређени тип мотора зависи од градијента промене EGT са OAT и може се представити једначином:

$$\frac{dEGT}{dOAT} = \frac{EGTM}{OATL - CP} \quad (4.1)$$

Како EGT маргина опада током оперативне употребе мотора, тако се OATL приближава CP. Код мотора са EGT маргином једнаком нули, вредност OATL ће бити једнака CP, док ће код мотора са негативном EGT маргином вредност OATL бити мања од CP. Код мотора са позитивном EGT маргином ( $OATL > CP$ ), полетање са максималним потиском неће резултовати прекорачењем EGT ограничења, будући да потисак мотора опада са повећањем OAT изнад CP. Код мотора са негативном EGT маргином ( $OATL < CP$ ), употреба максималног потиска на полетању на температурама  $OAT > OATL$ , довешће до прекорачења EGT ограничења. Без обзира на вредност EGT маргине, до прекорачења оперативног EGT ограничења неће доћи уколико се полетање са максималним потиском реализује на температурама OAT мањим од OATL.

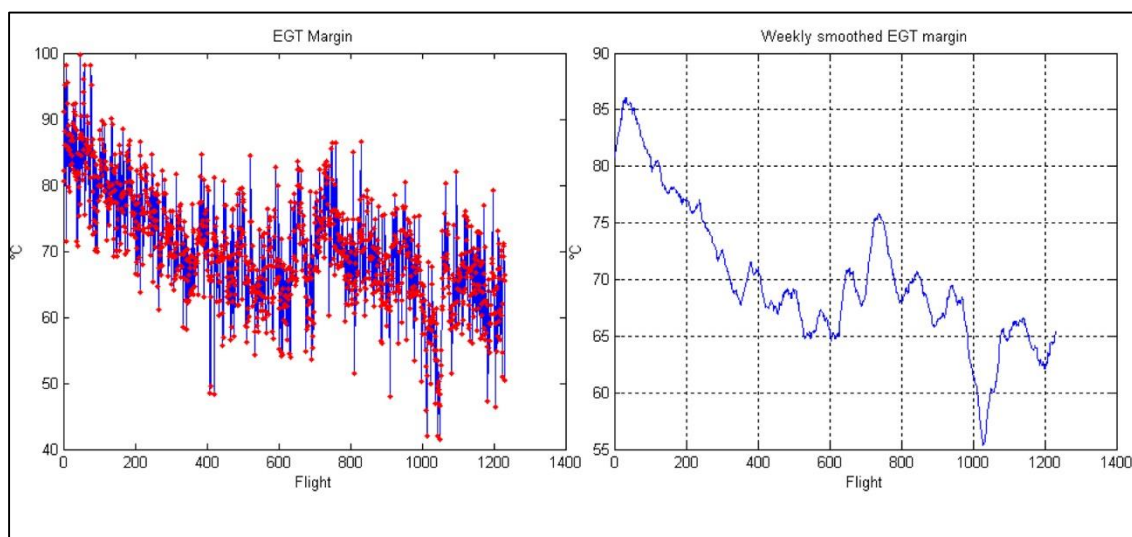
Према томе, мотор са негативном EGT маргином би могао да се користи у зимском периоду, на температурама нижим од OATL, чиме би било могуће продужити интервал његовог рада на авиону. Оператери би могли стратешки да искористе поменути чињеницу, уколико би разматрали тренутно стање мотора на авионима при реализацији планираног реда летења. Анализом би требало размотрити расподелу налета по појединачним авионима у оквиру флоте оператера и годишње или сезонске температурне варијације на опслуживаним рутама. Авионе и моторе би требало посматрати као ресурсе, којима је, у зависности од стања, потребно доделити одређено искоришћење.

Поједини оператери прате стање флоте својих мотора коришћењем OATL параметра, због једноставне интерпретације перформанси мотора на полетању. Познавањем и редовним праћењем EGT маргине, може се лако израчунати OATL.

#### 4.2.7 ПРАЋЕЊЕ EGT МАРГИНЕ

EGT маргина представља поуздан индикатор стања мотора, који се редовно прати кроз примену ЕСМ програма [67]. Тренд промене EGT маргине служи за детекцију погоршања перформанси појединачних мотора, на основу које се утврђује потреба за обављањем прегледа или других активности одржавања. Праћењем тренда EGT маргине омогућена је прогноза преосталог броја циклуса рада мотора до скидања, узрокованог губитком EGT маргине [70]. Поред тренда промене EGT маргине, за доношење одлуке о скидању мотора неопходно је размотрити и остале факторе, као што су тренд промене моторских параметара у крстарењу, преостали ресурс делова са ограниченим радним веком, број прекорачења оперативног ограничења EGT и захтевани задаци одржавања у складу са упутством за одржавање авиона.

Праћење EGT маргине врши се редовним мерењем вредности EGT на полетању, у тренутку када она достиже свој максимум. На пример, код мотора типа *CFM56-3* узима се вредност EGT, измерена 9s након ротације или по достизању висине по притиску од 300ft [81]. На основу мерења осталих радних параметара мотора и услова лета, израчунава се вредност EGT маргине, у складу са упутством произвођача. Прорачунате вредности омогућавају анализу и праћење тренда EGT маргине, који је илустрован на Слици 4.13 [82].



Слика 4.13 Тренд промене EGT маргине

У циљу добијања репрезентативних вредности EGT маргине обично се избегава бележење података са првог полетања током летачког дана, због већих вредности зазора између врхова роторских лопатица и кућишта „хладног“ мотора. Поред тога, тачност измерених вредности радних параметара мотора и услова лета може имати изражени утицај на резултујући тренд промене EGT маргине, због чега се преферира употреба система за аутоматско бележење података. Систем за аутоматско бележење података смањује могућност појаве грешака, које су присутне код ручног читавања података са инструмената и обезбеђује редовно снимање података под истим условима, независно од посаде лета и њеног тренутног радног оптерећења.

Поред инструменталних грешака и грешака везаних за начин аквизиције података, тачност израчунате вредности EGT маргине је делимично ограничена и чињеницом да је модел перформанси, који је увршћен у алат за праћење стања мотора, репрезент просечног понашања произведених мотора, а не сваког појединачног мотора [70]. Према томе, имајући у виду утицај разматраних фактора на тачност одређивања EGT маргине [70]:

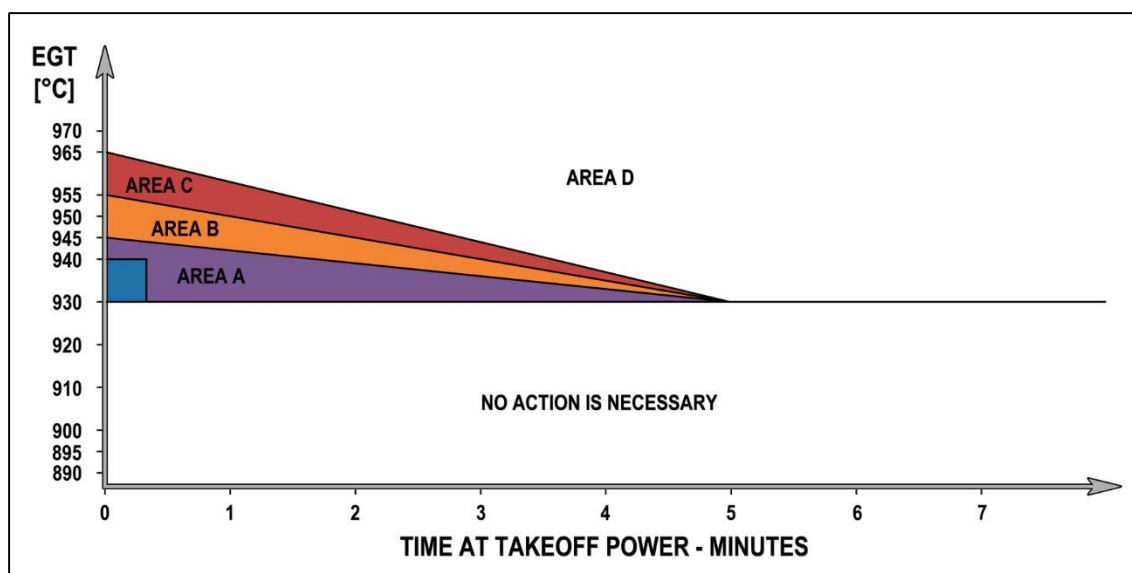
- мотори са малим позитивним вредностима EGT маргине могу искусити прекорачење EGT ограничења при полетању, и
- мотори са малим негативним вредностима EGT маргине не морају нужно искусити прекорачење EGT ограничења при полетању.

#### **4.2.8 ПРЕКОРАЧЕЊА EGT ОГРАНИЧЕЊА**

Код мотора са малом вредношћу EGT маргине може доћи до прекорачења EGT ограничења, нарочито уколико се полетања изводе са максималним потиском при високим вредностима температуре околног ваздуха и на великим надморским висинама. Краткотрајно прекорачење EGT ограничења на полетању, уз кретање осталих моторских параметара унутар сертифицираних ограничења, не би требало негативно да утиче на интегритет мотора [67], с обзиром на испуњеност ригорозних сертификационих захтева.

У зависности од вредности, временског трајања и укупног броја прекорачења EGT ограничења на полетању, прописују се захтевани задаци одржавања, који се наводе у упутству за одржавање авиона (АММ), покретаног одређеним типом мотора. Задаци одржавања се крећу од визуелних прегледа до скидања мотора ради ревизије и нуде могућност обављања повратног лета до базе оператера, у циљу спречавања догађаја застоја авиона на небазним аеродромима [70].

На Слици 4.14 је приказан дијаграм из упутства за одржавање авиона, покретаног моторима типа *CFM56-3*. На дијаграму су дефинисане четири области (А, В, С и D) у зависности од вредности прекорачења EGT ограничења и временског трајања догађаја. Свакој од наведених области је додељен одговарајући задатак одржавања.



Слика 4.14 Области прекорачења EGT ограничења код мотора типа *CFM56-3*

Краткотрајно прекорачење EGT ограничења на полетању (не дуже од 20s), за највише 10°C изнад дозвољене вредности, не захтева никакву акцију одржавања и не убраја се у укупном дозвољеном броју прекорачења (правоугаоник у области А). Остала прекорачења EGT ограничења у области А захтевају визуелну инспекцију мотора пре наредног лета и спровођење процедуре за утврђивање узрока догађаја.

Прекорачење EGT ограничења у области В захтева бороскопску инспекцију тубинског дела мотора и успешан пролаз на тесту за проверу снаге (*Power Assurance Test*), ради добијања одобрења за наставак коришћења. Уколико је укупан број дозвољених прекорачења EGT ограничења, насталих у областима А и В, већи од 10, захтева се скидање мотора са авиона. Једно прекорачење у области С, у трајању краћем од 5s, захтева у наредних 10 циклуса обављање истих задатака одржавања, који су дефинисани за област В. Уколико је трајање прекорачења EGT ограничења у области С дуже од 5s, захтева се скидање мотора у наредних 15 циклуса. Прекорачење у области D захтева скидање мотора, уз могућност обављања једног непрофитабилног лета до базе оператера, уколико се бороскопском инспекцијом потврди да се оштећења налазе унутар дозвољених граница.

Праћењем стања мотора омогућено је фокусирање пажње на моторе са малом вредношћу EGT маргине. У циљу смањења броја прекорачења EGT ограничења, препоручује се спровођење следећих активности [70]:

- избегавање операција ваздухоплова на захтевним рутама са моторима којима је смањена EGT маргина,
- редовно прање мотора водом,
- подешавање рада климатизационог система и разматрање могућности полетања без одвођења ваздуха са компресора мотора,
- дуже време загревања мотора ради смањења EGT на полетању.

### **4.3 ИНТЕНЗИТЕТ ПОСЕТЕ МОТОРСКОЈ РАДИОНИЦИ**

Израчунавање индикатора поузданости и формирање извештаја о поузданости чине саставни део процеса праћења поузданости флоте ваздухоплова. Интензитет посете моторској радионици је један од параметара којим се квантитативно изражава поузданост мотора.



Скидање мотора са авиона се сматра посетом радионици, када спроведене акције одржавања, које претходе уградњи мотора на авион, обухватају раздвајање главних прирубница мотора, или скидање диска, главчине или ротационог склопа [42]. Интензитет посете радионици се рачуна појединачно за сваки тип мотора и може се дефинисати на два различита начина:

**Популарни интензитет посете радионици**<sup>2</sup> представља количник укупног броја посета радионици у посматраном периоду и укупно остварених часова налета флоте мотора у посматраном периоду, на 1000 часова лета.

$$SVR = \frac{N_{SV}}{EFH_{TOTAL}} \cdot 1000 \quad (4.2)$$

Овако дефинисан популарни интензитет посете радионици, описује процес старења флоте. На основу вредности укупног популарног интензитета посете радионици, која се добија посматрањем укупног периода коришћења флоте, може се израчунати **средње време између посета радионици**:

$$MTBSV = \frac{1000}{SVR} \quad (4.3)$$

**Обновљени интензитет посете радионици**<sup>3</sup> представља количник укупног броја посета радионици у посматраном периоду и укупно остварених часова налета скинутих мотора од претходне посете радионици, на 1000 часова лета.

$$RSVR = \frac{N_{SV}}{\sum_{i=1}^{N_{SV}} TSLSV_i} \cdot 1000 \quad (4.4)$$

Вредност укупног обновљеног интензитета посете радионици се добија посматрањем укупног периода коришћења флоте и омогућава израчунавање **средњег времена рада мотора на авиону**, помоћу формуле:

$$TOW_{mean} = \frac{1000}{RSVR} \quad (4.5)$$

Обновљени интензитет посете радионици може се израчунавати према редном броју посете радионици.

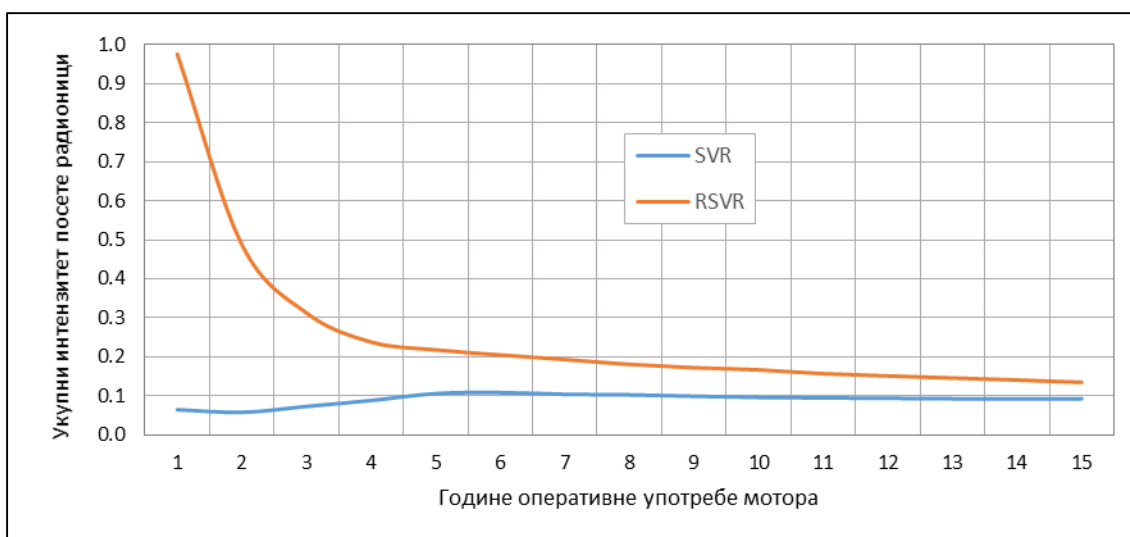
---

<sup>2</sup> енг. Popular Shop Visit Rate - Popular SVR

<sup>3</sup> енг. Restored Shop Visit Rate - RSVR

Практична искуства у експлоатацији турбофенских мотора, заснована на анализи расподеле времена рада мотора на авиону, потврђују постојање статистичке разлике између првог и наредних (зрелих) интервала рада мотора на авиону [83]. Према томе, оправдано је одвојено рачунање обновљеног интензитета посете радионици за прве посете (нов мотор<sup>4</sup>) и збирно за све наредне посете (зreo мотор<sup>5</sup>). У зависности од типа, мотори достижу зрелост након посете радионици на којој се изврши прва обнова перформанси језгра, или обнова перформанси свих модула мотора [65].

На почетку експлоатационог периода флоте одређеног типа мотора, уочљива је значајна разлика у вредностима укупног популарног и обновљеног интензитета посете радионици, приказаним на Слици 4.15. Поменута разлика је пре свега резултат мањег броја остварених часова налета мотора, који почињу да реализују своје прве посете радионици.



Слика 4.15 Укупни популарни (SVR) и обновљени (RSVR) интензитет посете радионици

Уласком у зрелу фазу експлоатације, долази до значајног приближавања вредности укупног популарног и обновљеног интензитета посете радионици, које тек на истеку експлоатационог периода постају приближно једнаке.

<sup>4</sup> енг. First-Run (FR) Engine

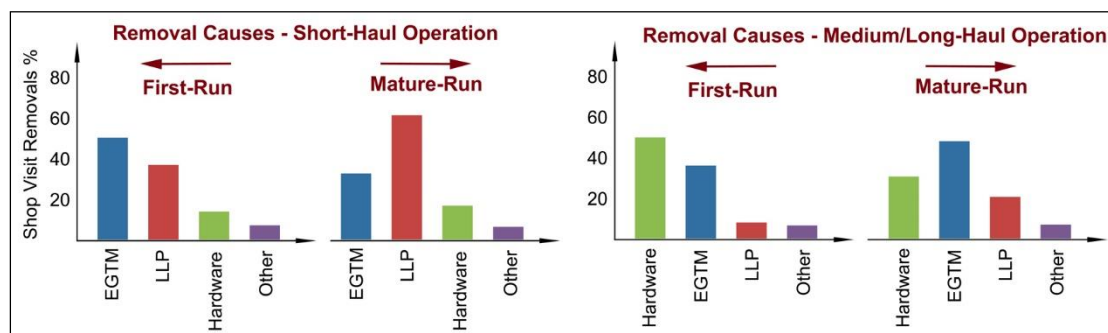
<sup>5</sup> енг. Mature-Run (MR) Engine

У извештајима о поузданости се најчешће приказују дванаестомесечне покретне средње вредности популарног и обновљеног интензитета посете радионици, путем којих се прати општи тренд промена средњег времена између посета радионици и средњег времена рада мотора на авиону. Током радног века мотора, дванаестомесечне покретне средње вредности популарног и обновљеног интензитета посете радионици се коначно стапају у једну обједињену вредност интензитета посете радионици зрелих мотора.

Даља подела разматраних индикатора поузданости мотора може бити извршена према узроку скидања мотора са авиона. Посете радионици се могу класификовати према узроцима на базичне и небазичне. Базичне посете радионици обухватају планирана или непланирана, након дефинисаног времена рада или превремена скидања мотора са авиона, ради одржавања базичних елемената мотора [42]. У базичне елементе мотора спадају компоненте и уређаји за допремање смеше горива и ваздуха и стварање потиска, пренос снаге на вратило елисе (уколико постоје), погон помоћних уређаја, функционисање осталих екстерних система и контролу рада система за подмазивање. Посете радионици ради обнове перформанси и замене делова са ограниченим радним веком убрајају се у базичне посете. Небазичне посете радионици обухватају скидања мотора са авиона из било којих осталих разлога (оштећења страним објектима, повољан тренутак за спровођење одржавања, враћање са лизинга, итд.).

Вредности популарног и обновљеног интензитета посете радионици користе се за обрачун трошкова одржавања по часу лета, које пружаоци услуга нуде оператерима, кроз разне врсте уговора о радионичком одржавању мотора. Зависно од типа уговора, плаћања за услуге одржавања мотора могу се вршити при посети радионици (на основу вредности производа одговарајућег обновљеног интензитета посете радионици и остварених часова лета од претходне посете радионици) или на месечном нивоу (на основу производа одговарајућег популарног интензитета посете радионици и броја остварених часова лета мотора у претходном месецу).

Током свог радног века, мотори реализују неколико посета радионици, при чему вредности интензитета посете радионици зависе од просечног годишњег налета, зрелости и степена радног оптерећења мотора. Утицај начина коришћења и зрелости мотора на процентуални удео узрока скидања мотора у укупном броју посета радионици приказан је на Слици 4.16 [84].



Слика 4.16 Главни узроци скидања мотора

Главни узроци скидања мотора са авиона, који се користе на краћим линијама, су истрошеност ресурса делова са ограниченим радним веком и EGT маргине. На пример, погоршање перформанси и замене делова са ограниченим радним веком учествују са 70% у укупном броју посета радионици, код мотора типа CFM56-3 [85]. Са друге стране, код мотора који се користе на дужим линијама, већи је проценат скидања која су резултат погоршања перформанси компонената и трошења EGT маргине. Зрелост мотора утиче на процентуални удео појединачних разлога скидања у укупном броју посета радионици.

Уопште гледано, свако скидање мотора са крила, било да је резултат истека ресурса делова са ограниченим радним веком или погоршања перформанси појединих модула мотора доводи до повећања директних оперативних трошкова. Због наведених разлога ваздухопловни оператери настоје да продуже коришћење мотора на авиону колико год је могуће, све док се системом за праћење стања мотора не детектују промене тренда моторских параметара или физичког стања компонената мотора које индицирају могућу појаву квара или отказа компонената.

---

## 5 ТРОШКОВИ ОДРЖАВАЊА МОТОРА

---

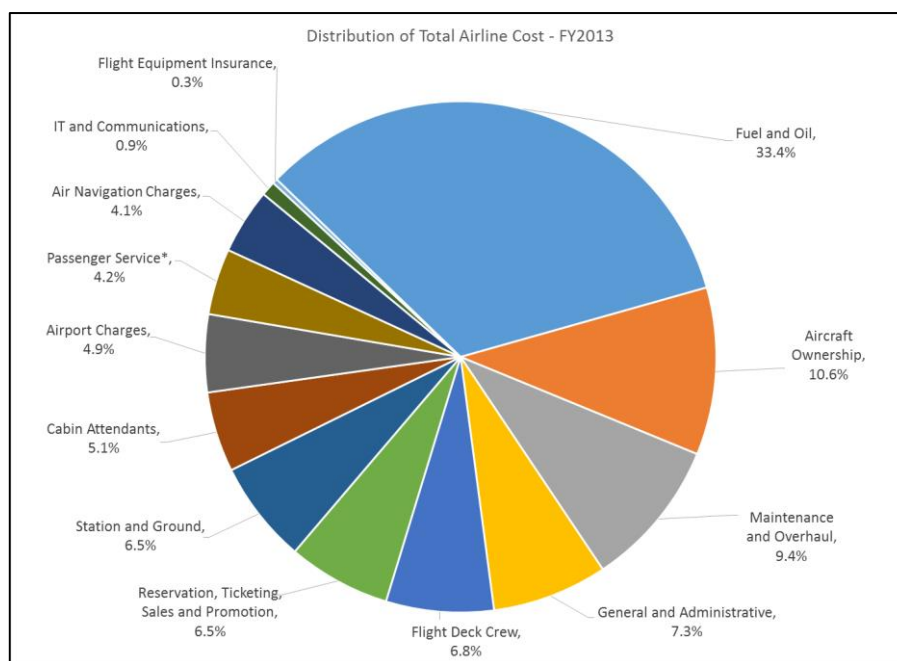
У ваздухопловној индустрији је уобичајена подела укупних оперативних трошкова авиопревозиоца (ТОС – *Total Operating Cost*) на директне и индиректне трошкове. Директни оперативни трошкови (ДОС – *Direct Operating Cost*) су резултат оперативне употребе авиона и обухватају трошкове летачког особља, трошкове горива и мазива, трошкове осигурања, трошкове одржавања, трошкове слетања и трошкове навигационих такси [42]. Профитабилност и конкурентност авиопревозиоца на тржишту ваздушног саобраћаја зависи од вредности директних оперативних трошкова. Индиректни оперативни трошкови (ИОС – *Indirect Operating Cost*) нису непосредно везани за обављање лета и они доприносе укупним трошковима оперативне употребе авиона. У индиректне оперативне трошкове спадају трошкови опште администрације и финансирања, трошкови пружања услуга путницима, трошкови рекламирања и трошкови прихвата и отпреме авиона, путника и робе [42]. Авиопревозиоци приступају категоризацији оперативних трошкова према сопственим потребама и у складу са рачуноводственом праксом матичне државе, што доводи до тога да у пракси разлика између директних и индиректних трошкова није увек јасно дефинисана. Однос директних и индиректних трошкова може знатно варирати у зависности од врсте реализованог саобраћаја, структуре и организације авиопревозилаца, као и начина праћења трошкова. Према томе, при разматрању удела појединих ставки трошкова у директним, индиректним или укупним оперативним трошковима потребно је познавати конкретну структуру трошкова авиопревозиоца.

Укупни трошкови одржавања авиона спадају у посебну категорију оперативних трошкова авиопревозиоца и састоје се из:

- директних трошкова одржавања (DMC – *Direct Maintenance Cost*), и
- индиректних трошкова одржавања (IMC – *Indirect Maintenance Cost*).

Директни трошкови одржавања авиона представљају трошкове рада и материјала потребног за обављање задатака линијског, базног и радионичког одржавања структуре, мотора, система и компонената ваздухоплова [86]. Индиректни трошкови одржавања авиона обухватају остале трошкове рада и материјала, који нису у директној вези са одржавањем самог ваздухоплова, као што су трошкови: администрације, вођења евиденције, надгледања и планирања одржавања, обуке особља, постројења, алата и опреме за испитивање, изнајмљивања опреме, комуналних услуга, итд [86] [87].

Према финансијском извештају међународног удружења авиопревозилаца (IATA – *International Air Transport Association*) [88], који обухвата 20% светске флоте у комерцијалном ваздушном саобраћају, удео укупних трошкова одржавања авиона у укупним оперативним трошковима је у 2013. години износио 9.4% (Слика 5.1).

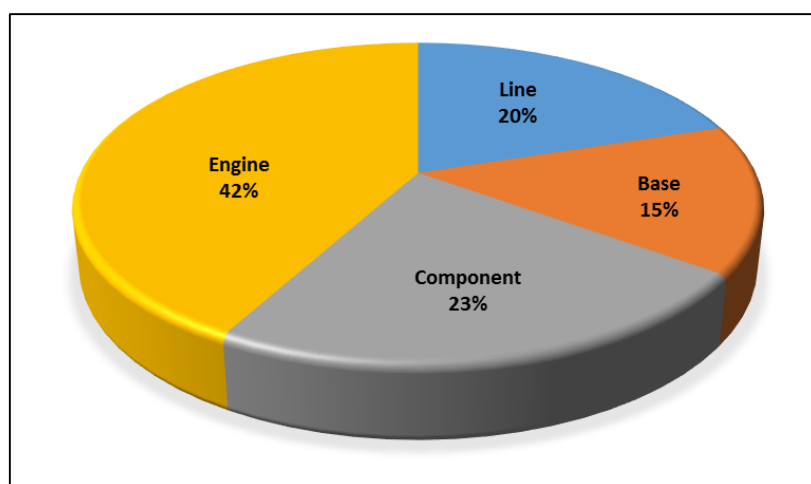


Слика 5.1 Расдела укупних оперативних трошкова (55 авиопревозиоца, 2013. година)

Процентуално учешће трошкова одржавања ваздухоплова у укупним оперативним трошковима авиопревозиоца подложно је годишњим варијацијама, које су пре свега резултат глобалне промене цене горива на светском тржишту, али исто тако и величине, типа и старости флоте, као и временског распореда великих активности одржавања. Директни трошкови одржавања (DMC) учествују са 10÷20% у директним оперативним трошковима (DOC), у зависности од типа, зрелости и долета авиона [86]. У зависности од намене, директни трошкови одржавања ваздухоплова (DMC) се могу поделити на више начина:

- према АТА поглављима,
- према типу активности одржавања (планирано и непланирано),
- према месту извођења радова (линијско, базно и радионичко),
- према елементима одржавања (рад, материјал, уговорене услуге),
- према сегментима одржавања (линијско, базно, компоненте, мотор).

Због специфичности одржавања ваздухопловних мотора, директни трошкови радионичког одржавања мотора су присутни у свакој од подела директних трошкова одржавања ваздухоплова као посебна целина. Према IATA [89], директни трошкови радионичког одржавања мотора представљају најзаступљенији сегмент трошкова одржавања са 42% учешћа у директним трошковима одржавања ваздухоплова у 2013. години (Слика 5.2).

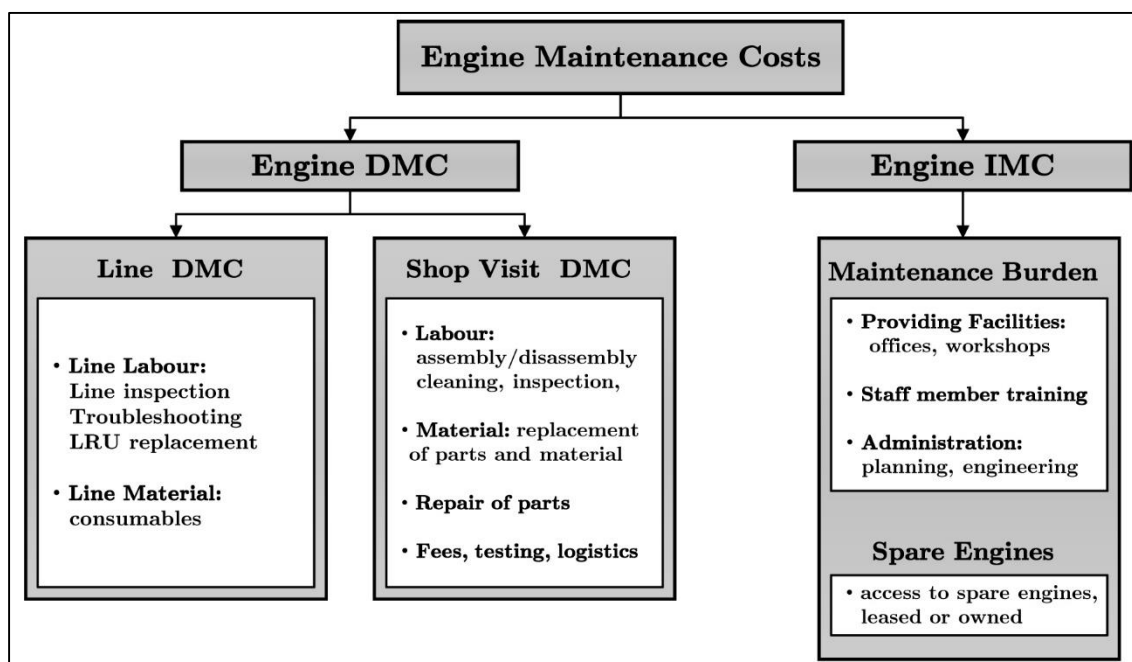


Слика 5.2 Директни трошкови одржавања према сегментима (48 авиопревозиоца, 2013. година)

## 5.1 СТРУКТУРА ТРОШКОВА ОДРЖАВАЊА МОТОРА

Укупни трошкови одржавања мотора (EMC – *Engine Maintenance Cost*) обухватају трошкове рада, материјала и уговорених услуга за обављање задатака линијског и радионичког одржавања мотора, као и остале трошкове везане за спровођење програма одржавања. На Слици 5.3 је приказана структура укупних трошкова одржавања мотора према [84] и [90], која је у складу са опште прихваћеним концептом категоризације трошкова на:

- директне трошкове одржавања мотора (*Engine DMC*), и
- индиректне трошкове одржавања мотора (*Engine IMC*).



Слика 5.3 Структура трошкова одржавања мотора

Директни трошкови одржавања мотора обухватају трошкове линијског и радионичког одржавања. Линијско одржавање мотора се обавља у релативно кратким временским интервалима и континуирано генерише трошкове. За разлику од линијског, радионичко одржавање мотора се врши након релативно дугих временских интервала и ствара трошкове приликом посета радионици. Због наведених специфичности, трошкови линијског и радионичког одржавања се разматрају одвојено.



Највеће учешће у директним трошковима одржавања мотора (*Engine DMC*) имају трошкови радионичког одржавања (*Shop Visit DMC*), са 93% удела, док трошкови линијског одржавања (*Line DMC*) носе преосталих 7% удела [91].

Наведени доприноси указују да радионичко одржавање мотора представља најважнији сегмент одржавања са аспекта трошкова, поред доминантног утицаја на поузданост мотора.

