SISTEM ZA NADZOR OBRABE REZILNEGA ORODJA Z UPORABO TRIOSNEGA POSPEŠKOMERA

Jože Ravničan

Doktorska disertacija
Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana
Ljubljana, Slovenija

Mentor: prof. dr. Matjaž Gams, MPŠ in Institut ″Jožef Stefan″, Ljubljana, Slovenija

Komisija za oceno doktorske disertacije:
prof. dr. Gregor Papa, predsednik, MPŠ in Institut ″Jožef Stefan″, Ljubljana, Slovenija
prof. dr. Jurij Tasič, član, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija
prof. dr. Karl Gotlih, član, Univerza v Mariboru, Maribor, Slovenija

MEDNARODNA PODIPLOMSKA ŠOLA JOŽEFA STEFANA
JOŽEF STEFAN INTERNATIONAL POSTGRADUATE SCHOOL



Jože Ravničan

SISTEM ZA NADZOR OBRABE REZILNEGA ORODJA Z UPORABO TRIOSNEGA POSPEŠKOMERA

Doktorska disertacija

CUTTING TOOL LIFE MONITORING SYSTEM USING TRIAXIAL ACCELEROMETER

Doctoral Dissertation

Mentor: prof. dr. Matjaž Gams

Ljubljana, Slovenija, oktober 2025

Za Rosano, Enjo in Mašo

Zahvala

V prvi vrsti se želim iskreno zahvaliti prof. dr. Bogdanu Filipiču, ki je bil moj prvi mentor in me prvi usmerjal na moji raziskovalni poti. Njegova podpora, vodstvo in vzpodbudne besede so mi omogočili prve raziskovalne korake ter me vpeljali v svet znanstvenih raziskav Instituta ″Jožef Stefan″.

Še posebej gre zahvala profesorju dr. Matjažu Gamsu, mojemu mentorju doktorske disertacije, za njegovo strokovno podporo, dragocene nasvete in usmeritve, ki so mi bili v pomoč pri oblikovanju in razvoju mojega raziskovalnega dela. Njegova izkušnja, kritično mišljenje in spodbuda so bili ključni za uspešen zaključek te naloge. Pomagal mi je, da sem ostal osredotočen, in me spodbujal, kadar sem izgubil zagon. Delo z njim štejem za privilegij in se veselim še kakšnega sodelovanja tudi v prihodnje.

Hvala tudi podjetju UNIOR, d. d., za zaupanje in financiranje, ki mi je skozi R&R projekt omogočilo dostop do potrebnih virov, raziskovalnih možnosti, aplikativno podporo ter implementacijo raziskovalnih rezultatov v prakso.

Nenazadnje se želim iskreno zahvaliti tudi Anžetu Marinku z Instituta ″Jožef Stefan″, ki mi je s svojim matematičnim in računalniškim znanjem nudil pomembno podporo pri tehničnih in aplikativnih vidikih mojega raziskovanja.

Iskrena hvala tudi moji družini za neskončno podporo, razumevanje in motivacijo skozi celotno študijsko obdobje. Vaše besede spodbude so mi vedno dajale moč v težjih trenutkih. Brez vaše potrpežljivosti in vere vame ne bi bilo mogoče doseči tega cilja.

Zahvala pa še vsem ostalim, ki ste s svojo prisotnostjo, podporo in spodbudo prispevali k temu, da je nastala ta doktorska disertacija.

Povzetek

V industriji mehanske obdelave rezilna orodja predstavljajo ključen dejavnik kakovosti, stroškovne učinkovitosti in zanesljivosti proizvodnih procesov. Nepravočasna menjava orodij lahko vodi bodisi v prezgodnje zamenjave, kar povzroča neupravičene stroške, bodisi v prepozno ukrepanje, kar ogroža kakovost izdelkov, varnost strojev in stabilnost proizvodnje. Tradicionalne metode spremljanja obrabe, ki temeljijo na subjektivni oceni ali vnaprej določenih intervalih menjave, pogosto ne ustrezajo zahtevam sodobne industrije 4.0.

V tej disertaciji predstavljamo celovit pristop k napovedovanju življenjske dobe rezilnega orodja z uporabo vibracijskih podatkov, zajetih s triosnim pospeškomerom, v kombinaciji z algoritmi strojnega učenja. Sistem je zasnovan za uporabo v realnem industrijskem okolju in temelji na zanesljivem zajemu signalov, ekstrakciji značilnosti, učenju napovednih modelov in enostavni interpretaciji rezultatov za potrebe operaterjev. Poleg razvoja algoritma smo oblikovali uporabniški vmesnik za sprotno spremljanje stanja orodja in vizualno opozarjanje na potrebo po menjavi.

Rezultati eksperimentalnega preverjanja v realnih pogojih proizvodnje kažejo visoko korelacijo med vibracijskimi signali in stopnjo obrabe, kar potrjuje uporabnost razvitega sistema za napoved obrabe rezilnega orodja. Disertacija s tem prispeva k razvoju trajnostnih in pametnih proizvodnih rešitev, ki povečujejo učinkovitost, zmanjšujejo izpade in omogočajo bolj informirano odločanje v industrijski praksi.

Abstract

In modern manufacturing, cutting tools play a pivotal role in ensuring product quality, process reliability, and cost efficiency. Premature or delayed tool replacement can lead to unnecessary expenses, compromise product quality, machine safety and production stability. Conventional approaches, such as fixed replacement intervals or visual inspections, often fail to provide accurate insights into the actual tool condition, especially in high-throughput industrial environments.

This doctoral dissertation proposes a comprehensive approach to tool life prediction based on vibration analysis using triaxial accelerometer, combined with machine learning algorithms. The developed system enables real-time monitoring of tool wear, allowing predictive decisions that minimize production downtime and enhance overall process efficiency. The solution integrates sensor signal acquisition, feature extraction, model training, and operator-friendly visualization to support decision-making in real-world machining conditions.

Experimental validation conducted in an industrial setting demonstrates a strong correlation between vibration patterns and the tool's wear state. The predictive models achieve high accuracy, enabling timely alerts for tool replacement and supporting the optimization of machining parameters. The system is designed to be cost-effective, adaptable to various machines and processes, and easily integrated into existing manufacturing infrastructure.

The findings contribute to the development of intelligent, sustainable manufacturing systems and offer a practical tool for increasing productivity, reducing material waste, and enhancing operational decision-making through data-driven insights.

Kazalo

Slike **xvii**

Tabele **xix**

Kratice **xxi**

Simboli **xxiii**

1 Uvod **1**
1.1 Ozadje, motivacija in namen ... 1
1.2 Problemi in izzivi pri napovedovanju življenjske dobe rezilnega orodja ... 3
1.3 Cilji, podcilji in hipoteze ... 5
1.3.1 Podcilj 1 – podrobnejša analiza obrabljenosti rezilnega orodja ... 5
1.3.2 Podcilj 2 – analiza in izbira optimalnega pospeškomera ter določitev njegove lokacije ... 5
1.3.3 Podcilj 3 – analiza ustrezne tehnike za pridobivanje podatkov ... 5
1.3.4 Podcilj 4 – razvoj aplikacije za napovedovanje življenjske dobe orodja ter iskanje kakovostnih in stroškovnih optimumov ... 6
1.3.5 Hipoteza 1 – z uporabo triosnega pospeškomera in upoštevanjem spremenljivih vibracij, je možno napovedovati življenjsko dobo orodja ... 6
1.3.6 Hipoteza 2 – razviti sistem omogoča dovolj natančno napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja ... 6
1.3.7 Hipoteza 3 – razviti sistem omogoča iskanje stroškovnih in kakovostnih optimumov ... 7
1.4 Utemeljitev znanstvene relevantnosti ... 7
1.5 Pregled vsebine doktorske disertacije ... 8

2 Obstoječe metode in sorodna dela **11**
2.1 Obstoječe metode za spremljanje obrabe orodja ... 11
2.1.1 Vizualni pregled ... 11
2.1.2 Direktne metode ... 12
2.1.3 Posredne metode ... 13
2.2 Strojno učenje za napovedovanje v proizvodnji ... 19
2.3 Primerjava različnih pristopov in ključne ugotovitve v raziskavah ... 24

3 Teoretične osnove **25**
3.1 Tehnologija odrezavanja ... 25
3.1.1 Proces odrezavanja - splošno ... 25
3.1.2 Vrste rezilnih orodij ... 29
3.1.3 Vrste rezilnih materialov ... 33
3.2 Mehanizmi obrabe rezilnega orodja ... 37
3.2.1 Splošno o obrabi orodja ... 37

3.2.2 Merila obstojnosti in obrabe orodja ... 37
3.2.3 Slabšanje orodja v relaciji z obrabo ... 38
3.3 Vibracije v strojih in vpliv na obrabo ... 42
3.3.1 Osnove in dejavniki ... 42
3.3.2 Vrste vibracij pri strojni obdelavi ... 42
3.3.3 Povezava med vibracijami in obrabo orodja ... 43

4 Metodologija 45
4.1 Arhitektura sistema za spremljanje obrabe ... 45
4.2 Izbira triosnega pospeškomera ... 46
4.2.1 Specifikacije pospeškomerov ... 46
4.2.2 Namestitev pospeškomera ... 48
4.3 Zajem podatkov ... 49
4.3.1 Nastavitve zajema ... 50
4.3.2 Obdelava signalov ... 51
4.3.3 Primerjava z uporabo matrike razdalj ... 54
4.4 Uporabljeni algoritmi strojnega učenja ... 57
4.4.1 Priprava podatkov ... 58
4.4.2 Gradnja modelov in glasovanje ... 59

5 Meritve in analiza podatkov (empirično) 63
5.1 Eksperimentalna postavitev ... 63
5.1.1 Izbira obdelovalnega stroja ... 64
5.1.2 Izbira artikla in materiala obdelovanca ... 66
5.1.3 Izbira rezilnega orodja in določitev parametrov obdelave ... 68
5.2 Postopek merjenja vibracij ... 69
5.3 Analiza zbranih podatkov ... 69
5.3.1 Analiza zamenjane rezilne ploščice T3 zaradi iztrošenosti ... 72
5.3.2 Korelacija med vibracijami in obrabo ... 73

6 Razvoj sistema (tehnika in aplikacija) 79
6.1 Razvoj programske opreme za zajem in obdelavo podatkov ... 79
6.1.1 Uporabniški vmesnik ... 80
6.1.2 Vizualizacija podatkov ... 80
6.1.3 Definiranje stopnje obrabljenosti – grafi ... 82
6.1.4 Zaznava in analiza obdelav ... 84

7 Eksperimenti in evalvacija 85
7.1 Metrike evalvacije modela ... 85
7.1.1 Natančnost napovedi in zanesljivost sistema ... 85
7.2 Primerjava z obstoječimi metodami ... 86
7.2.1 Primerjava na podlagi uporabljenih tehnik ... 86
7.2.2 Primerjava na podlagi integracije s strojnim učenjem ... 86
7.2.3 Primerjava na podlagi celostnega pristopa ... 86
7.2.4 Primerjava na podlagi prilagodljivosti in prenosljivosti ... 86
7.3 Analiza stroškovne učinkovitosti ... 87

8 Zaključek 91
8.1 Povzetek ugotovitev ... 91
8.2 Izpolnjeni cilji in potrditev hipotez ... 92
8.3 Prispevki k znanosti ... 93

9 Prihodnje delo **95**
9.1 Omejitve raziskave 95
9.2 Priložnosti za izboljšave sistema 96
9.3 Razširitev na druge vrste obdelovalnih strojev in procesov 97

Literatura **99**

Bibliografija **105**

Biografija **107**

Slike

Slika 1.1: Ishikawa diagram [1]. 1
Slika 1.2: Vplivni dejavniki na življenjsko dobo rezilnega orodja [2]. 3
Slika 2.1: Možne poškodbe rezilnega orodja [6]. 11
Slika 2.2: Primer nove in obrabljene rezilne ploščice [lastni]. 12
Slika 2.3: Konfokalni mikroskop, laserski skener Ranger3 proizvajalca SICK in CMM proizvajalca Hexagon DEA [7, 8, 9] 13
Slika 2.4: Rezilne sile [10]. 14
Slika 2.5: Pospeškomer Dytran [11]. 15
Slika 2.6: Teoretični toplotni tokovi (leva slika) in značilna porazdelitev temperature v orodju, obdelovancu in odrezku (desna slika) [10]. 17
Slika 2.7: Primer delovanja ARTISA pri obdelavi artikla končnik [lastni]. 19
Slika 3.1: Primer porazdelitve temperatur med procesom odrezavanja aluminija 7475-T7351 [31] 26
Slika 3.2: Pritrditev rezilnih ploščic na držala orodij pri operaciji struženja in rezkanja [3]. 27
Slika 3.3: Parametri procesa odrezavanja [30]. 27
Slika 3.4: Primer obrabe na prosti ploskvi VB in obraba v obliki kotanje KT [30]. 29
Slika 3.5: Primeri različnih vrst rezilnega orodja [32]. 29
Slika 3.6: Osnovne operacije struženja in vrste rezilnih orodij [33, 34]. 30
Slika 3.7: Rezilne ploščice z negativno in pozitivno geometrijo [34]. 31
Slika 3.8: Priporočljivi parametri obdelave pri operaciji struženja [30] 33
Slika 3.9: Možne poškodbe rezilnega roba [30]. 39
Slika 3.10: Kompleksnost procesov odrezavanja kovin [30]. 39
Slika 3.11: Diagram različnih mehanizmov obrabljanja rezilnega orodja [30]. 41
Slika 3.12: Povezava med obrabo na hrbtni strani VB in obstojnostjo orodja pri različnih rezilnih hitrostih vc [30] 41
Slika 4.1: Arhitektura sistema za spremljanje obrabe z različnimi sestavnimi komponentami [lastni]. 45
Slika 4.2: Pospeškomer Dytran 3623A4T [lastni]. 47
Slika 4.3: Lokacija pritrditve pospeškomera na obdelovalnem stroju [lastni]. 48
Slika 4.4: Naprava za zajem podatkov SIRIUSm [38]. 49
Slika 4.5: Računalnik za obdelavo podatkov Intel NUC i5 [lastni]. 50
Slika 4.6: Diagram DEWESoft DualCoreADC pretvornika [39]. 50
Slika 4.7: Posnetek zajetih podatkov v programu DEWESoft X3 [lastni]. 51
Slika 4.8: Levo referenčni signal z označenimi orodji, ki obdelujejo kos. Desno predprocesiran signal med obdelavo z orodjema T3 in T2 [41] 52
Slika 4.9: Korelacija posnetka petih obdelav z referenco [41] 53
Slika 4.10: Fourierjeva transformacija in njegova aproksimacija [41]. 53
Slika 4.11: Spektrogram in njegova aproksimacija [41]. 54
Slika 4.12: Spreminjanje standardne deviacije tekom obdelav [41]. 55

Slika 4.13: Primerjava Fourierjevih transformacij obdelav v različnih fazah življenjske dobe rezilnega orodja [41]. ... 55
Slika 4.14: Matriki razdalj na sredini med menjavama in pred naslednjo menjavo [41]. ... 56
Slika 4.15: Stopnja različnosti tekom obdelav med izbranima menjavama orodja [41]. ... 57
Slika 4.16: Arhitekturi dveh nevronskih mrež, levo širša in desno globlja [41]. ... 59
Slika 4.17: Povprečna absolutna napaka na podatkih. Svetle barve (rumena) označujejo nižje napake, temnejše pa višje [41]. ... 60
Slika 4.18: Porazdelitev napak na testnih podatkih za izbrani oceni [41]. ... 61
Slika 4.19: Vrednosti obeh ocen med menjavami orodja [41]. ... 61
Slika 4.20: Mesto opozorila o iztrošenosti orodja [41]. ... 62
Slika 5.1: Osnovni diagram poteka za zbiranje informacij o vibracijah med potekom obdelave [lastni]. ... 63
Slika 5.2: Stružnica Mori Seiki in glavno (levo) vreteno, v čigar ohišje smo implementirali pospeškomer [lastni]. ... 64
Slika 5.3: Stružnica PUMA GT 2100 M v povezavi z industrijskim robotom Kawasaki RS010L [lastni]. ... 65
Slika 5.4: Oprema neposredno na delovnem mestu stružnice [lastni]. ... 66
Slika 5.5: 3D-model končnega odkovka (siva barva) in obdelane vilice [lastni]. ... 67
Slika 5.6: Primer vpetja odkovka v stružnico [lastni]. ... 67
Slika 5.7: Diagram obdelave operacije struženja prva stran po posameznih orodjih [lastni]. ... 69
Slika 5.8: Izmera zunanjega premera in meritev trdote odkovka vilice AKC [lastni]. ... 70
Slika 5.9: Spremna tabela beleženja dogodkov (čistopis v Excelu) [lastni]. ... 71
Slika 5.10: Postopek izvedbe meritev hrapavosti na struženem delu [lastni]. ... 71
Slika 5.11: 3D-model rezilne ploščice WNMG 080408 WM pod oznako T3 [44]. ... 72
Slika 5.12: Obraba roba rezilne ploščice orodja T3 s pogledom z vrha in s strani [lastni]. ... 72
Slika 5.13: Normalna obraba (levo) in lom ploščice (desno) [lastni]. ... 72
Slika 5.14: Toplotno vplivne cone in obraba rezilnega orodja [lastni]. ... 73
Slika 5.15: Poravnanih 20 posnetkov obdelovalne šarže K [41]. ... 74
Slika 5.16: Matrike razdalj za vsako izmed osi [41]. ... 75
Slika 5.17: Matrika razdalj [41]. ... 75
Slika 5.18: Matrike razdalj za prvo vektorsko normo [41]. ... 76
Slika 5.19: Matrike razdalj za DTW razdaljo [41]. ... 76
Slika 5.20: Gibanje povprečij tekom obdelav [41]. ... 77
Slika 5.21: Gibanje razmerja ″b/a″, kjer je opazen trend naraščanja med menjavami [41]. ... 78
Slika 6.1: Tokovni diagram poteka sistema [lastni]. ... 79
Slika 6.2: Pregled prvotnega uporabniškega vmesnika za nadzor procesnih parametrov [41]. ... 80
Slika 6.3: Zaslonska slika uporabniškega vmesnika [41]. ... 81
Slika 6.4: Barvna vrstica za prikaz potrebe menjave rezilnega orodja [41]. ... 82
Slika 6.5: Graf standardnih deviacij iz uporabniškega vmesnika [41]. ... 82
Slika 6.6: Graf ocene iztrošenosti [41]. ... 83
Slika 6.7: Spremembe amplitud pri frekvencah [41]. ... 84

Tabele

Tabela 3.1: Vpliv parametrov obdelave na proces odrezavanja [30]. 32
Tabela 3.2: Pomembne lastnosti rezilnih materialov [30]. 34
Tabela 3.3: Karakteristike rezilnih materialov [30]. 35
Tabela 4.1: Detajlni tehnični podatki pospeškomera Dytran 3623A4T [11]. 47
Tabela 4.2: Povprečna (absolutna) napaka [41]. 60
Tabela 5.1: Osnovni tehnični podatki o dvovretenski stružnici Mori Seiki [lastni]. 64
Tabela 5.2: Osnovni tehnični podatki o enovretenski stružnici Doosan [lastni]. 65
Tabela 5.3: Materialne lastnosti šarže ″P″, ki smo jo prvenstveno uporabili za testiranje [lastni] 66
Tabela 5.4: Nastavni plan za operacijo struženja prva stran [lastni]. 68
Tabela 7.1: Oprema, potrebna za delovanje sistema za nadzor obrabe rezilnega orodja [lastni] 88
Tabela 7.2: Zaključeni delovni nalogi s stroškom rezilnega orodja v fazi zbiranja in beleženja menjav [lastni] 88
Tabela 7.3: Zaključeni delovni nalogi s stroškom rezilnega orodja – po testni uporabi aplikacije [lastni] 89

Kratice

ADC	...	analogno-digitalni pretvornik
AE	...	akustične emisije
AISI	...	Ameriški inštitut za železo in jeklo
AKC	...	aktivni kinematični nadzor
ANN	...	umetne nevronske mreže
CMM	...	koordinatni merilni stroj
CNC	...	računalniško numerično krmiljenje
CNN	...	konvolucijske nevronske mreže
DFT	...	diskretna Fourierjeva transformacija
DLC	...	diamantu podoben ogljik
FFT	...	hitra Fourierjeva transformacija
HMM	...	skriti Markovi modeli
ICP	...	integrirano piezoelektrično vezje
IIoT	...	industrijski internet stvari
KT	...	kotanjasta obraba
LLM	...	veliki jezikovni modeli
MES	...	sistem za upravljanje proizvodnje
MLP	...	večplastni perceptroni
MPŠ	...	mednarodna podiplomska šola
MQL	...	minimalno količinsko mazanje
OLAM	...	optimalni linearni asociativni spomin
PCD	...	polikristalni diamant
PdM	...	prediktivno vzdrževanje
RMS	...	kvadratni povprečni koren
RF	...	naključni gozd
RUL	...	napovedovanja preostale življenjske dobe
SEM	...	skenirni elektronski mikroskop
SVM	...	podporni vektorji
TiAlN	...	titanov aluminijev nitrid
TiN	...	titanov nitrid
UI	...	umetna inteligenca
VB		obraba na hrbtni ploskvi

Simboli

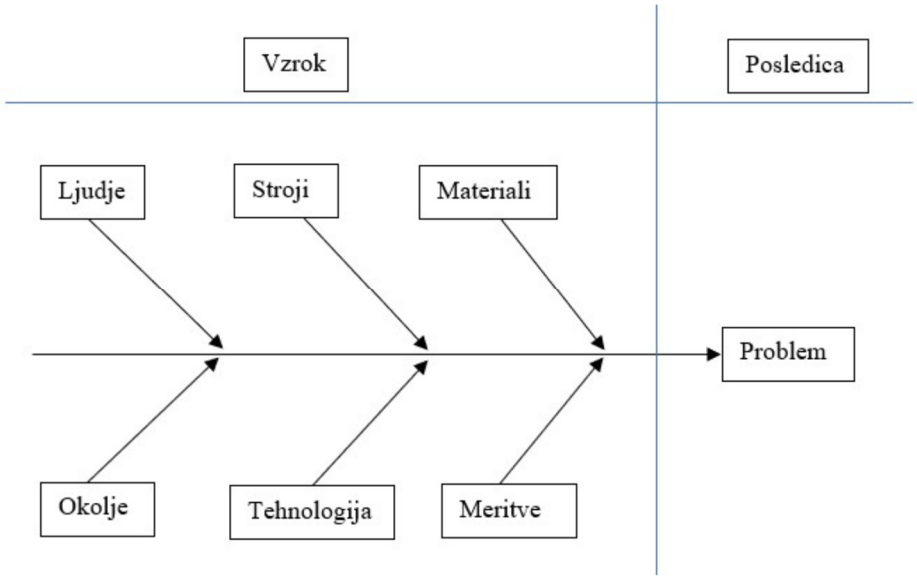
µm . . . mikrometer
Ω . . . ohm
VDC . . . volt enosmernega toka
mA . . . miliamper
kHz . . . kiloherc
Hz . . . herc
dB . . . decibel
mW . . . milivat
HBW . . . trdota po Brinellu
C_T . . . teoretična rezilna hitrost, pri kateri bi obstojnost orodja znašala eno minuto
$R_{xy}[m]$ . . . korelacija med signaloma x in y pri zamiku m
x[n] . . . signal (posnetek vibracij)
y[n] . . . referenčni signal
n . . . indeks vzorca
m . . . zamik (število vzorcev, za katerega se referenčni signal zamakne)
X[k] . . . frekvenčna komponenta pri frekvenci k
x_n . . . signal v časovni domeni
N . . . število vzorcev
j . . . imaginarna enota

Poglavje 1

Uvod

1.1 Ozadje, motivacija in namen

Zahteva avtomobilske industrije po doseganju t. i. 0 ppm je še vedno globoko zakoreninjena v proizvajalcih avtomobilskih delov, saj si s tem zagotavljajo kakovost in stabilnost lastne produkcije. Kaj vse so lahko vplivni faktorji pri produkciji avtomobilskih komponent in doseganju le-teh, nam nazorno prikazuje diagram vzročno-posledične povezanosti oz. t. i. Ishikawa diagram (Slika 1.1).



Slika 1.1: Ishikawa diagram [1].

Eden od ciljev industrije 4.0 je razvoj naprednih proizvodnih procesov, ki združujejo vse zgoraj naštete vplivne faktorje z namenom izboljšanja produktivnosti in kakovosti ter zmanjšanja vpliva na okolje.

V podjetju, kjer je zaposlen avtor disertacije, se ukvarjajo z mehansko obdelavo odkovkov. Proces izdelave izdelka je sestavljen iz stroja za mehansko obdelavo in odkovka, ki se obdeluje, držal in rezilnega orodja, ki se pri tem periodično trošijo, ter operaterja, ki vpenja/menjuje artikle, jih meri in na splošno nadzira proces. Dobro obvladovanje procesa zahteva ustrezno usposobljen kader, ki mora poleg nadzora prepoznati tudi napake proizvoda in ob njihovi zaznavi ustrezno odreagirati. Šibkost tovrstnega načina dela je ravno v tem, da so operaterji nagnjeni k napakam [2]. Poleg tega ponavljajoče se delo ni

primerno, da bi jih človek/operater opravljal dolgo časa s ponovljivo kakovostjo. Ena od rešitev je uporaba računalniške tehnologije za doseganje višje, predvsem pa ponovljive kakovosti procesov.

Eden ključnih vplivnih dejavnikov pri mehanski obdelavi, ki močno vpliva tako na stroškovne kot kakovostne kazalnike, je potrošnja rezilnega orodja. Namreč, prehitro zamenjano rezilno orodje povzroča višji strošek na enoto proizvoda, na drugi strani prepozna zamenjava zelo poveča tveganje za slabo kakovost, ki se lahko stopnjuje vse do reklamacije kupca. Izbira ustreznega časa za zamenjavo je težko določljiva in eno od najtežjih vprašanj na področju mehanske obdelave z odrezavanjem [3].

Kot pomoč operaterju danes nudijo obdelovalni stroji zgolj osnovno programsko rešitev, kdaj je potreben čas za menjavo, ki jo vnaprej definira CNC programer. Stroj sporoči in/ali se ustavi, ko se doseže vnaprej nastavljena vrednost števila izdelanih artiklov. Vse te številčne vrednosti so zgolj ocena in določene predvsem na osnovi preteklih izkušenj iz podobnih izdelkov in niso pravo merilo. Še vedno je operater tisti, ki se mora odločiti še na osnovi ostalih vplivnih faktorjev, ki se lahko zgodijo tudi prej, preden se stroj sam ustavi in nas opozori o poteku rezilnega orodja. Za potek produkcije je ta način zadovoljiv, daleč pa je od stroškovnega in kakovostnega optimuma, kot bi si ga želeli.

V kontekstu industrije 4.0, kjer sta avtomatizacija in digitalizacija ključni, se pojavljajo nove možnosti za izboljšanje spremljanja stanja orodij. Z uporabo senzorjev, kot so pospeškomeri, in naprednih algoritmov strojnega učenja, je mogoče razviti inteligentne sisteme, ki v realnem času spremljajo vibracije in druge relevantne parametre procesa mehanske obdelave. Ti sistemi lahko prepoznajo vzorce, ki kažejo na obrabo orodja in napovedo njegovo preostalo življenjsko dobo z visoko natančnostjo.

Od tukaj tudi motivacija za raziskovanje in razvoj novih metod za spremljanje obrabe in napovedovanje življenjske dobe rezilnih orodij, saj lahko s tem prispevamo k zmanjšanju stroškov, izboljšanju kakovosti izdelkov in povečanju trajnosti proizvodnih procesov. Disertacija bo raziskala možnosti uporabe triosnih pospeškomerov v kombinaciji s tehnikami strojnega učenja za doseganje teh ciljev, s poudarkom na praktični uporabnosti sistema v realnem proizvodnem okolju. Poleg tega bo raziskava prispevala k razvoju novih metodologij in algoritmov za spremljanje obrabe orodij, ki bodo lahko uporabne tudi v drugih panogah in aplikacijah.

Namen doktorske disertacije je torej razviti sistem oz. odločitveni model, ki bo pomagal pri napovedovanju življenjske dobe rezilnega orodja, s čimer bi se podaljšala uporaba rezilnih orodij, zmanjšalo bi se število lomov in z njimi povezanih težav. Prav tako bi se povečala učinkovitost proizvodnega procesa in posredno zmanjšala tudi obremenitev na okolje. Sistem bi tako pripomogel k splošnim izboljšavam v proizvodnem procesu mehanske obdelave.

Uspešna aplikacija algoritma naj bi bila zato prenosljiva in uporabna na večini strojev z rezilnimi oziroma obdelovalnimi orodji. Sistem mora biti cenovno ugoden in ne preveč kompleksen, hkrati pa mora imeti možnost integracije k že obstoječim strojem. Ne smemo pozabiti tudi na enostavnost uporabe, saj so operaterji na strojih večinoma s poklicno usmeritvijo in kompleksne tabele in diagrami ne pridejo v poštev.

V svetu sodobne proizvodnje, kjer sta učinkovitost in kakovost ključnega pomena, je upravljanje z rezilnimi orodji kritična komponenta za doseganje konkurenčnosti. Rezilna orodja so nepogrešljiv element v številnih proizvodnih procesih, od avtomobilske do letalske industrije, zato njihovo stanje neposredno vpliva na produktivnost, stroške in kakovost izdelkov.

1.2 Problemi in izzivi pri napovedovanju življenjske dobe rezilnega orodja

Optimizacija uporabe rezilnih orodij zahteva natančno razumevanje procesa obrabe in sposobnost napovedovanja njihove življenjske dobe. Natančno napovedovanje življenjske dobe rezilnih orodij prinaša številne koristi, vključno z zmanjšanjem stroškov zaradi prezgodnjih zamenjav, zmanjšanjem izpada proizvodnje zaradi nepričakovanih zlomov orodja, izboljšanjem kakovosti izdelkov in optimizacijo parametrov obdelave. Vendar pa je napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja izjemno zahteven izziv, kjer je treba zaradi kompleksnosti procesa obrabe upoštevati več dejavnikov, ki jih bomo obravnavali v nadaljevanju (Slika 1.2).



Slika 1.2: Vplivni dejavniki na življenjsko dobo rezilnega orodja [2].