## 5.2 ТРОШКОВИ РАДИОНИЧКОГ ОДРЖАВАЊА МОТОРА

Директни трошкови радионичког одржавања мотора (*Shop DMC*) настају као резултат радова на враћању мотора у стање ваздухопловне пловидбености и могу се представити количником трошкова посете радионици (*SVC – Shop Visit Cost*) и остварених часова рада мотора на авиону (*TOW – Time On-Wing*):

$$Shop\ DMC = \frac{SVC}{TOW} \quad (5.1)$$

Вредност трошкова посете радионици (*SVC*) зависи од примењеног обима радова (енг. *workscope*) над модулима мотора при посети радионици. Обим радова се при конкретној посети радионици утврђује у зависности од разлога скидања мотора, акумулираних часова рада модула мотора, остварених часова рада од претходне посете радионици, стања модула мотора, преосталог ресурса делова са ограниченим радним веком, тренда перформанси и пословних циљева [92] [93].

Процена времена рада мотора на авиону (*TOW*) може се извршити коришћењем популарног (*SVR*) или обновљеног (*RSVR*) интензитета посете радионици. На основу података о вредностима трошкова посете радионици и интензитета посете радионици зрелих мотора могуће је извршити поређење типова мотора према директним трошковима радионичког одржавања.

Трошкови посете мотора радионици се најчешће деле на трошкове рада, замене материјала и оправке делова. Трошкови замене материјала имају главни удео у трошковима посете мотора радионици, пре свега због високе цене роторских лопатица турбине високог притиска. Највећи део трошкова материјала и трошкова оправке је управо везан за замену и оправку статорских и роторских лопатица турбина и компресора мотора. Према [84], приближно 60-70% трошкова посете радионици може се приписати трошковима материјала, чији се удео може додатно повећати у случају потребе за заменом делова са ограниченим радним веком. Трошкови радне снаге учествују са 20-30% у трошковима посете радионици, а трошкови оправке са 10-20% [84].

Учешће трошкова материјала, рада и оправки у укупним трошковима посете радионици зависи од типа и зрелости мотора. Процес старења мотора је праћен развојем нових типова оправки и повећањем расположивости коришћених резервних делова, што доводи до постепене промене вредности трошкова посете радионици, као и процентуалног удела елемената трошкова.

Трошкове посете мотора радионици ( $SVC$ ) је такође уобичајено поделити на трошкове обнове перформанси главних модула мотора  $C^{PR}$  (енг. *Performance Restoration Cost*) и трошкове замене делова са ограниченим радним веком  $C^{LLP}$  (енг. *LLP Cost*) [90]:

$$SVC = C^{PR} + C^{LLP} \quad (5.2)$$

Трошкови обнове перформанси зависе од остварених часова рада мотора на авиону, који су пре свега последица оперативних услова рада мотора. Са повећањем часова рада мотора на авиону расте захтевани обим радова над модулима мотора ради оправке и замене истрошених делова, што доводи до пораста трошкова обнове перформанси.

Трошкови замене делова са ограниченим радним веком су делимично независни од начина оперативне употребе мотора и посматрају се као функција акумулираних циклуса рада мотора на авиону.

### 5.3 ТРОШКОВИ ЗАМЕНЕ ДЕЛОВА СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКООМ

Трошкови замене делова са ограниченим радним веком имају значајни удео у директним трошковима одржавања мотора. У прилог томе иде чињеница да цена комплетног сета делова са ограниченим радним веком може лако премашити трошкове обнове перформанси мотора. Да би мотор могао да настави да се користи након истека ресурса делова са ограниченим радним веком неопходно је извршити њихову замену у моторској радионици. Замена делова са ограниченим радним веком у одређеном модулу мотора захтева ревизију датог модула и може се обавити уградњом нових или претходно коришћених делова са преосталим ресурсом. Захтев за ревизијом модула, поред трошкова замене делова са ограниченим радним веком, генерише додатне трошкове рада, материјала и оправке модула мотора, што доводи до пораста укупних трошкова посете радионици.

Пре свега као резултат варијација у LLP ресурсима између модула мотора, али и понекад подједнако важних разлика у LLP ресурсима унутар самих модула мотора, један мали проценат ресурса делова са ограниченим радним веком се при оперативној употреби мотора не искористи. Неискоришћени ресурс одређеног дела са ограниченим радним веком обично износи око 3-15% од дозвољеног броја циклуса рада [94]. Због разлика у ресурсима по модулима мотора, при конкретној посети радионици се разматра превремена замена делова са ограниченим радним веком, како се не би угрозила дужина наредног интервала рада мотора на авиону, која је резултат примењеног обима радова на обнови перформанси мотора. Непотпуно искоришћење ресурса делова са ограниченим радним веком доводи до пораста трошкова замене делова по циклусу лета. Накнадном продајом делова са ограниченим радним веком на тржишту коришћених делова отвара се могућност повраћаја трошкова, која пре свега зависи од преосталог броја циклуса рада до замене делова.

Трошкови замене делова са ограниченим радним веком  $C^{LLP}$  зависе од актуелне цене делова у тренутку посете радионици и могу се посматрати као збир трошкова искоришћеног  $C^{USED}$  и неискоришћеног ресурса  $C^{STUB}$ :

$$C^{LLP} = C^{USED} + C^{STUB} \quad (5.3)$$

Вредност трошкова замене делова са ограниченим радним веком и међусобни однос трошкова искоришћеног и неискоришћеног ресурса могу се одредити познавањем лимитираног и акумулираног броја циклуса рада замењених делова при конкретној посети радионици, као и актуелних цена делова. Коришћењем података о каталожској цени делова из 2013. године, у Табели 5.1 је приказан резултат прорачуна јединичних цена делова са ограниченим радним веком по циклусу лета, за мотор типа CFM56-3.

Табела 5.1 Каталожка цена делова са ограниченим радним веком и јединична цена по циклусу лета за мотор CFM56-3

| NO.                             | DESCRIPTION         | LIST PRICE [\$]    | LIFE LIMIT [CYCLES] |               |               | UNIT PRICE [\$/CYCLES] |                 |                 |
|---------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------|---------------|------------------------|-----------------|-----------------|
|                                 |                     | 2013               | Cat A               | Cat B         | Cat C         | Cat A                  | Cat B           | Cat C           |
| 1                               | Booster Spool       | \$198,900          | 30000               | 30000         | 30000         | \$6.63                 | \$6.63          | \$6.63          |
| 2                               | Fan Disk            | \$138,000          | 30000               | 24900         | 20100         | \$4.60                 | \$5.54          | \$6.87          |
| 3                               | Fan Shaft           | \$123,500          | 30000               | 30000         | 30000         | \$4.12                 | \$4.12          | \$4.12          |
| <b>Fan &amp; Booster Total:</b> |                     | <b>\$460,400</b>   | <b>90000</b>        | <b>84900</b>  | <b>80100</b>  | <b>\$15.35</b>         | <b>\$16.29</b>  | <b>\$17.61</b>  |
| 4                               | HPC Front Shaft     | \$86,480           | 20000               | 20000         | 20000         | \$4.32                 | \$4.32          | \$4.32          |
| 5                               | HPC Spool Stg. 1-2  | \$134,500          | 20000               | 20000         | 20000         | \$6.73                 | \$6.73          | \$6.73          |
| 6                               | HPC Disk Stg. 3     | \$42,020           | 20000               | 20000         | 20000         | \$2.10                 | \$2.10          | \$2.10          |
| 7                               | HPC Spool Stg. 4-9  | \$302,600          | 20000               | 20000         | 15800         | \$15.13                | \$15.13         | \$19.15         |
| 8                               | HPC CDP Seal        | \$61,740           | 20000               | 18000         | 15000         | \$3.09                 | \$3.43          | \$4.12          |
| <b>HPC Total:</b>               |                     | <b>\$627,340</b>   | <b>100000</b>       | <b>98000</b>  | <b>90800</b>  | <b>\$31.37</b>         | <b>\$31.71</b>  | <b>\$36.42</b>  |
| 9                               | HPT Front Shaft     | \$108,100          | 20000               | 17300         | 17000         | \$5.41                 | \$6.25          | \$6.36          |
| 10                              | HPT CDP Seal        | \$114,800          | 20000               | 15800         | 15100         | \$5.74                 | \$7.27          | \$7.60          |
| 11                              | HPT Rotor Disk      | \$206,100          | 20000               | 18500         | 16600         | \$10.31                | \$11.14         | \$12.42         |
| 12                              | HPT Rear Shaft      | \$84,680           | 20000               | 20000         | 20000         | \$4.23                 | \$4.23          | \$4.23          |
| <b>HPT Total:</b>               |                     | <b>\$513,680</b>   | <b>80000</b>        | <b>71600</b>  | <b>68700</b>  | <b>\$25.68</b>         | <b>\$28.89</b>  | <b>\$30.61</b>  |
| 13                              | LPT Disk Stg. 1     | \$95,150           | 25000               | 25000         | 25000         | \$3.81                 | \$3.81          | \$3.81          |
| 14                              | LPT Disk Stg. 2     | \$109,100          | 25000               | 25000         | 25000         | \$4.36                 | \$4.36          | \$4.36          |
| 15                              | LPT Disk Stg. 3     | \$110,100          | 25000               | 25000         | 25000         | \$4.40                 | \$4.40          | \$4.40          |
| 16                              | LPT Disk Stg. 4     | \$95,230           | 25000               | 25000         | 25000         | \$3.81                 | \$3.81          | \$3.81          |
| 17                              | LPT Conical Support | \$73,850           | 25000               | 25000         | 25000         | \$2.95                 | \$2.95          | \$2.95          |
| 18                              | LPT Shaft           | \$186,100          | 30000               | 30000         | 30000         | \$6.20                 | \$6.20          | \$6.20          |
| 19                              | LPT Stub Shaft      | \$61,830           | 25000               | 25000         | 25000         | \$2.47                 | \$2.47          | \$2.47          |
| <b>LPT Total:</b>               |                     | <b>\$731,360</b>   | <b>180000</b>       | <b>180000</b> | <b>180000</b> | <b>\$28.01</b>         | <b>\$28.01</b>  | <b>\$28.01</b>  |
| <b>TOTAL:</b>                   |                     | <b>\$2,332,780</b> | <b>450000</b>       | <b>434500</b> | <b>419600</b> | <b>\$100.41</b>        | <b>\$104.90</b> | <b>\$112.66</b> |

Јединичне цене делова са ограниченим радним веком, приказане у Табели 5.1, представљају трошкове замене делова по циклусу лета, под претпоставком потпуног искоришћења ресурса делова. У циљу одређивања трошкова замене делова са ограниченим радним веком по циклусу лета за случај непотпуног искоришћења ресурса, неопходно је повећати јединичне цене делова по циклусу лета за процентуалну вредност односа преосталог и акумулираног броја циклуса рада замењених делова. Према томе, вредност трошкова замене делова по циклусу лета једнака је збиру јединичних цена делова по циклусу, које представљају трошкове искоришћеног ресурса по циклусу и процентуалног приноса јединичних цена делова по циклусу, који представља трошкове неискоришћеног ресурса по циклусу.

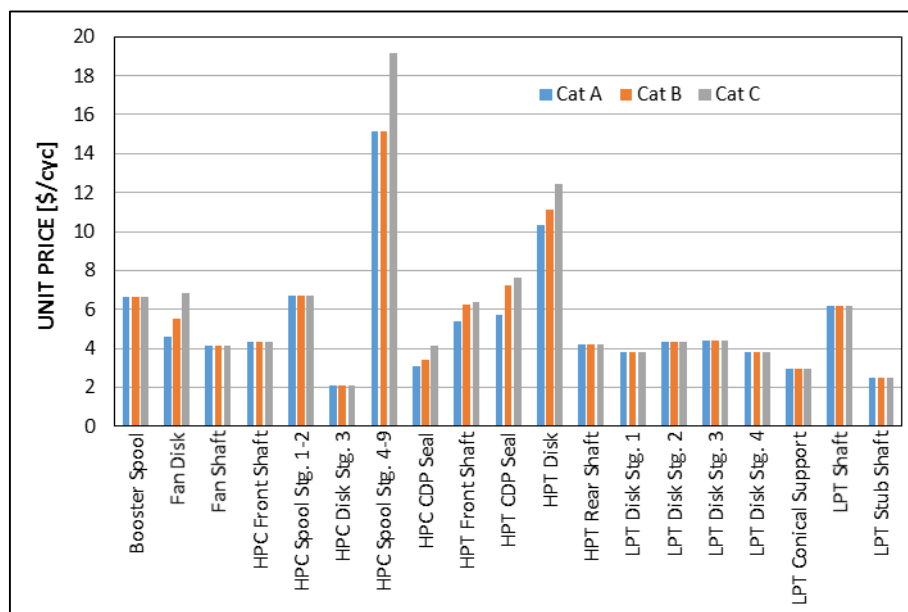
Примера ради, потпуно искоришћење ресурса делова у НРС модулу, при употреби мотора *CFM56-3* у категорији потиска В, захтевало би најпре скидање мотора након 18000 циклуса, ради замене заптивке (*HPC CDP Seal*) и захтеване ревизије модула, а затим додатно скидање мотора након 2000 циклуса, ради замене осталих делова и поновне ревизије модула (Табела 5.1). У том случају трошкови замене делова у НРС модулу износили би \$627340, односно \$31.71 по циклусу. У случају замене свих делова са ограниченим радним веком у НРС модулу након 18000 циклуса, трошкови замене делова у НРС модулу би порасли на \$34.85 по циклусу (Табела 5.2).

Табела 5.2 Анализа трошкова замене делова у НРС модулу мотора *CFM56-3*

| Сценарио                                             | C <sub>LLP</sub> |          | C <sub>USED</sub> |          |      | C <sub>STUB</sub> |          |    |
|------------------------------------------------------|------------------|----------|-------------------|----------|------|-------------------|----------|----|
|                                                      | \$               | \$/cycle | \$                | \$/cycle | %    | \$                | \$/cycle | %  |
| Потпуно искоришћење ресурса делова у НРС модулу      | \$627,340        | \$31.71  | \$627,340         | \$31.71  | 100% | \$0               | \$0      | 0% |
| Превремена замена делова у НРС модулу након 18000сус | \$627,340        | \$34.85  | \$570,780         | \$31.71  | 91%  | \$56,560          | \$3.14   | 9% |

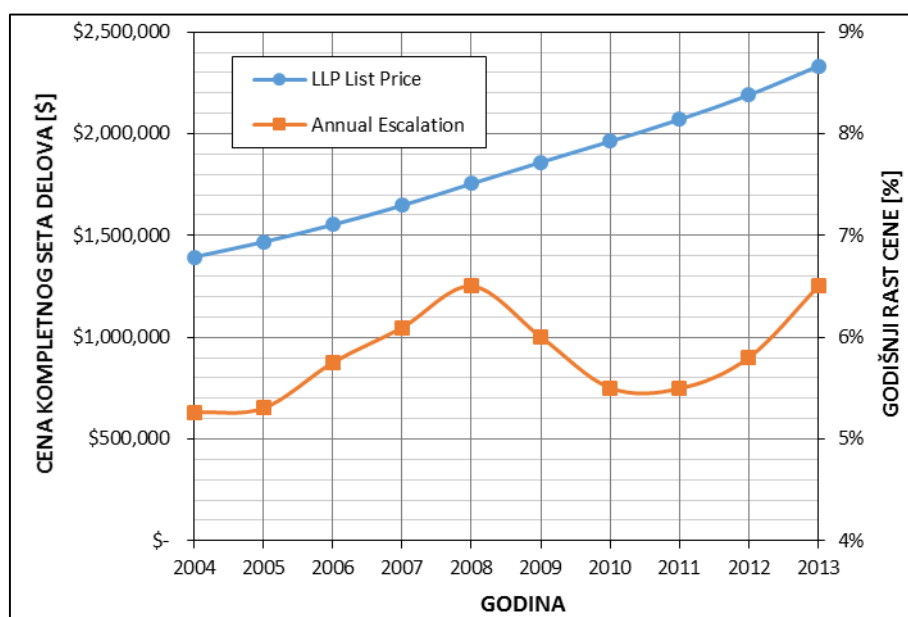
Оправданост превремене замене делова са ограниченим радним веком може се утврдити поређењем укупних трошкова радионичког одржавања по циклусу лета за случајеве превремене замене делова (мањи број посета радионици) и потпуног искоришћења ресурса (већи број посета радионици).

Делови са ограниченим радним веком се могу међусобно упоредити на основу јединичних трошкова по циклусу лета (Слика 5.4). Слично поређење јединичних трошкова може се извршити и по модулима мотора.



Слика 5.4 Поређење делова са ограниченим радним веком мотора CFM56-3 према јединичним трошковима по циклусу лета

Произвођачи мотора врше редовна повећања цене делова са ограниченим радним веком сваке године. Разматрањем каталожних цена делова у периоду од 2004. до 2013. године, утврђено је да се годишњи раст цене делова са ограниченим радним веком креће од 5-7%, што је приказано на Слици 5.5.



Слика 5.5 Годишњи раст цене сета делова са ограниченим радним веком за мотор CFM56-3

### 5.3.1 ОДРЕЂИВАЊЕ БРОЈА ПРЕОСТАЛИХ ЦИКЛУСА РАДА ДЕЛОВА СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКОМ

У циљу доношења одлуке о потреби за заменом одговарајућег дела са ограниченим радним веком при посети мотора радионици потребно је одредити број преосталих циклуса рада дела у свакој од категорија потиска мотора. Дозвољени број циклуса рада дела са ограниченим радним веком  $L^6$  зависи од категорије потиска мотора ( $A$ ,  $B$  или  $C$ ) на коме је уграђен, и у општем случају, може се разликовати или бити исти у свим категоријама потиска. Број преосталих циклуса рада конкретног дела са ограниченим радним веком зависи од броја остварених циклуса рада у појединим категоријама потиска  $O^7$  и ограничења броја циклуса рада  $L$  у поменутим категоријама. Једначине за одређивање броја преосталих циклуса рада дела са ограниченим радним веком  $R^8$  у датој категорији потиска гласе:

$$R_A = L_A - \left( O_A + O_B \frac{L_A}{L_B} + O_C \frac{L_A}{L_C} \right) = L_A - O_A^{ef} \quad (5.4)$$

$$R_B = L_B - \left( O_A \frac{L_B}{L_A} + O_B + O_C \frac{L_B}{L_C} \right) = L_B - O_B^{ef} \quad (5.5)$$

$$R_C = L_C - \left( O_A \frac{L_C}{L_A} + O_B \frac{L_C}{L_B} + O_C \right) = L_C - O_C^{ef} \quad (5.6)$$

где су:

$L_A$ ,  $L_B$ , и  $L_C$  - ограничења броја циклуса рада до скидања у категоријама  $A$ ,  $B$  и  $C$ ,

$O_A$ ,  $O_B$ , и  $O_C$  - бројеви остварених циклуса рада у категоријама  $A$ ,  $B$ , и  $C$ ,

$R_A$ ,  $R_B$ , и  $R_C$  - бројеви преосталих циклуса рада у категоријама  $A$ ,  $B$ , и  $C$ ,

$O_A^{ef}$ ,  $O_B^{ef}$ , и  $O_C^{ef}$  - ефективни бројеви остварених циклуса рада у категоријама  $A$ ,

$B$ , и  $C$ .

---

<sup>6</sup> скр. од енг. речи *Limit*

<sup>7</sup> скр. од енг. речи *Operated*

<sup>8</sup> скр. од енг. речи *Remaining*

Ефективни број остварених циклуса рада дела са ограниченим радним веком описује утицај коришћења дела у осталим категоријама потиска на трошење ресурса дела у посматраној категорији потиска мотора. Дељењем једначина (5.4), (5.5) и (5.6) са адекватним ограничењима броја циклуса рада до скидања добија се веза између коефицијената преосталог и утрошеног ресурса дела:

$$\frac{R_A}{L_A} = 1 - \left( \frac{O_A}{L_A} + \frac{O_B}{L_B} + \frac{O_C}{L_C} \right) = 1 - \frac{O_A^{ef}}{L_A} \quad (5.7)$$

$$\frac{R_B}{L_B} = 1 - \left( \frac{O_A}{L_A} + \frac{O_B}{L_B} + \frac{O_C}{L_C} \right) = 1 - \frac{O_B^{ef}}{L_B} \quad (5.8)$$

$$\frac{R_C}{L_C} = 1 - \left( \frac{O_A}{L_A} + \frac{O_B}{L_B} + \frac{O_C}{L_C} \right) = 1 - \frac{O_C^{ef}}{L_C} \quad (5.9)$$

Коефицијентима преосталог или утрошеног ресурса дела са ограниченим радним веком биће називани децимални записи процентуалних вредности преосталог или утрошеног ресурса дела, у даљем делу текста. Из једначина (5.7), (5.8) и (5.9) следи да је коефицијент преосталог ресурса дела са ограниченим радним веком једнак количнику броја преосталих и лимитираних циклуса рада дела у истим категоријама потиска мотора:

$$\frac{R_A}{L_A} = \frac{R_B}{L_B} = \frac{R_C}{L_C} = 1 - \left( \frac{O_A}{L_A} + \frac{O_B}{L_B} + \frac{O_C}{L_C} \right) \quad (5.10)$$

На исти начин је коефицијент утрошеног ресурса дела са ограниченим радним веком једнак количнику ефективног броја остварених и лимитираних циклуса рада дела у истим категоријама потиска мотора:

$$\frac{O_A^{ef}}{L_A} = \frac{O_B^{ef}}{L_B} = \frac{O_C^{ef}}{L_C} = \left( \frac{O_A}{L_A} + \frac{O_B}{L_B} + \frac{O_C}{L_C} \right) \quad (5.11)$$

Ако се категорије потиска мотора означе индексом  $h$  ( $h = A, B$  или  $C$ ), онда се веза између коефицијената преосталог и утрошеног ресурса дела са ограниченим радним веком може представити једначином:

$$\frac{R_h}{L_h} + \frac{O_h^{ef}}{L_h} = \frac{R_h}{L_h} + \sum_h \frac{O_h}{L_h} = 1 \quad (5.12)$$

Помоћу једначине (5.12) може се извршити расподела трошкова замене делова на трошкове искоришћеног и неискоришћеног ресурса делова.



### 5.3.2 ОДРЕЂИВАЊЕ ТРОШКОВА ЗАМЕНЕ ДЕЛОВА СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКООМ ПРИ ПОСЕТИ МОТОРСКОЈ РАДИОНИЦИ

Због релативно великог броја лимитираних циклуса рада до скидања, замена конкретног дела са ограниченим радним веком се не обавља при свакој посети радионици. Трошкови замене одређеног дела са ограниченим радним веком зависе од актуелне цене новог дела у тренутку посете радионици и исхода одлуке о замени посматраног дела при посети радионици. Ако се индексом  $k$  означи редни број посете радионици, тада се одлука о замени  $i$ -тог дела са ограниченим радним веком ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ), при  $k$ -тој посети радионици може представити фиктивном (прекидачком, Буловом) променљивом  $r_{k,i}$  функције трошкова замене дела. Фиктивна променљива  $r_{k,i}$  ће узети вредност 1 када се при  $k$ -тој посети радионици донесе одлука о замени  $i$ -тог дела, или вредност 0 када се при  $k$ -тој посети радионици одлучи да се не изврши замена  $i$ -тог дела:

$$r_{k,i} = \begin{cases} 1, & \text{замена } i\text{-тог дела при } k\text{-тој посети радионици} \\ 0, & \text{без замене } i\text{-тог дела при } k\text{-тој посети радионици} \end{cases} \quad (5.13)$$

Сагласно претходном разматрању, уз претпоставку да се замена делова обавља куповином и уградњом нових делова, трошкови замене  $i$ -тог дела са ограниченим радним веком при  $k$ -тој посети радионици  $C_{k,i}^{LLP}$  биће једнаки:

$$C_{k,i}^{LLP} = C_{k,i}^{LIST PRICE} \cdot r_{k,i} \quad (5.14)$$

где су:

$C_{k,i}^{LIST PRICE}$  – каталошка цена  $i$ -тог дела при  $k$ -тој посети радионици,

$r_{k,i}$  – фиктивна променљива функције трошкова замене  $i$ -тог дела при  $k$ -тој посети радионици. Према томе, укупни трошкови замене делова са ограниченим радним веком при  $k$ -тој посети радионици  $C_k^{LLP}$  дати су изразом:

$$C_k^{LLP} = \sum_{i=1}^n C_{k,i}^{LLP} = \sum_{i=1}^n C_{k,i}^{LIST PRICE} \cdot r_{k,i} \quad (5.15)$$

где је:

$n$  - укупан број делова са ограниченим радним веком у мотору.

### 5.3.3 ТРОШКОВИ ИСКОРИШЋЕНОГ И НЕИСКОРИШЋЕНОГ РЕСУРСА ДЕЛОВА СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКОМ ПРИ ПОСЕТИ РАДИОНИЦИ

Расподела трошкова замене  $i$ -тог дела са ограниченим радним веком на трошкове искоришћеног и неискоришћеног ресурса делова при  $k$ -тој посети моторској радионици дата је изразом:

$$C_{k,i}^{LLP} = C_{k,i}^{USED} + C_{k,i}^{STUB} \quad (5.16)$$

Удео трошкова искоришћеног и неискоришћеног ресурса у трошковима замене је одређен вредностима коефицијената утрошеног и преосталог ресурса делова по доласку мотора у радионицу. Будући да је збир коефицијената утрошеног и преосталог ресурса делова према једначини (5.12) једнак јединици, трошкови замене  $i$ -тог дела са ограниченим радним веком, при  $k$ -тој посети радионици могу се представити следећом једначином:

$$C_{k,i}^{LLP} = C_{k,i}^{LLP} \cdot \frac{O_{k,h,i}^{INef}}{L_{h,i}} + C_{k,i}^{LLP} \cdot \frac{R_{k,h,i}^{IN}}{L_{h,i}} = C_{k,i}^{USED} + C_{k,i}^{STUB} \quad (5.17)$$

где су:

$O_{k,h,i}^{INef}$  – ефективни број остварених циклуса рада  $i$ -тог дела у одређеној

категорији потиска  $h$ , при доласку у  $k$ -ту посети радионици,

$R_{k,h,i}^{IN}$  - број преосталих циклуса рада  $i$ -тог дела у одређеној категорији потиска  $h$ , при доласку у  $k$ -ту посети радионици,

$L_{h,i}$  – ресурс  $i$ -тог дела у одређеној категорији потиска  $h$ ,

$h$  – ознака категорије потиска ( $h = A, B$  или  $C$ ).

Заменом израза (5.14) у једначину (5.17) добијају се формуле за одређивање трошкова искоришћеног и неискоришћеног ресурса  $i$ -тог дела са ограниченим радним веком, при  $k$ -тој посети радионици:

$$C_{k,i}^{USED} = C_{k,i}^{LIST PRICE} \cdot \frac{O_{k,h,i}^{INef}}{L_{h,i}} \cdot r_{k,i} = C_{k,i}^{LIST PRICE} \cdot \left( \sum_h \frac{O_{k,h,i}^{IN}}{L_{h,i}} \right) \cdot r_{k,i} \quad (5.18)$$

$$C_{k,i}^{STUB} = C_{k,i}^{LIST PRICE} \cdot \frac{R_{k,h,i}^{IN}}{L_{h,i}} \cdot r_{k,i} = C_{k,i}^{LIST PRICE} \cdot \left( 1 - \sum_h \frac{O_{k,h,i}^{IN}}{L_{h,i}} \right) \cdot r_{k,i} \quad (5.19)$$

Укупни трошкови искоришћеног и неискоришћеног ресурса у случају замене делова са ограниченим радним веком при  $k$ -тој посети радионици постају:

$$C_k^{USED} = \sum_{i=1}^n C_{k,i}^{USED} = \sum_{i=1}^n C_{k,i}^{LIST\ PRICE} \cdot \frac{O_{k,h,i}^{INef}}{L_{h,i}} \cdot r_{k,i} = \sum_{i=1}^n C_{k,i}^{LIST\ PRICE} \cdot \left( \sum_h \frac{O_{k,h,i}^{IN}}{L_{h,i}} \right) \cdot r_{k,i} \quad (5.20)$$

$$C_k^{STUB} = \sum_{i=1}^n C_{k,i}^{STUB} = \sum_{i=1}^n C_{k,i}^{LIST\ PRICE} \cdot \frac{R_{k,h,i}^{IN}}{L_{h,i}} \cdot r_{k,i} = \sum_{i=1}^n C_{k,i}^{LIST\ PRICE} \cdot \left( 1 - \sum_h \frac{O_{k,h,i}^{IN}}{L_{h,i}} \right) \cdot r_{k,i} \quad (5.21)$$

Приликом посета моторској радионици током којих се врши замена делова са ограниченим радним веком потребно је правити разлику у броју како преосталих, тако и остварених циклуса рада делова по доласку и након одласка из радионице. Веза између преосталог броја циклуса рада  $i$ -тог дела у датој категорији потиска  $h$ , на улазу и излазу из  $k$ -те посете радионици зависи од одлуке о замени дела  $r_{k,i}$  и дата је формулом:

$$R_{k,h,i}^{OUT} = R_{k,h,i}^{IN} \cdot (1 - r_{k,i}) + L_{h,i} \cdot r_{k,i} \quad (5.22)$$

Према једначини (5.22), преостали бројеви циклуса рада  $i$ -тог дела у категорији потиска  $h$ , на улазу и излазу из  $k$ -те посете моторској радионици биће једнаки само онда када се не врши замена дела ( $r_{k,i} = 0$ ). У случају замене дела ( $r_{k,i} = 1$ ), преостали број циклуса рада  $i$ -тог дела у категорији  $h$ , на излазу из  $k$ -те посете радионици биће једнак лимитираном броју циклуса рада, што је у складу са претпоставком обнове ресурса на максималну вредност. Аналогно претходном разматрању може се написати и једначина везе између оствареног броја циклуса рада  $i$ -тог дела у категорији  $h$ , на улазу и излазу из  $k$ -те посете радионици у функцији одлуке о замени дела  $r_{k,i}$ , за коју важе исте претпоставке:

$$O_{k,h,i}^{OUT} = O_{k,h,i}^{IN} \cdot (1 - r_{k,i}) \quad (5.23)$$

Према једначини (5.23), остварени број циклуса рада  $i$ -тог дела у категорији  $h$ , на излазу из  $k$ -те посете радионици  $O_{k,h,i}^{OUT}$  једнак је нули у случају одлуке о његовој замени ( $r_{k,i} = 1$ ), тако да замењени део на излазу из  $k$ -те посете радионици акумулира циклусе које ће мотор остварити до наредне посете радионици. У супротном случају ( $r_{k,i} = 0$ ), остварени бројеви циклуса рада  $i$ -тог дела у категорији  $h$ , на улазу и излазу из  $k$ -те посете радионици биће једнаки.

Ако се уведе случајна променљива  $CSLSV_{k,h,i}$ , која означава број остварених циклуса  $i$ -тог дела у одређеној категорији  $h$ , на  $k$ -том интервалу рада мотора на авиону, односно у периоду између  $k-1$ -ве и  $k$ -те посете радионици, тада се број остварених циклуса  $i$ -тог дела у категорији  $h$ , на улазу у  $k$ -ту посету радионици може представити као:

$$O_{k,h,i}^{IN} = O_{k-1,h,i}^{OUT} + CSLSV_{k,h,i} \quad (5.24)$$

Заменом (5.23) у (5.24) добија се рекурентна једначина за остварени број циклуса рада  $i$ -тог дела у категорији  $h$ , на улазу у  $k$ -ту посету радионици:

$$O_{k,h,i}^{IN} = O_{k-1,h,i}^{IN} \cdot (1 - r_{k-1,i}) + CSLSV_{k,h,i} \quad (5.25)$$

Решавањем ове рекурентне једначине добија се:

$$O_{k,h,i}^{IN} = \left[ \prod_{a=1}^{k-1} (1 - r_{a,i}) \right] \cdot \sum_{b=0}^{k-1} \left[ \frac{CSLSV_{1+b,h,i}}{\prod_{a=1}^b (1 - r_{a,i})} \right] \quad (5.26)$$

Заменом једначине (5.26) у једначине (5.20) и (5.21) добијају се коначни изрази за трошкове искоришћеног и неискоришћеног ресурса делова са ограниченим радним веком при  $k$ -тој посети радионици у функцији:

- актуелне каталожке цене делова при  $k$ -тој посети радионици,
- донетих одлука о замени делова на свим претходним посетама радионици, укључујући и одлуку при  $k$ -тој посети радионици, и
- броја остварених циклуса делова са ограниченим радним веком у одређеним категоријама потиска  $h$  на свим претходним интервалима рада мотора на авиону, закључно са  $k$ -том посетом радионици:

$$C_k^{USED} = \sum_{i=1}^n C_{k,i}^{LIST PRICE} \cdot \left( \sum_h \frac{\left[ \prod_{a=1}^{k-1} (1 - r_{a,i}) \right] \cdot \sum_{b=0}^{k-1} \left[ \frac{CSLSV_{1+b,h,i}}{\prod_{a=1}^b (1 - r_{a,i})} \right]}{L_{h,i}} \right) \cdot r_{k,i} \quad (5.27)$$

$$C_k^{STUB} = \sum_{i=1}^n C_{k,i}^{LIST PRICE} \cdot \left( 1 - \sum_h \frac{\left[ \prod_{a=1}^{k-1} (1-r_{a,i}) \right] \cdot \sum_{b=0}^{k-1} \left[ \frac{CSLSV_{1+b,h,i}}{\prod_{a=1}^b (1-r_{a,i})} \right]}{L_{h,i}} \right) \cdot r_{k,i} \quad (5.28)$$

Једначине (5.27) и (5.28) могу се користити за одређивање трошкова искоришћеног и неискоришћеног ресурса делова са ограниченим радним веком при посети радионици уколико су испуњени следећи услови:

- замена делова се врши куповином и уградњом нових делова,
- лимитирани циклуси рада делова се не мењају током употребе мотора.

---

## **6 АНАЛИЗА ОПЕРАТИВНИХ ФАКТОРА КОЈИ УТИЧУ НА ЧАСОВЕ РАДА МОТОРА НА АВИОНУ**

---

Просечан број часова рада мотора на авиону представља меру оперативне поузданости мотора. Са повећањем просечног времена рада мотора на авиону, поред раста оперативне поузданости, долази и до смањења директних трошкова радионичког одржавања. Због тога је повећање просечног броја часова рада мотора на авиону од нарочите важности за авиопревозиоца.

Просечно време рада мотора на авиону зависи од услова оперативне употребе мотора, зрелости мотора и пословне стратегије оператера при дефинисању обима радова радионичког одржавања. Након достизања зрелости, просечно време рада мотора на авиону се обично стабилизује на 60%-80% од броја часова, остварених током првог интервала рада на авиону, у зависности од типа мотора и начина његовог одржавања.

Комерцијални летови авиона у цивилном ваздушном саобраћају обављају се на рутама различитих дужина и климатских услова средине. Због разлика у маси на полетању авиона са аеродрома различитих надморских висина, дужина полетно-слетних стаза и температура околног ваздуха, варирају и могућности смањења потиска на полетању. У главне оперативне факторе који утичу на просечно време рада мотора на авиону, спадају:

- оцењена вредност максималног потиска мотора и
- степен радног оптерећења мотора.

## 6.1 МАКСИМАЛНИ ПОТИСАК НА ПОЛЕТАЊУ

---

Ваздухопловни турбински мотори се рангирају према вредностима силе потиска. Произвођач мотора прописује максималне вредности расположивог потиска, које су одобрене за оперативну употребу у одређеним фазама лета авиона или приликом ванредних ситуација, водећи рачуна о максимално дозвољеним вредностима разлике притисака, температуре и бројева обртаја. За сваки модел мотора врши се оцена следећих вредности потиска<sup>9</sup> [57]:

- максимални потисак на полетању (енг. *Maximum Take-Off Thrust*),
- максимални континуални потисак (енг. *Maximum Continuous Thrust*),
- максимални потисак у пењању (енг. *Maximum Climb Thrust*),
- максимални потисак у крстарењу (енг. *Maximum Cruise Thrust*).

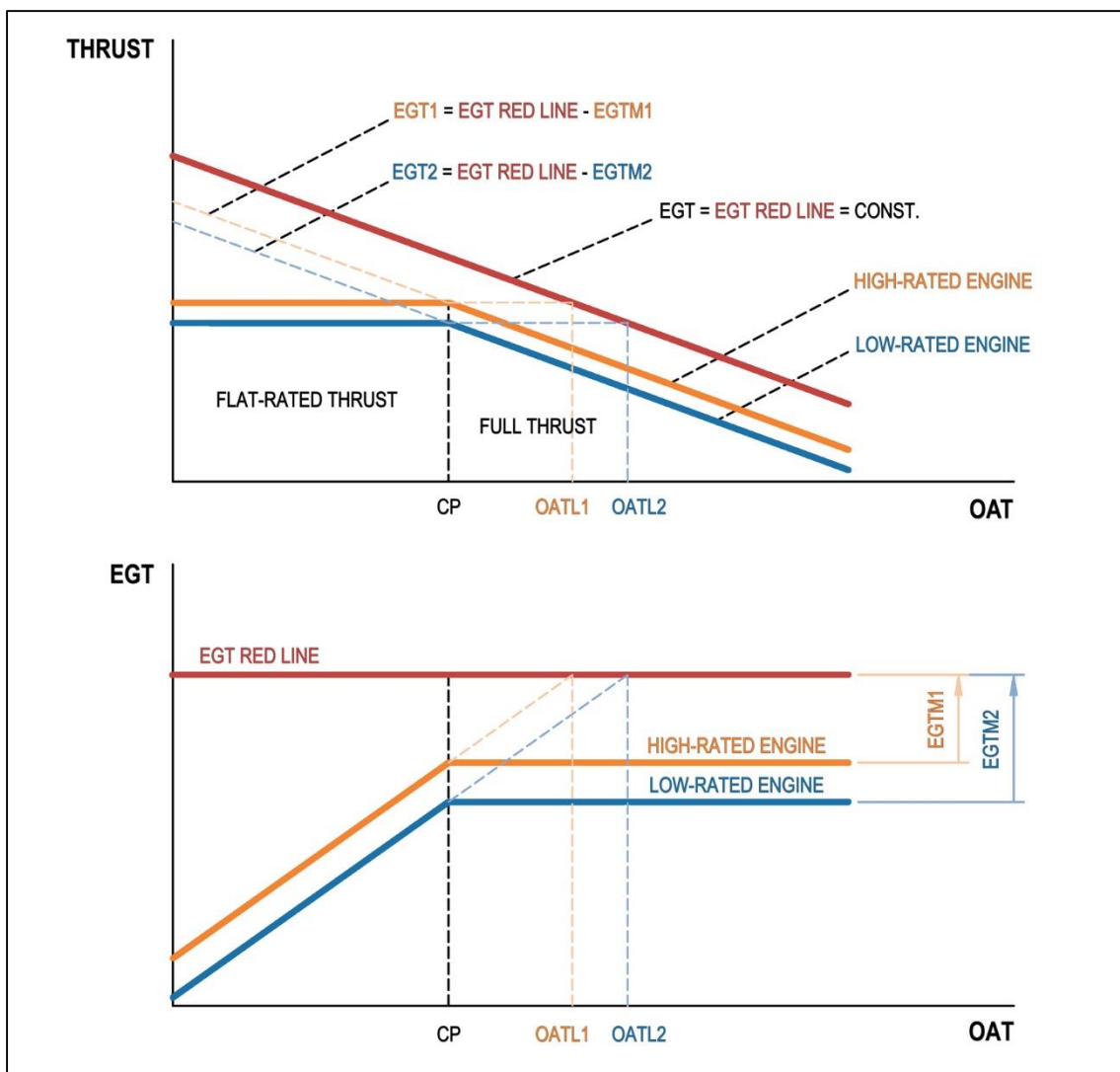
Оцењене вредности максималног потиска на полетању и максималног континуалног потиска спадају у сертификована оперативна ограничења потиска мотора, која су предмет одобрења од стране надлежних ваздухопловних власти. За разлику од њих, максимални потисак у пењању и максимални потисак у крстарењу не подлежу сертификационим захтевима.

Максимални потисак на полетању се користи на полетању или приликом неуспелог прилаза на слетање и представља највећу вредност расположивог потиска мотора. Рад мотора у режиму максималног потиска на полетању је временски ограничен због великих механичких и топлотних оптерећења делова мотора. Временско ограничење рада мотора у режиму максималног потиска износи 5 минута, док се у случају отказа једног од мотора на авиону, код појединих модела одобрава повећање времена рада на 10 минута, што је условљено куповином специјалног прилога Упутства за летење авионом (AFM – *Aircraft Flight Manual*).

---

<sup>9</sup> енг. *Thrust Ratings*

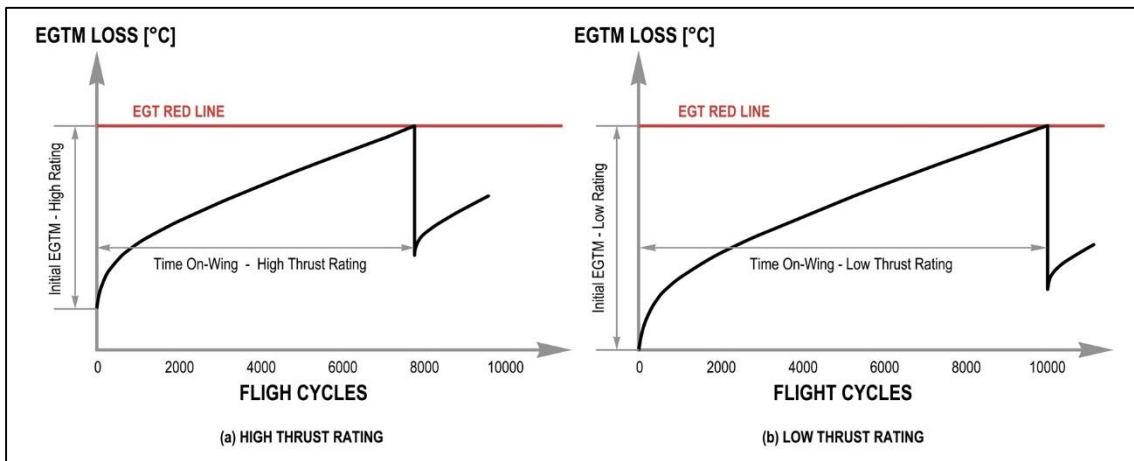
Поједини модели мотора имају већи број процењених вредности максималног потиска на полетању, ради могућности примене на већем броју модела авиона и испуњења оперативних захтева ваздухопловних превозилаца. На пример, модел мотора *CFM56-3*, серије *C1* је рангиран на 18.5klbs, 20.1klbs, 22.1klbs и 23.5klbs максималног потиска на полетању и може се користити на класичним серијама авиона *Boeing 737*. Рад мотора на већим оцењеним вредностима максималног потиска на полетању праћен је порастом EGT, будући да се ради о склопу истих компонената. Како оперативно EGT ограничење не зависи од ранга потиска мотора, то ће варијанта одређеног модела мотора са већим максималним потиском на полетању имати мању вредност иницијалне EGT маргине, што је илустровано на Слици 6.1.



Слика 6.1 Оцењене вредности потиска мотора и иницијалне вредности EGT маргине



Брзина трошења радног века топлог дела мотора расте експоненцијално са порастом температуре на турбини [95], па употреба мотора на већим вредностима EGT резултује порастом интензитета трошења EGT маргине. Према томе, због мањих иницијалних вредности EGT маргине и већег интензитета трошења EGT маргине, мотори са већим максималним потиском на полетању остварују краће интервале рада на авиону. Разматрани утицај оперативне употребе мотора са различитим оцењеним вредностима максималног потиска на полетању на интервале рада на авиону приказан је на Слици 6.2 [65].



Слика 6.2 Утицај максималног потиска на полетању на интензитет трошења EGT маргине и циклусе рада мотора на авиону

Након потрошње EGT маргине при раду на већем процењеном максималном потиску, мотору се може повратити извесни део EGT маргине трајним ограничавањем максималног потиска на нижу оцењену вредност<sup>10</sup>. Поменута промена ранга максималног потиска на полетању код мотора са FADEC системом, врши се заменом идентификационог прикључка (енг. *ID Plug*). Искоришћење додатне EGT маргине се обавља након уградње мотора на други тип авиона. Поједини ваздухопловни оператери примењују поменуту стратегију за повећање часова рада мотора на авиону, како би смањили директне трошкове радионичког одржавања мотора по часу лета.

<sup>10</sup> енгл. *Engine Derate*

Утицај вредности максималног потиска на полетању на директне трошкове радионичког одржавања мотора се може сагледати на два начина. Повећани интензитет посете радионици мотора са већим оцењеним максималним потиском на полетању доводи до пораста трошкова, који су првенствено резултат повећаног обима радова на радионичкој обнови перформанси. Са друге стране, због стриктнијих ограничења LLP ресурса у већој категорији потиска, долази до пораста трошкова замене делова са ограниченим радним веком по циклусу лета.

Узимајући у обзир описани утицај вредности максималног потиска на полетању на директне трошкове радионичког одржавања мотора, оператерима се по могућству саветује примена процедура за смањење потиска на полетању, ради продужења радног века компонената топлог дела и интервала рада на авиону. Поред тога, код мотора са могућношћу рада на различитим процењеним вредностима максималног потиска неопходно је бележење броја остварених циклуса у свакој од категорија потиска, ради одређивања броја преосталих циклуса рада делова са ограниченим радним веком и планирања скидања узрокованих истрошеношћу LLP ресурса.

## 6.2 СТЕПЕН РАДНОГ ОПТЕРЕЂЕЊА МОТОРА

---

Просечно време рада мотора на авиону (TOW) у великој мери зависи од тежине радних услова, којима се мотор излаже при оперативној употреби. Радно оптерећење мотора (енг. *Operational Severity*) одређено је вредностима температуре, притиска и бројева обртаја. За оцену тежине радних услова користи се степен радног оптерећења мотора (енг. *Severity Factor*). Употреба мотора при мањем радном оптерећењу доводи до пада интензитета погоршања перформанси и повећања часова рада на авиону, што резултује падом интензитета посете радионици и директних трошкова одржавања.

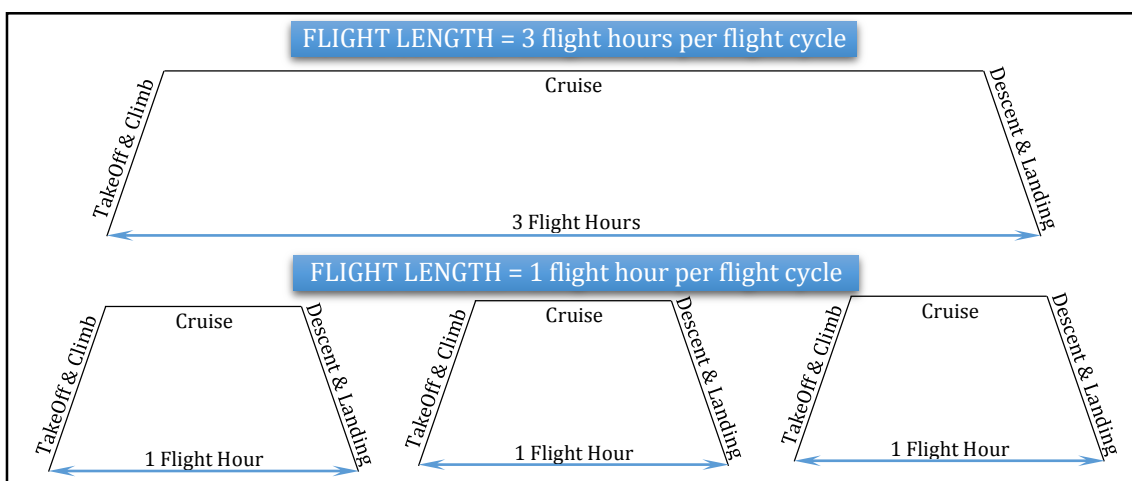
У оперативне факторе који утичу на степен радног оптерећења мотора спадају:

- просечна дужина лета,
- ефективни ниво смањења потиска мотора,
- температура околног ваздуха и
- тип радне средине.

### 6.2.1 ДУЖИНА ЛЕТА

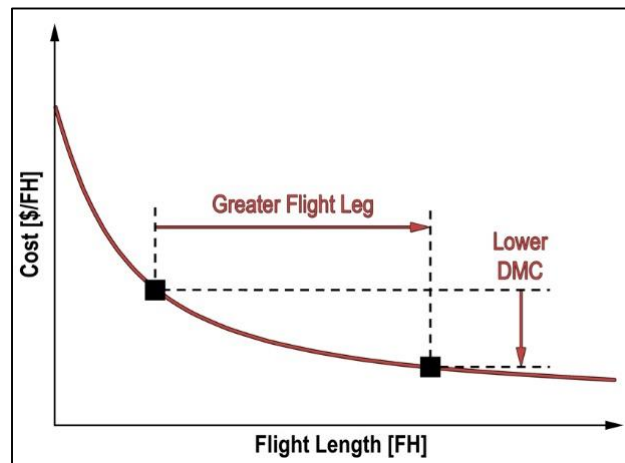
Мерење акумулираног налета мотора на авиону врши се бележењем остварених часова рада мотора (EFH – *Engine Flight Hours*) и циклуса рада мотора (EFC – *Engine Flight Cycles*). Однос остварених часова и циклуса рада мотора на авиону (*EFH/EFC Ratio*) представља просечну дужину лета, која се обично изражава у временским јединицама и означава просечно трајање лета, односно просечан број часова рада мотора по једном циклусу лета.

Просечна дужина лета (FL – *Flight Length*) описује профил оперативне употребе мотора и може значајно утицати на радно оптерећење мотора. Утицај просечне дужине лета на радно оптерећење мотора се најбоље може објаснити поређењем два различита профила оперативне употребе мотора на авиону, као на примеру са Сlike 6.3.



Слика 6.3 Поређење профила оперативне употребе мотора на кратким и средњим дужинама лета

Радно оптерећење мотора зависи од процентуалног удела часова проведених у раду при одређеним вредностима потиска у укупном броју остварених часова налета, као и од самих вредности потиска. Поређењем профила оперативне употребе мотора са Сликe 6.3, може се закључити да са смањењем дужине лета расте процентуални удео часова рада мотора проведених у режимима полетања и пењања и опада проценат часова рада у режиму крстарења. Употреба мотора на краћим дужинама лета, због процентуално дуже изложености већим вредностима температуре, разлике притисака и бројева обртаја, доводи до повећања радног оптерећења мотора, а самим тим и директних трошкова одржавања по часу лета. Насупрот томе, употреба мотора на већим дужинама лета се одликује мањим интензитетом хабања по часу лета, што доводи до смањења директних трошкова радионичког одржавања по часу лета, због дужег времена између посета радионици. Основни облик утицаја дужине лета на директне трошкове одржавања и/или интензитет посете радионици је приказан на Слици 6.4.



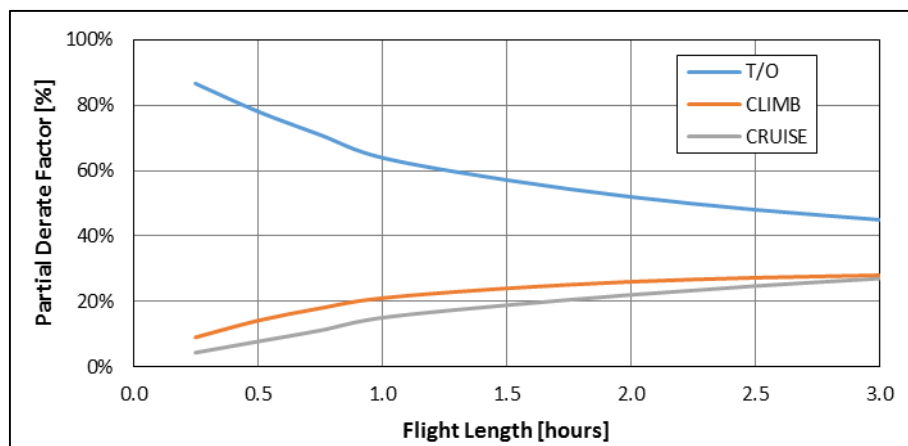
Слика 6.4 Утицај дужине лета на директне трошкове радионичког одржавања мотора

На краћим дужинама лета, брза акумулација остварених циклуса рада и већи интензитет трошења EGT маргине су главни узроци повећаних вредности директних трошкова одржавања мотора, где највећи удео имају трошкови замене делова са ограниченим радним веком. За исти годишњи налет у часовима рада мотора, трошкови замене делова са ограниченим радним веком по часу лета биће мањи при употреби мотора на већим дужинама лета, због смањене брзине акумулације циклуса рада.

## 6.2.2 НИВО СМАЊЕЊА МАКСИМАЛНОГ ПОТИСКА НА ПОЛЕТАЊУ

Оперативна употреба мотора са смањеним вредностима потиска у фазама полетања, пењања и крстарења у општем случају доводи до смањења радног оптерећења мотора. Оцена парцијалног утицаја оперативног смањења нивоа потиска у фазама полетања, пењања и крстарења на радно оптерећење мотора заснива се на анализи дејства топлотних и механичких оптерећења на брзину трошења делова мотора, при задатој дужини лета.

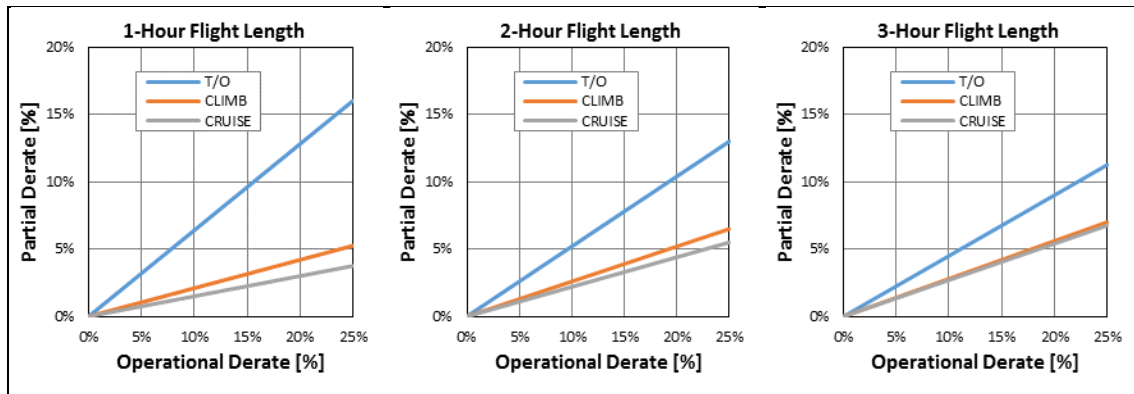
На краћим дужинама лета, утицај смањења потиска на полетању је оцењен већим тежинским фактором, због већег процентуалног удела времена рада у режиму максималног потиска на полетању и веће вредности потиска. Из истих разлога се смањењима максималног потиска у пењању и крстарењу додељује већи тежински фактор на већим дужинама лета. На Слици 6.5 је приказана зависност процењених вредности парцијалних утицаја смањења потиска у фазама полетања, пењања и крстарења од просечне дужине лета, према подацима за фамилију *CFM56* мотора [96]. Тежински утицај смањења потиска на полетању је значајно мањи на већим дужинама лета, али остаје ипак већи од утицаја смањења потиска у пењању или крстарењу.



Слика 6.5 Парцијални утицај смањења потиска у фазама полетања, пењања и крстарења на радно оптерећење фамилије мотора *CFM56* у функцији дужине лета

Коришћењем процењених тежинских фактора, могу се одредити парцијални нивои смањења потиска за задате вредности оперативних смањења потиска у фазама полетања, пењања и крстарења, при одређеној дужини лета.

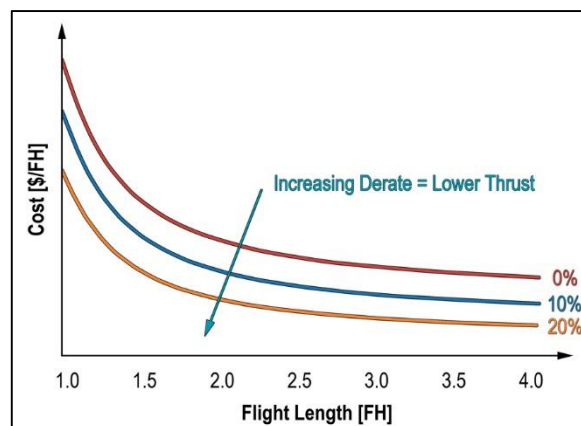
На Слици 6.6 је илустрована веза између оперативних (енг. *Operational Derate*) и парцијалних (енг. *Partial Derate*) нивоа смањења потиска фамилије CFM56 мотора, при изабраним просечним дужинама лета.



Слика 6.6 Оперативни и парцијални ниво смањења потиска фамилије мотора CFM56

Збиром процењених парцијалних утицаја смањења потиска на разматраној дужини лета, за задате вредности оперативног смањења потиска у наведеним фазама лета, одређује се вредност ефективног нивоа смањења потиска. Ефективно смањење потиска (енг. *Effective Derate*) обухвата заједнички утицај просечне дужине лета и оперативног смањења потиска у фазама полетања, пењања и крстарења на степен радног оптерећења мотора.

Основни облик утицаја смањења потиска мотора на директне трошкове одржавања и/или интензитет посете радионици је приказан на Слици 6.7 [84].



Слика 6.7 Утицај смањења потиска на директне трошкове одржавања мотора

Оперативна употреба мотора са смањеним вредностима потиска доприноси паду радних вредности EGT и порасту часова рада мотора на авиону, при чему највећи допринос има смањење максималног потиска на полетању.

Ниво смањења максималног потиска на полетању, при лету на рути задате дужине, зависи од испуњености захтева по питању перформанси авиона.

Максимална маса авиона на полетању (MTOW – *Maximum Take-Off Weight*) се дефинише у поступку сертификације и представља структурално ограничење. Са друге стране, анализом перформанси утврђује се максимална дозвољена маса авиона на полетању (RTOW – *Regulated Take-Off Weight*), која обезбеђује достизање унапред одређеног нивоа безбедности у свим фазама лета [97].

Максимална дозвољена маса авиона на полетању је једнозначно одређена максималним расположивим потиском мотора, при задатим условима на полетању:

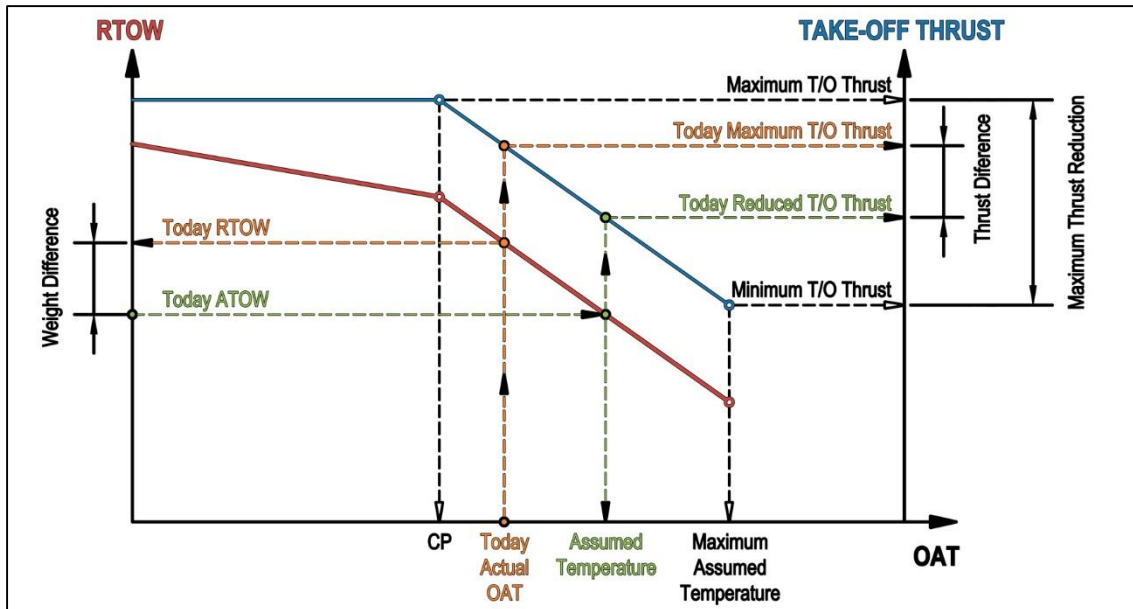
- карактеристике полетно-слетне стазе (дужина, нагиб, стање, надморска висина, итд.),
- перформансе авиона (аеродинамичка конфигурација, стање, итд.),
- услови средине (OAT, јачина и смер ветра, итд.),
- висина и удаљеност препрека.

Потребан потисак за полетање авиона биће мањи од максимално расположивог потиска, уколико је стварна маса авиона на полетању (ATOW – *Actual Take-Off Weight*) мања од максимално дозвољене масе на полетању, при задатој вредности температуре околног ваздуха.

Оперативно смањење вредности потиска мотора на полетању може се остварити методом:

- претпостављене температуре (енг. *Assumed Temperature*), и/или
- избора мањег максималног потиска на полетању (енг. *Take-Off Derate*).

Примена методе претпостављене температуре заснива се на одређивању вредности претпостављене температуре околног ваздуха, при којој би стварна маса на полетању била једнака максимално дозвољеној маси на полетању, коришћењем RTOW табела.



Слика 6.8 Одређивање вредности претпостављене температуре околног ваздуха

Процедура одређивања вредности претпостављене температуре околног ваздуха приказана је на Слици 6.8. Смањење нивоа потиска на полетању се реализује уношењем утврђене вредности претпостављене температуре у рачунар за управљање летом авиона (FMC – *Flight Management Computer*). Након подешавања потиска на максималну вредност, систем за управљање радом мотора ће одржавати мањи број обртаја  $N1\%$ , како би генерисао оцењену вредност потиска, која одговара унетој вредности претпостављене температуре. С обзиром да овако подешен потисак мотора не представља ограничење на полетању, омогућен је избор максималног потиска у било ком тренутку током полетања, гурањем полуге потиска унапред.

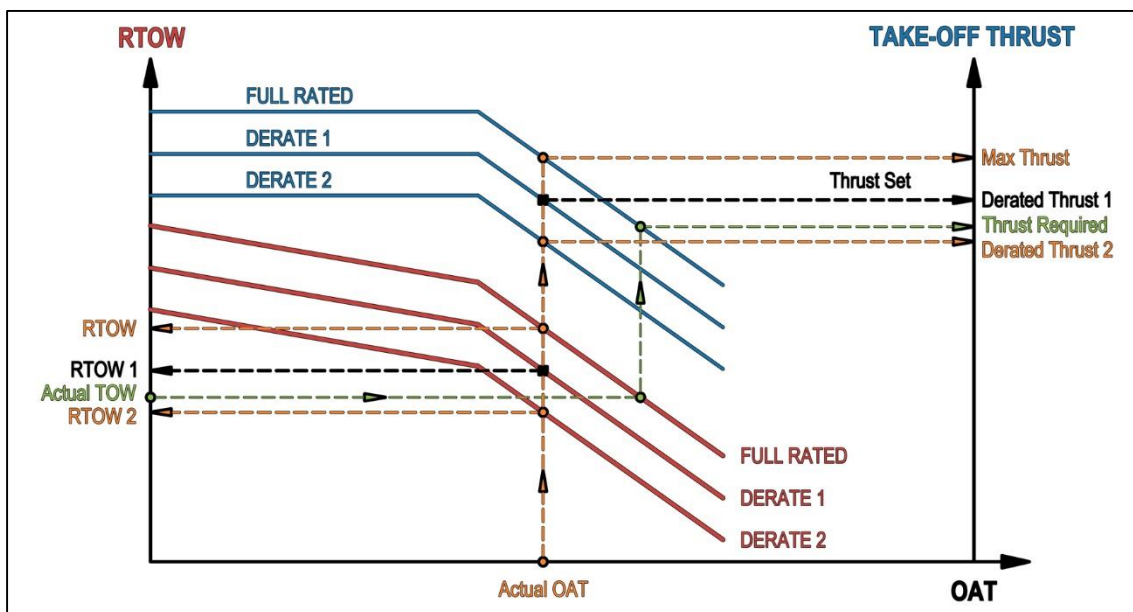
Највећи дозвољени ниво смањења максималног потиска на полетању се дефинише ваздухопловним прописима. Према FAR AC 25-13 и JAR AMJ 25-13, максимално дозвољено смањење потиска износи 25% од одобреног ранга максималног потиска на полетању, као основе за анализу перформанси авиона. Према важећим EASA прописима [98] највеће дозвољено смањење нивоа потиска на полетању износи 40% од максималног потиска на полетању. Ваздухопловни прописи захтевају и периодично обављање полетања авиона са максималним потиском, ради провере радних параметара мотора [99].