Napovedovanje obrabe rezilnih orodij v realnih proizvodnih pogojih predstavlja izjemno zahteven izziv zaradi široke raznolikosti dejavnikov, ki vplivajo na proces obrabe. Eden ključnih dejavnikov je raznolikost materialov obdelovanca, saj se rezilna orodja uporabljajo za obdelavo zelo heterogenih materialov, od mehkih aluminijevih zlitin do visoko trdnih jekel, titanovih zlitin ter kompozitnih materialov. Vsak material ima specifične fizikalnokemijske lastnosti, kot so trdota, žilavost, toplotna prevodnost in kemična reaktivnost, ki vplivajo na kontaktne pogoje med orodjem in obdelovancem, posledično pa na prevladujoče mehanizme obrabe, kot so adhezija, abrazija, difuzija ali termokemične interakcije.

Poleg materialov obdelovanca pomembno vlogo igra tudi raznolikost rezilnih orodij. Na voljo so različni tipi orodij, kot so svedri, rezkarji, povrtala, žage itd., pri čemer ima vsaka vrsta svoje specifične konstrukcijske značilnosti. Geometrija rezilnega roba, material osnovnega telesa (npr. hitrorezna jekla, karbid, keramika, PCD) ter morebitne prevleke(TiN, TiAlN, DLC itd.) pomembno vplivajo na odpornost orodja proti termomehanskim obremenitvam in različnim tipom obrabe.

Tretji pomemben dejavnik je raznolikost parametrov obdelave, kamor sodijo hitrost rezanja, podajanje, globina reza, vnos hladilno-mazalnih sredstev ter izbrana strategija obdelave (npr. zaporedje prehodov, način vstopa v material itd.). Ti parametri določajo mehanske sile in temperaturne pogoje v območju rezanja. Na primer, visoke hitrosti rezanja in velike globine reza povzročajo večje trenje in s tem dvig temperature, kar povečuje obrabo zaradi toplotne degradacije. Neustrezna uporaba hladilnih sredstev pa lahko privede do toplotnih šokov ali kemičnih reakcij, ki negativno vplivajo na stabilnost rezilnega roba.

Nenazadnje je pomembna tudi raznolikost obdelovalnih strojev, na katerih poteka odrezavanje. Togost konstrukcije stroja, kakovost ležajev vretena, prisotnost in oblika vibracij, zmogljivost krmilnega sistema ter splošno stanje vzdrževanja stroja neposredno vplivajo na ponovljivost pogojev obdelave in s tem na hitrost obrabe orodja.

Na obrabo orodja vpliva več mehanizmov, kot so adhezija, abrazija, difuzija, kemične reakcije, lom in utrujenost, pri čemer ima vsak svoje značilnosti in vpliva na različne dele orodja. Ti mehanizmi se lahko pojavljajo sočasno in z različno intenziteto, odvisno od materiala obdelovanca, orodja in parametrov obdelave. Proces obrabe je spremenljiv in se razvija s časom, saj je obraba na začetku pogosto počasna, nato pa se pospeši zaradi povečanih temperatur in mehanskih obremenitev, pri čemer dodatno vplivajo tudi spremembe v materialu ali nestabilnosti v procesu. Zaradi te kompleksnosti je modeliranje obrabe zahtevno, saj tradicionalni modeli pogosto temeljijo na poenostavljenih predpostavkah in ne vključujejo vseh relevantnih dejavnikov, kar zmanjšuje njihovo natančnost in zanesljivost. Realnočasovni nadzor obrabe je prav tako izziv, saj neposredno merjenje obrabe rezilnega roba med obdelavo ni enostavno izvedljivo. Zato so bolj v uporabi posredne metode, kot so analiza vibracij, sile in temperature, vendar njihova interpretacija zahteva poglobljeno strokovno znanje in je pogosto kompleksna.

Izbira ustreznih senzorjev je ključna za učinkovito spremljanje stanja orodja, saj različni tipi senzorjev, kot so pospeškomeri, merilniki sile, termočleni, mikrofoni in senzorji električnega toka, omogočajo zajem podatkov o različnih vidikih procesa obdelave. Njihova izbira je odvisna od vrste obdelave, materiala orodja in obdelovanca ter informacij, ki jih želimo pridobiti. Za zanesljivo merjenje je enako pomembna tudi pravilna namestitev senzorjev, ki morajo biti postavljeni na občutljiva mesta, kjer lahko zaznajo spremembe stanja orodja, hkrati pa ne smejo ovirati procesa in morajo biti zaščiteni pred zunanjimi vplivi, kot so zunanje vibracije, toplota in umazanija. Senzorski podatki so pogosto obremenjeni z motnjami in šumom, ki izvirajo iz električnih motenj, mehanskih vibracij stroja ali drugih zunanjih virov, zato jih je treba ustrezno filtrirati z uporabo digitalnih filtrov, povprečenja ali frekvenčne analize, da se zagotovi njihova natančnost. Poleg tega je za dolgoročno zanesljivost meritev nujna redna kalibracija senzorjev, ki vključuje primerjavo s standardnimi vrednostmi in prilagoditev senzorja, saj lahko na njegovo točnost vplivajo dejavniki, kot so staranje, temperaturne spremembe ali mehanske obrabe.

Sodobni proizvodni procesi generirajo velike količine podatkov, ki vključujejo meritve senzorjev, parametre obdelave, informacije o materialih in druge relevantne podatke, kar zahteva učinkovite metode za njihovo obdelavo, shranjevanje in upravljanje ter uporabo zmogljivih računalniških sistemov. Za napovedovanje obrabe orodja je ključno izbrati ustrezne algoritme strojnega učenja, ki lahko ob pravilni implementaciji iz podatkov izluščijo uporabne vzorce. Pred tem pa je nujna skrbna priprava podatkov, ki zajema čiščenje, normalizacijo, odstranjevanje izstopajočih vrednosti ter izbor relevantnih značilnosti, saj le tako lahko algoritmi dosežejo visoko natančnost. Za zagotavljanje zanesljivosti in splošne uporabnosti modelov je potrebno njihovo temeljito preverjanje z uporabo neodvisnih testnih podatkov, kar omogoča oceno njihove učinkovitosti v realnih pogojih.

Za uspešno implementacijo sistema za napovedovanje obrabe je ključna njegova integracija z obstoječimi sistemi za upravljanje proizvodnje (MES) in CNC krmiljenimi

stroji, kar zahteva uporabo standardiziranih komunikacijskih protokolov in podatkovnih formatov. Hkrati je nujno učinkovito upravljanje s podatki, kar vključuje njihovo varno shranjevanje, redno varnostno kopiranje, arhiviranje ter zagotavljanje dostopa do podatkov različnim uporabnikom glede na njihove potrebe. Uporabnost sistema ima pomembno vlogo pri njegovi sprejetosti v proizvodnem okolju – mora biti intuitiven, uporabniku prijazen ter jasno prikazovati stanje orodja, napovedano življenjsko dobo in priporočila za optimizacijo parametrov obdelave. Poleg tehničnih vidikov je pomembno tudi, da so stroški implementacije ekonomsko upravičeni. Vanje sodijo stroški senzorjev, programske in računalniške opreme, integracije ter usposabljanja osebja, zato je pred uvedbo nujna izvedba analize stroškov in koristi. Z upoštevanjem vseh teh vidikov je mogoče razviti zanesljiv in učinkovit sistem za napovedovanje življenjske dobe rezilnih orodij, ki prispeva k optimizaciji proizvodnje, znižanju stroškov in izboljšanju kakovosti končnih izdelkov.

1.3 Cilji, podcilji in hipoteze

Osnovni cilj disertacije je razvoj celovitega sistema oz. odločitvenega modela, ki bo s pomočjo naprednih tehnik senzorjev, strojnega učenja in podatkovne analitike omogočal natančno in zanesljivo napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja v realnem proizvodnem okolju. Pri tem bo sistem upošteval vse predhodno naštete probleme in izzive, povezane z raznolikostjo materialov, orodij, parametrov obdelave in kompleksnostjo procesa obrabe. Za dosego tega temeljnega cilja je treba določiti tudi podcilje.

1.3.1 Podcilj 1 – podrobnejša analiza obrabljenosti rezilnega orodja

Da bi razvili učinkovit sistem za napovedovanje življenjske dobe, je treba temeljito razumeti proces obrabe rezilnega orodja. Različne vrste obrabe, kot so abrazija, adhezija, difuzija in utrujenost materiala, se pojavljajo v različnih fazah življenjske dobe orodja in so odvisne od pogojev obdelave. V tem delu disertacije bomo izvedli podrobno analizo mehanizmov obrabe za različne materiale orodij in obdelovancev ter identificirali ključne parametre, ki vplivajo na hitrost obrabe. Poleg tega bomo določili jasne kriterije, kdaj se šteje, da je orodje iztrošeno in neprimerno za nadaljnjo uporabo, pri čemer bomo upoštevali tako stroškovne kot tudi kakovostne vidike.

1.3.2 Podcilj 2 – analiza in izbira optimalnega pospeškomera ter določitev njegove lokacije

Procesi odrezavanja se izvajajo v zahtevnem delovnem okolju, ki je pogosto zaznamovano z vibracijami, temperaturnimi nihanji in prisotnostjo hladilnih tekočin. Zato je pravi izbor senzorjev ključnega pomena za zagotavljanje zanesljivih podatkov o stanju orodja. V tem delu disertacije bomo izvedli podrobno analizo različnih vrst pospeškomerov, pri čemer bomo upoštevali njihovo natančnost, občutljivost, frekvenčni odziv, odpornost na vibracije in temperaturne vplive. Na podlagi te analize bomo izbrali pospeškomer, ki je najbolj primeren za naše aplikacije, in določili optimalno lokacijo njegove namestitve na obdelovalni stroj. Pri tem bomo upoštevali tako tehnične kot tudi praktične vidike, da bi zagotovili čim bolj zanesljive podatke brez zunanjih vplivov.

1.3.3 Podcilj 3 – analiza ustrezne tehnike za pridobivanje podatkov

Kvaliteta podatkov, ki jih pridobimo iz senzorjev, je ključnega pomena za uspeh napovedovanja življenjske dobe orodja. V tem delu disertacije bomo analizirali različne tehnike za pridobivanje, obdelavo in filtriranje podatkov iz pospeškomera. Poseben

poudarek bo na tehnikah, ki omogočajo učinkovito odstranjevanje šuma in motenj ter zagotavljajo visoko občutljivost in odzivnost sistema. Analizirali bomo različne algoritme za obdelavo signalov, kot so filtri, transformacije in metode za ekstrakcijo značilnosti, ter določili optimalno tehniko za naše specifične zahteve. Pri tem bomo upoštevali tako zmogljivost algoritmov kot tudi njihovo računsko zahtevnost, da bi zagotovili učinkovito delovanje sistema v realnem času.

1.3.4 Podcilj 4 – razvoj aplikacije za napovedovanje življenjske dobe orodja ter iskanje kakovostnih in stroškovnih optimumov

Končni cilj disertacije je razvoj praktične aplikacije, ki bo omogočala natančno napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja ter optimizacijo parametrov obdelave za doseganje najboljše kakovosti izdelkov in najnižjih stroškov proizvodnje. Aplikacija bo integrirala vse predhodno razvite komponente sistema, vključno z algoritmom za napovedovanje življenjske dobe, tehnikami za obdelavo podatkov in modeli za optimizacijo stroškov in kakovosti. Razvili bomo uporabniku prijazen vmesnik, ki bo operaterjem omogočal enostavno spremljanje stanja orodja, prejemanje opozoril o bližajoči se zamenjavi orodja ter optimizacijo parametrov obdelave. Aplikacija bo tudi omogočala analizo podatkov, ki bo pripomogla k boljšemu razumevanju procesa obrabe orodja in sprejemanju informiranih odločitev.

Za preverjanje uspešnosti razvitega sistema in potrditev zastavljenih ciljev disertacija obravnava tri hipoteze.

1.3.5 Hipoteza 1 – z uporabo triosnega pospeškomera in upoštevanjem spremenljivih vibracij je možno napovedovati življenjsko dobo orodja

Ta hipoteza temelji na predpostavki, da se vibracije, ki nastanejo med obdelavo, spreminjajo z obrabo orodja in so neposredno povezane z njegovo preostalo življenjsko dobo. Triosni pospeškomer omogoča zajem vibracij v treh ortogonalnih smereh *(x, y, z)*, kar zagotavlja celovit vpogled v dinamično obnašanje orodja med obdelavo. S podrobno analizo teh vibracij je mogoče identificirati značilne vzorce, ki kažejo na določene faze obrabe orodja. Z uporabo teh vzorcev in naprednih algoritmov strojnega učenja je možno razviti modele, ki omogočajo napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja. Uspešna potrditev te hipoteze bi dokazala, da je spremljanje vibracij s triosnim pospeškomerom učinkovita metoda za spremljanje stanja orodja in napovedovanje njegove preostale življenjske dobe.

1.3.6 Hipoteza 2 – razviti sistem omogoča dovolj natančno napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja

Ta hipoteza se nanaša na natančnost napovedi, ki jih bo omogočal razviti sistem. Cilj je doseči dovolj visoko stopnjo natančnosti, da bo sistem lahko učinkovito uporaben v praksi in omogočil zanesljivo načrtovanje proizvodnih procesov. Za preverjanje te hipoteze bomo izvedli obsežne eksperimente v realnem proizvodnem okolju, kjer bomo primerjali napovedi sistema z dejansko življenjsko dobo orodij. Natančnost sistema bomo ocenjevali z različnimi metrikami. Uspešna potrditev te hipoteze bo dokazala, da je razviti sistem dovolj zanesljiv za uporabo v praksi in omogoča učinkovito optimizacijo uporabe rezilnih orodij.

1.3.7 Hipoteza 3 – razviti sistem omogoča iskanje stroškovnih in kakovostnih optimumov

Ta hipoteza se nanaša na sposobnost razvitega sistema, da poleg napovedovanja življenjske dobe orodja omogoča tudi optimizacijo parametrov obdelave za doseganje najboljšega kompromisa med stroški in kakovostjo. Pri tem je treba upoštevati različne dejavnike, kot so stroški orodja, čas obdelave, kakovost površine obdelovanca in izmet. Z uporabo modelov strojnega učenja, ki upoštevajo te dejavnike, je možno razviti sistem, ki operaterjem omogoča iskanje optimalnih parametrov obdelave za doseganje želenih ciljev. Za preverjanje te hipoteze bomo izvedli simulacije in eksperimente, kjer bomo primerjali stroške in kakovost izdelkov pri uporabi optimalnih parametrov obdelave, ki jih nakazuje sistem, s stroški in kakovostjo pri trenutni uporabi.

1.4 Utemeljitev znanstvene relevantnosti

Kot že predstavljeno uvodoma, predstavlja ključni izziv v sodobni proizvodnji pravočasna in učinkovita odločitev o zamenjavi rezilnega orodja. Nepravočasna menjava lahko vodi v prezgodnjo menjavo še uporabnih orodij, kar povzroča nepotrebne stroške, ali pa v nadaljevanje obdelave z obrabljenimi orodji, kar negativno vpliva na kakovost izdelkov in povečuje tveganje za poškodbe stroja. V doktorski disertaciji je predstavljen inovativen pristop k reševanju tega problema, ki združuje napredno analizo vibracij na obdelovalnem stroju, implementacijo inteligentnih algoritmov in senzorskih sistemov za realnočasovno spremljanje ter odločitveni model, ki s pomočjo umetne inteligence napoveduje predvideno življenjsko dobo rezilnega orodja.