Максимално дозвољено смањење потиска на полетању одређује максималну вредност претпостављене температуре околног ваздуха. Минимална вредност претпостављене температуре околног ваздуха једнака је  $CP$ , будући да се смањење потиска реализује употребом крива оцењеног потиска у области температурног ограничења рада мотора. Примена методе претпостављене температуре околног ваздуха за смањење потиска на полетању могућа је уколико су истовремено испуњена следећа три услова:

- претпостављена температура је већа од  $CP$ ,
- претпостављена температура је мања од максималне претпостављене температуре,
- стварна  $OAT$  је мања од претпостављене температуре.

Смањење вредности потиска на полетању се може остварити и избором мањег одобреног нивоа потиска на полетању (*Derate*), који се врши у рачунару за управљање летом авиона. Овако подешена вредност потиска постаје оперативно ограничење потиска на полетању. При избору мањег нивоа потиска на полетању потребно је водити рачуна да подешена вредност потиска на полетању буде увек већа од потребног потиска мотора. Процедура избора смањеног нивоа одобреног потиска илустрована је на Слици 6.9.



Слика 6.9 Процедура избора смањеног нивоа одобреног потиска мотора

У појединим случајевима, могу се истовремено применити обе методе за смањење потиска, тако што се прво изабере мањи ниво одобреног потиска, а затим потисак додатно смањи методом претпостављене температуре.

Смањење потиска на полетању праћено је падом масеног протока горива до коморе сагоревања. Са друге стране, употреба било које од метода за смањење потиска на полетању најчешће резултује повећањем укупне потрошње горива [100]. Збирни ефекат је ипак такав да је ниво смањења трошкова радионичког одржавања мотора значајно већи од нивоа пораста трошкова горива.

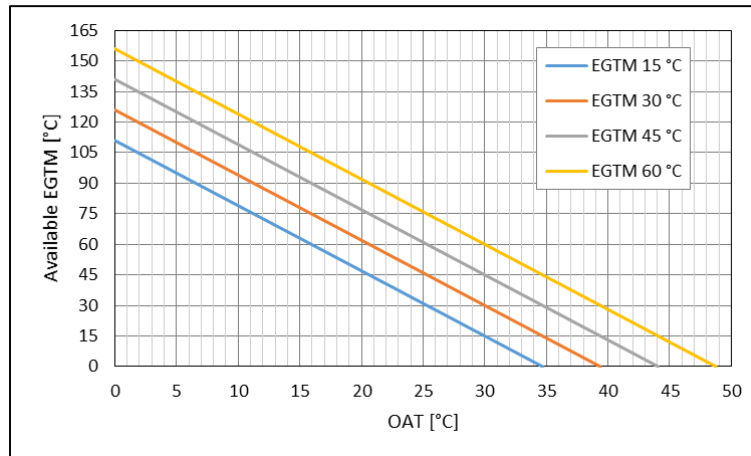
Практиковањем полетања са смањеним вредностима потиска обезбеђује се рад мотора са смањеним вредностима температура, притисака и бројева обртаја, што резултује:

- смањењем напона и хабања,
- повећањем поузданости,
- смањењем интензитета трошења EGT маргине,
- повећањем часова рада мотора на авиону TOW, и
- смањењем директних трошкова одржавања мотора.

### **6.2.3 ТЕМПЕРАТУРА ОКОЛНОГ ВАЗДУХА**

Утицај температуре околног ваздуха на радно оптерећење мотора је у директној вези са претходно размотреним ефектима на промену радних вредности EGT. Оперативна употреба мотора при мањим вредностима температуре околног ваздуха доводи до пада максималне вредности EGT, потребне за остваривање задате вредности потиска, а тиме и до смањења радног оптерећења мотора. У пракси се често користи појам расположиве EGT маргине, којим се описује утицај температуре околног ваздуха на промену радних вредности EGT. Расположива EGT маргина (енг. *Available EGT Margin*) представља разлику између оперативног EGT ограничења и максималне EGT на полетању са максималним потиском, при стварним вредностима OAT.

Познавањем градијента промене EGT са OAT за одређени тип мотора, могу се израчунати вредности расположивих EGT маргина за различите вредности OAT и стандардне EGT маргине [72]. На Слици 6.10 је приказана зависност расположиве EGT маргине од температуре околног ваздуха, при изабраним вредностима стандардне EGT маргине на нивоу мора, за мотор типа CFM56-3.



Слика 6.10 Распожива EGT маргина у функцији OAT код мотора типа CFM56-3

Коришћење мотора са релативно великом позитивном EGT маргином при великим просечним вредностима OAT захтева превремену радионичку обнову перформанси, због малих вредности расположиве EGT маргине. Аналогно томе, употреба мотора у хладним временским условима обезбеђује ниже радне вредности EGT, веће расположиве EGT маргине и дуже временске интервале рада на авиону.

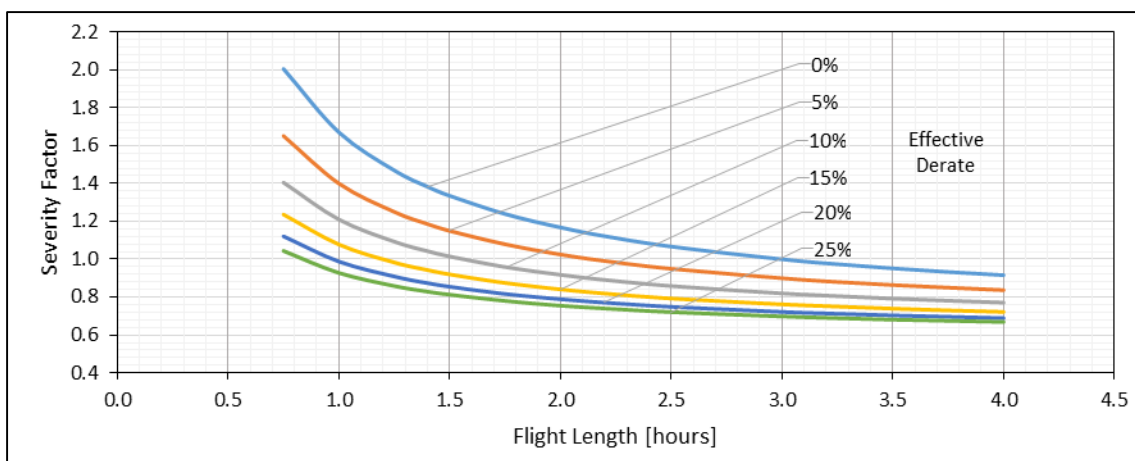
#### 6.2.4 ТИП РАДНЕ СРЕДИНЕ

Употреба мотора у ерозивним, пешчаним и прашњавим срединама повећава степен радног оптерећења мотора због негативног дејства фактора средине на стање и радни век компонената. Ефекти радне средине обухватају корозију, оксидацију и ерозију делова, блокаду отвора за хлађење турбинских лопатица, и прогоревање коморе сагоревања. Утицај радне средине на степен радног оптерећења мотора може се проценити помоћу коефицијената [65]. Захтевнији радни услови скратиће интервале рада на авиону и убрзаће процес старења мотора.

### 6.3 КРИВЕ РАДНОГ ОПТЕРЕЂЕЊА МОТОРА

Криве радног оптерећења мотора (*Severity Curves*) користе се за одређивање трошкова одржавања или интензитета посете радионици при задатим условима оперативне употребе мотора. Услов оперативне употребе мотора дефинисан је просечном дужином лета и ефективним нивоом смањења потиска. Сваком услову оперативне употребе додељена је одговарајућа вредност степена радног оптерећења (*Severity Factor*), на основу статистичке анализе података о трошковима одржавања и интензитета посете радионици.

Произвођачи мотора израђују криве радног оптерећења мотора, које су примењиве за све оцењене вредности потиска датог типа мотора, због великог броја заједничких делова. Поред тога, криве радног оптерећења се обично приказују посебно за нове и зреле моторе. Поједине криве радног оптерећења мотора обухватају утицај ефективног нивоа смањења потиска, док друге укључују само утицај оперативног нивоа смањења потиска на полетању, што зависи од статистичких података, коришћених за њихову израду. На Слици 6.11 је приказан утицај ефективног нивоа смањења потиска на промену степена радног оптерећења у функцији дужине лета, за моторе фамилије *CFM56* [96]. При краћим дужинама лета, иста вредност ефективног смањења потиска мотора носи већи утицај на пад степена радног оптерећења.



Слика 6.11 Криве радног оптерећења за моторе фамилије CFM56

Подаци о степену радног оптерећења мотора се често дају и табеларним путем, као што је приказано у Табели 6.1 [96]. Познавањем вредности трошкова одржавања мотора за базични (основни) услов оперативне употребе, може се извршити процена трошкова одржавања за било који други услов оперативне употребе, на основу односа степена радног оптерећења разматраног и основног услова оперативне употребе. На исти начин може се одредити и интензитет посете радионици.

Табела 6.1 Степен радног оптерећења за CFM56 фамилију мотора

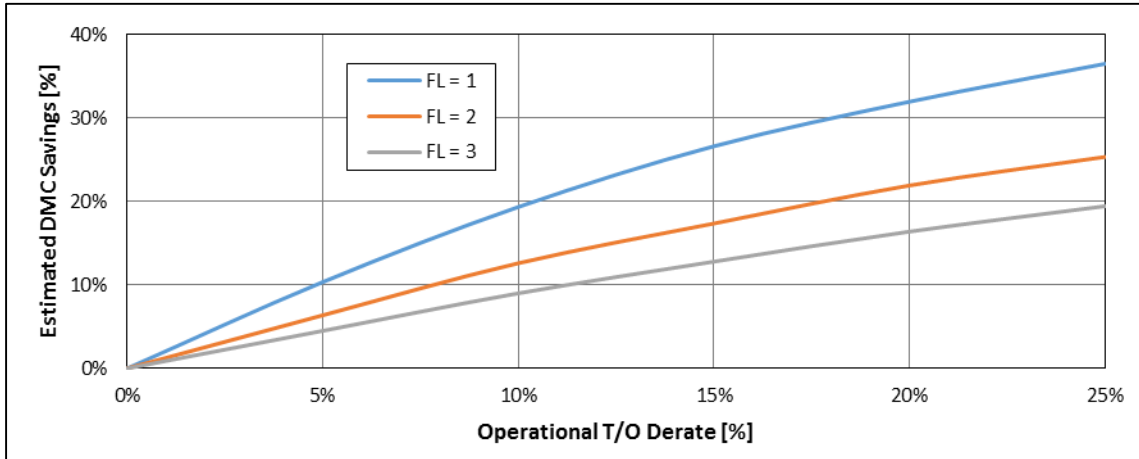
| FLIGHT LENGTH<br>(Hours) | EFFECTIVE DERATE |       |       |       |       |       |
|--------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                          | 0%               | 5%    | 10%   | 15%   | 20%   | 25%   |
| 0.75                     | 2.005            | 1.651 | 1.405 | 1.236 | 1.121 | 1.044 |
| 1.00                     | 1.670            | 1.400 | 1.210 | 1.078 | 0.988 | 0.928 |
| 1.25                     | 1.469            | 1.250 | 1.093 | 0.983 | 0.909 | 0.859 |
| 1.40                     | 1.383            | 1.186 | 1.043 | 0.943 | 0.874 | 0.829 |
| 1.50                     | 1.335            | 1.150 | 1.015 | 0.920 | 0.855 | 0.813 |
| 1.75                     | 1.239            | 1.079 | 0.959 | 0.875 | 0.817 | 0.780 |
| 2.00                     | 1.168            | 1.025 | 0.918 | 0.841 | 0.789 | 0.755 |
| 2.20                     | 1.122            | 0.991 | 0.891 | 0.819 | 0.771 | 0.740 |
| 2.50                     | 1.067            | 0.950 | 0.859 | 0.793 | 0.749 | 0.721 |
| 3.00                     | 1.000            | 0.900 | 0.820 | 0.762 | 0.722 | 0.698 |
| 3.25                     | 0.974            | 0.880 | 0.805 | 0.750 | 0.712 | 0.689 |
| 3.50                     | 0.952            | 0.864 | 0.792 | 0.739 | 0.703 | 0.681 |
| 3.75                     | 0.933            | 0.850 | 0.781 | 0.730 | 0.696 | 0.675 |
| 4.00                     | 0.916            | 0.837 | 0.771 | 0.722 | 0.689 | 0.669 |

Криве радног оптерећења се могу користити и за анализу потенцијалних уштеда трошкова одржавања мотора. Примера ради, уколико мрежа линија на којима оператер обавља комерцијалне летове допушта додатно оперативно смањење потиска на полетању, тада се могу израчунати очекиване уштеде трошкова одржавања мотора, коришћењем односа одговарајућих степена радног оптерећења, што је приказано у Табели 6.2, на примеру мотора CFM56.

Табела 6.2 Анализа потенцијалних уштеда трошкова радионичког одржавања мотора CFM56

| OPERATING<br>CONDITION | FLIGHT<br>LEG | OPERATIONAL<br>DERATE |     |     | PARTIAL DERATE |      |      | EFFECTIVE<br>DERATE | SEVERITY<br>FACTOR | SEVERITY<br>FACTOR<br>RATIO | MAINTENANCE<br>COST SAVINGS |
|------------------------|---------------|-----------------------|-----|-----|----------------|------|------|---------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                        |               | T/O                   | CL  | CR  | T/O            | CL   | CR   |                     |                    |                             |                             |
| BASE                   | 2.0           | 5%                    | 10% | 10% | 2.6%           | 2.6% | 2.2% | 7.4%                | 0.974              | 1.000                       | 0.0%                        |
| VARIANT 1              | 2.0           | 10%                   | 10% | 10% | 5.2%           | 2.6% | 2.2% | 10.0%               | 0.918              | 0.918/0.974                 | 5.7%                        |
| VARIANT 2              | 2.0           | 15%                   | 10% | 10% | 7.8%           | 2.6% | 2.2% | 12.6%               | 0.878              | 0.878/0.974                 | 9.8%                        |

Коришћењем података о степену радног оптерећења CFM56 фамилије мотора, извршен је прорачун очекиваних уштеда директних трошкова одржавања у зависности од оперативног смањења нивоа потиска на полетању, при изабраним дужинама лета. Резултати прорачуна приказани су на Слици 6.12.



Слика 6.12 Утицај оперативног смањења потиска на полетању на очекиване уштеде трошкова одржавања мотора фамилије CFM56

Са Сlike 6.12 се може видети да се највећи утицај на пад директних трошкова радионичког одржавања мотора остварује у првим процентима оперативног смањења потиска на полетању, при чему ниво очекиваних уштеда трошкова расте са смањењем просечне дужине лета.

Поред наведених примера употребе, криве радног оптерећења мотора могу се користити и за међусобно поређење директних трошкова одржавања мотора и интензитета посете моторској радионици између различитих оператера.

---

## **7 МЕТОДОЛОГИЈА ЗА СТРАТЕШКО ПЛАНИРАЊЕ И ОДЛУЧИВАЊЕ У ПРОЦЕСУ РАДИОНИЧКОГ ОДРЖАВАЊА ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА**

---

Посете радионици свакако представљају тренутке када је потребно донети одлуке о обиму радионичких радова над модулима мотора и замени делова са ограниченим радним веком. Разматрањем стања мотора и преосталог ресурса делова са ограниченим радним веком по доласку у моторску радионицу, приступа се доношењу одлуке о обиму и садржају радова, којом се обезбеђује дужина наредног интервала рада мотора на авиону, у складу са оперативним захтевима и пословном стратегијом оператера.

Донета одлука не утиче само на дужину наредног интервала рада на авиону, већ и на обим захтеваних радионичких радова на наредној посети моторској радионици. Сагласно томе, постоји потреба за претходном анализом утицаја потенцијалних одлука на директне трошкове радионичког одржавања и очекивану дужину наредног интервала рада мотора. Оценом дужине наредног интервала рада мотора, за сваку разматрану одлуку и у складу са планираним начином оперативне употребе авиона, отвара се могућност разматрања потенцијалних одлука о садржају радова и на наредној посети радионици.

Стратешким планирењем радова на унапред изабраном броју разматраних посета радионици, може се побољшати квалитет одлучивања у процесу радионичког одржавања турбофенских мотора.

Основни елементи методологије за стратешко планирање и доношење одлука у процесу радионичког одржавања турбофенских мотора обухватају:

- 1) Предвиђање будућих очекиваних циклуса рада мотора у функцији:
  - a) задатог начина оперативне употребе мотора на авиону,
  - b) разматраних одлука о обиму и садржају радионичких радова.
- 2) Предвиђање очекиваних трошкова радионичког одржавања у функцији:
  - a) разматраних одлука о обиму и садржају радионичких радова.

Коришћењем поменутих предвиђања потребно је извршити оптимизацију трошкова радионичког одржавања, за претходно изабран број разматраних посета моторској радионици, у складу са пословним стратегијама оператора.

Изабрани критеријум за оптимизацију трошкова у оквиру предложене методологије истраживања је минимизација очекиване вредности укупних директних трошкова радионичког одржавања мотора по циклусу лета, генерисаних на разматраном броју посета радионици. Оптимизацију трошкова одржавања мотора према утврђеном критеријуму је потребно посматрати кроз призму пословних стратегија, које одсликавају приступ оператора у управљању ресурсима делова са ограниченим радним веком. У општем случају, оператори могу изабрати једну од следећих стратегија:

- максимално искоришћење ресурса делова ограниченог радног века,
- превремена замена делова са ограниченим радним веком.

Стратегија максималног искоришћења LLP ресурса је оправдана, под условом да се примени на нивоу целокупне флоте мотора. Стога највећу корист од њене примене могу имати оператори са великим бројем мотора. Максимално искоришћење LLP ресурса се постиже уклапањем потребних и расположивих LLP ресурса, уз претходно планирање динамике трошења ресурса и своди се на решавање проблема комбинаторне оптимизације. Примена ове стратегије ван контекста расположивих LLP ресурса са осталих мотора из флоте није економски исплатива, због пораста броја превремених скидања и непотпуног коришћења интервала, омогућених перформансама мотора.



У оквиру овог истраживања разматрана је стратегија превремене замене делова са ограниченим радним веком. Стратешки приступ превременој замени делова са ограниченим радним веком моделиран је различитим вредностима минималног LLP ресурса, којег је потребно уградити при разматраним посетама радионици. Замена свих делова са ограниченим радним веком, са преосталим ресурсом мањим од 2000 циклуса, представља један од примера разматраних стратегија превремене замене.

## 7.1 ПОЛАЗНЕ ПРЕТПОСТАВКЕ

---

Примена предложене методологије истраживања је омогућена одговарајућим уопштавањима процеса оперативне употребе и радионичког одржавања, неопходним за моделирање самих процеса, увођењем следећих претпоставки:

**Претпоставка 1:** Разматране посете радионици су искључиво резултат погоршања перформанси мотора и потребе за обновом ресурса делова са ограниченим радним веком. Ова претпоставка је оправдана за моторе који се користе на кратким рутама, где наведени разлози планираних скидања мотора учествују са преко 70% у укупном броју посета радионици [92].

**Претпоставка 2:** Сви делови са ограниченим радним веком у разматраном модулу мотора се замењују истовремено. Овом претпоставком се уводи ограничење броја одлука о замени делова при посети моторској радионици.

**Претпоставка 3:** Делови са ограниченим радним веком се замењују искључиво са новим деловима. Моделирање процеса радионичког одржавања са могућношћу уградње коришћених делова захтева предвиђање кретања на тржишту резервних делова (расположивост, цена и преостали ресурс делова), што би довело до знатног пораста комплексности модела одлучивања.

**Претпоставка 4:** При замени делова са ограниченим радним веком у одговарајућем модулу мотора врши се ревизија датог модула. Ова претпоставка је у складу са препорукама произвођача мотора [92].

**Претпоставка 5:** Максимално дозвољени број циклуса рада делова са ограниченим радним веком се не мења током разматраног периода оперативне употребе мотора. Ова претпоставка је уведена због немогућности предвиђања промене максималног ресурса делова, коју поједини произвођачи мотора повремено објављују у ревизијама упутства за радионичко одржавање мотора (ESM), паралелно са стицањем искуства у експлоатацији.

**Претпоставка 6:** При разматрању потенцијалних одлука које укључују замену делова са ограниченим радним веком на наредним посетама радионици, претпоставља се годишњи раст цене од 6%. Ова претпоставка је заснована на претходно изложеној анализи просечног годишњег раста цене делова. Цена делова са ограниченим радним веком се утврђује у тренутку доласка мотора у посету радионици, на основу које се одређује очекивана цена делова у наредном периоду.

**Претпоставка 7:** Тип мотора који долази у актуелну посету радионици се неће мењати у наредном периоду оперативне употребе, током којег се минимизацијом очекиваних директних трошкова радионичког одржавања одређује низ оптималних одлука на разматраном броју посета радионици. Овом претпоставком се одбацује могућност промене максималне оцењене вредности потиска мотора (тзв. *Re-Rating*), путем промене типа мотора. Тип мотора се утврђује по доласку мотора у актуелну посету радионици и представља један од улазних параметара.

Наведене претпоставке пружају оквир за даљу разраду и моделирање процеса:

- оперативне употребе мотора у складу са захтевима оператера,
- доношења одлука о обиму и садржају радова при радионичком одржавању у складу са пословним стратегијама оператера.

## 7.2 ПРЕДВИЂАЊЕ ОЧЕКИВАНИХ ЦИКЛУСА РАДА ДО СКИДАЊА РАДИ ОБНОВЕ ПЕРФОРМАНСИ

---

Прогноза преосталог броја циклуса рада мотора до скидања ради обнове перформанси заснива се на праћењу тренда EGT маргине у флоти оператера. Статистичком анализом прикупљених података о тренду EGT маргине, оператери могу извршити предикцију очекиваног броја циклуса рада мотора до скидања. За прогнозу очекиваних интервала рада мотора на авиону потребно је располагати са довољним бројем емпиријских података о оствареним часовима и циклусима рада до скидања ради обнове перформанси. У недостатку података, што је случај код нових типова мотора, могу се иницијално користити предвиђања које даје произвођач мотора.

У оквиру овог истраживања, направљен је модел за предвиђање очекиваних циклуса рада мотора, у зависности од задатог начина оперативне употребе авиона. Модел се заснива на статистичкој анализи података о реализованим скидањима мотора *CFM56-3*, у периоду од 1987. до 2004. године, која су била резултат потребе за радионичком обновом перформанси. Податке је аутор веб-сајта *Aircraft Monitor*<sup>11</sup> ставио на располагање за потребе израде докторске дисертације. За свако скидање располаже се са следећим информацијама:

- редни број посете радионици,
- модел авиона на коме је мотор радио пре скидања,
- серија мотора и ниво потиска,
- датум испоруке мотора,
- датум и разлог скидања,
- укупан број остварених часова (*TSM*) и циклуса (*CSN*) рада мотора,
- број часова рада мотора од претходне посете радионици (*TSLSV*) и
- број циклуса рада мотора од претходне посете радионици (*CSLSV*).

---

<sup>11</sup> <http://www.aircraftmonitor.com>

Класификација података о скидањима извршена је у складу са разликама у дужини интервала рада нових и зрелих мотора, на податке о оствареним часовима и циклусима рада пре прве посете радионици (SV1) и податке о оствареним часовима и циклусима рада између наредних посета радионици (SV2+). Преглед укупног броја расположивих података о скидањима мотора CFM56-3, која су резултат погоршања перформанси, приказан је у Табели 7.1.

**Табела 7.1 Укупан број података о скидањима мотора CFM56-3 ради обнове перформанси**

| Серија мотора              |                 | -3B1       |            | -3B2      |            |            |            | -3C1       |            |            |            |            |            |
|----------------------------|-----------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Категорија потиска         |                 | A          |            | A         |            | B          |            | A          |            | B          |            | C          |            |
| Посета радионици           |                 | SV1        | SV2+       | SV1       | SV2+       | SV1        | SV2+       | SV1        | SV2+       | SV1        | SV2+       | SV1        | SV2+       |
| Авион                      | <b>B737-300</b> | 276        | 798        | 19        | 235        | 186        | 544        | 65         | 120        | 46         | 138        | 8          | 3          |
|                            | <b>B737-400</b> |            |            |           |            | 54         | 80         | 2          | 5          | 118        | 181        | 210        | 311        |
|                            | <b>B737-500</b> | 32         | 34         |           |            |            |            | 63         | 45         | 1          | 5          | 1          | 0          |
| <b>Укупан број скидања</b> |                 | <b>308</b> | <b>832</b> | <b>19</b> | <b>235</b> | <b>240</b> | <b>624</b> | <b>130</b> | <b>170</b> | <b>165</b> | <b>324</b> | <b>219</b> | <b>314</b> |

Од укупног броја података, из даље анализе су изузети случајеви скидања оних мотора, који су остварили значајно мањи број часова и циклуса рада од претходне посете радионици у поређењу са моторима исте серије, категорије потиска и зрелости, за које је утврђено да представљају очигледне аутјалере. Имајући у виду да је произвођач мотора током производног периода уводио побољшања поузданости, издржљивости и очувања перформанси, при разматрању првих интервала рада нових мотора серије -3B1, са оцењеном вредношћу максималног потиска на полетању од 20.1klb, одбачени су сви случајеви скидања мотора произведених пре 1989. године. Са друге стране, при разматрању посета зрелих мотора радионици обухваћена су сва годишта производње мотора<sup>12</sup>, под претпоставком да је спровођењем неопходних модификација на првој посети радионици, моторима свих годишта производње омогућено остваривање идентичних интервала рада на авиону.

<sup>12</sup> Vintage 1 (1984.-1986.)

Vintage 2 (1987.-1988.)

Vintage 3 (1989.-1990.)

Vintage 4 (1991.-)

На основу података о броју остварених часова и циклуса од претходне посете радионици, за сваки случај скидања мотора је одређена вредност просечне дужине лета  $FL_i$ , применом следеће формуле:

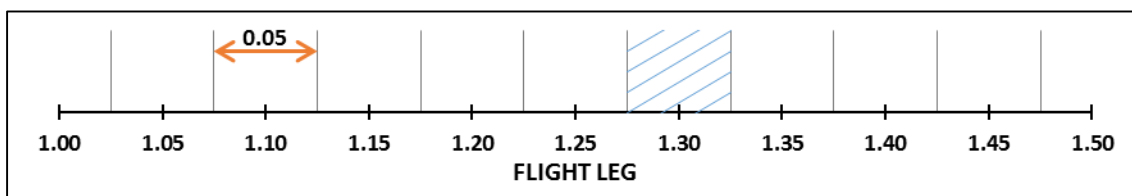
$$FL_i = \frac{TSLSV_i}{CSLSV_i} \quad (7.1)$$

$i$  – случај скидања мотора,

$TSLSV_i$  – број остварених часова рада мотора од претходне посете радионици,

$CSLSV_i$  – број остварених циклуса рада мотора од претходне посете радионици.

У оквиру серија мотора *CFM56-3*, за сваку категорију потиска и посебно за прву и све наредне посете радионици, извршено је груписање података, према израчунатим вредностима просечне дужине лета, у интервале ширине 0.05 часова по циклусу ( $\pm 3$  мин), што је илустровано на Слици 7.1. При груписању података узето је да случајеви скидања припадају датом интервалу уколико се вредности просечних дужина лета налазе на крају интервала.



Слика 7.1 Подела дужине лета на интервале

Након груписања података, применом формула (7.2), (7.3), (7.4) и (7.5), на сваком интервалу дужине лета утврђено је:

- $z$  – број случајева скидања,
- $\overline{TSLSV}$  – просечан број часова рада од претходне посете радионици,
- $\overline{CSLSV}$  – просечан број циклуса рада од претходне посете радионици,
- $FL$  – просечна вредност дужине лета,
- $RSVR$  – просечна вредност обновљеног интензитета посете радионици.

$$\overline{TSLSV} = \frac{\sum_{i=1}^z TSLSV_i}{z} \quad (7.2)$$

$$\overline{CSLSV} = \frac{\sum_{i=1}^z CSLSV_i}{z} \quad (7.3)$$

$$FL = \frac{\overline{TSLSV}}{\overline{CSLSV}} \quad (7.4)$$

$$RSVR = \frac{1000}{\overline{TSLSV}} \quad (7.5)$$

На овај начин је формиран скуп парова података ( $RSVR$ ,  $FL$ ), над којим је у наставку вршено тестирање различитих модела вишеструке линеарне регресије. Анализира се претпоставка да је обновљени интензитет посете моторској радионици ( $RSVR$ ) линеарно сразмеран природном логаритму просечне дужине лета ( $FL$ ) и да зависи од серије мотора и категорије потиска,

Општи облик модела вишеструке линеарне регресије дат је једначином:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_p \cdot X_p + \varepsilon \quad (7.6)$$

где су:

$Y$  – квантитативна зависна променљива,

$X$  – независне променљиве (предиктори),

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$  – непознати параметри,

$\varepsilon$  – стандардна грешка оцене параметара,

$p$  – број предиктора.

Непознати параметри представљају парцијалне регресионе коефицијенте јер говоре о специфичном доприносу одговарајуће предикторске варијабле на објашњење варијабилитета у критеријумској варијабли, када се вредности осталих предиктора држе константним.

Оцењени модел за предвиђање је облика:

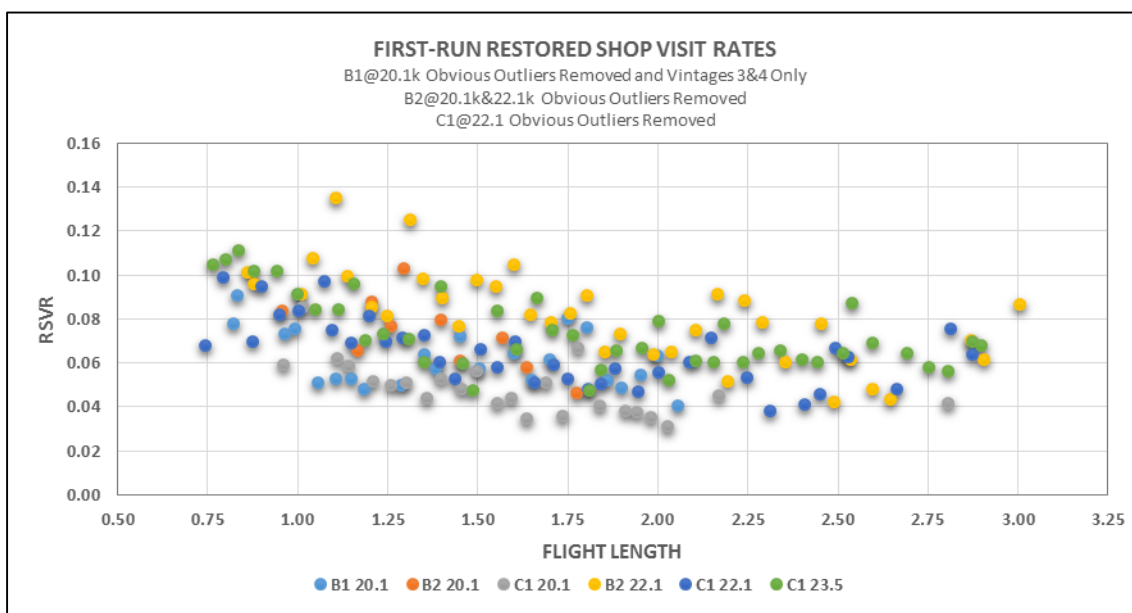
$$\hat{Y} = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_p \cdot X_p \quad (7.7)$$

где су:

$b_0, b_1, \dots, b_p$  – оцењене вредности параметара  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ .

## 7.2.1 ПРВА ПОСЕТА РАДИОНИЦИ

За прву посету радионици, након филтрирања и груписања података, располаже се са укупно 174 парова података. На дијаграму расипања, илустрованом на Слици 7.2, приказан је скуп података о првим посетама радионици модела мотора *CFM56-3*, по серијама мотора и категоријама потиска, над којим се врши вишеструка линеарна регресија.



Слика 7.2 Дијаграм расипања за прве посете радионици

Дијаграм расипања вредности парова података (*RSVR*, *FL*) указује на постојање зависности између ових величина, поред изражене варијансе. Варијанса у подацима може бити резултат примене различитих нивоа ефективног смањења потиска мотора или климатских услова употребе.