S to rešitvijo, ki temelji na bolj objektivnem in celovitem pristopu, se bo operaterjem olajšalo delo in jih hkrati razbremenilo subjektivne odločitve o menjavi orodja. Čeprav problematiko napovedovanja življenjske dobe rezilnih orodij naslavljajo že tudi drugi, obstoječe rešitve pogosto ponujajo le parcialne odgovore in imajo svoje omejitve. Na primer, nekatere rešitve se opirajo predvsem na vizualni pregled rezilnega roba [4], kar zahteva prekinitev proizvodnega procesa, čiščenje orodja, fotografiranje in subjektivno oceno strokovnjaka. Takšen pristop je časovno potraten, vpliva na produktivnost in ni primeren za avtomatizirane proizvodne linije. Obstajajo tudi sistemi, ki delujejo na podobni osnovi, torej s pomočjo analize vibracij, vendar ne uporabljajo napredne podpore s pomočjo umetne inteligence v kombinaciji z uporabniškim vmesnikom [5], kar omejuje njihovo natančnost in zanesljivost.

Inovativnost sistema, predstavljenega v doktorski disertaciji, se odraža v celostnem pristopu, ki upošteva več ključnih dejavnikov. Sistem ne samo da upošteva vibracije, ampak tudi omogoča uporabo in analizo podatkov z enega ali več različnih rezilnih orodij, ki se uporabljajo v procesu mehanske obdelave. S primerjavo vibracij med različnimi fazami obdelave in glede na prejšnje vibracije, sistem omogoča boljše ocenjevanje sprememb na rezilnem orodju in s tem natančnejše napovedovanje njegove življenjske dobe. Poleg tega sistem uporablja napredne principe strojnega učenja, kot sta vrečenje (angl. bagging) in princip mnogoterega znanja (angl. ensemble learning), ki omogočajo izboljšanje napovedne natančnosti in robustnosti sistema. Ti principi so še posebej pomembni v realnem proizvodnem okolju, kjer so podatki pogosto obremenjeni s šumom in variabilnostjo. Prednost razvitega sistema je tudi prilagodljivost fiksnim obdelovalnim ciklom, kar omogoča njegovo enostavno integracijo v obstoječe proizvodne linije brez večjih sprememb v delovnem procesu. S tem se zagotavlja visoka uporabnost sistema in hiter povratek investicije.

Prispevki te disertacije k znanosti se odražajo v razvoju in validaciji inovativne metodologije za napovedovanje življenjske dobe rezilnih orodij, ki bistveno presegajo omejitve obstoječih pristopov na več ključnih področjih. Medtem ko se obstoječe metode pogosto opirajo na subjektivno oceno, posamične senzorje ali poenostavljene modele obrabe, ta disertacija uvaja celostni in dinamični pristop, ki združuje prednosti napredne analize vibracij s triosnimi pospeškomeri, inteligentnih algoritmov strojnega učenja in realno časovnega spremljanja stanja orodja.

Ta inovativna kombinacija omogoča natančnejše in zanesljivejše napovedi življenjske dobe rezilnih orodij, kar bo zmanjšalo stroške in izboljšalo kakovost izdelkov ter prilagodljivost različnim proizvodnim pogojem, vključno z različnimi materiali obdelovanca, orodji, parametri obdelave in stroji. Avtomatizirano spremljanje stanja orodja in pravočasno opozarjanje na potrebo po zamenjavi bo zmanjšalo tveganje za nepričakovane prekinitve proizvodnje. Prav tako bo omogočena možnost optimizacije parametrov obdelave, kot so hitrost rezanja, podajanje in globina reza, za dosego najboljšega kompromisa med produktivnostjo, kakovostjo in stroški. In nenazadnje, boljše razumevanje procesa obrabe orodja bo omogočalo razvoj novih strategij za podaljšanje njegove življenjske dobe. S temi prispevki bo ta disertacija pomembno prispevala k razvoju znanosti in tehnologije na področju proizvodnje ter omogočila podjetjem, da izboljšajo svojo konkurenčnost in trajnost.

1.5 Pregled vsebine doktorske disertacije

Doktorska disertacija je strukturirana v devet glavnih poglavij, ki sistematično obravnavajo ključne vidike raziskave, od uvoda v problematiko do zaključka in predlogov za prihodnje delo. Vsako poglavje prispeva k celovitemu razumevanju problematike napovedovanja življenjske dobe rezilnih orodij in predstavlja korak k doseganju zastavljenih ciljev.

V uvodnem poglavju je predstavljeno ozadje in motivacija za izvedbo te raziskave. Opredeljeni so ključni problemi in izzivi, s katerimi se soočamo pri napovedovanju življenjske dobe rezilnih orodij. Jasno so navedeni cilji in hipoteze disertacije ter opredeljeni prispevki raziskave k znanosti. V poglavju obstoječe metode in sorodna dela je predstavljen obsežen pregled obstoječe literature s področja spremljanja obrabe orodja, uporabe pospeškomerov, strojnega učenja in optimizacije proizvodnih procesov. Analizirane so različne metode za napovedovanje življenjske dobe rezilnih orodij, njihove prednosti in slabosti. Poseben poudarek je na pregledu literature, ki se nanaša na uporabo vibracijskih signalov in strojnega učenja za napovedovanje obrabe. Na podlagi pregleda literature so identificirane vrzeli v znanju in raziskavah, ki jih bo poskušala zapolniti ta disertacija.

Poglavje teoretične osnove je podlaga za razumevanje procesa obrabe rezilnih orodij in razvoj sistema za napovedovanje življenjske dobe. Podrobno so razloženi mehanizmi obrabe, kot so abrazija, adhezija, difuzija in termokemične interakcije. Predstavljene so osnove vibracij in njihova povezava z obrabo orodja. Razloženi so tudi ključni koncepti strojnega učenja, ki se uporabljajo v disertaciji. V poglavju, ki sledi, je podrobno opisana metodologija, ki je bila uporabljena pri izvedbi raziskave. Opisana je arhitektura razvitega sistema za spremljanje obrabe, izbira in namestitev pospeškomera ter tehnike za zajem in obdelavo podatkov. Razloženi so algoritmi strojnega učenja, ki so bili uporabljeni za razvoj modelov napovedovanja življenjske dobe.

Poglavje meritve in analiza podatkov opisuje izvedbo eksperimentov za zajem podatkov o vibracijah med obdelavo. Podrobno je opisana eksperimentalna postavitev, izbira materialov in orodij ter postopek merjenja. Predstavljena je analiza zbranih podatkov v časovni in frekvenčni domeni ter korelacija med vibracijami in obrabo. V poglavju razvoj sistema je opisan razvoj celotnega sistema za napovedovanje življenjske dobe rezilnih

orodij. Podrobno je razložen razvoj programske opreme za zajem in obdelavo podatkov, implementacija algoritmov strojnega učenja ter razvoj uporabniškega vmesnika. Poudarek je na inovativnih rešitvah in tehničnih izboljšavah, ki so bile dosežene pri razvoju sistema.

V poglavju eksperimenti in evalvacija so predstavljeni rezultati eksperimentalne validacije razvitega sistema. Opisani so različni scenariji testiranja, metrike za ocenjevanje učinkovitosti sistema ter primerjava z obstoječimi metodami. Analizirane so prednosti in slabosti razvitega sistema ter identificirana področja za nadaljnje izboljšave. V zaključnem poglavju so povzete ključne ugotovitve disertacije in ocenjeni doseženi cilji. Potrjene ali zavržene so hipoteze raziskave ter ovrednoteni prispevki disertacije k znanosti.

V zadnjem poglavju so obravnavane omejitve raziskave in predstavljeni predlogi za nadaljnje raziskave in izboljšave na področju napovedovanja življenjske dobe rezilnih orodij. Predlagani so novi pristopi in tehnike, ki bi lahko še dodatno izboljšale natančnost, zanesljivost in uporabnost sistema za spremljanje stanja orodja. Prav tako so navedena področja uporabe, kjer bi se lahko razviti sistem še dodatno izkazal.

Poglavje 2

Obstoječe metode in sorodna dela

2.1 Obstoječe metode za spremljanje obrabe orodja

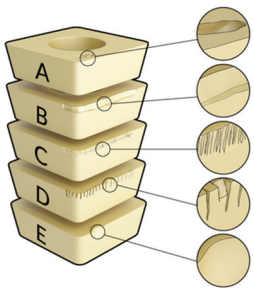
Obstaja več različnih metod za spremljanje obrabe orodja, ki jih lahko v grobem razdelimo na vizualni pregled, direktne in posredne metode.

2.1.1 Vizualni pregled

Je najosnovnejša metoda za spremljanje obrabe orodja in vključuje vizualno pregledovanje rezilnega roba orodja s prostim očesom ali s pomočjo povečevalnih pripomočkov, kot so lupe, mikroskopi ali endoskopi. Ta metoda je subjektivna in odvisna od izkušenj in znanja operaterja oz. tehnologa. Postopek vizualnega pregleda običajno vključuje tri korake.

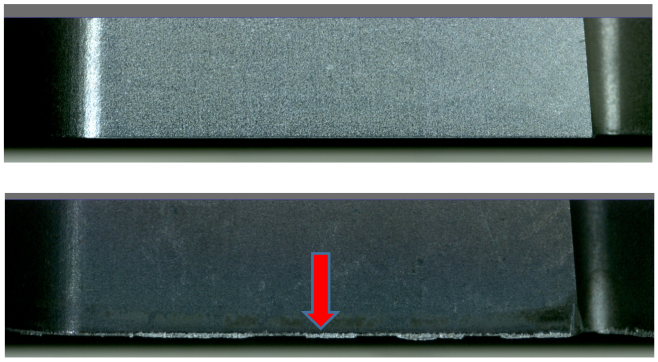
Prvi korak je priprava orodja. Pred pregledom je treba orodje očistiti vseh ostankov materiala, hladilne tekočine in drugih nečistoč, ki bi lahko ovirale natančno opazovanje rezilnega roba.

Drugi korak, ki sledi, je pregled rezilnega roba. Operater natančno pregleda rezilni rob orodja s prostim očesom ali s pomočjo povečevalnih pripomočkov. Vizualno lahko ovrednoti obrabo na čelni ploskvi **A** (glej Sliko 2.1), ki se kaže kot krater ali jamica in nastane zaradi toplotnih in kemičnih procesov med obdelavo. Globina in oblika kraterja sta odvisni od materiala orodja, obdelovanca in parametrov obdelave. Obrabo na hrbtni ploskvi **B** (glej Sliko 2.1), ki je pogost znak abrazivne obrabe in nastane zaradi trenja med hrbtno ploskvijo orodja in obdelovancem. Širina in globina obrabe na hrbtni ploskvi se uporabita kot indikator stopnje obrabe orodja. Odlomke in razpoke **C**, **D** (glej Sliko 2.1) ali druge poškodbe na rezilnem robu, ki kažejo jasen znak obrabe. Spremembe barve in sijaja kažejo na toplotne obremenitve, kemične reakcije ali spremembe v mikrostrukturi materiala orodja, npr. modrikasta ali rjava barva lahko kaže na pregrevanje orodja. Nalepek na rezilnem robu **E** (glej Sliko 2.1) nastane, ko se material obdelovanca prilepi na rezilni rob orodja. Nalepek lahko vpliva na kakovost obdelave in povzroči vibracije in hrapavost površine.



Slika 2.1: Možne poškodbe rezilnega orodja [6].

Tretji korak je ocena stanja orodja in odločitev o zamenjavi. Na podlagi vizualnega pregleda operater/tehnolog oceni stanje orodja in se odloči, ali je orodje še primerno za nadaljnjo uporabo ali ga je treba zamenjati (glej Sliko 2.2). Ta odločitev je pogosto subjektivna in ni nujno, da je vedno odraz prave odločitve.



Slika 2.2: Primer nove in obrabljene rezilne ploščice [lastni].

2.1.2 Direktne metode

Direktne metode zajemajo neposredno merjenje obrabe na rezilnem robu orodja. Te metode so zelo natančne, vendar pa zahtevajo prekinitev proizvodnega procesa, kar je nezaželeno in zamudno.

Merjenje obrabe s pomočjo merilnih instrumentov predstavlja korak naprej od subjektivne ocene pri vizualnem pregledu in omogoča kvantitativno določanje stopnje obrabe rezilnega orodja. Ta pristop vključuje uporabo različnih natančnih merilnih naprav za neposredno merjenje dimenzij obrabljenih površin na orodju. Čeprav merjenje z merilnimi instrumenti običajno zahteva prekinitev proizvodnega procesa in odstranitev orodja iz stroja, zagotavlja visoko natančnost in ponovljivost meritev. Najbolj tipični merilni instrumenti za oceno obrabe orodja so mikrometri in kljunasta merila, ki se uporabljajo za merjenje linearnih dimenzij z natančnostjo do nekaj mikrometrov. S pomočjo mikrometrov se lahko meri širina obrabe na hrbtni ploskvi orodja ali globina kraterja na čelni ploskvi.

Optični mikroskopi omogočajo podrobnejši pregled rezilnega roba orodja in natančno merjenje dimenzij obrabljenih površin. Z uporabo mikroskopov se lahko meri širina obrabe, globina razpok, velikost odlomkov in drugi parametri, ki karakterizirajo stanje orodja. Sodobni optični mikroskopi pogosto vključujejo digitalne kamere in programsko opremo za obdelavo slik, kar omogoča avtomatizacijo meritev in izboljšanje natančnosti.

Konfokalni mikroskopi (glej Sliko 2.3) so naprednejša vrsta optičnih mikroskopov, ki omogočajo rekonstrukcijo 3D-površine orodja z visoko ločljivostjo. Konfokalni mikroskopi uporabljajo laserski vir svetlobe in posebno optično konfiguracijo za zajemanje slik samo iz določene globine ostrenja, kar odpravlja zamegljenost in omogoča natančno merjenje topografije površine.

Laserski skenerji (glej Sliko 2.3) se uporabljajo za digitalizacijo 3D-geometrije orodja in ustvarjanje natančnih 3D-modelov. S primerjavo 3D-modelov novega in obrabljenega orodja je mogoče določiti volumen materiala, ki je bil odstranjen zaradi obrabe. Laserski skenerji so primerni za merjenje kompleksnih oblik obrabe, kot so erozija rezilnega roba ali spremembe geometrije orodja.

Koordinatni merilni stroji (CMM) so visoko natančne merilne naprave, ki se uporabljajo za merjenje dimenzij in kompleksnih oblik 3D-objektov. CMM uporabljajo tipalo, ki se dotika površine merjenega objekta. Z uporabo CMM je mogoče izmeriti različne parametre

obrabe, kot so širina obrabe, globina razpok, spremembo geometrije rezilnega roba in volumen odstranjenega materiala. CMM so primerni za merjenje orodij kompleksnih oblik in omogočajo visoko stopnjo avtomatizacije meritev (glej Sliko 2.3).



Slika 2.3: Konfokalni mikroskop, laserski skener Ranger3 proizvajalca SICK in CMM proizvajalca Hexagon DEA [7, 8, 9].

Prednosti merjenja obrabe s pomočjo merilnih instrumentov omogočajo natančno merjenje dimenzij obrabljenih površin z natančnostjo do nekaj mikrometrov. Rezultati meritev so kvantitativni, kar omogoča objektivno oceno stanja orodja in primerjavo med različnimi orodji. Merilni instrumenti zagotavljajo visoko ponovljivost meritev, kar je ključnega pomena za validacijo modelov napovedovanja življenjske dobe orodja in avtomatizacijo, kar zmanjšuje čas in stroške meritev.