Под претпоставком да се разликују вредности одсечака и градијената за сваку серију мотора и категорију потиска спроводи се вишеструка линеарна регресија:

- за општи модел вишеструке линеарне регресије, који обухвата већи број предиктора,
- за редуковане моделе вишеструке регресије, који сукцесивно редукују број предиктора.

У Табели 7.2 приказани су тестирани модели вишеструке линеарне регресије за прве посете мотора радионици, заједно са бројем разматраних предикторских варијабли.

**Табела 7.2 Тестирани модели вишеструке линеарне регресије за прве посете радионици**

| FULL MODEL        | REDUCED MODEL 1 | REDUCED MODEL 2 | REDUCED MODEL 3 |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Intercept         | Intercept       | Intercept       | Intercept       |
| Ln(FLmean)        | Ln(FLmean)      | Ln(FLmean)      | Ln(FLmean)      |
| Medium            | Medium          | Medium          | Medium          |
| Low               | Low             | Low             | Low             |
| B2                | B2              | B2              | B2              |
| B1                | B1              | B1              | B1              |
| B2*Ln(FLmean)     | B2*Ln(FLmean)   | B2*Ln(FLmean)   |                 |
| B1*Ln(FLmean)     | B1*Ln(FLmean)   |                 |                 |
| Medium*Ln(FLmean) |                 |                 |                 |
| Low*Ln(FLmean)    |                 |                 |                 |

Оцена параметара је извршена методом најмањих квадрата. Оцењене вредности параметара су добијене минимизацијом збира квадрата резидуала. Тестирањем наведених модела вишеструке регресије дошло се до закључка да серије мотора и категорије потиска немају изражени утицај на градијент функцијске зависности обновљеног интензитета посете радионици од природног логаритма просечне дужине лета. Као резултат тога, најбољу способност предвиђања обновљеног интензитета посете радионици, за прве посете радионици, даје редуковани модел вишеструке линеарне регресије број 3 (Табела 7.2). Поменути модел разматра пет предикторских варијабли, које су представљене у Табели 7.3.

**Табела 7.3 Предикторске варијабле за оцену RSVR за прве посете радионици**

| ПРЕДИКТОРСКА<br>ВАРИЈАБЛА | ТИП<br>ВАРИЈАБЛЕ | ОПИС ВАРИЈАБЛЕ                          | ВРЕДНОСТ                                                                                      |
|---------------------------|------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $X_1$                     | нумеричка        | Природни логаритам просечне дужине лета | $X_1 = \ln(FL)$                                                                               |
| $X_2$                     | категоријска     | Потисак на полетању је 22.1klb          | $X_2 = \begin{cases} 1, & \text{thrust} = \text{medium} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$ |
| $X_3$                     | категоријска     | Потисак на полетању је 20.1klb          | $X_3 = \begin{cases} 1, & \text{thrust} = \text{low} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$    |
| $X_4$                     | категоријска     | Серија мотора је -3B2                   | $X_4 = \begin{cases} 1, & \text{type} = \text{B2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$       |
| $X_5$                     | категоријска     | Серија мотора је -3B1                   | $X_5 = \begin{cases} 1, & \text{type} = \text{B1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$       |



Категоријским варијаблама је описан утицај серије мотора и категорије потиска на вредност слободног члана у регресионој једначини. Предложени модел вишеструке линеарне регресије за оцену обновљеног интензитета посете радионици, за прве посете радионици, дат је следећом једначином:

$$RSVR_{FR} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 + \beta_4 \cdot X_4 + \beta_5 \cdot X_5 + \varepsilon \quad (7.8)$$

Резултати вишеструке линеарне регресије за прве посете радионици приказани су у Табели 7.4.

Табела 7.4 Регресиона статистика за прве посете радионици

|                                                                                       |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| КОЕФИЦИЈЕНТ ВИШЕСТРУКЕ КОРЕЛАЦИЈЕ (R)                                                 | 0.851293346 |
| КОЕФИЦИЈЕНТ ВИШЕСТРУКЕ ДЕТЕРМИНАЦИЈЕ (R <sup>2</sup> )                                | 0.724700361 |
| КОРИГОВАНИ КОЕФИЦИЈЕНТ ВИШЕСТРУКЕ ДЕТЕРМИНАЦИЈЕ (R <sup>2</sup> <sub>adjusted</sub> ) | 0.716097247 |
| СТАНДАРДНА ГРЕШКА                                                                     | 0.009414574 |
| БРОЈ ОБСЕРВАЦИЈА                                                                      | 166         |

Применом овог модела, на основу линеарне комбинације предикторских варијабли може се објаснити 85% варијабилности зависне променљиве. Оцењене вредности параметара приказане су у Табели 7.5.

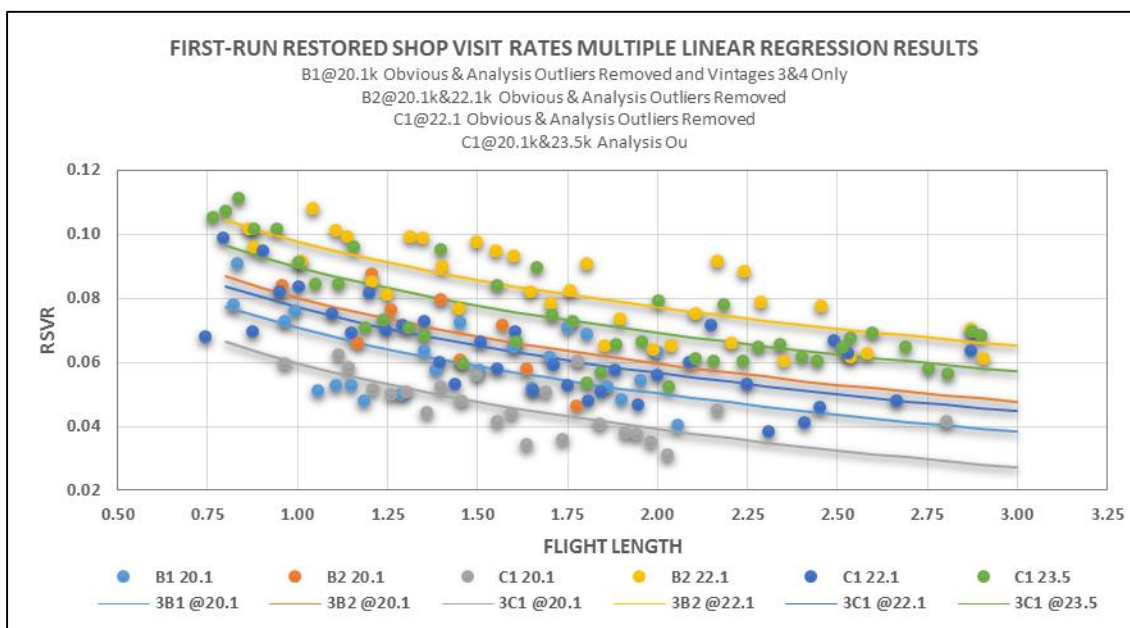
Табела 7.5 Оцењене вредности параметара за прве посете радионици

| ПРЕДИКТОРИ | КОЕФИЦИЈЕНТИ | СТАНДАРДНА ГРЕШКА | t СТАТИСТИКА | P-ВРЕДНОСТ  | ДОЊИ ИНТЕРВАЛ ПОВЕРЕЊА 95% | ГОРЊИ ИНТЕРВАЛ ПОВЕРЕЊА 95% |
|------------|--------------|-------------------|--------------|-------------|----------------------------|-----------------------------|
| Intercept  | 0.0896       | 0.00185           | 48.32        | 2.41656E-97 | 0.0860                     | 0.0933                      |
| Ln(FLmean) | -0.0296      | 0.00220           | -13.46       | 4.24668E-28 | -0.0339                    | -0.0252                     |
| Medium     | -0.0125      | 0.00208           | -6.02        | 1.1671E-08  | -0.0166                    | -0.0084                     |
| Low        | -0.0300      | 0.00229           | -13.11       | 3.80608E-27 | -0.0345                    | -0.0255                     |
| B2         | 0.0205       | 0.00193           | 10.60        | 3.24505E-20 | 0.0167                     | 0.0243                      |
| B1         | 0.0112       | 0.00264           | 4.23         | 3.88826E-05 | 0.0060                     | 0.0164                      |

Облик коначне једначине за оцену обновљеног интензитета посете нових мотора радионици гласи:

$$RSVR_{FR} = 0.0896 - 0.0296 \cdot X_1 - 0.0125 \cdot X_2 - 0.03 \cdot X_3 + 0.0205 \cdot X_4 + 0.0112 \cdot X_5 \quad (7.9)$$

Функцијска зависност обновљеног интензитета посете радионици, за прве посете мотора типа *CFM56-3*, од просечне дужине лета, зависно од серије мотора и категорије потиска приказана је на Слици 7.3.



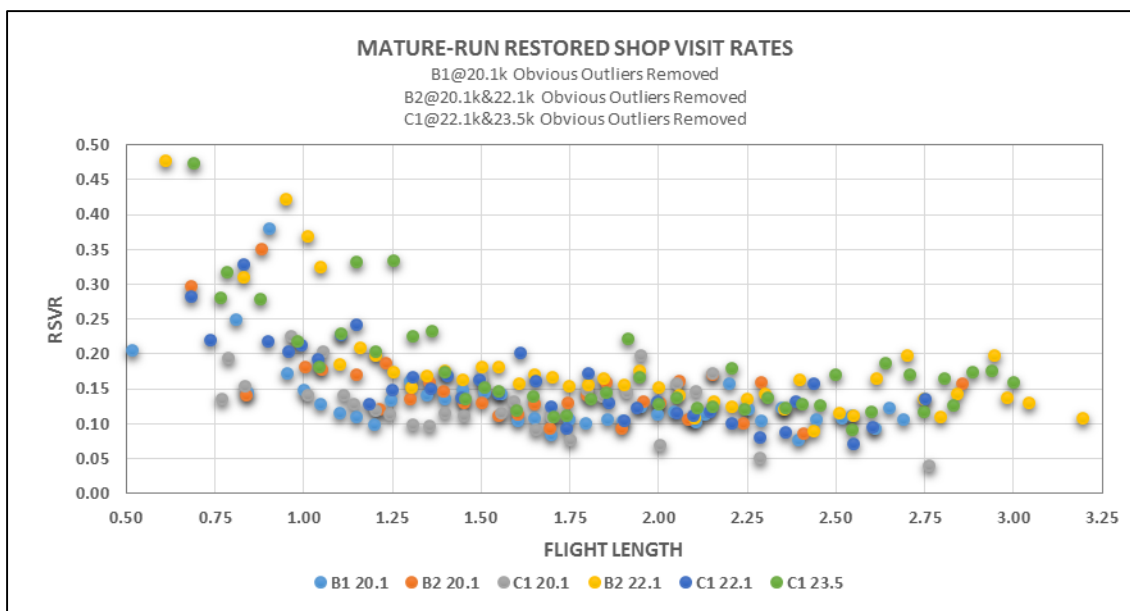
Слика 7.3 Обновљени интензитет посете нових мотора радионици

Модел за предвиђање очекиваних циклуса рада мотора *CFM56-3* до првог скидања, у зависности од просечне дужине лета, серије мотора и категорије потиска, дат је једначином:

$$CSLSV_{FR} = \frac{1000}{e^{X_1} \cdot (0.0896 - 0.0296 \cdot X_1 - 0.0125 \cdot X_2 - 0.03 \cdot X_3 + 0.0205 \cdot X_4 + 0.0112 \cdot X_5)} \quad (7.10)$$

## 7.2.2 ЗРЕЛЕ ПОСЕТЕ РАДИОНИЦИ

За зреле посете радионици, након филтрирања и груписања података, располаже се укупно 226 парова података. На дијаграму расипања, илустрованом на Слици 7.4, приказан је скуп података о зрелим посетама радионици модела мотора *CFM56-3*, по серијама мотора и категоријама потиска, над којим се врши вишеструка линеарна регресија.



Слика 7.4 Дијаграм расипања за зреле посете радионици

Под претпоставком да се разликују вредности одсечака и градијената за сваку серију мотора и категорију потиска, паралелно се спроводи вишеструка линеарна регресија:

- за општи модел вишеструке линеарне регресије, који обухвата већи број предиктора,
- за редуковане моделе вишеструке регресије, који sukcesивно редукују број предиктора.

У Табели 7.6 приказани су тестирани модели вишеструке линеарне регресије за прве посете мотора радионици, заједно са типом и бројем разматраних предикторских варијабли.

Табела 7.6 Тестирани модели вишеструке линеарне регресије за зреле посете радионици

| FULL MODEL        | REDUCED MODEL 1 | REDUCED MODEL 2 |
|-------------------|-----------------|-----------------|
| Intercept         | Intercept       | Intercept       |
| Ln(FLmean)        | Ln(FLmean)      | Ln(FLmean)      |
| Medium            | Medium          | Medium          |
| Low               | Low             | Low             |
| B2                | B2              | B2              |
| B1                | B1              |                 |
| B2*Ln(FLmean)     |                 |                 |
| B1*Ln(FLmean)     |                 |                 |
| Medium*Ln(FLmean) |                 |                 |
| Low*Ln(FLmean)    |                 |                 |

Тестирањем наведених модела вишеструке регресије такође је закључено да и код зрелих посета радионици серије мотора и категорије потиска немају изражени утицај на градијент функцијске зависности обновљеног интензитета посете радионици од природног логаритма просечне дужине лета. Поред тога, мотори серије -3B1 имају исти градијент као и мотори серије -3C1, рангирани на 20.1klb потиска. На основу изложеног, најбољу способност предвиђања обновљеног интензитета посете радионици, за зреле посете радионици, даје редуковани модел вишеструке линеарне регресије број 2 (Табела 7.6). Поменути модел разматра четири предикторских варијабли, које су представљене у Табели 7.7.

Табела 7.7 Предикторске варијабле за оцену RSVR за зреле посете радионици

| ПРЕДИКТОРСКА<br>ВАРИЈАБЛА | ТИП<br>ВАРИЈАБЛЕ | ОПИС ВАРИЈАБЛЕ                          | ВРЕДНОСТ                                                                                      |
|---------------------------|------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| X <sub>1</sub>            | нумеричка        | Природни логаритам просечне дужине лета | $X_1 = \ln(FL)$                                                                               |
| X <sub>2</sub>            | категоријска     | Потисак на полетању је 22.1klb          | $X_2 = \begin{cases} 1, & \text{thrust} = \text{medium} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$ |
| X <sub>3</sub>            | категоријска     | Потисак на полетању је 20.1klb          | $X_3 = \begin{cases} 1, & \text{thrust} = \text{low} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$    |
| X <sub>4</sub>            | категоријска     | Серија мотора је -3B2                   | $X_4 = \begin{cases} 1, & \text{type} = \text{B2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$       |

Предложени модел вишеструке линеарне регресије за оцену обновљеног интензитета посете радионици, за зреле посете радионици, дат је следећом једначином:

$$RSVR_{MR} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 + \beta_4 \cdot X_4 + \varepsilon \quad (7.11)$$

Резултати вишеструке линеарне регресије за зреле посете радионици приказани су у Табели 7.8.

Табела 7.8 Регресиона статистика за зреле посете радионици

|                                                                                       |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| КОЕФИЦИЈЕНТ ВИШЕСТРУКЕ КОРЕЛАЦИЈЕ (R)                                                 | 0.735921761 |
| КОЕФИЦИЈЕНТ ВИШЕСТРУКЕ ДЕТЕРМИНАЦИЈЕ (R <sup>2</sup> )                                | 0.541580839 |
| КОРИГОВАНИ КОЕФИЦИЈЕНТ ВИШЕСТРУКЕ ДЕТЕРМИНАЦИЈЕ (R <sup>2</sup> <sub>adjusted</sub> ) | 0.532890428 |
| СТАНДАРДНА ГРЕШКА                                                                     | 0.028986378 |
| БРОЈ ОБСЕРВАЦИЈА                                                                      | 216         |

Применом овог модела, на основу линеарне комбинације предикторских варијабли може се објаснити 73% варијабилности зависне променљиве. Оцењене вредности параметара приказане су у Табели 7.9.

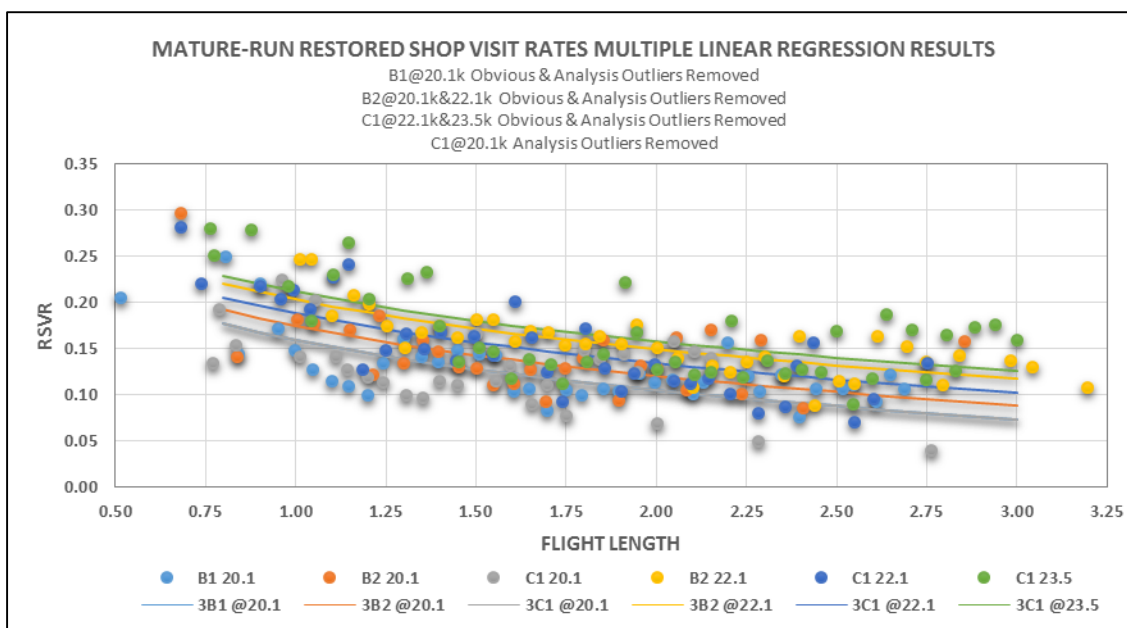
Табела 7.9 Оцењене вредности параметара за зреле посете радионици

| ПРЕДИКТОРИ | КОЕФИЦИЈЕНТИ | СТАНДАРДНА ГРЕШКА | t СТАТИСТИКА | P-ВРЕДНОСТ  | ДОЊИ ИНТЕРВАЛ ПОВЕРЕЊА 95% | ГОРЊИ ИНТЕРВАЛ ПОВЕРЕЊА 95% |
|------------|--------------|-------------------|--------------|-------------|----------------------------|-----------------------------|
| Intercept  | 0.2120       | 0.00555           | 38.20        | 9.64507E-97 | 0.2011                     | 0.2230                      |
| Ln(FLmean) | -0.0780      | 0.00564           | -13.82       | 2.30266E-31 | -0.0891                    | -0.0668                     |
| Medium     | -0.0235      | 0.00608           | -3.87        | 0.000145521 | -0.0355                    | -0.0115                     |
| Low        | -0.0524      | 0.00556           | -9.42        | 8.179E-18   | -0.0634                    | -0.0414                     |
| B2         | 0.0151       | 0.00471           | 3.20         | 0.001577911 | 0.0058                     | 0.0244                      |

Уколико се аналогно првим посетама радионици, уведе пета предикторска варијабла, која описује утицај серије  $-3B1$  мотора на одсечак, уз напомену да је коефицијент  $b_5$  једнак нули, тада се коначна једначине за оцену обновљеног интензитета посете зрелих мотора радионици може записати:

$$RSVR_{MR} = 0.212 - 0.078 \cdot X_1 - 0.0235 \cdot X_2 - 0.0524 \cdot X_3 + 0.0151 \cdot X_4 + 0 \cdot X_5 \quad (7.12)$$

Функцијска зависност обновљеног интензитета посете радионици, за зреле посете мотора типа  $CFM56-3$ , од просечне дужине лета, зависно од серије мотора и категорије потиска приказана је на Слици 7.5.



Слика 7.5 Обновљени интензитет посете зрелих мотора радионици

Модел за предвиђање очекиваних циклуса рада мотора CFM56-3 до зрелих скидања, у зависности од просечне дужине лета, серије мотора и категорије потиска, дат је једначином:

$$CSLSV_{MR} = \frac{1000}{e^{X_1} \cdot (0.212 - 0.078 \cdot X_1 - 0.0235 \cdot X_2 - 0.0524 \cdot X_3 + 0.0151 \cdot X_4 + 0 \cdot X_5)} \quad (7.13)$$

### 7.3 МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ОДЛУЧИВАЊА

При посети радионици, над сваким модулом се може или не мора обавити један од следећих обима радова:

- минимални обим радова (енг. *minimum*),
- обнова перформанси (енг. *performance restoration*),
- генерална оправка (енг. *overhaul*).

Према препорукама произвођача, наведеним у WPG за мотор типа CFM56-3 [92], обнова перформанси фенског модула и модула турбине ниског притиска није економски исплатива и потребна је једино у случајевима појаве непланираних догађаја. С обзиром да предложена методологија истраживања не разматра непланирана скидања мотора са авиона, претпостављено је да се при посети моторској радионици обављају само радови на ревизији модула фена и турбине ниског притиска, и то у случајевима потребе за заменом делова са ограниченим радним веком у њима.

Највећи допринос погоршању перформанси мотора има модул језгра мотора, кога чине компресор и турбина високог притиска. Према томе, претпостављено је да се обнова перформанси језгра мотора врши на свакој планираној посети радионици, осим у случајевима замене делова са ограниченим радним веком, када је потребно обавити ревизију језгра мотора.

У складу са претходним разматрањима и полазним претпоставкама може се дефинисати скуп могућих одлука о обиму и садржају радова радионичког одржавања мотора *CFM56-3*, који је приказан у Табели 7.10.

**Табела 7.10 Одлуке о замени делова са ограниченим радним веком и обнови перформанси мотора *CFM56-3* при посети радионици**

| Код | Одлука о замени сета делова са ограниченим радним веком у одговарајућем модулу мотора |     |     |     | Одлука о обнови перформанси |         |         |        |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----------------------------|---------|---------|--------|
|     | FAN                                                                                   | HPC | HPT | LPT | FAN OH                      | CORE PR | CORE OH | LPT OH |
| 1   |                                                                                       |     |     |     |                             | CORE PR |         |        |
| 2   | FAN                                                                                   |     |     |     | FAN OH                      | CORE PR |         |        |
| 3   |                                                                                       | HPC |     |     |                             |         | CORE OH |        |
| 4   |                                                                                       |     | HPT |     |                             |         | CORE OH |        |
| 5   |                                                                                       | HPC | HPT |     |                             |         | CORE OH |        |
| 6   |                                                                                       |     |     | LPT |                             | CORE PR |         | LPT OH |
| 7   | FAN                                                                                   | HPC |     |     | FAN OH                      |         | CORE OH |        |
| 8   | FAN                                                                                   |     | HPT |     | FAN OH                      |         | CORE OH |        |
| 9   | FAN                                                                                   | HPC | HPT |     | FAN OH                      |         | CORE OH |        |
| 10  | FAN                                                                                   |     |     | LPT | FAN OH                      | CORE PR |         | LPT OH |
| 11  |                                                                                       | HPC |     | LPT |                             |         | CORE OH | LPT OH |
| 12  |                                                                                       |     | HPT | LPT |                             |         | CORE OH | LPT OH |
| 13  |                                                                                       | HPC | HPT | LPT |                             |         | CORE OH | LPT OH |
| 14  | FAN                                                                                   | HPC |     | LPT | FAN OH                      |         | CORE OH | LPT OH |
| 15  | FAN                                                                                   |     | HPT | LPT | FAN OH                      |         | CORE OH | LPT OH |
| 16  | FAN                                                                                   | HPC | HPT | LPT | FAN OH                      |         | CORE OH | LPT OH |

Из Табеле 7.10 се може видети да се при посети радионици разматрају све могуће комбинације замене делова са ограниченим радним веком у модулима мотора *CFM56-3*.

У случају замене делова са ограниченим радним веком у било којем од модула језгра мотора, врши се ревизија језгра (одлуке 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15 и 16). У случају да се не мењају делови са ограниченим радним веком у модулима језгра, врши се обнова перформанси језгра мотора (одлуке 1, 2, 6 и 10). Коначно, у случајевима замене делова са ограниченим радним веком у модулима FAN&BOOSTER или LPT, врши се ревизија одговарајућег модула мотора (одлуке 2, 7, 8, 9, 10, 14, 15, и 16; и одлуке 6, 10, 11, 12, 13, 14, 15 и 16).

На овај начин је моделиран процес доношења одлука о обиму и садржају радова радионичког одржавања мотора.

### 7.3.1 ПРЕДВИЂАЊЕ ОЧЕКИВАНИХ ТРОШКОВА РАДИОНИЧКОГ ОДРЖАВАЊА МОТОРА CFM56-3 У ФУНКЦИЈИ РАЗМАТРАНИХ ОДЛУКА

Свака од разматраних одлука о замени делова са ограниченим радним веком и обнови перформанси мотора *CFM56-3* при посети радионици носи са собом одговарајуће трошкове радионичког одржавања. Податке о трошковима посете радионици тешко је наћи. У разговору са експертима из једне консултантске фирме која се бави одржавањем мотора, добијене су оквирне вредности уобичајених трошкова радионичке обнове перформанси мотора *CFM56-3*. Трошкови обнове перформанси су моделирани фиксним износивама, који су приказани у Табели 7.11, зависно од зрелости мотора.

Табела 7.11 Процењене вредности трошкова обнове перформанси мотора CFM56-3

|            | CORE PR     | FAN & BOOSTER OH | CORE OH     | LPT OH    | ENGINE OH   |
|------------|-------------|------------------|-------------|-----------|-------------|
| Нов мотор  | \$900,000   | \$100,000        | \$1,100,000 | \$225,000 | \$1,425,000 |
| Зрео мотор | \$1,020,000 | \$110,000        | \$1,240,000 | \$250,000 | \$1,600,000 |

Вредности трошкова замене делова са ограниченим радним веком су претходно изложене у поглављу о трошковима одржавања мотора. Потребно је напоменути да се у складу са полазном претпоставком бр. 6, очекивана вредност трошкова замене делова са ограниченим радним веком ажурира при разматрању потенцијалних одлука на наредним посетама моторској радионици. Примена годишњег раста трошкова замене делова са ограниченим радним веком од 6% омогућена је увођењем планираног годишњег налета мотора, као улазног параметра модела за оптимизацију трошкова према утврђеном критеријуму. Претходно је потребно обавити интеграцију модела за предвиђање очекиваних циклуса рада мотора са моделом одлучивања, како би се утврдио очекивани број циклуса рада мотора у зависности од сваке од разматраних одлука при посетама радионици. Након процене очекиваних циклуса рада, на основу задатог просечног годишњег налета, рачуна се протекли временски период до наредне посете радионици и примењује адекватно увећање трошкова замене делова са ограниченим радним веком при разматрању одлука о замени делова на наредним посетама.



### 7.3.2 ПРЕДВИЂАЊЕ ОЧЕКИВАНИХ ЦИКЛУСА РАДА ДО СКИДАЊА МОТОРА CFM56-3 У ФУНКЦИЈИ РАЗМАТРАНИХ ОДЛУКА

Изабрани обим радионичких радова утиче на број часова и циклуса рада, које ће мотор моћи да оствари током наредног интервала. Минимални обим радова представља краткорочну стратегију којом се остварују краћи временски интервали рада мотора. Већим обимом радова генеришу се велики трошкови посете радионици. Потребно је размотрити оптимални обим радова у складу са утврђеним критеријумом, који се уклапа у оперативне захтеве и дугорочну стратегију оператера [65].

Очекивани број часова и циклуса рада мотора након посете радионици зависи од примењеног нивоа уградње ресурса (енг. *Build-To Level*) при посети радионици. Сагласно полазним претпоставкама, уградња ресурса у мотор, који ће се трошити током наредног рада на авиону, врши се:

- заменом делова са ограниченим радним веком, и/или
- обновом EGT маргине, одн. перформанси мотора.

Свака од разматраних одлука о обиму радионичких радова утиче на број циклуса на наредном интервалу рада мотора на авиону. За планирани начин оперативне употребе мотора, описан задатом вредношћу просечне дужине лета, коришћењем једначина (7.10) или (7.13), може се извршити предвиђање очекиваних циклуса рада мотора до скидања ради поновне радионичке обнове перформанси, за било коју серију мотора типа *CFM56-3* и оцењену вредност максималног потиска на полетању. Са друге стране, утицај сваке од разматраних одлука о обиму и садржају радионичких радова на могућност остваривања тако предвиђених циклуса рада након обнове перформанси, зависи од преосталог LLP ресурса, по доласку у актуелну посету радионици. Праћењем оствареног налета мотора, које обухвата бележење укупних часова (*TSN*) и циклуса рада (*CSN*), као и часова (*TSLSV*) и циклуса рада (*CSLSV*) између посета радионици, омогућено је прецизно познавање преосталог LLP ресурса, у сваком тренутку оперативне употребе мотора.

Примена било које од разматраних одлука при посети радионици довешће до промене преосталог ресурса делова са ограниченим радним веком на излазу из моторске радионице. Скуп разматраних одлука о замени делова са ограниченим радним веком може се представити матрицом  $m$ , димензија  $16 \times 19$ , у којој редови представљају одлуке, а колоне делове са ограниченим радним веком. Елементи матрице  $m$  су прекидачке променљиве, које узимају вредност 1 уколико разматрана одлука подразумева замену датог дела са ограниченим радним веком.

$$m = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (7.14)$$

За сваку од разматраних одлука, може се једноставно одредити минимална вредност преосталог ресурса делова са ограниченим радним веком на излазу из моторске радионице, у свакој од категорија потиска мотора, која представља ограничење циклуса рада мотора према категорији *Hard Time*. Поређењем минималног преосталог ресурса делова са ограниченим радним веком на излазу из моторске радионице са оцењеним циклусима рада до скидања ради обнове перформанси у функцији просечне дужине лета, добија се очекивани број циклуса рада мотора након посете радионици у функцији разматраних одлука, за сваку категорију потиска мотора.

Минимални број циклуса рада до скидања, који сваки део са ограниченим радним веком мора поседовати након извршене радионичке обнове перформанси, је важан стратешки параметар, који се појављује као једна од ставки у уговорима о радионичком одржавању мотора. Њиме се дефинише гранична вредност која служи за доношење одлука о томе који ће делови са ограниченим радним веком бити замењени на датој посети радионици. Оптимизација трошкова радионичког одржавања мотора зависи од пословне стратегије по питању нивоа уградње ресурса при посети радионици.

У пракси је редак случај истовремене замене свих делова са ограниченим радним веком, па се одлука о замени свих делова може сматрати економски неисплативом. Међутим, потребно је размотрити све потенцијалне одлуке, са последицама које оне носе. Разматране одлуке при датој посети радионици се класификују на валидне и невалидне, зависно од испуњености критеријума стратегије превремене замене делова са ограниченим радним веком. Као пример невалидне одлуке може се навести случај доношења одлуке о замени делова у НРС модулу када је стање на улазу у радионицу такво, да је ресурс делова у LPT модулу истрошен. Тиме се смањује скуп валидних одлука при посети радионици, што поједностављује проналажење оптималног решења.

## **7.4 МАТЕМАТИЧКИ ОПИС МОДЕЛА ОДЛУЧИВАЊА**

Стратешки приступ планирању радионичких радова огледа се у разматрању унапред изабраног броја нивоа одлучивања, који постаје основ за даљу анализу трошкова. Увођењем полазних претпоставки дефинисан је скуп могућих одлука при посети радионици. Оптимизација трошкова радионичког одржавања према утврђеном критеријуму врши се анализом потпуног скупа одлука и проналажењем низа узастопних одлука, који даје минималну вредност трошкова, у оквиру постављених ограничења.