Slabosti merjenja obrabe s pomočjo merilnih instrumentov je zahteva po prekinitvi proizvodnega procesa, merjenje obrabe je lahko časovno zahtevno še posebej pri orodjih kompleksnih oblik, merilni instrumenti so lahko dragi, kar povečuje stroške spremljanja obrabe orodja in potreba po usposobljenem osebju z znanjem o merilni tehniki in interpretaciji rezultatov.

2.1.3 Posredne metode

Vključujejo merjenje različnih parametrov, ki so povezani z obrabo orodja, kot so sila, vibracije, temperatura, zvok in električni tok. Te metode omogočajo spremljanje obrabe orodja med obdelavo, vendar pa so manj natančne kot direktne metode.

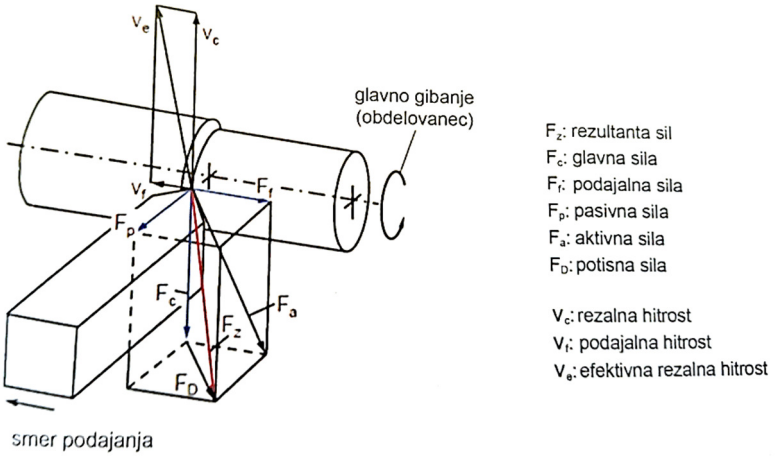
2.1.3.1 Merjenje sil

Predstavlja eno izmed ključnih posrednih metod za spremljanje obrabe rezilnega orodja v realnem času brez potrebe po prekinitvi proizvodnega procesa. Ideja te metode je, da obraba orodja neposredno vpliva na sile, ki nastanejo med procesom obdelave. Povečana obraba orodja običajno povzroči povišanje sil rezanja, sil podajanja in pasivnih sil, kar se lahko zazna z ustreznimi merilnimi sistemi. Analiza teh sil omogoča posredno oceno stanja orodja in napovedovanje njegove preostale življenjske dobe.

Obraba orodja vpliva na povečanje **rezilne sile** (angl. cutting force – Fc), kjer obraba rezilnega roba povzroči povečanje trenja med orodjem in obdelovancem. Povečanje rezilne sile je še posebej izrazito pri abrazivni obrabi, kjer se rezilni rob orodja topi in postane manj oster.

Obraba vpliva tudi na povečanje **sile podajanja** (angl. feed force – *Ff*), ki je potrebna za premikanje orodja v smeri podajanja. Obraba orodja lahko poveča silo podajanja zaradi povečanja trenja in spremembe geometrije rezilnega roba.

Prav tako tudi vpliva na povečanje **pasivne sile** (angl. thrust force – *Fp*), ki deluje v smeri, ki je pravokotna na rezilno silo in silo podajanja. Obraba orodja lahko poveča pasivno silo zaradi povečanja trenja med orodjem in obdelovancem ter zaradi spremembe geometrije rezilnega roba. Povečanje pasivne sile lahko povzroči vibracije in nestabilnosti v procesu obdelave (glej Sliko 2.4).



Slika 2.4: Rezilne sile [10].

Za merjenje sil pri obdelavi se uporabljajo različni tipi senzorjev, ki temeljijo na različnih principih delovanja. Najpogosteje se uporabljajo piezoelektrični dinamometri, ki izkoriščajo piezoelektrični učinek, pri katerem se pri deformaciji nekaterih materialov (npr. kremen) generira električni naboj. Dinamometri vsebujejo piezoelektrične kristale, ki so nameščeni med orodjem in držalom orodja. Ko na orodje delujejo sile, se piezoelektrični kristali deformirajo in generirajo električni naboj, ki je proporcionalen sili. Piezoelektrični dinamometri so zelo natančni in imajo hiter odzivni čas, vendar zahtevajo zunanje napajanje in ojačevalnike signala. Merilni trakovi so tanke uporne žice, ki so pritrjene na površino merjenega objekta. Ko na objekt delujejo sile, se merilni trakovi deformirajo, kar povzroči spremembo njihove električne upornosti. Sprememba upornosti je proporcionalna sili in se lahko meri z uporabo Wheatstonovega mostu. Merilni trakovi so relativno poceni in enostavni za uporabo, vendar so manj natančni kot piezoelektrični dinamometri. Optični senzorji sil temeljijo na principu spreminjanja intenzitete svetlobe, ki potuje skozi optično vlakno, ko na vlakno deluje sila. Optični senzorji sil so imuni na elektromagnetne motnje in so primerni za uporabo v težkih industrijskih okoljih.

Prednost merjenja sil omogoča spremljanje obrabe orodja v realnem času brez potrebe po prekinitvi proizvodnega procesa. Podatki o silah so objektivni in neodvisni od subjektivne ocene operaterja. Proces zbiranja in analize podatkov se lahko avtomatizira, kar zmanjšuje stroške in izboljšuje učinkovitost.

Slabosti merjenja sil je cena senzorjev, saj so natančni dinamometri relativno dragi. Prav tako namestitev dinamometrov zahteva ustrezno znanje in izkušnje. Na podatke o silah lahko vplivajo tudi drugi faktorji, kot so spremembe v materialu obdelovanca, vibracije stroja in temperatura, kar lahko popači interpretacijo rezultatov. Za učinkovito uporabo je potrebna obdelava in analiza podatkov, kar zahteva ustrezno strokovno znanje.

2.1.3.2 Analiza vibracij

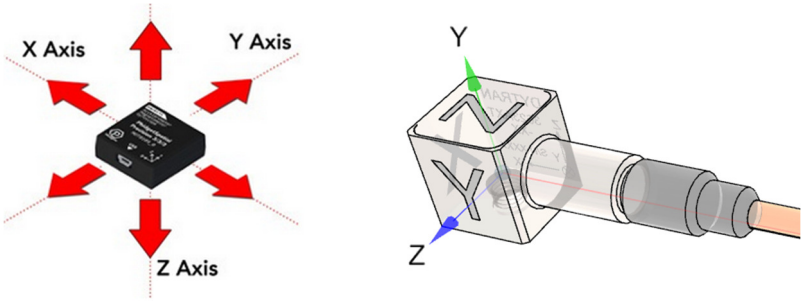
Obraba orodja vpliva na vibracije, ki nastanejo med obdelavo. Analiza vibracij s pomočjo pospeškomerov omogoča spremljanje obrabe orodja v realnem času. Povečanje amplitude vibracij ali spremembe v frekvenčnem spektru običajno kažejo na povečano obrabo orodja. Temelji na dejstvu, da obraba orodja vpliva na dinamično obnašanje obdelovalnega stroja in povzroča spremembe v vibracijah, ki se prenašajo skozi strukturo stroja. Z natančnim merjenjem in analizo teh vibracij, je mogoče posredno oceniti stanje orodja, zaznati nastanek napak in napovedati njegovo preostalo življenjsko dobo.

Pri obdelavi materialov z odrezavanjem se vibracije pojavljajo kot rezultat sil rezanja, ki delujejo na orodje, in vplivajo na strukturo stroja. Intenziteta teh vibracij je odvisna od različnih dejavnikov, vključno z materialom obdelovanca, geometrijo orodja, parametrov obdelave ter stanjem orodja. Dodatne vibracije lahko povzročijo neuravnoteženi rotirajoči deli, kot so vretena in orodja, ki delujejo pri določenih frekvencah, ter zračnost v ležajih, vodilih in drugih komponentah stroja. Poleg tega vibracije lahko izvirajo iz zunanjih virov, kot so delovanje drugih strojev, transportne naprave ter okoljski vplivi, kar dodatno prispeva k nestabilnosti obdelovalnega procesa.

Obraba orodja običajno povzroči povečanje amplitude vibracij, še posebej pri določenih frekvencah, kar je posledica povečanja sil rezanja, trenja in nestabilnosti v procesu obdelave. Prav tako lahko povzroči tudi spremembe v frekvenčnem spektru vibracij, kot so pojavljanje novih frekvenc, premik obstoječih frekvenc ali spremembe amplitude frekvenc. Te spremembe so lahko povezane z nastankom določenih vrst obrabe, kot so odlomki, razpoke ali obraba na hrbtni ploskvi. Izrazitejša obraba orodja lahko povzroči nestabilnosti v procesu obdelave, kot so vibracije, ki se kažejo kot močne vibracije in povzročajo slabo kakovost površine obdelovanca ter hrup.

Pospeškomer je naprava, ki pretvarja mehanske pospeške v električne signale, ki jih je mogoče analizirati in uporabiti za spremljanje stanja strojev in naprav. So ključni senzorji, ki merijo mehanske pospeške v definiranem delovnem okolju. V industriji zaradi svoje visoke občutljivosti in robustnosti igrajo pomembno vlogo pri spremljanju delovanja strojev, preventivnem vzdrževanju, zagotavljanju kakovosti in testiranju izdelkov.

Sodobni sistemi uporabljajo pospeškomere za zbiranje podatkov v realnem času ter za analizo vibracijskih vzorcev, s čimer izboljšujejo učinkovitost in zanesljivost industrijskih procesov. Poznamo piezoelektrične pospeškomere, ki so zaradi svoje občutljivosti in širokega dinamičnega razpona najpogosteje uporabljeni v industriji, kapacitivne pospeškomere, ki ponujajo visoko natančnost in zanesljivost predvsem za linearne vibracije in piezoresistivne pospeškomere, ki so pa primerni za meritve v težkih delovnih pogojih. Vibracije se lahko merijo v treh oseh *(x, y, z),* imajo visoko občutljivost in širok merilni razpon, so robustni za delovanje v zahtevnih okoljskih pogojih (temperatura, prah, udarci). Podpirajo digitalne ali analogne izhode, kar omogoča povezavo z nadzornimi sistemi (glej Sliko 2.5).



Slika 2.5: Pospeškomer Dytran [11].

Kar se tiče prednosti analize vibracij, je ključna enostavna namestitev senzorjev na različne dele stroja, kot so vretena, ležaji, miza ali orodje. Namestitev ne zahteva večjih posegov v strukturo stroja in jo je mogoče izvesti hitro in enostavno. Analiza vibracij omogoča zaznavanje različnih vrst napak, kot so obraba orodja, neuravnoteženost, zračnost, poškodbe ležajev in druge mehanske težave. Sistemi za analizo vibracij omogočajo spremljanje stanja strojev in orodij na daljavo, kar je še posebej koristno za stroje, ki se nahajajo na oddaljenih lokacijah ali v težko dostopnih delovnih okoljih. Podatke o vibracijah je mogoče analizirati z različnimi naprednimi metodami, kot so frekvenčna analiza, časovno-frekvenčna analiza in strojno učenje, kar omogoča pridobivanje poglobljenih informacij o stanju stroja in orodja.

Z vidika slabosti je težava kompleksnost interpretacije podatkov o vibracijah in zahteva strokovno znanje ter izkušnje. Za pravilno razumevanje vzrokov vibracij je treba upoštevati številne dejavnike, kot so geometrija stroja, parametri obdelave, lastnosti materiala obdelovanca in delovne razmere. Na vibracije, ki se merijo na stroju, vplivajo tudi drugi viri vibracij, kot so drugi stroji, transportni in okoljski vplivi. Te vibracije lahko otežijo zaznavanje vibracij, ki so povezane z obrabo orodja. Signali vibracij so pogosto obremenjeni s šumom, ki ga povzročajo različni viri, kot so električne motnje, mehanske vibracije in okoljski vplivi. Za natančno analizo vibracij je treba uporabiti ustrezne tehnike filtriranja šuma. Učinkovitost analize vibracij je odvisna od pravilne izbire lokacije senzorjev. Senzorje je treba namestiti na mesta, ki so občutljiva na spremembe v stanju orodja, vendar hkrati ne izpostavljena prevelikim vibracijam iz drugih virov. Za učinkovito napovedovanje življenjske dobe orodja je treba uporabiti modele strojnega učenja, ki se učijo na podlagi podatkov o vibracijah. Ti modeli se morajo prilagajati spremembam v proizvodnem procesu, kot so spremembe materiala obdelovanca, geometrije orodja in spremembe parametrov obdelave.

2.1.3.3 Merjenje temperature

Predstavlja še eno pomembno posredno metodo za spremljanje stanja rezilnega orodja v realnem času. Temelji na principu, da se med procesom obdelave zaradi trenja in deformacije materiala generira toplota, katere količina je odvisna od stanja orodja. Obraba orodja poveča trenje med orodjem in obdelovancem, kar se odraža v povišani temperaturi na rezilnem robu in v njegovi bližini (glej Sliko 2.6). Z natančnim merjenjem temperature je mogoče posredno oceniti stopnjo obrabe orodja in napovedati preostalo življenjsko dobo.

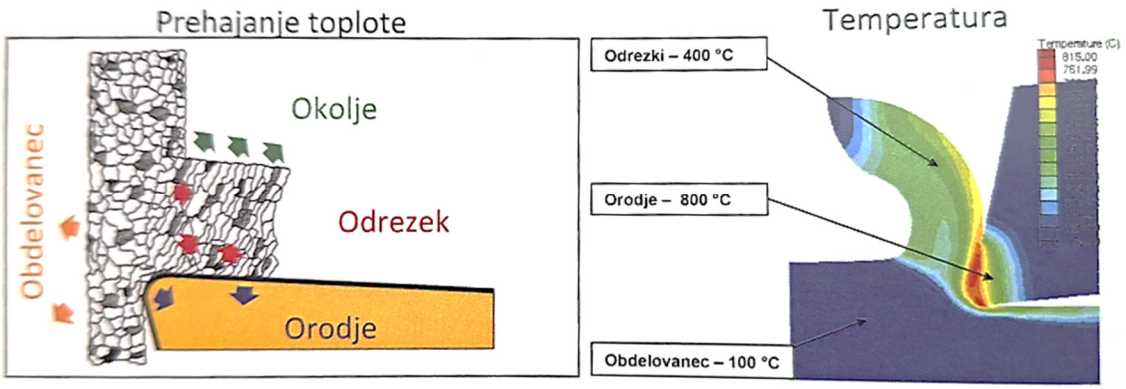
Obraba orodja povzroči povečanje trenja med orodjem in obdelovancem, kar se odraža v povišani temperaturi na rezilnem robu. Povišana temperatura lahko pospeši proces obrabe in zmanjša življenjsko dobo orodja. Vpliva tudi na porazdelitev temperature na orodju in obdelovancu. Spremembe v porazdelitvi temperature lahko kažejo na spremembe v mehanizmih obrabe in na nastanek določenih vrst napak.

Za merjenje temperature pri obdelavi se uporabljajo različni tipi senzorjev, ki temeljijo na različnih principih delovanja. Najpogosteje se v industrijskih aplikacijah uporabljajo termočleni. Temeljijo na Seebeckovem efektu, pri katerem se pri stiku dveh različnih kovin generira električna napetost, ki je odvisna od temperature. Termočleni so relativno poceni, robustni in imajo širok temperaturni razpon. Vendar pa imajo nižjo natančnost in počasnejši odzivni čas kot nekateri drugi tipi senzorjev. Za merjenje temperature na rezilnem orodju je treba termočlen vgraditi čim bližje rezilnemu robu, kar je lahko tehnično zahtevno.