Математички модел за доношење одлука у процесу радионичког одржавања мотора *CFM56-3* написан је у програмском пакету *Wolfram Mathematica* и наведен у Прилогу 1. Од корисника модела се тражи да изврши унос основних улазних података, који се могу поделити на:

- податке о историји оперативне употребе и обављених радова радионичког одржавања мотора, и
- податке о планираном начину оперативне употребе мотора.

Улазни подаци о историји рада и одржавања мотора обухватају:

- редни број актуелне посете радионици, дефинисан варијаблом:  $(svNUM)$ ,
- остварене циклусе рада између посета радионици на претходним интервалима:  $(cslsv[k]; 1 < k \leq svNUM)$ ,
- просечне дужине лета на претходним интервалима:  $(fl[k]; 1 < k \leq svNUM)$ ,
- просечан годишњи налет у циклусима током претходних интервала:  $(ut[k]; 1 < k \leq svNUM)$ ,
- серију мотора на претходним интервалима:  $(type[k]; 1 < k \leq svNUM)$ ,
- категорију потиска у којој је мотор коришћен на претходним интервалима:  $(category[k]; 1 < k \leq svNUM)$ ,
- одлуке о замени делова са ограниченим радним веком на претходним посетама радионици:  $(d[k]; 1 < k \leq svNUM-1)$ .

Улазни подаци за дефинисање планираног начина оперативне употребе мотора обухватају:

- просечну дужину лета на којој се планира употреба мотора:  $(leg)$ ,
- тип авиона на коме се планира уградња и употреба мотора:  $(aircraft)$ ,
- планиран годишњи налет мотора у циклусима:  $(util)$ .

У делу планираног коришћења мотора, програм аутоматски врши динамичко генерисање потенцијалних стратегија о превременој замени делова са ограниченим радним веком ( $minLLPbuildLIST$ ).

Подаци о максималним LLP ресурсима у свакој од категорија потиска (*llpLIMIT*), вредностима трошкова обнове перформанси (*wsPRICE*) и почетне цене делова са ограниченим радним веком (*llpPRICE*), такође су имплементирани у модел.

Максимални ресурс делова са ограниченим радним веком је моделиран матрицом димензија 3x19 (*llpLIMIT*), где су LLP ресурси у категоријама потиска дати у редовима матрице. Цена делова са ограниченим радним веком је представљена вектором од 19 елемената (*llpPRICE*).

Написани *Mathematica* код води рачуна о моделу авиона на коме се може уградити изабрани тип (серија) мотора, кроз варијаблу (*availAIRCRAFT*), што је приказано у Табели 7.12.

Табела 7.12 Расположиве комбинације за интеграцију серије мотора на моделима авиона

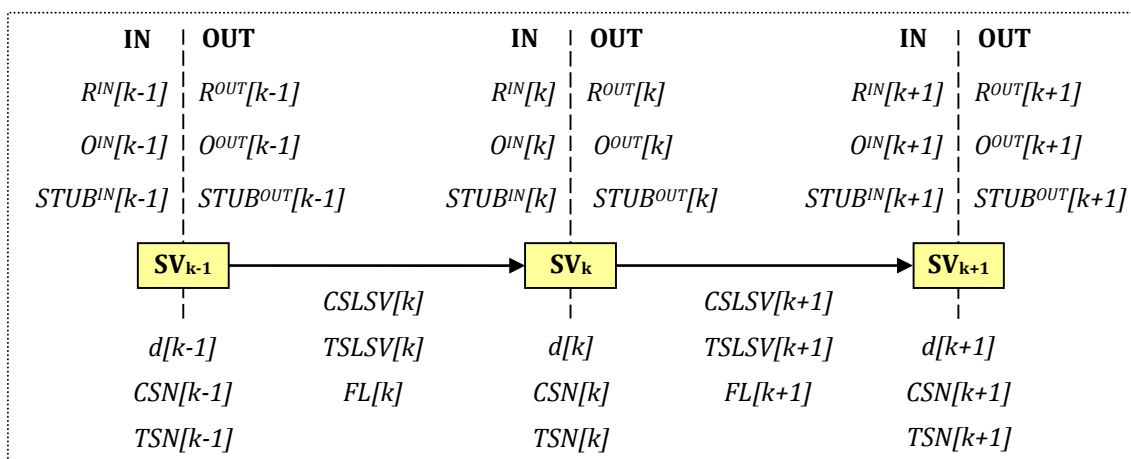
| ТИП АВИОНА | КАТЕГОРИЈА ПОТИСКА (h) | СЕРИЈА МОТОРА |      |      |
|------------|------------------------|---------------|------|------|
|            |                        | -3В1          | -3В2 | -3С1 |
| 737-300    | A                      | 20.1          | 20.1 | 20.1 |
|            | B                      |               | 22.1 | 22.1 |
|            | C                      |               |      | 23.5 |
| 737-400    | A                      |               | 20.1 | 20.1 |
|            | B                      |               | 22.1 | 22.1 |
|            | C                      |               |      | 23.5 |
| 737-500    | A                      | 20.1          |      | 20.1 |
|            | B                      |               |      | 22.1 |
|            | C                      |               |      | 23.5 |

Анализом базе података о скидањима мотора ради обнове перформанси закључено је да се серије мотора, чије су оцењене вредности максималног потиска на полетању осенчене у Табели 7.12, ретко користе на датим моделима авиона. Самим тим, модел за предикцију очекиваних циклуса рада мотора нема могућност предвиђања означених комбинација мотора и авиона.

На основу изабране серије мотора (*type[svNUM]*) и модела авиона (*aircraft*) одређују се валидне категорије потиска (*validCATEGORY*) у којима је могућа оперативна употреба мотора на наредним интервалима.

На свакој од укупног броја разматраних посета радионици ( $n$ ), који дефинише корисник модела, оцењује се утицај сваке од разматраних одлука ( $d[k]$ ) на основне параметре стања ресурса делова са ограниченим радним веком на улазу и излазу из посета радионици ( $svNUM \leq k \leq svNUM+n-1$ ) и одговарајуће очекиване циклусе рада након посета радионици (Слика 7.6):

- коефицијент преосталог ресурса делова са ограниченим радним веком на улазу у  $k$ -ту посету радионици: ( $rslc [k]$ ),
- остварени циклуси делова са ограниченим радним веком на улазу у  $k$ -ту посету радионици: ( $operatedIN[k]$ ),
- преостали циклуси делова са ограниченим радним веком на улазу у  $k$ -ту посету радионици: ( $remainingIN[k]$ ),
- минимални преостали ресурс делова са ограниченим радним веком на улазу у  $k$ -ту посету радионици: ( $stubIN[k]$ ),
- остварени циклуси делова са ограниченим радним веком на излазу из  $k$ -те посете радионице: ( $operatedOUT[k]$ ),
- преостали циклуси делова са ограниченим радним веком на излазу из  $k$ -те посете радионице: ( $remainingOUT [k]$ ),
- минимални преостали ресурс делова са ограниченим радним веком на излазу из  $k$ -те посете радионице: ( $stubOUT [k]$ ),
- циклуси рада мотора на  $k+1$ -вом интервалу у функцији донетих одлука на  $k$ -тој посети радионици и предвиђања циклуса до скидања ради обнове перформанси у функцији просечне дужине лета: ( $cslsv[k+1]$ ).



Слика 7.6 Основни параметри стања мотора на улазу и излазу из посета радионици

Одређивање циклуса рада на  $k+1$ -вом интервалу ( $cs/sv[k+1]$ ), који су резултат анализе потенцијално донетих одлука и планираног начина оперативне употребе мотора, врши се налажењем минимума при поређењу очекиваних циклуса рада до скидања ради обнове перформанси и минималног преосталог ресурса делова са ограниченим радним веком на излазу из  $k$ -те посете радионици ( $stubOUT[k]$ ), у свим категоријама потиска понаособ.

Дељењем овако одређених циклуса рада на наредним интервалима ( $cs/sv[k]; svNUM < k \leq svNUM + n - 1$ ) са планираним годишњим налетом мотора ( $ut[k] = util$ ) процењује се временски период употребе мотора на наредном интервалу до скидања ( $intervalYEARS[k]$ ), изражен у годинама. Збир временских интервала рада мотора ( $years[k]$ ) на разматраном броју посета радионици ( $n$ ), служи за одређивање фактора раста цене делова са ограниченим радним веком ( $llppriceRATE[k]$ ) и вредности трошкова њихове замене ( $costLLP[k]$ ) на наредним посетама радионици.

Трошкови посета радионици ( $costSV[k]; svNUM \leq k \leq svNUM + n - 1$ ) посматрани су као збир трошкова замене делова са ограниченим радним веком ( $costLLP[k]$ ) и трошкова радионичке обнове перформанси ( $costPR[k]$ ). Дељењем збира укупних трошкова посета радионици ( $svcTOTAL[n]$ ), са збиром укупно остварених циклуса ( $cyclesTOTAL[n]$ ) или часова рада ( $hoursTOTAL[n]$ ), на разматраном броју посета радионици ( $n$ ), добијају се оцењене вредности директних трошкова радионичког одржавања по циклусима и часовима ( $svcTOTALperCYCLE[n]$ ) и ( $svcTOTALperHOURL[n]$ ), у функцији свих одлука, на свим нивоима одлучивања.

У складу са изабраним бројем разматраних посета радионици ( $n$ ), у моделу се аутоматски обавља прорачун релевантних параметара оперативне употребе мотора и трошкова радионичког одржавања, применом свих разматраних одлука на свакој посети радионици. Резултати прорачуна се, зависно од параметра, генерално бележе у тензоре различитих димензија. Сваки наредни корак израчунавања параметара подразумева увећање ранга датог тензора.

Ради олакшаног праћења увећања ранга и димензија тензора, у Прилогу 2 је дат табеларни приказ димензија кључних прорачунских параметара модела, који прати нумерички пример доношења оптималних одлука из Прилога 1.

У наставку прорачуна, дефинишу се функције за одређивање валидних одлука на разматраним посетама радионици, којима се за сваку од могућности употребе мотора у нижој, вишој или комбинованим категоријама потиска током наредних интервала рада, тестира испуњеност сваке од разматраних стратегија превремене замене делова са ограниченим радним веком. Разматране стратегије превремене замене делова са ограниченим радним веком су у моделу представљене елементима вектора (*minLLPbuildLIST*).

Под употребом мотора у комбинованим категоријама потиска подразумевају се све могуће комбинације коришћења мотора на наредним интервалима. Примера ради, мотори серије -3C1 могу да раде на моделу авиона B737-400 у категоријама потиска В и С (Табела 7.12). У том случају варијабли (*validCATEGORY*) се додељује вредност {2, 3}, будући да су категорије потиска А, В и С, кодирани бројевима 1, 2 и 3, респективно. Уколико је број посета радионици на којима се разматра доношење одлука ( $n=3$ ), тада се скуп свих могућих комбинација рада мотора у расположивим категоријама потиска током наредна три интервала може записати као:

$$\{\{2, 2, 3\}, \{2, 3, 2\}, \{2, 3, 3\}, \{3, 2, 2\}, \{3, 2, 3\}, \{3, 3, 2\}\}$$

Ради додатног појашњења, први елемент из горњег скупа {2, 2, 3}, означава рад мотора у категорији потиска В (2) након прве и друге посете радионици и затим рад мотора у категорији потиска С (3) након треће посете радионици. Постаје очигледно да се под оперативном употребом мотора у једној од категорија потиска (нижој или вишој), сагласно претходном примеру, подразумева:

$$\{2, 2, 2\} \text{ или } \{3, 3, 3\}.$$



Функције валидних одлука за оперативну употребу мотора у појединачним (*validDECISIONSsingleCAT1*), (*validDECISIONSsingleCAT2*) или мешовитим категоријама потиска (*validMIXED*) користе структуру тензора (*stubOUT*), чије су димензије дате у Прилогу 2, да испитају и дају као резултат све позиције унутар тензора (*stubOUT*), на којима је минимални преостали ресурс делова са ограниченим радним веком у разматраној или разматраним категоријама потиска већи од сваког елемента вектора (*minLLPbuildLIST*). Након одређивања валидних одлука на првој посматраној (актуелној) посети радионици, одређивање скупа валидних одлука на наредној посети радионици подразумева коришћење претходно утврђених позиција (валидних одлука на првој посети) ради филтрирања претраге, сагласно увећаном рангу и димензијама тензора (*stubOUT*) на наредној посети. Овим путем се за изабрани број разматраних посета радионици, сходно тестираним стратегијама превремене замене делова, одређује скуп валидних одлука о замени делова са ограниченим радним веком у разматраним категоријама потиска мотора:

- (*validDECISIONSsingleCAT1[n]*),
- (*validDECISIONSsingleCAT2[n]*),
- (*validMIXED[n]*).

Функције оптималних одлука о обиму и садржају радионичких радова на унапред изабраном броју разматраних посета радионици:

- (*optimalDECISIONSsingleCAT1cycle[n]*)
- (*optimalDECISIONSsingleCAT2cycle[n]*)
- (*optimalMIXEDcycle[n]*)

користе структуру (ранг и димензије) тензора укупних директних трошкова радионичког одржавања (*svcTOTALperCYCLE[n]*), тако што траже минималну вредност на позицијама у тензору (*svcTOTALperCYCLE[n]*), које одговарају претходно одређеном скупу валидних одлука у разматраним категоријама потиска мотора, на истом нивоу одлучивања (*n*), сходно тестираним стратегијама превремене замене делова.

## 7.5 ПРИКАЗ ПРИМЕНЕ МОДЕЛА ОДЛУЧИВАЊА НА ПРАКТИЧНОМ ПРИМЕРУ

---

Ради ближег појашњења функционисања модела одлучивања, дат је приказ његове практичне примене, који у потпуности одговара приложеном коду, написаном у програмском језику *Mathematica* (Прилог 1). Без умањења општости примене модела у оквиру постављених ограничења, анализиран је случај посете моторској радионици, инициране потребом за обновом перформанси. Опис проблема који је потребно решити, дат је у наставку.

Мотор *CFM56-3*, серије *-3C1*, долази у трећу посету радионици ради обнове перформанси. Током првог интервала рада на просечној дужини лета од 2.1 часова по циклусу, мотор је остварио 7000 циклуса. На првој посети извршена је обнова перформанси језгра мотора, док делови са ограниченим радним веком нису мењани. Други интервал рада мотора на авиону је трајао 5000 циклуса, са просечном дужином лета од 0.9 часова по циклусу. На другој посети извршена је замена свих делова са ограниченим радним веком у модулима језгра мотора (НРС и НРТ) и захтевана ревизија језгра. Током трећег интервала рада на просечној дужини лета од 1.3 часова по циклусу, мотор је остварио 4000 циклуса до коначног доласка у трећу, актуелну посету радионици. На свим претходним интервалима, мотор серије *-3C1* је коришћен у трећој категорији потиска, са вредношћу максималног потиска на полетању од 23.5klb и просечним годишњим налетом од 1250 циклуса. Током наредних интервала рада, оператер планира да угради мотор серије *-3C1* на авион типа *B737-400* и са њим остварује просечни годишњи налет од 1500 циклуса, на просечној дужини лета од 1.4 часова по циклусу. На укупно 4 посете радионици (актуелна и три наредне), оператер жели да одреди оптималан низ одлука о обиму и садржају радова који даје минималне директне трошкове радионичког одржавања, разматрањем примене различитих стратегија замене делова са ограниченим радним веком за сваку појединачну, могућу употребу мотора у нижој, вишој или комбинованим категоријама потиска.



Табела 7.15 Коефицијент преосталог LLP ресурса на улазу у актуелну посету радионици  $rslc[3]$

|       |              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.467 | <b>0.204</b> | 0.467 | 0.800 | 0.800 | 0.800 | 0.747 | 0.733 | 0.765 | 0.735 | 0.759 | 0.800 | 0.360 | 0.360 | 0.360 | 0.360 | 0.360 | 0.467 | 0.360 |
|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Табела 7.16 Остварени LLP циклуси на улазу у актуелну посету радионици  $operatedIN[3]$

|       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 16000 | 16000 | 16000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 16000 | 16000 | 16000 | 16000 | 16000 | 16000 | 16000 |

Минимални преостали LLP ресурс на улазу у актуелну посету радионици, као последњи разматрани параметар стања, дефинисан је функцијом  $stubIN[3]$ , у облику вектора, чији елементи узимају вредности из друге колоне матрице  $remainingIN[3]$ , према Табели 7.14. Из Табела 7.14 и 7.15, види се да је на улазу у актуелну посету радионици наредни интервал рада мотора ограничен преосталим LLP ресурсом другог дела, који се налази у FAN&BOOSTER модулу мотора, под условом да се не донесе одлука о његовој замени. На овај начин, функцијама  $rslc[3]$ ,  $operatedIN[3]$ ,  $remainingIN[3]$  и  $stubIN[3]$ , дефинисане су вредности параметара стања ресурса делова са ограниченим радним веком на улазу у актуелну (трећу) посету радионици, у оквиру математичког модела и у складу са разматраним нумеричким примером.

Помоћу функција  $operatedOUT[3]$ ,  $remainingOUT[3]$  и  $stubOUT[3]$ , које су дефинисане у другом делу модела под називом „ГЛАВНЕ ФУНКЦИЈЕ“, одређене су вредности параметара стања делова са ограниченим радним веком на излазу из актуелне посете радионици, у зависности од разматраних одлука. Како се према првој одлуци, не врши замена делова са ограниченим радним веком, тако се и вредности параметара стања делова на излазу из актуелне посете радионици неће променити. Друга одлука подразумева замену делова са ограниченим радним веком у FAN&BOOSTER модулу мотора и имплицира обнову преосталог ресурса обухваћених делова на максималну вредност. Идући истом логиком, једноставно се може закључити да је укупан број могућих стања, којима је описан ресурс делова са ограниченим радним веком на излазу из актуелне посете радионици, једнак укупном броју разматраних одлука, односно 16.

Обухватање свих стања LLP ресурса на излазу из актуелне посете радионици захтева увећање ранга и димензија посматраног параметра стања. На тај начин су у оквиру модела, вредности остварених и преосталих циклуса рада делова са ограниченим радним веком на излазу из актуелне посете радионици дефинисане функцијама *operatedOUT[3]* и *remainingOUT[3]*, које попримају облик тензора трећег реда, димензија 16x3x19 (Прилог 2). Аналогно томе, вредност минималног преосталог LLP ресурса на излазу из актуелне посете радионици је дефинисана функцијом *stubOUT[3]*, која постаје тензор другог реда (матрица), димензија 16x3.

Очекивани циклуси рада мотора након актуелне (треће) посете радионици одређени су вредношћу функције *cs/sv[4]*, која се утврђује на следећи начин. Не улазећи у разматрање валидних категорија потиска у којима посматрана серија мотора може радити на изабраном типу авиона, заменом вредности функције обновљеног интензитета посете радионици *rsvr[4, 1.4, {1,2,3}, 3]* у једначину (7.13), одређује се број очекиваних циклуса рада до скидања ради обнове перформанси у свим категоријама потиска. На разматраном нумеричком примеру, добијају се вредности од 5356, 4402 и 3845 очекиваних циклуса рада у категоријама потиска А, В и С, респективно. Уколико се очекивани циклуси рада до скидања ради обнове перформанси посматрају као елементи неког вектора X, тада се очекивани циклуси рада мотора након треће посете радионици у било којој од категорија потиска добијају утврђивањем минималне вредности при поређењу елемената вектора X са елементима сваког од вектора врсте функције *stubOUT[3]* понаособ, на одговарајућим позицијама. Овим путем одређена је вредност функције *cs/sv[4]*, која је у моделу за доношење одлука представљена тензором другог реда, димензија 3x16. С обзиром да је у разматраном примеру минимални ресурс делова са ограниченим радним веком на улазу у трећу посету радионици већи од броја очекиваних циклуса рада до скидања ради обнове перформанси у свакој од категорија потиска мотора, дужина четвртог интервала рада ће бити искључиво ограничена перформансама мотора, независно од избора одлуке на трећој посети радионици.

Последња дискусија имплицира логичан закључак да би оптимална одлука о замени делова са ограниченим радним веком била управо одлука о неспровођењу замене делова, под условом разматрања само једног нивоа одлучивања на текућој посети радионици. Управо овај резултат даје модел, када се изабере да је број разматраних посета једнак јединици ( $n=1$ ).

Аналогно дефинисању функција којима су одређене вредности параметара стања делова са ограниченим радним веком *operatedOUT[3]*, *remainingOUT[3]* и *stubOUT[3]* на излазу из треће посете радионици, у другом делу математичког модела се дефинишу и функције за одређивање оцењених вредности трошкова замене делова *costLLP[3]*, обнове перформанси *costPR[3]* и посете радионици *costSV[3]*, у зависности од разматраних одлука. Вредности наведених функција трошкова представљене су вектором са 16 елемената, сагласно броју разматраних одлука.

У циљу разматрања одлука на наредној (четвртој) посети радионици потребно је претходно утврдити вредности параметара стања делова са ограниченим радним веком по доласку у четврту посету радионици. Будући да очекивани циклуси рада мотора на наредном (четвртом) интервалу обухватају анализу коришћења мотора у свим категоријама потиска, долази до додатног увећања димензија параметара стања делова са ограниченим радним веком на улазу у четврту посету радионици.

Наиме, модел прави разлику у избору категорије потиска, према којој ће бити обављен прелаз из стања на излазу у стање на улазу у сваку наредну посету, при дефинисању функција којима су одређене вредности параметара ресурса делова и трошкова радионичког одржавања.

Примера ради, као резултат једне од одлука на трећој посети радионици, утрошени ресурс делова са ограниченим радним веком на њеном излазу биће описан матрицом  $3 \times 19$ , а број очекиваних циклуса рада вектором са 3 елемента, зависно од категорије потиска.

Употреба мотора у првој категорији потиска након посете радионици довешће до пораста утрошеног LLP ресурса, који се на улазу у наредну посету може израчунати додавањем првог елемента вектора очекиваних циклуса рада свим елементима прве врсте матрице утрошеног LLP ресурса на излазу из претходне посете радионици. Према томе, за једну одлуку донету на трећој посети радионици, преостали LLP ресурс на излазу из треће посете, који је описан тензором другог реда, димензија  $3 \times 19$ , постаће тензор трећег реда, димензија  $3 \times 3 \times 19$  на улазу у четврту посету радионици.

У складу са претходним објашњењем може се закључити да ће обухватањем свих 16 одлука, утрошени *operatedIN[4]* и преостали *remainingIN[4]* ресурс делова са ограниченим радним веком на улазу у четврту посету радионици бити представљени тензорима четвртог реда, који узимају димензије  $3 \times 16 \times 3 \times 19$ , у оквиру изложеног нумеричког примера. Коначно, поређењем димензија тензора на улазу у трећу и четврту посету радионици (Прилог 2), следи да се при сваком порасту броја нивоа одлучивања увећава ранг тензора за два и то начелно према димензијама  $3 \times 16$ , где је првим индексом описан избор категорије потиска мотора, а другим донета одлука.

Аутоматизација прорачуна параметара стања делова са ограниченим радним веком и функција трошкова омогућена је применом рекурзивних функција. Да би се избегло поновно рачунање вредности описаних функција у сваком од наредних рекурзивних корака и уштедело на времену прорачуна, примењена је техника мемоизације, која подразумева памћење израчунатих вредности у активној меморији програма. Нежељени ефекти примене технике мемоизације испољавају се кроз губитак и трошење меморијског простора, као резултат великог броја елемената, чије вредности је потребно забележити у оквиру тензора рекурзивних функција.

Вредности описаних функција математичког модела се аутоматски израчунавају по добијању захтева за евалуацијом и не разматрају валидне категорије потиска у којима је могућ рад серије мотора на датом типу авиона.

Утврђивање валидних категорија потиска мотора у моделу препуштено је варијабли *validCATEGORY*. На основу дефиниције променљиве *validCATEGORY*, написане у складу са расположивим комбинацијама за интеграцију серије мотора са типом авиона, у посматраном примеру њена вредност је одређена вектором са два елемента {2, 3}. То значи да је употреба мотора серије -3С1 на изабраном авиону B737-400 могућа у категоријама потиска од 22.1klb и 23.5klb, односно у категоријама В и С.

Вредност варијабле *validCATEGORY* користи се за аутоматско генерисање стратегија о превременој замени делова са ограниченим радним веком, које дефинишу критеријум за одређивање скупа валидних одлука. У делу модела под називом „ИЗБОР ПЛАНИРАНОГ НАЧИНА КОРИШЋЕЊА МОТОРА“, одређују се вредности разматраних стратегија превремене замене делова са ограниченим радним веком, које су представљене елементима вектора *minLLPbuildLIST*. У посматраном примеру, при свакој посети радионици, посебно се разматра групна замена свих делова са ограниченим радним веком у модулима мотора, код којих је минимални LLP ресурс на улазу у посету радионици мањи од 2000, 3000, 3845 и 4402 циклуса, сагласно вредностима вектора *minLLPbuildLIST* (Прилог 1). Уз подсећање да је одређени број очекиваних циклуса рада мотора до скидања ради обнове перформанси у категоријама потиска А, В и С једнак 5356, 4402 и 3845, као и да је могуће планирати употребу разматране серије мотора на изабраном типу авиона у категоријама потиска В и С, може се извући закључак о начину аутоматског генерисања стратегија превремене замене делова ограниченог радног века. Почетна стратегија превремене замене, која је имплементирана у модел одлучивања, узима 2000 циклуса као доњу границу и сукцесивно је повећава за по 1000 циклуса, све док се не достигне гранична вредност, која одговара максималној вредности оцењеног броја циклуса рада мотора до скидања ради обнове перформанси у оквиру валидних категорија потиска. На основу овако дефинисаних стратегија превремене замене, приступа се дефинисању скупа валидних одлука при разматраним посетама радионици, кроз посебну анализу рада мотора у нижој, вишој или комбинованим категоријама потиска.



У конкретном случају, посматрају се минималне вредности преосталог LLP ресурса  $stubOUT[3]$ , приказане у Табели 7.17, које зависе од донетих одлука.

Табела 7.17 Минимални преостали LLP ресурс на излазу из треће посете радионици  $stubOUT[3]$

| ОДЛУКА | КАТЕГОРИЈА ПОТИСКА |      |      | ОДЛУКА | КАТЕГОРИЈА ПОТИСКА |       |       |
|--------|--------------------|------|------|--------|--------------------|-------|-------|
|        | А                  | В    | С    |        | А                  | В     | С     |
| 1      | 6119               | 5079 | 4099 | 9      | 9000               | 9000  | 9000  |
| 2      | 9000               | 9000 | 9000 | 10     | 14666              | 11614 | 11000 |
| 3      | 6119               | 5079 | 4099 | 11     | 6119               | 5079  | 4099  |
| 4      | 6119               | 5079 | 4099 | 12     | 6119               | 5079  | 4099  |
| 5      | 6119               | 5079 | 4099 | 13     | 6119               | 5079  | 4099  |
| 6      | 6119               | 5079 | 4099 | 14     | 14701              | 11614 | 11100 |
| 7      | 9000               | 9000 | 9000 | 15     | 14666              | 13200 | 11000 |
| 8      | 9000               | 9000 | 9000 | 16     | 20000              | 15800 | 15000 |

Поређењем вредности сваког од елемената вектора стратегија превремене замене  $minLLPbuildLIST$  (2000, 3000, 3845 и 4402) са вредностима минималног преосталог ресурса  $stubOUT[3]$ , које одговарају раду мотора у валидним категоријама потиска (нижој, вишој или комбинованим, одн. В, С или В и С), добијају се валидне одлуке о замени делова са ограниченим радним веком при трећој посети радионици. Претходно је објашњено да скуп валидних одлука означава позиције у тензору  $stubOUT[3]$ . Како је  $stubOUT[3]$  тензор другог реда, тако је свака позиција одређена паром бројева, од којих први означава врсту, а другу колону. Примера ради, уколико је потребно одредити скуп валидних одлука о замени делова са ограниченим радним веком при трећој посети радионици, за стратегију превремене замене свих делова, са ресурсом мањим од 2000 циклуса, анализирањем рада задате серије мотора у искључиво нижој категорији потиска (категорија В), тада је потребно испитати да ли су вредности елемената друге колоне тензора  $stubOUT[3]$  веће од 2000. Уколико је овај услов испуњен, што у разматраном случају важи за сваки елемент друге колоне тензора  $stubOUT[3]$ , формира се први елемент скупа валидних одлука у нижој категорији потиска, који се везује за прву од разматраних стратегија превремене замене. У конкретном случају, поменути први елемент скупа валидних одлука биће тензор другог реда (матрица), следећих вредности:

$\{\{1,2\},\{2,2\},\{3,2\},\{4,2\},\{5,2\},\{6,2\},\{7,2\},\{8,2\},\{9,2\},\{10,2\},\{11,2\},\{12,2\},\{13,2\},\{14,2\},\{15,2\},\{16,2\}\}$

Пролазом кроз сваку од разматраних стратегија превремене замене, добија се скуп валидних одлука о замени делова на трећој посети радионици у нижој категорији потиска *validDECISIONSsingecat1[1]*. Аналогним поступком провере испуњености дефинисаних услова, на првом нивоу одлучивања ( $n=1$ ) у оквиру модела се одређују и скупови валидних одлука о замени делова на актуелној (трећој) посети радионици у вишој *validDECISIONSsingecat2[1]* и комбинованим *validMIXED[1]* категоријама потиска.

На другом нивоу одлучивања ( $n=2$ ) при четвртој посети радионици, за одређивање валидних одлука наспрам разматраних стратегија превремене замене у нижој, вишој и комбинованим категоријама потиска, посматрају се минималне вредности преосталог LLP ресурса на излазу из четврте посете радионици *stubOUT[4]*, које зависе од донетих одлука на трећој и четвртој посети радионици. Минимални преостали LLP ресурс на излазу из четврте посете радионици је представљен тензором четвртог реда, димензија  $3 \times 16 \times 16 \times 3$  (Прилог 2). Први индекс тензора *stubOUT[4]* означава избор категорије потиска на излазу из треће посете, други индекс означава донету одлуку на трећој посети, трећим индексом је представљена одлука на четвртој посети и четвртим индексом је означен избор категорије потиска на излазу из четврте посете радионици.

Скуп валидних одлука о замени делова са ограниченим радним веком на другом нивоу одлучивања у нижој *validDECISIONSsingecat1[2]*, вишој *validDECISIONSsingecat2[2]* или комбинованим *validMIXED[1]* категоријама потиска је представљен уређеним четворкама, тј. позицијама елемената тензора *stubOUT[4]*, на којима је испуњен претходно разматрани услов неједнакости наспрам свих стратегија превремене замене, уз испуњење додатног услова који служи за елиминацију свих невалидних одлука на првом нивоу одлучивања. Сагласно томе, скуп валидних одлука на  $n$ -том нивоу одлучивања може се представити рекурзивним релацијама у функцији скупова валидних одлука на свим претходним нивоима одлучивања.

Уколико је разматрани број посета радионици на којима је потребно одредити оптималну одлуку о садржају и обиму радова једнак јединици ( $n=1$ ), тада ће у складу са посматраним нумеричким примером вредност функције укупних директних трошкова радионичког одржавања мотора  $svcTOTALperCYCLE[1]$  бити одређена количником трошкова треће посете радионици  $svcTOTAL[1]$ , датих у функцији разматраних одлука и остварених циклуса рада мотора на трећем интервалу  $cyclesTOTAL[1]$ . Укупни директни трошкови радионичког одржавања мотора  $svcTOTALperCYCLE[1]$  тада узимају облик тензора првог реда (вектора) са 16 елемената, чије су вредности приказане у Табели 7.18.