Infrardeče kamere merijo temperaturo na daljavo brez fizičnega kontakta s površino. Temeljijo na zaznavanju infrardečega sevanja, ki ga oddaja vsako telo, katerega temperatura je višja od absolutne ničle. Infrardeče kamere omogočajo merjenje temperature na težko dostopnih mestih in ustvarjanje termičnih slik, ki prikazujejo porazdelitev

temperature na površini. Vendar pa je natančnost meritev odvisna od emisivnosti površine in okoljskih pogojev. Pri uporabi infrardečih kamer za merjenje temperature na rezilnem orodju je treba upoštevati vpliv hladilne tekočine, ki lahko ovira merjenje.

Optični pirometri merijo temperaturo na daljavo z merjenjem intenzitete svetlobe, ki jo oddaja površina. Optični pirometri so primerni za merjenje visokih temperatur in imajo hiter odzivni čas. Vendar pa je natančnost meritev odvisna od emisivnosti površine in izvedbe kalibracije.



Slika 2.6: Teoretični toplotni tokovi (leva slika) in značilna porazdelitev temperature v orodju, obdelovancu in odrezku (desna slika) [10].

Merjenja temperature omogoča spremljanje stanja orodja med obdelavo brez potrebe po prekinitvi proizvodnega procesa ali neposrednem opazovanju rezilnega roba. V primerjavi z nekaterimi drugimi metodami je implementacija sistema za merjenje temperature relativno enostavna. Termočleni so cenovno dostopni in enostavni za namestitev. Prav tako infrardeče kamere omogočajo brezkontaktno merjenje temperature, kar olajša njihovo uporabo. Merjenje temperature omogoča zaznavanje preobremenitev in pregrevanja orodja, kar lahko povzroči hitro obrabo ali poškodbe. Podatke o temperaturi je mogoče uporabiti za optimizacijo parametrov obdelave, kot so hitrost rezanja, podajanje in globina reza, za zmanjšanje trenja in toplote ter podaljšanje življenjske dobe orodja.

Z vidika slabosti je merjenje temperature na samem rezilnem robu tehnično zahtevno zaradi majhnosti orodja, hitrega gibanja in prisotnosti hladilne tekočine. Običajno se meri temperatura v bližini rezilnega roba, kar lahko vpliva na natančnost meritev. Hladilna tekočina lahko vpliva na meritev temperature, saj hladi orodje in odnaša toploto. Pri uporabi infrardečih kamer je treba upoštevati vpliv hladilne tekočine na emisivnost površine. Za natančno oceno obrabe orodja je treba upoštevati lastnosti materiala obdelovanca, kot so toplotna prevodnost, specifična toplota in trdota. Termočlene in druge senzorje temperature je treba redno kalibrirati, da se zagotovi točnost meritev.

2.1.3.4 Analiza zvoka

Analiza zvoka, še posebej s poudarkom na analizi akustičnih emisij (angl. AE), predstavlja ne invazivno in potencialno zelo informativno metodo za spremljanje stanja rezilnega orodja. Za razliko od merjenja vibracij, ki zajema širši spekter mehanskih vibracij stroja, se analiza akustičnih emisij osredotoča na visokofrekvenčne zvočne valove, ki nastanejo neposredno v coni rezanja zaradi mikrodogodkov, povezanih z deformacijo in lomljenjem materiala.

Pri obdelavi materialov se akustične emisije pojavljajo zaradi plastične deformacije materiala. Intenziteta in frekvenca teh emisij sta odvisni od materiala obdelovanca, stopnje

deformacije in hitrosti. AE se pojavljajo tudi zaradi trenja med rezilnim robom orodja in obdelovancem, kar povzroča zvočne emisije, katerih značilnosti so odvisne od sile trenja, hitrosti drsenja in koeficienta trenja. Nadalje se akustične emisije pojavljajo tudi zaradi lomljenja delcev materiala obdelovanca ali orodja in turbulentnega toka hladilne tekočine, ki povzroči zvočne emisije, ki jih je treba še filtrirati, da se lahko analizirajo emisije, ki so dejansko povezane z obrabo orodja.

Za merjenje zvoka pri obdelavi se uporabljajo različni tipi senzorjev, ki so optimizirani za zaznavanje visokofrekvenčnih akustičnih emisij. Sem spadajo piezoelektrični senzorji, ki so najpogosteje uporabljeni senzorji za zaznavanje akustičnih emisij. So majhni, robustni in imajo visoko občutljivost na visokofrekvenčne zvočne valove. Pomembno je, da so pravilno nameščeni, tj. čim bližje območju odrezavanja, da se zmanjša vpliv šuma in izgube. Mikrofoni se prav tako lahko uporabljajo za zaznavanje zvoka v zraku, vendar so manj občutljivi na visokofrekvenčne AE signale kot piezoelektrični senzorji. Uporaba mikrofonov je primerna za analizo zvoka pri nizkoprocesnih obdelavah ali za zaznavanje grobih napak.

Analiza akustičnih emisij je zelo občutljiva na mikrodogodke, ki se dogajajo v coni rezanja, kot so mikrolomljenja, trenje in plastična deformacija. To omogoča zgodnje zaznavanje napak in obrabe, preden se pojavijo večje poškodbe. Merjenje zvoka ne zahteva fizičnega kontakta z orodjem ali obdelovancem, kar omogoča spremljanje stanja orodja med obdelavo brez prekinitev. Analiza zvoka zagotavlja neposredne informacije o procesih, ki se odvijajo v coni rezanja, kar omogoča razumevanje mehanizmov obrabe in razvoj strategij za optimizacijo procesa. Z analizo frekvenčnega spektra in drugih značilnosti zvočnih emisij je mogoče zaznavati različne vrste obrabe, kot so abrazivna obraba, adhezivna obraba, lomljenje in utrujenost materiala. Proces zbiranja in analize podatkov o zvoku je mogoče avtomatizirati, kar omogoča spremljanje stanja orodja v realnem času brez človeškega posredovanja.

Podatki o zvoku so pogosto obremenjeni s šumom, ki ga povzročajo različni viri, kot so hrup stroja, hladilna tekočina in okoljski vplivi. Za učinkovito analizo je treba uporabiti ustrezne tehnike filtriranja šuma. Interpretacija podatkov o zvoku je lahko kompleksna in zahteva strokovno znanje in izkušnje. Povezava med značilnostmi zvočnih emisij in stanjem orodja ni vedno enostavna in zahteva poglobljeno analizo. Značilnosti zvočnih emisij so odvisne od materiala obdelovanca, orodja in parametrov obdelave. Za različne materiale in procese je treba razviti specifične modele za napovedovanje obrabe. Za zajemanje in analizo zvočnih emisij je treba uporabiti specializirano opremo, kot so piezoelektrični senzorji, ojačevalniki signala in analizatorji spektra. Pravilna lokacija senzorjev je ključnega pomena za zajemanje kakovostnih podatkov o zvoku. Senzorje je treba namestiti čim bližje območju rezanja, vendar hkrati zaščititi pred mehanskimi poškodbami in vplivom hladilne tekočine. Za učinkovito napovedovanje življenjske dobe orodja je treba uporabiti modele strojnega učenja, ki se učijo na podlagi podatkov o zvoku. Ti modeli zahtevajo veliko količino podatkov za učenje in validacijo.

2.1.3.5 Merjenje električnega toka

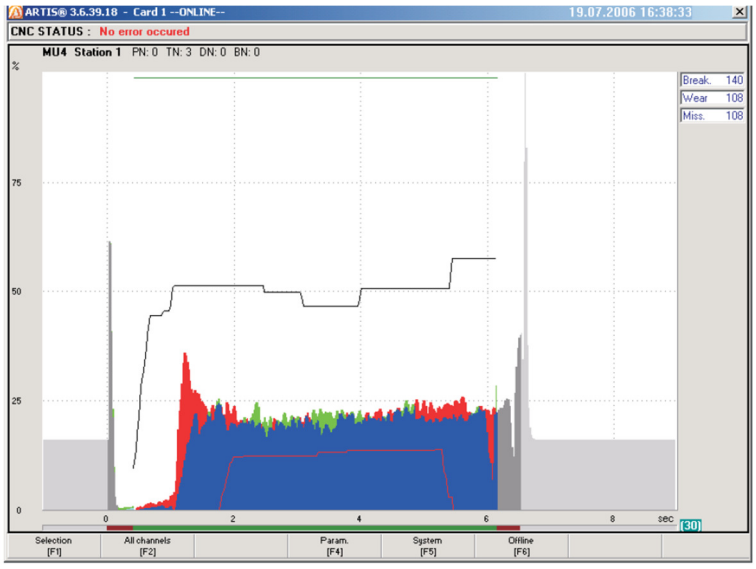
Merjenje električnega toka predstavlja posredno metodo za spremljanje stanja rezilnega orodja, ki temelji na spremljanju električne moči, ki jo porabljajo pogonski motorji obdelovalnega stroja. Zamisel je, da se z obrabo orodja spreminjajo sile rezanja, kar se odraža v spremembi električnega toka, ki ga porabljajo motorji za pogon vretena in osi stroja. Analiza teh sprememb omogoča posredno oceno stanja orodja in napovedovanje njegove preostale življenjske dobe (glej Sliko 2.7).

Količina električne energije, ki jo porabi motor, je odvisna od več dejavnikov, in sicer od materiala obdelovanca, ki vpliva na sile rezanja in s tem na porabo električne energije. Trdnejši materiali zahtevajo večjo moč za obdelavo. Geometrija orodja vpliva na

učinkovitost obdelave in s tem na porabo električne energije. Parametri obdelave, kot so hitrost rezanja, podajanje in globina reza, prav tako vplivajo na sile rezanja in s tem na porabo električne energije in nazadnje stanje orodja, katerega obraba poveča trenje in sile rezanja, kar se prav tako odraža v povečani porabi električne energije. Za spremljanje električnega toka se uporabljajo različne merilne naprave, ki se razlikujejo po natančnosti, odzivnem času in načinu namestitve. Ampermetri in vatmetri so osnovni instrumenti, ki se priključijo v električni krog motorja in merijo trenutni tok oziroma moč. So relativno poceni in enostavni za uporabo, vendar imajo omejeno natančnost in odzivni čas. Tokovni transformatorji omogočajo brezkontaktno merjenje toka. Namestijo se okoli žice, po kateri teče tok, in inducirajo tok v sekundarnem navitju, ki je sorazmeren primarnemu toku. Primerni so za merjenje visokih tokov in so galvansko ločeni od merjenega tokokroga, kar zagotavlja večjo varnost. Pretvorniki moči merijo napetost in tok ter izračunajo moč. Zagotavljajo natančnejšo meritev kot samo merjenje toka, saj upoštevajo tudi spremembe napetosti.

Merjenje električnega toka je relativno enostavno in poceni, saj so senzorji toka in moči široko dostopni in enostavni za namestitev. Merjenje ne zahteva fizičnega kontakta z orodjem ali obdelovancem, kar ne moti procesa obdelave. Zagotavlja vpogled v celotno obremenitev stroja, kar omogoča zaznavanje težav, ki niso nujno povezane samo z orodjem, ampak tudi z drugimi komponentami stroja. Spremembe v električnem toku pogosto nastopijo pred mehanskimi okvarami, kar omogoča pravočasno ukrepanje.

Merjenje električnega toka kot posredna metoda ne dovoljuje natančnega določanja narave okvare ali obrabe brez dodatnih analiz. Okoljski vplivi, začasni padci ali povečanja obremenitve lahko zameglijo interpretacijo podatkov. Za zanesljivo interpretacijo je potrebna redna kalibracija senzorjev in napredna obdelava podatkov.



Slika 2.7: Primer delovanja ARTISA pri obdelavi artikla končnik [lastni].

2.2 Strojno učenje za napovedovanje v proizvodnji

V okviru doktorske disertacije, ki obravnava uporabo umetne inteligence (UI) za spremljanje obrabe rezilnega orodja v industrijskih proizvodnih procesih, smo pregledali podobne pristope, ki so že bili razviti v preteklosti. Posebno pozornost smo posvetili metodam, ki uporabljajo različne senzorje za zbiranje podatkov o obrabi orodja ter tehnikam strojnega učenja za obdelavo teh podatkov. Namen raziskave je primerjati

različne pristope in identificirati najboljše prakse ter izzive, ki se pojavljajo v industrijski uporabi.

Munaro in drugi [12] so pregledali raziskave od leta 2010 do leta 2022 in sistematično izbrali 77 študij, v katerih so po protokolu PRISMA-P primerjali metode spremljanja obrabe orodja brez povezave (vizualni in direktni pregled) in s povezavo (posredne s senzorji). Metode brez povezave zahtevajo zaustavitev procesa strojne obdelave za pregled orodja pod mikroskopom, medtem ko se metode s povezavo zanašajo na pridobivanje podatkov v realnem času iz senzorjev, kot so sila, vibracije, akustična emisija, zvok in električni tok/moč. V pregledu so poudarjene prednosti posrednih metod, zlasti v povezavi z algoritmi umetne inteligence, ki se lahko učijo in prilagajajo različnim pogojem. Ekstrakcija značilnosti iz podatkov senzorjev se običajno izvaja v časovnem, frekvenčnem in časovnofrekvenčnem področju, da se zagotovijo ustrezni vhodni podatki za modele strojnega učenja. V nekaterih primerih se uporabljajo tudi neobdelani signali ali značilnosti, ki temeljijo na statistiki/PCA. Uporabljena je bila široka paleta algoritmov umetne inteligence, vključno z umetnimi nevronskimi mrežami (angl. ANN), podpornimi vektorji (angl. SVM), fuzzy logiko, naključnimi gozdovi, konvolucijskimi nevronskimi mrežami (angl. CNN), skritimi Markovimi modeli (angl. HMM) in hibridnimi modeli, kot sta LSTM ali GAN. SVM, ANN in fuzzy sistemi so med najpogosteje uporabljenimi pristopi. Ti algoritmi so pokazali visoko učinkovitost pri napovedovanju obrabe orodja, pri čemer je več modelov doseglo več kot 90-odstotno natančnost ali dobre regresijske metrike (npr. R2, RMSE, MAPE). Strategije združevanja senzorjev in prilagodljivega učenja še dodatno izboljšajo natančnost napovedi in robustnost, zlasti v hrupnih industrijskih okoljih. V članku je poudarjen industrijski pomen teh sistemov v sektorjih, kot sta letalski in avtomobilski, kjer so natančnost, zanesljivost in stroškovna učinkovitost ključnega pomena. Vendar je za uvajanje takšnih sistemov potrebna robustna senzorska strojna oprema, učinkoviti postopki obdelave podatkov in modeli umetne inteligence, ki so sposobni posploševanja na podlagi omejenih ali spremenljivih podatkov. Avtorji pozivajo k nadaljnjemu razvoju varčnih, prilagodljivih in integriranih sistemov za spremljanje stanja orodij, ki temeljijo na umetni inteligenci in so v skladu s cilji industrije 4.0. Pregled potrjuje, da ima posredno spremljanje s pomočjo umetne inteligence velik potencial za zmanjšanje izpadov, podaljšanje življenjske dobe orodja ter izboljšanje kakovosti in učinkovitosti proizvodnih procesov.