Табела 7.18 Укупн директни трошкови на првом нивоу одлучивања  $svcTOTALperCYCLE[1]$

| ОДЛУКА |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1      | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  |
| 255    | 390 | 457 | 430 | 577 | 489 | 592 | 566 | 713 | 624 | 691 | 664 | 812 | 827 | 800 | 947 |

Једноставним налажењем минималне вредности елемената на позицијама вектора  $svcTOTALperCYCLE[1]$ , које одговарају првим елементима претходно одређеног скупа валидних одлука на трећој посети радионици добијају се оптималне одлуке о замени делова са ограниченим радним веком и обнови перформанси модула мотора на трећој посети радионици у нижој  $optimalDECISIONSsingleCAT1cycle[1]$ , вишој  $optimalDECISIONSsingleCAT2cycle[1]$  и комбинованим  $optimalMIXEDcycle[1]$  категоријама потиска које одговарају разматраним стратегијама превремене замене делова. Претходно је наведено да су у посматраном примеру валидне све одлуке на трећој посети радионици и да је наредни интервал рада мотора у било којој од валидних категорија потиска ограничен перформансама мотора. Посматрањем вредности трошкова радионичког одржавања према Табели 7.18, генерисаних применом свих одлука на трећој посети радионици, долази се до закључка да је одлука број 1 оптимална, јер даје минималну вредност трошкова. Вредности функција оптималних одлука на трећој посети имају следећи облик:

$$optimalDECISIONSsingleCAT1cycle[1] = \{\{\{1,2\}\},\{\{1,2\}\},\{\{1,2\}\},\{\{1,2\}\}\}$$

$$optimalDECISIONSsingleCAT2cycle[1] = \{\{\{1,3\}\},\{\{1,3\}\},\{\{1,3\}\}\}$$

$$optimalMIXEDcycle[1] = \{\{\{1,2\},\{1,3\}\},\{\{1,2\},\{1,3\}\},\{\{1,2\},\{1,3\}\},\{\{1,2\}\}\}$$

Без обзира на истоветне резултате који се добијају евалуацијом функција оптималних одлука у нижој, вишој и мешовитим категоријама потиска мотора, за вредности испитиваних стратегија о превременој замени делова са ограниченим радним веком од 2000, 3000, 3845 и 4402 циклуса, разматрањем једног нивоа одлучивања, интерпретација приказа добијених резултата ће бити објашњена у наставку.

У нижој категорији потиска (категорија В), која је у моделу кодирана бројем 2, оптималне одлуке су означене вредностима првих елемената угњеждених листа података, једнаким јединици и односе се на одлуке да се при трећој посети радионици не врши замена делова са ограниченим радним веком, при чему број угњеждених листа одговара броју разматраних стратегија превремене замене делова {2000, 3000, 3845, 4402}. У вишој категорији потиска (категорија С), која је у моделу кодирана бројем 3, ситуација је готово идентична, изузев у броју разматраних стратегија превремене замене делова са ограниченим радним веком. Имајући у виду да ће мотор серије -3С1 при раду у трећој категорији потиска моћи да оствари највише 3845 очекиваних циклуса до скидања ради обнове перформанси, последња стратегија превремене замене делова са ограниченим радним се не разматра у оквиру предложеног модела одлучивања. Основна идеја којом је руковођено при дефинисању функције *minLLPbuildLIST* за аутоматско генерисање стратегија превремене замене је да оператер неће хтети да мења делове са ограниченим радним веком, чији ресурс премашује број очекиваних циклуса рада до скидања ради обнове перформанси мотора. Разматрање оптималне одлуке о замени на једном нивоу одлучивања, уз допуштање рада мотора у мешовитим категоријама потиска, иако на први поглед без суштинског смисла (оператер може да користи мотор на наредном интервалу у нижој или у вишој категорији потиска), имплицира доношење занимљивог закључка да је према последњој стратегији превентивне замене делова са ресурсом мањим од 4402 циклуса, изостанак очекиваног члана  $\{1,3\}$  резултат третирања такве одлуке о раду мотора у трећој категорији потиска невалидном одлуком, чиме се употпуњује математичка комплетност модела одлучивања.

Коначни одговор на постављено питање о оптималном низу секвенцијалних одлука на укупно четири посете моторској радионици, сагласно разматраном нумеричком примеру, добија се интерпретацијом добијених вредности функција оптималних одлука за вредност  $n=4$ , које су дате у Табели 7.19.

**Табела 7.19 Оптималне одлуке о обиму и садржају радова на разматраном примеру**

| СТРАТЕГИЈА ПРЕВРЕМЕНЕ ЗАМЕНЕ ДЕЛОВА СА ОГРАНИЧЕНИМ РАДНИМ ВЕКОМ |                      |                      |                      |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| ЗАМЕНА ДЕЛОВА СА РЕУРСОМ МАЊИМ ОД:                              |                      |                      |                      |
| 2000 ЦИКЛУСА                                                    | 3000 ЦИКЛУСА         | 3845 ЦИКЛУСА         | 4402 ЦИКЛУСА         |
| <b>ОПТИМАЛНЕ ОДЛУКЕ У НИЖОЈ КАТЕГОРИЈИ ПОТИСКА</b>              |                      |                      |                      |
| {{2,16,2,1,2,1,1,2}}                                            | {{2,10,2,5,2,1,1,2}} | {{2,10,2,5,2,1,1,2}} | {{2,10,2,5,2,1,1,2}} |
| <b>ОПТИМАЛНЕ ОДЛУКЕ У ВИШОЈ КАТЕГОРИЈИ ПОТИСКА</b>              |                      |                      |                      |
| {{3,16,3,1,3,1,1,3}}                                            | {{3,16,3,1,3,1,1,3}} | {{3,10,3,5,3,1,1,3}} |                      |
| <b>ОПТИМАЛНЕ ОДЛУКЕ У КОМБИНОВАНИМ КАТЕГОРИЈАМА ПОТИСКА</b>     |                      |                      |                      |
| {{2,16,2,1,2,1,1,3}}                                            | {{2,10,2,5,2,1,1,3}} | {{2,10,2,5,2,1,1,3}} | {{2,10,2,5,2,1,1,3}} |

Сагласно димензијама тензора укупних директних трошкова радионичког одржавања по циклусу лета  $svcTOTALperCYCLE[4]$ , наведеним у Прилогу 2, оптимални низ секвенцијалних одлука на четири посете радионици у нижој категорији потиска, за стратегију групне замене делова са ограниченим радним веком у сваком модулу у коме је минимални LLP ресурс мањи од 3845 циклуса може се прочитати из треће колоне Табеле 7.19 и интерпретирати на следећи начин:

- На трећој посети радионици применити одлуку кодирану бројем 10 (замена LLP у модулима FAN&BOOSTER и LPT, ревизија ових модула и обнова перформанси језгра мотора) и планирати употребу мотора са оцењеном вредности потиска од 22.1klb,
- На четвртој посети радионици применити одлуку кодирану бројем 5 (замена LLP у модулима НРС и НРТ и ревизија језгра мотора) и планирати употребу мотора са оцењеном вредности потиска од 22.1klb,
- На петој посети радионици применити одлуку кодирану бројем 1 (обнова перформанси језгра мотора) и планирати употребу мотора са оцењеном вредности потиска од 22.1klb,
- На шестој посети радионици применити одлуку кодирану бројем 1 (обнова перформанси језгра мотора) и планирати употребу мотора са оцењеном вредности потиска од 22.1klb.

На исти начин могу се веома једноставно интерпретирати и оптималне одлуке за било коју од разматраних стратегија превремене замене делова са ограниченим радним веком и планирану употребу мотора у вишој или комбинованим категоријама потиска мотора.

Приказ резултата се по потреби може једноставно аутоматизовати и прилагодити кориснику програма, тако да се добије у облику претходних исказа, употребљених за интерпретацију оптималних одлука.

Поређењем вредности евалуираних вредности функција оптималних одлука на различитим изабраним нивоима одлучивања, које су наведене у Прилогу 1, примећује се да предложени модел одлучивања, са повећањем броја разматраних посета моторској радионици индицира захтеве за заменом делова са ограниченим радним веком у већем броју главних модула мотора што је пре могуће, односно на првој од низа разматраних посета радионици. Овакав излазни резултат предложеног модела одлучивања је последица разматраног просечног годишњег раста цене делова са ограниченим радним веком и иницијално високих вредности цене делова. Један од могућих праваца дејства је продаја превремено замењених делова са ограниченим радним веком и остваривање додатних уштеда трошкова материјала.

---

## **8 ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА**

---

Разматрањем историјског развоја и савременог концепта одржавања турбофенских мотора, заснованог на примени техника за дијагностику стања и праћење тренда перформанси, створени су услови за анализу главних узрока скидања мотора са авиона. Погоршање перформанси главних модула мотора и истрошеност ресурса делова са ограниченим радним веком су главни разлози скидања мотора који се користе на краћим дужинама лета.

Реализованим истраживањима у оквиру ове дисертације извршена је идентификација и систематска анализа утицаја кључних фактора оперативне употребе турбофенских мотора на часове и циклусе рада на авиону. Највећи допринос порасту остварених часова рада мотора на авиону пружа примена процедура за смањење максималног потиска на полетању. Познавање степена радног оптерећења мотора омогућава квантификацију очекиваних уштеда директних трошкова одржавања у зависности од примењеног нивоа оперативног смањења потиска на полетању и просечне дужине лета.

Поступком анализе изведени су аналитички изрази за трошкове искоришћеног и неискоришћеног ресурса делова са ограниченим радним веком при посети радионици у функцији актуелне каталожке цене делова, донетих одлука о замени делова на актуелној и свим претходним посетама радионици и броја остварених циклуса рада делова у одређеним категоријама потиска на свим претходним интервалима рада мотора на авиону.

Сагласно постављеном циљу истраживања развијена је методологија за стратешко планирање и доношење одлука у процесу радионичког одржавања ваздухопловних турбофенских мотора.

Статистичком обрадом расположивих података о реализованим скидањима мотора типа *CFM56-3*, формиран је модел за предвиђање очекиваних циклуса рада до скидања ради обнове перформанси у функцији задатог начина оперативне употребе авиона.

Направљен је модел за доношење оптималних одлука о замени делова са ограниченим радним веком и обиму радова над модулима, којима се минимизирају будући очекивани директни трошкови радионичког одржавања за претходно изабрани број разматраних посета радионици и планирани начин оперативне употребе мотора. Резултати истраживања потврђују могућност унапређења квалитета процеса планирања радионичког одржавања мотора, путем смањења директних трошкова одржавања. Уз примену одговарајућих корекција, постоји отворена могућност примене развијеног модела одлучивања на другим моделима турбофенских мотора.

У светлу побољшања изложеног модела одлучивања, предложени правац даљег истраживања односи се на оптимизацију алгорита за доношење одлука, која би омогућила краће време прорачуна оптималних одлука одржавања, а самим тим и увођење додатних параметара одлучивања у разматрање. Тестирање резултата модела одлучивања кроз практичну примену у ваздухопловној индустрији би свакако допринело квалитету и омогућило реалну оцену предложеног стратешког приступа планирању радова на унапред изабраном броју разматраних посета радионици.



---

## ЛИТЕРАТУРА

---

- [1] R. E. Barlow and L. C. Hunter, "Optimum Preventive Maintenance Policies," *Operations Research*, vol. 8, no. 1, pp. 90-100, 1960.
- [2] D. W. Jorgenson and R. Radner, "Optimal Replacement and Inspection of Stochastically Failing Equipment," The RAND Corporation, Santa Monica, 1960.
- [3] R. Radner and D. W. Jorgenson, "Opportunistic Replacement of a Single Part in the Presence of Several Monitored Parts," The RAND Corporation, Santa Monica, 1962.
- [4] D. W. Jorgenson and J. McCall, "Optimal Scheduling of Replacement and Inspection," The RAND Corporation, Santa Monica, 1962.
- [5] D. W. Jorgenson, J. McCall and R. Radner, "Optimal Maintenance of Stochastically Failing Equipment," The RAND Corporation, Santa Monica, 1966.
- [6] R. Dekker and P. A. Scarf, "On the impact of optimisation models in maintenance decision making: the state of the art," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 60, no. 2, pp. 111-119, May 1998.
- [7] R. Dekker, "Applications Of Maintenance Optimization models: A Review and Analysis," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 51, no. 3, pp. 229-240, March 1996.
- [8] R. E. Barlow and F. Prochan, *Mathematical Theory of Reliability*, New York: John Wiley, 1965.
- [9] J. McCall, "Maintenance policies for stochastically failing equipment: a survey," *Management Science*, vol. 11, no. 5, pp. 493-524, 1965.
- [10] W. P. Pierskalla and J. A. Voelker, "A Survey of Maintenance Models: The Control and Surveillance of Deteriorating Systems," *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 23, no. 3, pp. 353-388, 1976.

- 
- [11] Y. S. Sherif and M. L. Smith, "Optimal Maintenance Models for Systems Subject to Failure: A Review," *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 28, no. 1, pp. 47-74, 1981.
- [12] C. Valdez-Flores and R. M. Feldman, "A Survey of Preventive Maintenance Models for Stochastically Deteriorating Single-Unit Systems," *Naval Research Logistics*, vol. 36, no. 4, pp. 419-446, 1989.
- [13] D. I. Cho and M. Parlar, "A survey of maintenance models for multi-unit systems," *European Journal of Operational Research*, vol. 51, no. 1, pp. 1-23, March 1991.
- [14] R. Dekker, R. E. Wildeman and F. A. van der Duyn Schouten, "A review of multi-component maintenance models with economic dependence," *Mathematical Methods of Operations Research*, vol. 45, no. 3, pp. 411-435, October 1997.
- [15] H. Wang, "A survey of maintenance policies of deteriorating systems," *European Journal of Operational Research*, vol. 139, no. 3, p. 469-489, June 2002.
- [16] R. P. Nicolai and R. Dekker, "Optimal Maintenance of Multi-component Systems: A Review," in *Complex System Maintenance Handbook*, 1 ed., London, Springer-Verlag, 2008, pp. 263-286.
- [17] J. A. Forbes and P. P. Wyatt, "Optimal replacement policy for the F-15 aircraft engine modules," Air Force Institute of Technology, Ohio, 1975.
- [18] S. Epstein and Y. Wilamowsky, "A Replacement Schedule for Multicomponent Life-Limited Parts," *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 29, no. 4, pp. 685-692, 1982.
- [19] D. U. Kumar, J. Crocker and J. Knežević, "Evolutionary Maintenance for Aircraft Engines," in *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Washington DC, 1999.
- [20] W. J. Hopp and Y.-L. Kuo, "An optimal structured policy for maintenance of partially observable aircraft engine components," *Naval Research Logistics*, vol. 45, no. 4, p. 335-352, June 1998.
- [21] W. J. Hopp and Y.-L. Kuo, "Heuristics for multicomponent joint replacement: Applications to aircraft engine maintenance," *Naval Research Logistics*, vol. 45, no. 5, p. 435-458, August 1998.
- [22] G. Tu, P. B. Luh, Q. Zhao and R. N. Tomastik, "An optimization method for joint replacement decisions in maintenance," in *43rd IEEE Conference on Decision and Control*, 2004.

- 
- [23] T. Sun, Q. Zhao, P. B. Luh and R. N. Tomastik, "Joint replacement optimization for multi-part maintenance problems," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2004.
- [24] T. Sun, Q. Zhao, P. B. Luh and R. N. Tomastik, "Optimization of Joint Replacement Policies for Multipart Systems by a Rollout Framework," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 609 - 619, 2008.
- [25] Q.-S. Jia and Q.-C. Zhao, "A SVM-based method for engine maintenance strategy optimization," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, 2006.
- [26] L. Xia, Q. Zhao and Q.-S. Jia, "A Structure Property of Optimal Policies for Maintenance Problems With Safety-Critical Components," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 519 - 531, 2008.
- [27] A. Domitrović, "Optimizacija održavanja pogonskog sustava u eksploataciji zrakoplova," Fakultet Prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2007.
- [28] A. Domitrović, V. Vojvodić Rosenzweig and E. Bazijanac, "Optimal Replacement of Aircraft Jet Engine Modules," in *12th International Conference on Operational Research KOI*, Pula, 2008.
- [29] A. Domitrović, E. Bazijanac and I. Čala, "Optimal Replacement Policy of Jet Engine Modules From the Aircarrier's Point of View," *Promet-Traffic&Transportation*, vol. 20, no. 1, pp. 1-9, 2008.
- [30] C. Petcharin and H. Ren, "CF6 Engine Operational Reliability and Maintenance Optimization," *Journal of Aircraft*, vol. 49, no. 2, pp. 651-653, 2012.
- [31] A. Bowman and J. Schmee, "Pricing and Managing a Maintenance Contract for a Fleet of Aircraft Engines," *SIMULATION*, vol. 76, no. 2, pp. 69-77, February 2001.
- [32] M. El Hayek, E. van Voorthuysen and D. W. Kelly, "Optimizing life cycle cost of complex machinery with rotatable modules using simulation," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 333 - 347, 2005.
- [33] M. Aleksić / A. Manić, *Vazduhoplovne pogonske grupe*, Beograd: Zavod za udžbenike, 1988, p. 271.
- [34] A. Ahmadi, P. S. Söderholm and U. Kumar, "An overview of trends in aircraft maintenance program development: past, present, and future," in *Proceedings of the 18th European Safety and Reliability Conference ESREL*, Stavanger, Norway, 2007.

- 
- [35] B. McLoughlin and J. Beck, "Maintenance Program Enhancements," *Boeing AERO Magazine*, no. 24, pp. 24-28, 2006.
- [36] S. F. Nowlan and H. F. Heap, "Reliability-Centered Maintenance," Dolby Access Press, San Francisco, CA, 1978.
- [37] S. Razumenić / A. Manić, Održavanje vazduhoplova, Beograd, Srbija: Saobraćajni fakultet, 2003, p. 442.
- [38] J. Moubray, Reliability-centered Maintenance, Industrial Press, 1997.
- [39] S. Ackert, "Basics of Aircraft Maintenance Programs for Financiers: Evaluation & Insights of Commercial Aircraft Maintenance Programs," *Aircraft Monitor*, 2010.
- [40] J. F. Rudolph, "Review of Engine Maintenance Concepts Applied to Wide Body Jets," Society of Automotive Engineers, 1973.
- [41] General Electric, Jet Engines and Propulsion Systems for Engineers, T. W. Fowler, Ed., 1989.
- [42] IATA, World Airlines Technical Operations Glossary (WATOG), 11th ed., ATA, IATA, ICCAIA, 1986.
- [43] E. d. C. P. Batalha, "Aircraft Engines Maintenance Costs and Reliability: An Appraisal of the Decision Process to Remove an Engine for a Shop Visit Aiming at Minimum Maintenance Unit Cost," Universidade Nova, Lisboa, 2012.
- [44] Rolls-Royce plc, The Jet Engine, 5th ed., 1986, pp. 1-278.
- [45] L. Vanhoyland and S. Van der Jonckheyd, "The Conception of Turbojet Maintenance System," Faculty of Power and Aeronautical Engineering, Warsaw, 2009.
- [46] S. Demirci, C. Hajiyev and A. Schwenke, "Fuzzy logic-based automated engine health monitoring for commercial aircraft," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 80, no. 5, pp. 516-525, 2008.
- [47] B. Stojiljković, L. Vasov, S. Gvozdenović, P. Miroslavljević and O. Čokorilo, "Condition Monitoring of Turbojet Engines," in *Proceedings of the 14th International Conference on Dependability and Quality Management*, Belgrade, Serbia, 2011.
- [48] I. Y. Tumer / A. Bajwa, „A Survey of Aircraft Engine Health Monitoring Systems,“ *y Proceedings of the 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit AIAA-99-2528*, Los Angeles, CA, 1999.

- 
- [49] Rolls-Royce plc, The Jet Engine, Latest ed., 2005, pp. 1-288.
- [50] Y. G. Li, "Performance Analysis Based Gas Turbine Diagnostics: a Review," *Journal of Power and Energy*, vol. 216, no. 5, pp. 363-377, September 2002.
- [51] FAA/ASA, Aviation Maintenance Technician Handbook-General (FAA-H-8083-30), Oklahoma City, OK: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2008.
- [52] D. Crane, Aviation maintenance technician series: Powerplant, T. Michmerhuizen and P. Benton, Eds., Newcastle, Washington: Aviation Supplies & Academics. Inc., 1996.
- [53] FAA, Airframe and Powerplant Mechanics: Powerplant Handbook (AC65-12A), Oklahoma City, OK: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 1971.
- [54] C. E. Otis and P. A. Vosbury, Aircraft Gas Turbine Powerplants, Jeppesen Sanderson Inc., 2002.
- [55] FAA, Aviation Maintenance Technician Handbook-Powerplant (FAA-H-8083-32), vol. 2, Oklahoma City, OK: United States Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2012.
- [56] M. Lukas and R. J. Yurko, "Current Technology in Oil Analysis Spectrometers and What We May Expect in the Future," in *Proceedings of a Joint Conference*, Mobile, AL, 1996.
- [57] I. E. Treager, Aircraft Gas Engine Turbine Technology, 3rd ed., New York: Glencoe, 1996, pp. 1-608.
- [58] M. J. Kroes and T. W. Wild, Aircraft Powerplants, 7th ed., Glencoe/McGraw-Hill, 1995.
- [59] T. Ariputhran, „Optimal Sensors Selection in Gas Path Diagnostic for High By-Pass Turbo-Fan,“ School of Engineering, Cranfield University, Cranfield, 2007.
- [60] J. P. R. Freitas, "Study and Implementation of Algorithms for in flight performance analysis of the PW4000-100 Turbofan engine for the purpose of Engine Condition Monitoring," Instituto Superior Tecnico, Lisboa, 2014.
- [61] GE Aircraft Engines, "SAGE Training Manual," GE/CFMI, 2005.
- [62] CFMI International, "CFM56 Trend Interpretation," CFMI, 2005.

- 
- [63] FAA, *Title 14, Chapter I, Subchapter C, Part 33, Subpart E: Engine Life-Limited Parts*, United States Department of Transportation.
- [64] Aircraft Commerce, „LLP management for short-haul engines,“ *Aircraft Commerce*, бр. 34, pp. 36-44, 2004.
- [65] S. Ackert, "Engine Maintenance Concepts for Financiers: Elements of Turbofan Shop Maintenance Costs," *Aircraft Monitor*, 2011.
- [66] EASA, *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Engines CS-E*, European Aviation Safety Agency, 2015.
- [67] M. Moutoussamy, "Coping With a Hot Engine," *CFM Flight Operations Newsletter*, pp. 4-5, July 2008.
- [68] Boeing, "Propulsion," *Flight Operations Engineering*.
- [69] A. Mihalchik, "Understanding the EGT redline," *GE Flight Operations Newsletter*, vol. 3, no. 1, pp. 4-7, Spring/Summer 2008.
- [70] A. Bonnet, "Avoiding high speed rejected takeoffs due to EGT limit exceedance," *Safety First*, no. 4, pp. 8-13, June 2007.
- [71] Commercial Engine Service Memorandum, "T/O EGT Margin and OATL Determination," CFM International, 1992.
- [72] Aircraft Commerce, "Owner's and Operator's Guide: CFM56-3 Series," *Aircraft Commerce*, no. 45, pp. 9-31, 2006.
- [73] CFM International, "CFM Flight Operations Support B737," CFMI, 2005.
- [74] Boeing, *Jet Transport Performance Methods*, Seattle, Washington: The Boeing Company, 2009.
- [75] R. E. Owens, *Engine Deterioration and On-wing Procedures to Recover Performance*, Madrid, 2002.
- [76] L. Vasov, O. Čokorilo, P. Miroslavljević, B. Stojiljković / S. Gvozdenović, *Energetska efikasnost vazduhoplova*, Beograd, Srbija: Saobraćajni fakultet, 2014, pp. 1-198.
- [77] Airbus Specialists and Engine Manufactures, "Fuel Conservation Part 3," *FAST Magazine*, no. 2, pp. 2-8, 1984.
- [78] O. Maumy and B. Mungin, "EGT Margin A300/CF6-50C2," *FAST Magazine*, no. 9, pp. 9-13, July 1988.

- 
- [79] GE Aircraft Engines, "SAGE Monitoring Program - Analytical Functions," GE.
- [80] University of Melbourne, "Wikimedia Commons," [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Koppen\\_World\\_Map\\_%28retouched\\_version%29.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Koppen_World_Map_%28retouched_version%29.png). [Accessed 6 11 2015].
- [81] GE Aircraft Engines, "Engine Condition Monitoring - Data Acquisition," GE.
- [82] J. Lacaille, A. Gouby and O. Piol, "Wear Prognostic on Turbofan Engines," in *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, New Orleans, USA, 2013.
- [83] P. Gruber, "CFM56 Time On-Wing Analysis," 2000.
- [84] S. Ackert, "Engine Maintenance Concepts for Financiers: Elements of Engine Shop Maintenance Costs," *Aircraft Monitor*, 2010.
- [85] P. Gruber, B. Fischer and F. C. Segard, "Engine Workscope Management," in *CFM56-3 All Operators Meeting*, Rome, 2000.
- [86] R. Heisey, "717-200: Low Maintenance Costs and High Dispatch Reliability," *Boeing AERO Magazine*, no. 19, pp. 18-31, July 2002.
- [87] J.-P. Genottin, "Maintenance cost analysis: IATA/Airbus activities and results," *FAST Magazine*, no. 25, pp. 3-6, December 1999.
- [88] IATA, "Airline Cost Management Group (ACMG) Report FY2013," 2013.
- [89] IATA, "Airline Maintenance Cost Executive Commentary: An Exclusive Benchmark Analysis (FY2013 data) by IATA's Maintenance Cost Task Force," 2014.
- [90] R. Seemann, "Modeling the Life Cycle Cost of Jet Engine Maintenance," Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), Hamburg, 2010.
- [91] Aircraft Technology Engineering and Maintenance, "Managing engine maintenance costs," *Aircraft Technology Engineering & Maintenance*, no. 86, pp. 42-48, February-March 2007.
- [92] CFM International, "CFM56-3 Workscope Planning Guide," CFMI, 2009.
- [93] S. Garson, *Managing an engine*, London: Airfinance Journal: Financing and Investing in Engines, 2009.

- [94] S. Ackert, "Basics of Aircraft Maintenance Reserve Development and Management: A Lessor's Perspective of Maintenance Reserve Theory and Best Practices," *Aircraft Monitor*, 2012.
- [95] D. Ting, "Reduced Thrust," Boeing, 2002.
- [96] W. Moeller, "CF34-8E Flight Operations Seminar," GE Aircraft Engines, Cincinnati, 2004.
- [97] P. J. Swatton, *Aircraft Performance Theory and Practice for Pilots*, 2nd ed., Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2008, pp. 1-496.
- [98] EASA, *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes CS-25*, European Aviation Safety Agency, 2015.
- [99] Airbus Industrie, "Getting To Grips With Aircraft Performance," *Flight Operations Support & Line Assistance*, Blagnac, 2002.
- [100] M. Moutoussamy, "Reduced Takeoff Thrust," *CFM Flight Operations Newsletter*, no. 2, pp. 6-8, Summer 2009.



# ПРИЛОГ 1

PhD Final.nb | 1

## MODEL ZA DONOŠENJE ODLUKA O OBIMU I SADRŽAJU RADOVA RADIONIČKOG ODRŽAVANJA TURBOFENSKOG MOTORA CFM56-3

### PODACI ZA PRORAČUN

```

llpLIMIT = Developer`ToPackedArray[
  {{30 000, 30 000, 30 000, 20 000, 20 000, 20 000, 20 000, 20 000, 20 000, 20 000,
    20 000, 20 000, 25 000, 25 000, 25 000, 25 000, 25 000, 25 000, 30 000, 25 000},
  {30 000, 24 900, 30 000, 20 000, 20 000, 20 000, 20 000, 18 000, 17 300, 15 800,
    18 500, 20 000, 25 000, 25 000, 25 000, 25 000, 25 000, 30 000, 25 000},
  {30 000, 20 100, 30 000, 20 000, 20 000, 20 000, 15 800, 15 000, 17 000, 15 100,
    16 600, 20 000, 25 000, 25 000, 25 000, 25 000, 25 000, 30 000, 25 000}}, Real];

llpPRICE = Developer`ToPackedArray[
  {186 800, 129 600, 116 000, 81 200, 126 300, 39 460, 284 100, 57 970, 101 500, 107 800,
    193 500, 79 510, 89 340, 102 400, 103 400, 89 420, 69 340, 174 700, 58 060}, Real];

m = SparseArray[N[{{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
  {1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
  {0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
  {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, {0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
    1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1,
    1, 1, 1, 1, 1},
  {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
  {1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
  {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
  {1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
  {0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
  {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
  {0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
  {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
  {1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
  {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}}]];

fanOHdecode = {"", 1, "", "", "", "", 1, 1, 1, 1, "", "", "", 1, 1, 1};
corePRdecode = {1, 1, "", "", "", 1, "", "", "", 1, "", "", "", "", ""};
coreOHdecode = {"", "", 1, 1, 1, "", 1, 1, 1, "", 1, 1, 1, 1, 1};
lptOHdecode = {"", "", "", "", "", 1, "", "", "", 1, 1, 1, 1, 1, 1};
fanLLPdecode = {"", 1, "", "", "", "", 1, 1, 1, 1, "", "", "", 1, 1, 1};
hpcLLPdecode = {"", "", 1, "", 1, "", 1, "", 1, "", 1, 1, "", 1};
hptLLPdecode = {"", "", "", 1, 1, "", "", 1, 1, "", "", 1, 1, "", 1};
lptLLPdecode = {"", "", "", "", "", 1, "", "", "", 1, 1, 1, 1, 1, 1};

```

## SHOP VISIT RATE

```

betas[k_ /; k == 1] := {0.0896, -0.0296, -0.0125, -0.03, 0.0205, 0.0112};
betas[k_ /; k >= 2] := {0.212, -0.078, -0.0235, -0.0524, 0.0151, 0.};

kategorija = {1, 2, 3};
tip = {1, 2, 3};

acceptableQ[thrust_, type_] :=
  Not[Or[thrust == 2 && type == 1, thrust == 3 && type == 1, thrust == 3 && type == 2]]

SetAttributes[rsvr, Listable]

rsvr[k_Integer, ratio_, thrust_, type_] := Infinity /; Not[acceptableQ[thrust, type]]

rsvr[k_Integer, ratio_, thrust_, type_] :=
  Total[betas[k] * {1, Log[ratio], DiscreteIndicator[thrust, 2, kategorija],
    DiscreteIndicator[thrust, 1, kategorija], DiscreteIndicator[type, 2, tip],
    DiscreteIndicator[type, 1, tip]}] /; acceptableQ[thrust, type]

```

## GLAVNE FUNKCIJE

## OSNOVNI PARAMETRI

```

availAIRCRAFT =
  Which[type[svNUM] == 1, {1, 3}, type[svNUM] == 2, {1, 2}, type[svNUM] == 3, {1, 2, 3}];

validCATEGORY = Which[type[svNUM] == 1 && (aircraft == 1 || aircraft == 3), {1},
  type[svNUM] == 2 && aircraft == 1, {1, 2}, type[svNUM] == 2 && aircraft == 2, {2},
  type[svNUM] == 3 && aircraft == 1, {1, 2}, type[svNUM] == 3 && aircraft == 2,
  {2, 3}, type[svNUM] == 3 && aircraft == 3, {1}];

d[k_Integer /; k >= svNUM] = m;
fl[k_Integer /; k > svNUM] = leg;
ut[k_Integer /; k > svNUM] = util;
type[k_Integer /; k > svNUM] = type[svNUM];

cslsv[k_Integer /; k == svNUM + 1] :=
  cslsv[k] = Developer`ToPackedArray[Transpose[Inner[Min, stubOUT[k - 1],
    N[Floor[1000 / (fl[k] * rsvr[k, fl[k], kategorija, type[k]])]], List],
  Flatten[MapAt[Reverse, Partition[Range[2 * (k - svNUM)], 2], -1]]]

cslsv[k_Integer /; k > svNUM + 1] := cslsv[k] = Developer`ToPackedArray[Transpose[
  Map[Inner[Min, #, N[Floor[1000 / (fl[k] * rsvr[k, fl[k], kategorija, type[k]])]],
  List] &, stubOUT[k - 1], {2 * (k - svNUM - 1)}],
  Flatten[MapAt[Reverse, Partition[Range[2 * (k - svNUM)], 2], -1]]]