Druga študija, ki so jo opravili, raziskuje uporabo konvolucijskih nevronskih mrež za klasifikacijo mehanizmov obrabe na materialih, ki so izpostavljeni drsni obrabi. Tradicionalno je taka klasifikacija zahtevala strokovno oceno slik, posnetih s skenirnim elektronskim mikroskopom (angl. SEM). Vendar je študija pokazala učinkovitost CNN pri avtomatizaciji tega procesa, saj je dosegla 98-odstotno natančnost učenja in 73-odstotno natančnost testiranja. Kljub obetavnim rezultatom študija poudarja omejitve neravnovesja razredov in spremenljivosti slik, kar kaže, da bi prihodnje izboljšave lahko izhajale iz širitve podatkovnih nizov in izpopolnitve shem klasifikacije ter z vključitvijo dodatnih mehanizmov, kot je adhezija [13].

V sistematičnem pregledu literature, ki so ga opravili Colantonio in drugi [14], je obravnavanih 20 let raziskav o spremljanju obrabe rezilnega orodja pri stabilnem struženju z uporabo tehnik umetne inteligence. Avtorji so s strogim izbirnim protokolom med več kot 8.400 objavami identificirali 102 relevantnih študij. Osredotočili so se na šest prevladujočih metod umetne inteligence: umetne nevronske mreže, fuzzy logične sisteme, podporne vektorje, samoorganizacijske karte (angl. SOM), skrite Markovove modele in konvolucijske nevronske mreže. V pregledu je podrobno opisano, kako posamezna tehnika obravnava zbiranje podatkov, ekstrakcijo značilnosti, izbiro vhodnih podatkov, sklepanje in oceno uspešnosti. V literaturi prevladujejo ANN, fuzzy logika in SVM, ki se uporabljajo predvsem za ocenjevanje obrabe robov na hrbtni strani (angl. VB) ali klasifikacijo stanja

orodja. Kljub na splošno visoki poročani natančnosti (pogosto več kot 90-odstotno) pregled izpostavlja pomanjkanje standardiziranih meril, nedosledno terminologijo (npr. "napovedovanje" v primerjavi s "spremljanjem") in minimalno osredotočenost na napovedno vzdrževanje. Avtorji poudarjajo potrebo po skupnih zbirkah podatkov, poenotenih metrikah in razširjenih raziskavah napovedovanja preostale življenjske dobe (angl. RUL), da bi izboljšali praktično uvajanje v kontekstu industrije 4.0.

Hibridni pristop, ki so ga predstavili Silva in ostali [15], združuje strokovne sisteme in nevronske mreže za spremljanje obrabe orodja med obdelovalnimi operacijami. Ta sistem se odlikuje po svoji sposobnosti prilagajanja dinamičnim pogojem rezanja in ocenjevanja, katera nevronska mreža je zanesljivejša v različnih scenarijih. Vključitev Taylorjevega modela življenjske dobe orodja je dodatno izboljšala robustnost sistema, čeprav se je izkazalo, da je manj natančen, če se uporablja samostojno. Hibridni sistem se je izkazal za učinkovitega pri napovedovanju obrabe, celo v kompleksnih in spreminjajočih se obdelovalnih okoljih.

V kontekstu strojnega učenja in industrijskega interneta stvari (angl. IIoT) so Kasiviswanathan in ostali [16] pregledali, kako se te tehnologije vključujejo v sodobne CNC-obdelovalne sisteme. Raziskali so neposredne in posredne metode zaznavanja, tehnike obdelave signalov in modele strojnega učenja, kot so CNN in LSTM. Te tehnologije pomagajo izboljšati natančnost napovedovanja obrabe in omogočajo diagnostiko v realnem času, čeprav ostajajo izzivi, kot so integracija senzorjev in kakovost podatkov. V članku so obravnavane tudi prihodnje smernice raziskav, vključno z uporabo računalništva v oblaku ter potencialom prenosnega učenja in učenja z nekaj poskusi za reševanje problemov, kot so majhni nizi podatkov.

Vlogo strojnega učenja pri napovedovanju obrabe so raziskali tudi Shah in ostali [17], ki so poudarili njegovo sposobnost prepoznavanja vzorcev v kompleksnih sistemih, za razliko od tradicionalnih fizikalnih modelov, ki se spopadajo z negotovostjo in kompleksnostjo sistemov. Modeli strojnega učenja, zlasti ANN, so pokazali močno zmogljivost pri napovedovanju obrabe, njihov uspeh pa je odvisen od visokokakovostnih podatkov in pravilne izbire algoritmov. Študija kaže, da strojno učenje ponuja obetavno alternativo za natančnejše napovedovanje obrabe v različnih panogah.

Delo Bustillo in ostali [18] uvaja nov pristop z uporabo modelov umetne inteligence, kot so večplastni perceptroni (angl. MLP) in naključni gozdovi, za napovedovanje obrabe površine in izgube mase med procesi trenja. Ključna novost v tej študiji je uvedba ravni izotropije površine kot ključne značilnosti, ki znatno izboljša natančnost modelov. Študija je pokazala, da so naključni gozdovi dobro delovali na različnih ravneh izotropije, ne da bi bilo treba obsežno prilagajanje parametrov, kar jih naredi bolj praktične za industrijske aplikacije.

Danish et al. [19] so razvili in ocenili modele strojnega učenja (angl. ML) za napovedovanje in razvrščanje obrabe orodja med trajnostnim rezkanjem aditivno izdelanega nerjavnega jekla 316L. Raziskovalci so preizkusili tri okolju prijazne strategije hlajenja – minimalno količinsko mazanje (angl. MQL), kriogeno (CO_2) in MQL s pomočjo trdnega maziva (angl. S-MQL) – ter analizirali njihove učinke na obrabo rezilnega roba in hrapavost površine. Podatki so bili uporabljeni za učenje in preverjanje štirih regresijskih modelov (linearna regresija, regresija s podpornimi vektorji, naključni gozd in večslojni perceptron) in treh klasifikacijskih modelov (SVM, RF in MLP). Med njimi je MLP dosledno izkazoval boljšo učinkovitost z najvišjo natančnostjo napovedi 95-odstotno, najnižjimi metrikami napak in odličnimi rezultati klasifikacije (natančnost, priklic, rezultat F1). Rezultati poudarjajo, da S-MQL ni le zmanjšal obrabe robov in izboljšal kakovost površine, temveč je zagotovil tudi optimalne pogoje za napovedno modeliranje. Študija ugotavlja, da lahko kombinacija trajnostnih strategij strojne obdelave z inteligentnim

spremljanjem stanja orodja na podlagi ML poveča produktivnost, zmanjša vpliv na okolje in podaljša življenjsko dobo orodja.

Farias in drugi [20] predlagajo praktičen pristop strojnega učenja za zaznavanje obrabe orodja z uporabo standardnih senzorskih podatkov iz obdelovalnih strojev CNC, ne da bi se pri tem zanašali na drage instrumente. Eksperiment je vključeval 160 poskusov strojne obdelave jekel AISI P20 in AISI 1045 s karbidnimi ploščicami v novih in umetno obrabljenih pogojih (VB = 0,3 mm), spremljanih prek protokola MTConnect®. Na začetku je linearna nevronska mreža OLAM (optimalni linearni asociativni spomin) dosegla 65-odstotno natančnost napovedi. Za izboljšanje rezultatov so avtorji uporabili statistično podatkovno rudarjenje in metode grozdenja na podlagi podatkov (DMM-DDM), s čimer so zmanjšali varianco podatkov in filtrirali anomalije. Z uporabo samoorganizacijske metode globokega učenja (K-means) za grozdenja v kombinaciji s klasifikacijo MLP – OLAM so natančnost napovedi povečali na 93,8-odstotno. Okvir dokazuje izvedljivost preprostih in poceni rešitev strojnega učenja za spremljanje stanja orodij v okoljih industrije 4.0, zlasti za odločanje o optimalnem času zamenjave orodja.

Val in drugi [21] so predstavili celovit pristop za napovedovanje stranskih obrab pri zamenljivih rezilnih ploščicah z uporabo tehnik umetne inteligence. Avtorji uporabljajo javno zbirko podatkov NUAA, ki vsebuje več kot 230.000 zapisov podatkov o ortogonalnem rezkanju in primerjajo tri strategije modeliranja: Random Forest, Gradient Boosting in mreže z dolgim kratkoročnim spominom (angl. LSTM). Njihov model Gradient Boosting se izkaže kot najučinkovitejši pri usklajevanju natančnosti napovedi in računske učinkovitosti, saj doseže R^2 0,9857 in MAE le 0,0058 mm. Metodologija vključuje predobdelavo skaliranje in časovno modeliranje, skupaj s kvantifikacijo negotovosti in napovedjo preostale življenjske dobe. Z integracijo umetne inteligence s praktičnimi metrikami, kot so pragovi obrabe robov in analiza časa do okvare, članek zagotavlja uporabna spoznanja za napovedno vzdrževanje v pametni proizvodnji. Delo ne samo da presega prejšnje študije po natančnosti, temveč poudarja tudi razširljivost, razložljivost in prilagodljivost različnim vrstam orodij in pogojem.

Gao, Qiao in Zhang [22] so preučili najnovejši razvoj na področju prepoznavanja obrabe orodij z uporabo umetne inteligence, pri čemer so se posebej osredotočili na integracijo globokega učenja in agentov UI z velikimi jezikovnimi modeli (angl. LLM). Članek obravnava tradicionalne tehnike prepoznavanja obrabe orodja in jih primerja s sodobnimi metodami, ki temeljijo na podatkih, vključno z algoritmi strojnega učenja, kot so SVM, odločitvena drevesa, naključni gozdovi in K-NN ter arhitekturami globokega učenja, kot so CNN, RNN, LSTM, GAN, avtoenkoderji in ojačano učenje. Te metode so pokazale visoko natančnost in prilagodljivost pri odkrivanju obrabe v različnih okoljih strojne obdelave. V pregledu je predstavljen tudi koncept agentov umetne inteligence, pri čemer so poudarjene njihove napredne zmožnosti na področju sklepanja, načrtovanja, spomina in multimodalne interakcije, zlasti v kombinaciji z LLM. Avtorji poudarjajo, da lahko agenti umetne inteligence, ki temeljijo na LLM, ne le analizirajo kompleksne senzorične podatke v realnem času za napovedno vzdrževanje, temveč tudi naravno komunicirajo z uporabniki in avtonomno izvajajo naloge.

Študija Maranija in drugih [23] predlaga adaptivni nevrofuzzy inference sistem (angl. ANFIS) za spremljanje in napovedovanje obrabe roba rezilnega orodja med struženjem hladno obdelanega jekla 1215. Z uporabo signalov rezilne sile (*Fx, Fy, Fz*) kot vhodnih spremenljivk so avtorji razvili model ANFIS, naučen na eksperimentalnih podatkih, zbranih s piezoelektričnim dinamometrom. Preizkusili so več funkcij spominjanja: sigmoidno, trikotniško, Gaussovo in zvonasto, pri čemer je sigmoidna funkcija dala najboljšo natančnost napovedi (regresijski koeficient 0,96775). Eksperimentalno preverjanje je pokazalo, da je obraba orodja močno povezana z naraščajočimi rezilnimi silami, zlasti Fz. Študija ugotavlja, da model, ki temelji na ANFIS, omogoča natančno napovedovanje stanja

orodja v realnem času in zagotavlja stroškovno učinkovito rešitev za spremljanje stanja orodja (angl. TCM) v industrijskih aplikacijah.

Sieberg in drugi [24] so raziskali možnosti uporabe umetne inteligence, zlasti konvolucijskih nevronskih mrež, za avtomatizacijo klasifikacije mehanizmov obrabe materialov, ki so izpostavljeni drsni obrabi. Klasifikacija obrabe tradicionalno zahteva ekspertno vrednotenje slik skeniranega elektronskega mikroskopa za prepoznavanje mehanizmov, kot so utrujanje površine, abrazija, tribokemične reakcije in adhezija. V nasprotju s tem je v tem delu prikazan pristop, ki temelji na podatkih, z uporabo slik SEM, ki jih označijo strokovnjaki in razvrstijo s pomočjo modela CNN. Po nastavitvi hiperparametrov in usposabljanju na uravnoteženem naboru podatkov z 1.072 slikami (vključno s podatki s presežnim vzorčenjem) je model dosegel 98-odstotno natančnost usposabljanja in 73-odstotno natančnost testiranja, pri čemer je bila natančnost za splošne mehanizme obrabe (85,5 %) večja kot za površinsko utrujanje (60,5 %). Avtorji poudarjajo omejitve zaradi neuravnoteženosti razredov in variabilnosti povečave slike ter predlagajo, da bi lahko razširjeni nabori podatkov in bolj diferencirane klasifikacijske sheme izboljšale prihodnje rezultate.

Chen, Tsai in Hung [25] so predstavili sistem za spremljanje obrabe orodja v realnem času, integriran s platformo za upravljanje modelov umetne inteligence, ki je namenjen izboljšanju natančnosti napovedovanja in robustnosti delovanja v proizvodnji. Sistem uporablja združitev več senzorjev, ki združuje obremenitev vretena, navor in zvočne signale, z ekstrakcijo značilnosti v časovni in frekvenčni domeni (npr. kurtoza, skewness, spektralni vrhovi), da se uporabijo modeli strojnega učenja. Platforma za upravljanje umetne inteligence, razvita v jeziku C++ in nameščena na plošči NPU z uporabo Dockerja, omogoča dinamične posodobitve modelov, prekvalifikacijo in nadzor različic v industrijskih okoljih. Med različnimi preizkušenimi modeli (vključno z modeli Random Forest, KNN, XGBoost in AdaBoost) je model skupinskega učenja dosegel najboljšo učinkovitost s povprečno RMSE 0,000185 mm^2. Platforma podpira tudi neprekinjeno učenje in učinkovito zmanjša RMSE do 68 % po ponovnem usposabljanju z novimi podatki senzorjev. Ta arhitektura spodbuja razširljivo, uporabniku prijazno in natančno, spremljanje stanja orodja za pametna proizvodna okolja.

Soori, Arezoo in Dastres [26] so raziskali široko uporabo strojnega učenja in umetne inteligence v procesih strojne CNC obdelave, da bi povečali produktivnost, natančnost in trajnost. Študija razvršča ključna področja, kot so napovedovanje obrabe orodja, modeliranje rezilne sile, ocenjevanje hrapavosti površine, napovedovanje porabe energije in napovedno vzdrževanje. Poudarja vlogo ML/AI pri skrajševanju časa zastojev, optimizaciji parametrov strojne obdelave ter omogočanju spremljanja in diagnosticiranja v realnem času s pomočjo podatkovno vodenih in hibridnih pristopov modeliranja. Številne metode, vključno z ANN, SVM, nevrofuzzy sistemi in globokimi metodami, so obravnavane skupaj z združevanjem senzorjev in digitalnimi dvojčki za inteligentno spremljanje stanja orodij in sistemov. Pregled se zaključi s prihodnjimi raziskovalnimi usmeritvami, ki vključujejo pametno označevanje prijemal, strojno obdelavo s pomočjo robotov, načrtovanje procesov v oblaku in industrijo 4.0, ki jih podpira ML/AI.