```

```

operatedIN[k_Integer /; k == 1] :=
  operatedIN[k] = SparseArray[Table[If[i == category[1], cslsv[1], 0.], {i, 3}, {19}]]

operatedIN[k_Integer /; 1 < k ≤ svNUM] := operatedIN[k] = SparseArray[
  operatedOUT[k - 1] + Table[If[i == category[k], cslsv[k], 0.], {i, 3}, {19}]]

operatedIN[k_Integer /; k > svNUM] :=
  operatedIN[k] = SparseArray[Transpose[MapThread[
    Function[{x, y}, Table[MapAt[Plus[x[[i]], #] &, y, i], {i, 1, 3}]], {Transpose[
      cslsv[k], Flatten[MapAt[Reverse, Partition[Range[2 * (k - svNUM)], 2], -1]}],
      Normal[operatedOUT[k - 1]], 2 * k - 2 * svNUM - 1,
      Flatten[MapAt[Reverse, Partition[Range[2 * (k - svNUM + 1)], 2], k - svNUM]}]]]

remainingIN[k_Integer /; 1 ≤ k ≤ svNUM] := remainingIN[k] =
  Developer`ToPackedArray[Floor[Inner[Times, llpLIMIT, rslc[k], List]], Real]

remainingIN[k_Integer /; k > svNUM] := remainingIN[k] = Developer`ToPackedArray[
  Floor[Map[Inner[Times, llpLIMIT, #, List] &, rslc[k], {2 * (k - svNUM)}]], Real]

stubIN[k_Integer /; 1 ≤ k ≤ svNUM] :=
  stubIN[k] = Developer`ToPackedArray[Map[Min, remainingIN[k], {1}], Real]

stubIN[k_Integer /; k > svNUM] := stubIN[k] =
  Developer`ToPackedArray[Map[Min, remainingIN[k], {2 * (k - svNUM) + 1}], Real]

operatedOUT[k_Integer /; 1 ≤ k < svNUM] := operatedOUT[k] =
  SparseArray[Map[Times[#, Normal[1 - d[k]]] &, Normal[operatedIN[k]], {1}]]

operatedOUT[k_Integer /; k = svNUM] := operatedOUT[k] =
  SparseArray[Outer[Times, Normal[1 - d[k]], Normal[operatedIN[k]], 1]]

operatedOUT[k_Integer /; k > svNUM] :=
  operatedOUT[k] = SparseArray[Map[Outer[Times, Normal[1 - d[k]], #, 1] &,
    Normal[operatedIN[k]], {2 * (k - svNUM)}]]

remainingOUT[k_Integer /; 1 ≤ k < svNUM] :=
  remainingOUT[k] = Developer`ToPackedArray[Floor[Inner[Times, llpLIMIT,
    1 - Total[Divide[Normal[operatedOUT[k]], llpLIMIT]], List]], Real]

remainingOUT[k_Integer /; k ≥ svNUM] := remainingOUT[k] = Developer`ToPackedArray[
  Floor[Map[Inner[Times, llpLIMIT, 1 - Total[Divide[#, llpLIMIT]], List] &,
    Normal[operatedOUT[k]], {2 * (k - svNUM) + 1}], Real]

stubOUT[k_Integer /; 1 ≤ k < svNUM] :=
  stubOUT[k] = Developer`ToPackedArray[Map[Min, remainingOUT[k], {1}], Real]

stubOUT[k_Integer /; k ≥ svNUM] := stubOUT[k] =
  Developer`ToPackedArray[Map[Min, remainingOUT[k], {2 * (k - svNUM) + 1}], Real]

```

### RSLC

```

rslc[k_Integer /; 1 ≤ k ≤ svNUM] :=
  rslc[k] = 1 - Total[Divide[Normal[operatedIN[k]], llpLIMIT]];

```

```
rslc[k_Integer /; k > svNUM] :=
  rslc[k] = Developer`ToPackedArray[Map[(1 - Total[Divide[#, llpLIMIT]]) &,
    Normal[operatedIN[k]], {2 * (k - svNUM)}], Real];
```

#### INTERVAL YEARS, YEARS and LLP PRICE RATE

```
intervalYEARS[k_Integer /; k ≥ 1] := intervalYEARS[k] = Divide[cslsv[k], ut[k]]
years[k_Integer /; k == svNUM] := years[k] = 0.
years[k_Integer /; k == svNUM + 1] := years[k] = intervalYEARS[k]
years[k_Integer /; k > svNUM + 1] := years[k] = Developer`ToPackedArray[
  MapThread[Plus, {years[k - 1], intervalYEARS[k]}, 2 * (k - svNUM - 1)], Real]
llppriceRATE[k_Integer /; k == svNUM] := llppriceRATE[k] = 1.
llppriceRATE[k_Integer /; k > svNUM] := llppriceRATE[k] = Power[1.06, Floor[years[k]]]
```

#### LLP COST

```
costLLP[k_Integer /; k == svNUM] := costLLP[k] = Dot[Normal[d[k]], llpPRICE]
costLLP[k_Integer /; k > svNUM] :=
  costLLP[k] = Developer`ToPackedArray[Map[Dot[Normal[d[k]], #] &,
    Outer[Times, llppriceRATE[k], llpPRICE], {2 * (k - svNUM)}], Real]
```

#### STUB LLP COST

```
costLLPstub[k_Integer /; k == svNUM] :=
  costLLPstub[k] = Dot[Normal[d[k]], rslc[k] * llpPRICE]
costLLPstub[k_Integer /; k > svNUM] :=
  costLLPstub[k] = Developer`ToPackedArray[Map[Dot[Normal[d[k]], #] &,
    Times[rslc[k], Outer[Times, llppriceRATE[k], llpPRICE]], {2 * (k - svNUM)}], Real]
```

#### USED LLP COST

```
costLLPused[k_Integer /; k ≥ svNUM] := costLLPused[k] = costLLP[k] - costLLPstub[k]
```

#### PERFORMANCE RESTORATION COST

```
ws = SparseArray[N[{{0, 1, 0, 0}, {1, 1, 0, 0}, {0, 0, 1, 0}, {0, 0, 1, 0}, {0, 0, 1, 0},
  {0, 1, 0, 1}, {1, 0, 1, 0}, {1, 0, 1, 0}, {1, 0, 1, 0}, {1, 1, 0, 1}, {0, 0, 1, 1},
  {0, 0, 1, 1}, {0, 0, 1, 1}, {1, 0, 1, 1}, {1, 0, 1, 1}, {1, 0, 1, 1}}]];
wsPRICE[k_Integer /; k == 1] =
  Developer`ToPackedArray[{100 000, 900 000, 1 100 000, 225 000}], Real];
wsPRICE[k_Integer /; k ≥ 2] = Developer`ToPackedArray[
  {110 000, 1 020 000, 1 240 000, 250 000}], Real];
costPR[k_Integer /; k == svNUM] := costPR[k] = Dot[Normal[ws], wsPRICE[k]]
```

```
costPR[k_Integer /; k > svNUM] :=
  costPR[k] = ConstantArray[Dot[Normal[ws], wsPRICE[k]], Dimensions[cslsv[k]]]
```

### SHOP VISIT COST

```
costSV[k_Integer /; k ≥ svNUM] := costSV[k] = costLLF[k] + costPR[k]
```

### SUM OF SHOP VISIT COSTS

```
svcTOTAL[n_Integer /; n = 1] := svcTOTAL[n] = costSV[svNUM]
svcTOTAL[n_Integer /; n > 1] :=
  svcTOTAL[n] = Developer`ToPackedArray[Transpose[MapThread[Plus,
    {svcTOTAL[n - 1], Transpose[costSV[n + svNUM - 1], Flatten[MapAt[Reverse,
      Partition[Range[2 * n - 1], 2, 2, {1, 1}, {}], n - 1]]], 2 * n - 3,
    Flatten[MapAt[Reverse, Partition[Range[2 * n - 1], 2, 2, {1, 1}, {}], n - 1]]], Real]
```

### SUM OF CYCLES

```
cyclesTOTAL[n_Integer /; n = 1] := cyclesTOTAL[n] = cslsv[svNUM]
cyclesTOTAL[n_Integer /; n = 2] := cyclesTOTAL[n] = cyclesTOTAL[n - 1] + cslsv[svNUM + 1]
cyclesTOTAL[n_Integer /; n > 2] := cyclesTOTAL[n] = Developer`ToPackedArray[
  MapThread[Plus, {cyclesTOTAL[n - 1], cslsv[n + svNUM - 1]}, 2 * (n - 2)], Real]
```

### SUM OF HOURS

```
hoursTOTAL[n_Integer /; n = 1] := hoursTOTAL[n] = cslsv[svNUM] * fl[svNUM]
hoursTOTAL[n_Integer /; n = 2] :=
  hoursTOTAL[n] = hoursTOTAL[n - 1] + cslsv[svNUM + 1] * fl[svNUM + 1]
hoursTOTAL[n_Integer /; n > 2] :=
  hoursTOTAL[n] = Developer`ToPackedArray[MapThread[Plus[#1, #2 * fl[n + svNUM - 1]] &,
    {hoursTOTAL[n - 1], cslsv[n + svNUM - 1]}, 2 * (n - 2)], Real]
```

### SUM OF TOTAL SHOP VISIT COSTS PER CYCLES

```
svcTOTALperCYCLE[n_Integer /; n ≥ 1] := svcTOTALperCYCLE[n] =
  Quiet[Divide[svcTOTAL[n], cyclesTOTAL[n]] /. ComplexInfinity → Infinity]
```

### SUM OF TOTAL SHOP VISIT COSTS PER HOURS

```
svcTOTALperHOUR[n_Integer /; n ≥ 1] := svcTOTALperHOUR[n] =
  Quiet[Divide[svcTOTAL[n], hoursTOTAL[n]] /. ComplexInfinity → Infinity]
```

## VALID DECISIONS FOR SINGLE CATEGORY OPERATION

## SINGLE CAT 1 - LOWER THRUST RATING

```

validDECISIONSsingleCAT1[n_Integer //; n == 1] :=
validDECISIONSsingleCAT1[n] = Map[Developer`ToPackedArray[
  Cases[SparseArray[UnitStep[stubOUT[n + svNUM - 1] - #]]["NonzeroPositions"],
    Flatten[MapAt[Reverse, ConstantArray[{First[validCATEGORY], _}, n], n],
      1]]] &, minLLPbuildLIST]

validDECISIONSsingleCAT1[n_Integer //; n > 1] :=
validDECISIONSsingleCAT1[n] = Map[Developer`ToPackedArray[
  Cases[SparseArray[Fold[MapThread[Times, {#2[[1]], Transpose[#1, #2[[2]]}],
    #2[[3]]] &, UnitStep[stubOUT[svNUM] - #], Transpose[
    {Map[Function[{x}, UnitStep[stubOUT[svNUM + x - 1] - #]}, Range[2, n]],
    Map[Flatten[MapAt[Reverse, Partition[Range[2 * (# - 1)], 2], #-1]] &,
    Range[2, n]], Join[{1}, 2 * (# - 2) &@Range[3, n]]]]]]["NonzeroPositions"],
    Flatten[MapAt[Reverse, ConstantArray[
    {First[validCATEGORY], _}, n], n], 1]]] &, minLLPbuildLIST]

```

## SINGLE CAT 2 - HIGHER THRUST RATING

```

validDECISIONSsingleCAT2[n_Integer //; n ≥ 1 && Length[validCATEGORY] == 1] := {}

validDECISIONSsingleCAT2[n_Integer //; n == 1] :=
validDECISIONSsingleCAT2[n] = Map[Developer`ToPackedArray[
  Cases[SparseArray[UnitStep[stubOUT[n + svNUM - 1] - #]]["NonzeroPositions"],
    Flatten[MapAt[Reverse, ConstantArray[{Last[validCATEGORY], _}, n], n],
      1]]] &, Drop[minLLPbuildLIST, -1]]

validDECISIONSsingleCAT2[n_Integer //; n > 1] :=
validDECISIONSsingleCAT2[n] = Map[Developer`ToPackedArray[
  Cases[SparseArray[Fold[MapThread[Times, {#2[[1]], Transpose[#1, #2[[2]]}],
    #2[[3]]] &, UnitStep[stubOUT[svNUM] - #], Transpose[
    {Map[Function[{x}, UnitStep[stubOUT[svNUM + x - 1] - #]}, Range[2, n]], Map[
    Flatten[MapAt[Reverse, Partition[Range[2 * (# - 1)], 2], #-1]] &, Range[
    2, n]], Join[{1}, 2 * (# - 2) &@Range[3, n]]]]]]["NonzeroPositions"],
    Flatten[MapAt[Reverse, ConstantArray[{Last[validCATEGORY], _}, n], n],
      1]]] &, Drop[minLLPbuildLIST, -1]]

```

## VALID DECISIONS FOR MIXED CATEGORY OPERATION

```

validMIXED[n_Integer //; n ≥ 1 && Length[validCATEGORY] == 1] := {}

validMIXED[n_Integer //; n == 1] := validMIXED[n] = Map[
  Developer`ToPackedArray[Cases[SparseArray[UnitStep[stubOUT[n + svNUM - 1] - #]]["NonzeroPositions"],
    Alternatives@@Map[Insert[Riffle[#, _, _, -2] &,
    Tuples[validCATEGORY, n]]]]] &, minLLPbuildLIST]

```

```

validMIXED[n_Integer /; n > 1] :=
  validMIXED[n] = Map[Developer`ToPackedArray[Cases[SparseArray[
    Fold[MapThread[Times, {#2[[1]], Transpose[#1, #2[[2]]}], #2[[3]]] &,
    UnitStep[stubOUT[svNUM] - #], Transpose[
      {Map[Function[{x}, UnitStep[stubOUT[svNUM + x - 1] - #]}, Range[2, n]],
      Map[Flatten[MapAt[Reverse, Partition[Range[2 * (# - 1)], 2], #-1]]] &,
      Range[2, n]], Join[{1}, 2 * (# - 2) &@Range[3, n]]]]][
    "NonzeroPositions"], Alternatives@@Map[Insert[Riffle[#, _, _, -2] &,
    Tuples[validCATEGORY, n][[2 ;; -2]]]]] &, minLLPbuildLIST]

```

### OPTIMAL DECISIONS FOR SINGLE CATEGORY OPERATION

```

optimalDECISIONSsingleCAT1cycle[n_Integer /; n ≥ 1] :=
  optimalDECISIONSsingleCAT1cycle[n] =
    Pick[validDECISIONSsingleCAT1[n], Normal[Map[SparseArray[Unitize[
      Extract[svcTOTALperCYCLE[n], #] - Min[Extract[svcTOTALperCYCLE[n], #]]] &,
      Drop[validDECISIONSsingleCAT1[n], None, None, -1]]], 0]
optimalDECISIONSsingleCAT2cycle[n_Integer /; n ≥ 1 && Length[validCATEGORY] == 1] := {}
optimalDECISIONSsingleCAT2cycle[n_Integer /; n ≥ 1] :=
  optimalDECISIONSsingleCAT2cycle[n] =
    Pick[validDECISIONSsingleCAT2[n], Normal[Map[SparseArray[Unitize[
      Extract[svcTOTALperCYCLE[n], #] - Min[Extract[svcTOTALperCYCLE[n], #]]] &,
      Drop[validDECISIONSsingleCAT2[n], None, None, -1]]], 0]
optimalDECISIONSsingleCAT1hour[n_Integer /; n ≥ 1] :=
  optimalDECISIONSsingleCAT1hour[n] =
    Pick[validDECISIONSsingleCAT1[n], Normal[Map[SparseArray[Unitize[
      Extract[svcTOTALperHOURL[n], #] - Min[Extract[svcTOTALperHOURL[n], #]]] &,
      Drop[validDECISIONSsingleCAT1[n], None, None, -1]]], 0]
optimalDECISIONSsingleCAT2hour[n_Integer /; n ≥ 1 && Length[validCATEGORY] == 1] := {}
optimalDECISIONSsingleCAT2hour[n_Integer /; n ≥ 1] :=
  optimalDECISIONSsingleCAT2hour[n] =
    Pick[validDECISIONSsingleCAT2[n], Normal[Map[SparseArray[Unitize[
      Extract[svcTOTALperHOURL[n], #] - Min[Extract[svcTOTALperHOURL[n], #]]] &,
      Drop[validDECISIONSsingleCAT2[n], None, None, -1]]], 0]

```

### OPTIMAL DECISIONS FOR MIXED CATEGORY OPERATION

```

optimalMIXEDcycle[n_Integer /; n ≥ 1 && Length[validCATEGORY] == 1] := {}
optimalMIXEDcycle[n_Integer /; n ≥ 1] :=
  optimalMIXEDcycle[n] = Pick[validMIXED[n], Normal[Map[SparseArray[Unitize[
    Extract[svcTOTALperCYCLE[n], #] - Min[Extract[svcTOTALperCYCLE[n], #]]] &,
    Drop[validMIXED[n], None, None, -1]]], 0]
optimalMIXEDhour[n_Integer /; n ≥ 1 && Length[validCATEGORY] == 1] := {}

```

```

optimalMIXEDhour[n_Integer /; n >= 1] :=
  optimalMIXEDhour[n] = Pick[validMIXED[n], Normal[Map[SparseArray[Unitize[
    Extract[svcTOTALperHOUR[n], #] - Min[Extract[svcTOTALperHOUR[n], #]]] &,
    Drop[validMIXED[n], None, None, -1]]], 0]

```

## ISTORIJA RADA MOTORA

UPIŠI REDNI BROJ AKTUELNE POSETE RADIONICI "svNUM":

```
svNUM = 3;
```

UNESI PODATKE O ISTORIJI RADA MOTORA:

```

Grid[Prepend[
  Delete[Table[{cslsv[i], fl[i], ut[i], type[i], category[i], d[i]}, {i, 1, svNUM}],
    {svNUM, 6}], {Text["Za dalji rad programa potrebno je uneti sledece
    podatke o istoriji rada motora:"], SpanFromLeft, SpanFromLeft}]]

```

Za dalji rad programa potrebno je uneti sledece podatke o istoriji rada motora:

```

cslsv[1] fl[1] ut[1] type[1] category[1] d[1]
cslsv[2] fl[2] ut[2] type[2] category[2] d[2]
cslsv[3] fl[3] ut[3] type[3] category[3]

```

```
cslsv[1] = N[7000];
```

```
cslsv[2] = N[5000];
```

```
cslsv[3] = N[4000];
```

```
fl[1] = 2.1;
```

```
fl[2] = 0.9;
```

```
fl[3] = 1.3;
```

```
ut[1] = N[1250];
```

```
ut[2] = N[1250];
```

```
ut[3] = N[1250];
```

```
type[1] = 3;
```

```
type[2] = 3;
```

```
type[3] = 3;
```

```
category[1] = 3;
```

```
category[2] = 3;
```

```
category[3] = 3;
```

```
d[1] = SparseArray[N[{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}]];
```



```
d[2] = SparseArray[N[{0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0}]];
```

## IZBOR PLANIRANOG NAČINA KORIŠĆENJA MOTORA

UPIŠI TIP AVIONA NA KOJEM SE PLANIRA UGRADNJA I UPOTREBA MOTORA "aircraft":

```
aircraft = 2;
```

UPIŠI PROSEČNU DUŽINU LETA (FLIGHT LENGTH) NA KOJOJ SE PLANIRA UPOTEBA MOTORA "leg":

```
leg = 1.4;
```

UPIŠI PLANIRAN GODIŠNJI NALET MOTORA U CIKLUSIMA "util":

```
util = N[1500];
```

LISTA ZA ITERACIJU VREDNOSTI "minLLPbuild" ZA SVAKI IZABRANI FLIGHT LEG:

```
minLLPbuildLIST =
Developer`ToPackedArray[Join[Range[2000, Floor[1 / (fl[svNUM + 1] * rsvr[svNUM + 1,
fl[svNUM + 1], Last[validCATEGORY], type[svNUM + 1]]) * 1000, 1000],
Floor[1000 / (fl[svNUM + 1] * rsvr[svNUM + 1, fl[svNUM + 1],
Reverse[validCATEGORY], type[svNUM + 1]])]], Real]
{2000., 3000., 3845., 4402.}
```

## PRIKAZ REZULTATA

```
optimalDECISIONSsingleCAT1cycle[1]
{{{1, 2}}, {{1, 2}}, {{1, 2}}, {{1, 2}}}

optimalDECISIONSsingleCAT1hour[1]
{{{1, 2}}, {{1, 2}}, {{1, 2}}, {{1, 2}}}

optimalDECISIONSsingleCAT1cycle[2]
{{{2, 2, 1, 2}}, {{2, 2, 1, 2}}, {{2, 2, 1, 2}}, {{2, 2, 1, 2}}}

optimalDECISIONSsingleCAT1hour[2]
{{{2, 2, 1, 2}}, {{2, 2, 1, 2}}, {{2, 2, 1, 2}}, {{2, 2, 1, 2}}}

optimalDECISIONSsingleCAT1cycle[3]
{{{2, 10, 2, 1, 1, 2}}, {{2, 15, 2, 1, 1, 2}}, {{2, 15, 2, 1, 1, 2}}, {{2, 16, 2, 1, 1, 2}}}
```

```

optimalDECISIONSsingleCAT1hour [3]
{{2, 10, 2, 1, 1, 2}}, {{2, 15, 2, 1, 1, 2}}, {{2, 15, 2, 1, 1, 2}}, {{2, 16, 2, 1, 1, 2}}

optimalDECISIONSsingleCAT1cycle [4]
{{{2, 16, 2, 1, 2, 1, 1, 2}}, {{2, 10, 2, 5, 2, 1, 1, 2}},
 {{2, 10, 2, 5, 2, 1, 1, 2}}, {{2, 10, 2, 5, 2, 1, 1, 2}}}

optimalDECISIONSsingleCAT1hour [4]
{{{2, 16, 2, 1, 2, 1, 1, 2}}, {{2, 10, 2, 5, 2, 1, 1, 2}},
 {{2, 10, 2, 5, 2, 1, 1, 2}}, {{2, 10, 2, 5, 2, 1, 1, 2}}}

optimalDECISIONSsingleCAT2cycle [1]
{{1, 3}}, {{1, 3}}, {{1, 3}}

optimalDECISIONSsingleCAT2hour [1]
{{1, 3}}, {{1, 3}}, {{1, 3}}

optimalDECISIONSsingleCAT2cycle [2]
{{{3, 2, 1, 3}}, {{3, 2, 1, 3}}, {{3, 2, 1, 3}}}

optimalDECISIONSsingleCAT2hour [2]
{{{3, 2, 1, 3}}, {{3, 2, 1, 3}}, {{3, 2, 1, 3}}}

optimalDECISIONSsingleCAT2cycle [3]
{{{3, 10, 3, 1, 1, 3}}, {{3, 10, 3, 1, 1, 3}}, {{3, 16, 3, 1, 1, 3}}}

optimalDECISIONSsingleCAT2hour [3]
{{{3, 10, 3, 1, 1, 3}}, {{3, 10, 3, 1, 1, 3}}, {{3, 16, 3, 1, 1, 3}}}

optimalDECISIONSsingleCAT2cycle [4]
{{{3, 16, 3, 1, 3, 1, 1, 3}}, {{3, 16, 3, 1, 3, 1, 1, 3}}, {{3, 10, 3, 5, 3, 1, 1, 3}}}

optimalDECISIONSsingleCAT2hour [4]
{{{3, 16, 3, 1, 3, 1, 1, 3}}, {{3, 16, 3, 1, 3, 1, 1, 3}}, {{3, 10, 3, 5, 3, 1, 1, 3}}}

optimalMIXEDcycle [1]
{{1, 2}, {1, 3}}, {{1, 2}, {1, 3}}, {{1, 2}, {1, 3}}, {{1, 2}, {1, 3}}

optimalMIXEDhour [1]
{{1, 2}, {1, 3}}, {{1, 2}, {1, 3}}, {{1, 2}, {1, 3}}, {{1, 2}, {1, 3}}

optimalMIXEDcycle [2]
{{2, 2, 1, 3}}, {{2, 2, 1, 3}}, {{2, 2, 1, 3}}, {{2, 2, 1, 3}}

optimalMIXEDhour [2]
{{2, 2, 1, 3}}, {{2, 2, 1, 3}}, {{2, 2, 1, 3}}, {{2, 2, 1, 3}}

```

**optimalMIXEDcycle[3]**

```
{{{2, 10, 2, 1, 1, 3}},  
  {{2, 10, 3, 1, 1, 2}, {2, 10, 3, 1, 1, 3}, {3, 10, 2, 1, 1, 2}, {3, 10, 2, 1, 1, 3}},  
  {{2, 15, 3, 1, 1, 2}, {3, 15, 2, 1, 1, 2}}, {{2, 16, 2, 1, 1, 3}}}
```

**optimalMIXEDhour[3]**

```
{{{2, 10, 2, 1, 1, 3}},  
  {{2, 10, 3, 1, 1, 2}, {2, 10, 3, 1, 1, 3}, {3, 10, 2, 1, 1, 2}, {3, 10, 2, 1, 1, 3}},  
  {{2, 15, 3, 1, 1, 2}, {3, 15, 2, 1, 1, 2}}, {{2, 16, 2, 1, 1, 3}}}
```

**optimalMIXEDcycle[4]**

```
{{{2, 16, 2, 1, 2, 1, 1, 3}}, {{2, 10, 2, 5, 2, 1, 1, 3}},  
  {{2, 10, 2, 5, 2, 1, 1, 3}}, {{2, 10, 2, 5, 2, 1, 1, 3}}}
```

**optimalMIXEDhour[4]**

```
{{{2, 16, 2, 1, 2, 1, 1, 3}}, {{2, 10, 2, 5, 2, 1, 1, 3}},  
  {{2, 10, 2, 5, 2, 1, 1, 3}}, {{2, 10, 2, 5, 2, 1, 1, 3}}}
```

## ПРИЛОГ 2

| ПАРАМЕТРИ                  | ВРЕДНОСТИ* И ДИМЕНЗИЈЕ ПАРАМЕТАРА |      |         |                |                   |                        |
|----------------------------|-----------------------------------|------|---------|----------------|-------------------|------------------------|
|                            | 1*                                | 2*   | 3=svNUM | 4*             | 5*                | 6*                     |
| <i>k</i>                   | 1*                                | 2*   | 3=svNUM | 4*             | 5*                | 6*                     |
| <i>n</i>                   |                                   |      | 1*      | 2*             | 3*                | 4*                     |
| <i>k-svNUM</i>             |                                   |      | 0*      | 1*             | 2*                | 3*                     |
| <i>f[k]</i>                | 1                                 | 1    | 1       | 1              | 1                 | 1                      |
| <i>ut[k]</i>               | 1                                 | 1    | 1       | 1              | 1                 | 1                      |
| <i>type[k]</i>             | 1                                 | 1    | 1       | 1              | 1                 | 1                      |
| <i>category[k]</i>         | 1                                 | 1    | 1       | (имплицитно 3) | (имплицитно 3)    | (имплицитно 3)         |
| <i>llpLIMIT</i>            | 3x19                              | 3x19 | 3x19    | 3x19           | 3x19              | 3x19                   |
| <i>llpPRICE</i>            | 19                                | 19   | 19      | 19             | 19                | 19                     |
| <i>d[k]</i>                | 19                                | 19   | 16x19   | 16x19          | 16x19             | 16x19                  |
| <i>rslc[k]</i>             | 19                                | 19   | 19      | 3x16x19        | 3x16x3x16x19      | 3x16x3x16x3x16x19      |
| <i>stubIN[k]</i>           | 3                                 | 3    | 3       | 3x16x3         | 3x16x3x16x3       | 3x16x3x16x3x16x3       |
| <i>stubOUT[k]</i>          | 3                                 | 3    | 16x3    | 3x16x16x3      | 3x16x3x16x16x3    | 3x16x3x16x3x16x16x3    |
| <i>cslsv[k]</i>            | 1                                 | 1    | 1       | 3x16           | 3x16x3x16         | 3x16x3x16x3x16         |
| <i>intervalYEARS[k]</i>    | 1                                 | 1    | 1       | 3x16           | 3x16x3x16         | 3x16x3x16x3x16         |
| <i>years[k]</i>            |                                   |      | 1       | 3x16           | 3x16x3x16         | 3x16x3x16x3x16         |
| <i>llppriceRATE[k]</i>     |                                   |      | 1       | 3x16           | 3x16x3x16         | 3x16x3x16x3x16         |
| <i>cyclesTOTAL[n]</i>      |                                   |      | 1       | 3x16           | 3x16x3x16         | 3x16x3x16x3x16         |
| <i>operatedIN[k]</i>       | 3x19                              | 3x19 | 3x19    | 3x16x3x19      | 3x16x3x16x3x19    | 3x16x3x16x3x16x3x19    |
| <i>remainingIN[k]</i>      | 3x19                              | 3x19 | 3x19    | 3x16x3x19      | 3x16x3x16x3x19    | 3x16x3x16x3x16x3x19    |
| <i>operatedOUT[k]</i>      | 3x19                              | 3x19 | 16x3x19 | 3x16x16x3x19   | 3x16x3x16x16x3x19 | 3x16x3x16x3x16x16x3x19 |
| <i>remainingOUT[k]</i>     | 3x19                              | 3x19 | 16x3x19 | 3x16x16x3x19   | 3x16x3x16x16x3x19 | 3x16x3x16x3x16x16x3x19 |
| <i>costSV[k]</i>           |                                   |      | 16      | 3x16x16        | 3x16x3x16x16      | 3x16x3x16x3x16x16      |
| <i>svcTOTAL[n]</i>         |                                   |      | 16      | 3x16x16        | 3x16x3x16x16      | 3x16x3x16x3x16x16      |
| <i>svcTOTALperCYCLE[n]</i> |                                   |      | 16      | 3x16x16        | 3x16x3x16x16      | 3x16x3x16x3x16x16      |

---

## БИОГРАФИЈА АУТОРА

---

Бранимир Стојиљковић је рођен 06.11.1976. године у Лесковцу. Основну школу је завршио у Грделици, 1991. године, а математичку гимназију „Стеван Јаковљевић“ у Власотинцу, 1995. године. Машински факултет Универзитета у Београду уписао је школске 1995/1996. године. Дипломирао је 2002. године на смеру Ваздухопловство, са просечном оценом током студија 8.94 (осам и 94/100). Дипломски рад, под називом „Пројектовање подзвучних аеротунела“, из предмета „Аеродинамичке конструкције“, одбранио је са оценом 10 (десет).

На позицији студента истраживача, 1999. године успешно је обавио стручну праксу у одељењу „*Aircraft Flight Safety Provision Systems*“, department no. 103, „Московског Авијационог Института“ (МАИ) у Русији. Након дипломирања, служио је војни рок 2003. године у Школи резервних официра на Војној Академији у Жаркову, у оквиру Ваздухопловно-техничке службе, где је стекао практична знања из области радио-навигационих система.

Последипломске студије на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду, на смеру за Ваздушни саобраћај и транспорт, уписао је школске 2004/2005. године. Све испите последипломских студија положио је са просечном оценом 10 (десет). Магистарску тезу под називом „Анализа утицаја динамике коришћења флоте ваздухоплова на процес и трошкове одржавања турбо-фенских мотора“ одбранио је 12. јула 2010. године на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду.

---

У звање асистента-приправника за ужу научну област „Ваздухопловна превозна средства“ на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду, изабран је 01.10.2004. године, а у звање асистента 05.11.2010. године.

Од школске 2004/2005. до школске 2006/2007. године био је ангажован на извођењу вежби из предмета „Погонске групе ваздухоплова“ и „Инструменти и опрема ваздухоплова“ студијског програма за Ваздушни саобраћај, школске 2006/2007. године на извођењу вежби из предмета „Основи програмирања“, а од школске 2007/2008. до школске 2008/2009. године на извођењу вежби из предмета „Погонске групе ваздухоплова“ студентима - питомцима Војне академије у оквиру студијског програма Официр пилот-инжењер ваздушног саобраћаја.

Тренутно је ангажован на основним академским студијама за држање вежби из предмета „Погонске групе ваздухоплова“, „Инструменти и опрема ваздухоплова 1“, „Инструменти и опрема ваздухоплова 2“ и „Механика лета 1“. На мастер академским студијама ангажован је за држање вежби из предмета „Одржавање и поузданост ваздухоплова“ и „Управљање одржавањем ваздухоплова“.

Током досадашњег рада, као аутор или коаутор објавио је укупно 27 радова из области техничке експлоатације ваздухопловних превозних средстава, учествовао у изради једне студије у оквиру Националног програма енергетске ефикасности и два пројекта у оквиру Програма истраживања у области технолошког развоја Министарства науке Републике Србије. Течно говори, чита и пише енглески језик.

---

## Изјава о ауторству

Потписани мр Бранимир Стојиљковић

Број индекса \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**МЕТОДОЛОГИЈА ЗА СТРАТЕШКО ПЛАНИРАЊЕ И ОДЛУЧИВАЊЕ У**  
**ПРОЦЕСУ ОДРЖАВАЊА ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

**Потпис докторанда**

У Београду, \_\_\_\_\_





---

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

**МЕТОДОЛОГИЈА ЗА СТРАТЕШКО ПЛАНИРАЊЕ И ОДЛУЧИВАЊЕ У  
ПРОЦЕСУ ОДРЖАВАЊА ТУРБОФЕНСКИХ МОТОРА**

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

**Потпис докторанда**

У Београду, \_\_\_\_\_