Nazadnje so Lee in avtorji [27] uporabili tehnike umetne inteligence, kot so SVM, RNN in CNN, v prediktivnem vzdrževanju (angl. PdM) za sisteme strojev, s poudarkom na degradaciji kritičnih komponent, kot so rezilna orodja in ležaji vretena. Njihova študija je pokazala, da lahko modeli umetne inteligence z visoko natančnostjo napovedujejo obrabo komponent, pri čemer uporabljajo značilnosti signalov v frekvenčnem prostoru, ki so boljši od signalov v časovnem prostoru. To delo je pokazalo, da sistemi PdM na podlagi umetne inteligence ne le zmanjšujejo izpad strojev in stroške vzdrževanja, ampak tudi prispevajo k bolj trajnostni in učinkoviti proizvodnji, saj maksimalno podaljšujejo preostalo življenjsko dobo komponent.

2.3 Primerjava različnih pristopov in ključne ugotovitve v raziskavah

Pregled literature razkriva raznolikost pristopov k spremljanju obrabe orodij, odvisno od senzorjev in tehnik strojnega učenja, z izrazitimi prednostmi in slabostmi vsakega [28]. Ključni dejavniki, kot so material obdelovanca in šum v podatkih, pomembno vplivajo na napoved obrabe. Splošni trendi kažejo, da so nekateri pristopi obetavni za natančno napovedovanje, vendar nobena metoda ni univerzalno uporabna v vseh pogojih.

Ključne ugotovitve so pokazale, da so napredne tehnike umetne inteligence, zlasti strojno in globoko učenje (npr. CNN, LSTM, GAN), zelo obetavne za realnočasovno napovedovanje obrabe, zmanjševanje izpadov in podaljševanje življenjske dobe orodij v proizvodnih procesih. Posredno spremljanje, ki temelji na senzorjih in poteka v realnem času, je bistveno bolj zaželeno od direktnih metod, saj omogoča neprekinjeno delovanje, pri čemer umetna inteligenca obdeluje podatke o vibracijah, sili in akustični emisiji za boljše napovedi. Hibridni pristopi, ki združujejo UI z ekspertno logiko, omogočajo učinkovito prilagajanje dinamičnim pogojem in povečujejo zanesljivost ocenjevanja obrabe. Ključno vlogo pri tem imajo kakovostni senzorni podatki in njihova integracija, saj je za robustne napovedi treba obvladovati težave, povezane s hrupom in raznolikostjo podatkov. Uveljavljeni algoritmi strojnega učenja, kot so umetne nevronske mreže, podporni vektorji in naključni gozdovi, se izkazujejo kot zanesljivi pri obdelavi kompleksnih in spremenljivih podatkov. Kljub temu ostaja pomanjkanje standardiziranih podatkovnih nizov, meril ocenjevanja in terminologije velika ovira za širšo uporabo UI v tej domeni, zato so prihodnja prizadevanja usmerjena v vzpostavitev skupnih standardov. Umetna inteligenca se uspešno uporablja tudi za razvrščanje mehanizmov obrabe, kot so abrazija, adhezija in utrujenost, na podlagi SEM slik, kar zmanjšuje potrebo po ročnih analizah. Sistemi prediktivnega vzdrževanja, ki temeljijo na UI, dokazano zmanjšujejo stroške in izpade strojev z natančnim napovedovanjem obrabe ključnih komponent. Poleg tega je vključevanje trajnostnih obdelovalnih praks v UI-sisteme pomemben korak k učinkovitejši in okolju prijaznejši proizvodnji. Prihodnji razvoj bo usmerjen v povezovanje strojnega učenja z industrijskim internetom stvari, računalništvom v oblaku, kar bo omogočilo gradnjo prilagodljivih, učinkovitih in pametnih sistemov za spremljanje obrabe orodja.

Pri pregledu različnih raziskovalnih pristopov, ki smo jih obravnavali, pa se pojavlja tudi širša potreba po kritičnem premisleku o etičnih in družbenih implikacijah raziskovalnega dela. Čeprav se znanstvene metode osredotočajo na objektivnost in natančnost, je ključno, da raziskovalci aktivno razmišljajo o tem, kako njihova dela vplivajo na družbo in kako lahko zagotovijo, da je tehnološki napredek usmerjen v splošno dobro. Ne gre le za to, da se pridobljena znanja uporabljajo v dobro ljudi, ampak tudi da se predvidevajo in aktivno rešujejo morebitne škodljive posledice. Zato bo ta etična razsežnost postala vse bolj pomembna za razvoj odgovorne in trajnostne prihodnosti industrije [29].

Poglavje 3

Teoretične osnove

3.1 Tehnologija odrezavanja

3.1.1 Proces odrezavanja – splošno

Procesi obdelave z odrezavanjem tvorijo glavno skupino postopkov, ki jih uporabljamo pri izdelavi kovinskih izdelkov. Ti postopki vključujejo struženje, izstruževanje, rezkanje, vrtanje, posnemanje in povrtavanje. Cilj teh postopkov je izdelava izdelka z visoko stopnjo proizvodne učinkovitosti, tj. na ravni kakovosti in v želenem časovnem obdobju ter z ustreznimi stroški. Vsem procesom odrezavanja je skupna uporaba rezilnega orodja, ki ustvarja deformacije, zaradi katerih se deli odstranijo z obdelovanca v obliki odrezkov [30].

Na proces odrezavanja kovin pomembno vplivajo številni dejavniki [30]:

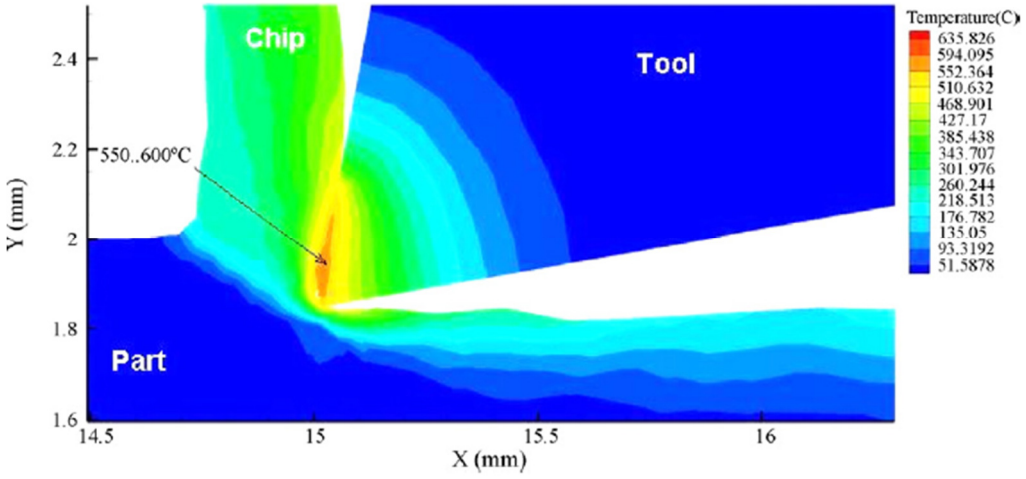
- *obdelovanec* (z njegovim materialom in geometrijo),
- *obdelovalni stroj* (upoštevajoč dejavnike, kot so moč, podajanje in hitrosti ter stabilnost, togost itd.),
- *procesno okolje* (vključno s hlajenjem in splošno stabilnostjo),
- *vpenjalni sistem* (obdelovanca in orodja),
- *rezilno orodje* (z uporabljenimi specifičnimi pogoji rezanja) in
- z*nanjem* (izkušnjami in strokovnostjo operaterja).

Osrednja komponenta tega procesa je rezilno orodje. Služi kot ključni vmesnik, kjer se združujejo vsi bistveni elementi obdelave. Interakcija med obdelovancem (materialom in geometrijsko obliko) in proizvodnim sistemom (obdelovalni stroj, rezilno orodje itd.) je skoncentrirana na rezilni rob. To je območje, kjer se pojavljajo rezilne sile, toplotni učinki in obrabni pojavi, ki neposredno vplivajo na učinkovitost, kakovost in življenjsko dobo obdelave. Zato sta zmogljivost in vzdržljivost rezilnega orodja ključnega pomena za zagotovitev uspešnega, zanesljivega in stroškovno učinkovitega proizvodnega procesa.

Na učinkovitost odrezavanja vpliva več dejavnikov, pri čemer ima vsak svojo vlogo pri splošni zmogljivosti in produktivnosti. Spremenljivke, kot so hitrost rezanja, podajanje in trdota materiala obdelovanca, določajo življenjsko dobo orodja in učinkovitost obdelave. Optimizacija teh parametrov lahko znatno poveča proizvodni obseg, hkrati pa zmanjša stroške in poveča konkurenčnost v proizvodnji. Poleg tega so prevleke, nanesene na rezilna orodja, ključne, saj vplivajo na odpornost proti obrabi in toplotno prevodnost, kar je bistveno za ohranjanje zmogljivosti odrezavanja v različnih delovnih pogojih.

Orodja so pri odrezavanju izpostavljena silam, le-te pa izhajajo iz deformacij pri nastanku odrezka in trenja med orodjem ter obdelovancem. Pri tem se sprošča toplota, ki segreva orodje, odrezek, pa tudi del obdelovanca. Pregrevanje orodja je kritična točka, saj

lahko zmanjša njegovo učinkovitost. Če poznamo orodja iz različnih materialov z različnimi temperaturnimi trdotami, lažje obvladujemo segrevanje in se izognemo izgubi rezilne sposobnosti. Namreč, preseganje kritične temperature lahko trajno poškoduje orodje in zmanjša njegovo rezilno moč. Najvišja temperatura se pojavi nekoliko odmaknjeno od cepilne ploskve, kjer se obraba kaže kot kotanja (glej Sliko 3.1).

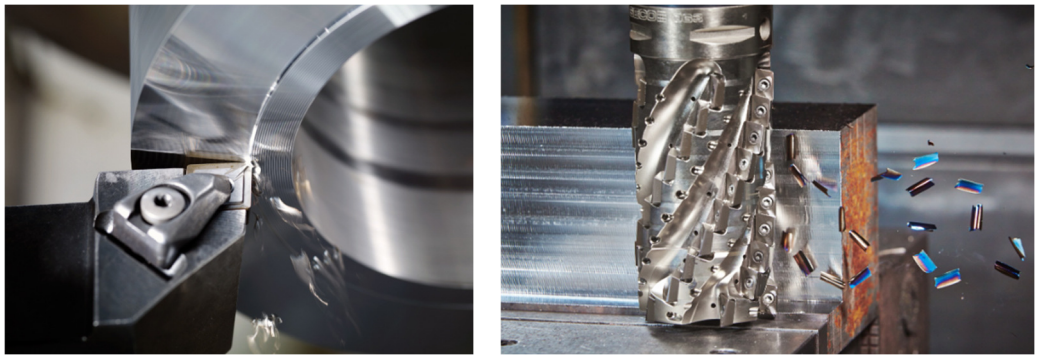


Slika 3.1: Primer porazdelitve temperatur med procesom odrezavanja aluminija 7475-T7351 [31].

Pri odrezavanju je zelo pomembno, da uporabljamo hladilno-mazalno sredstvo. To namreč pomaga zniževati temperaturo orodja in ustvarja zaščitni mazalni prostor, kar zmanjšuje trenje in pripomore k stabilnejši obdelavi. Dobro mazanje preprečuje pregrevanje orodja in nastanek nalepka na rezilnem robu, kar je ključnega pomena za podaljšanje njegove življenjske dobe. Pomembno je, da sredstvo doseže pravo mesto na orodju, sicer tvegamo temperaturni šok. Pri procesu lomljenja odrezkov hladilno-mazalno sredstvo poskrbi tudi za učinkovito odnašanje odrezkov, kar izboljšuje kakovost obdelave. Tekočine, ki jih uporabljamo kot hladilno-mazalna sredstva, se delijo v več kategorij: hladilne tekočine (na primer voda, ki sicer ne deluje kot mazivo, a zelo dobro hladi, a hkrati povzroča korozijo); raztopine sode in milnice; ogljikov tetraklorid, ki velja za eno najučinkovitejših sredstev, a se ga zaradi strupenosti danes ne uporablja več. Hladilna emulzija (mešanica vode in mineralnih olj z različnimi dodatki, na primer dezinfekcijskimi sredstvi, emulgatorji in mehčali) dobro hladi in zmanjšuje obrabo. Rezilna olja (mineralna, rastlinska ali živalska) pa zagotavljajo boljše mazalne lastnosti in zmanjšujejo trenje. Ne smemo pa pozabiti tudi na minimalno količinsko mazanje. Izbira ustreznih sredstev je odvisna od različnih dejavnikov, kot so hitrost obdelave, vrsta rezilnega materiala, učinkovitost odstranjevanja odrezkov in korozijska odpornost, kar je bistveno za celoten proces obdelave.

3.1.1.1 Rezilna orodja

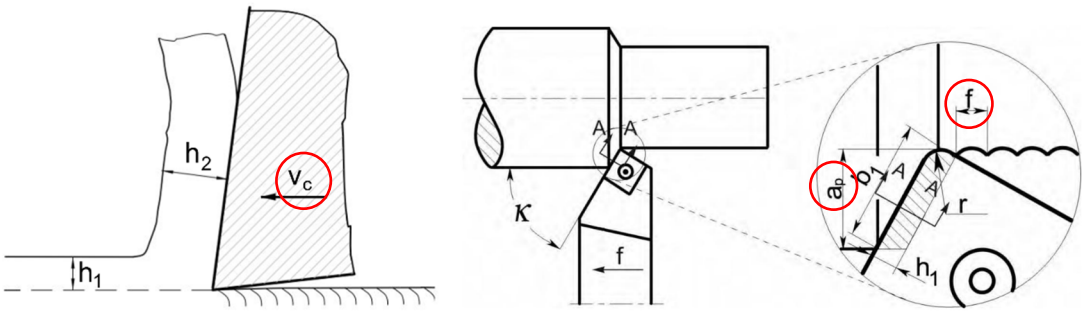
Rezilna orodja so ključna pri obdelavi materialov bodisi v izvedbi iz polnega materiala ali pa z zamenljivimi ploščicami. Izbira ustrezne zamenljive ploščice omogoča optimalno prilagoditev specifičnim zahtevam obdelave in s tem povečuje učinkovitost. Zaradi stroškovnih pritiskov se pri orodjih iz polnega materiala pogosto izvaja obnova po daljši uporabi. Ta obnova obsega brušenje ali drugačno pripravo rezilnih robov, kar podaljšuje življenjsko dobo in izboljšuje učinkovitost, poleg tega pa se nanese nova prevleka za boljšo obstojnost. Pritrditev rezilnih ploščic na držalo je izvedena na različne načine, s spono ali vijakom, kar dopušča fleksibilnost uporabe (glej Sliko 3.2).



Slika 3.2: Pritrditev rezilnih ploščic na držala orodij pri operaciji struženja in rezkanja [3].

3.1.1.2 Rezilni parametri

Spremenljivke, ki vplivajo na količino odstranjenega materiala v določenem času, imenujemo rezilni parametri. Ti so izjemno pomembni za optimizacijo same proizvodnje. Vrednosti teh parametrov nastavimo na obdelovalnem stroju, pri čemer natančne nastavitve omogočajo, da dosežemo želene rezultate obdelave. Rezilna hitrost ***vc*** **(m/min)**, ki je definirana kot hitrost gibanja rezilnega orodja po površini obdelovanca med procesom odrezavanja, vpliva na kakovost površine in življenjsko dobo orodja. Gre torej za hitrost gibanja orodja glede na obdelovanec, ne glede na to, ali se premika le orodje ali pa obdelovanec, lahko pa se gibljeta oba. Stopnja odvzema materiala in potrebna moč sta v precejšnji meri odvisni od rezilne hitrosti, kar kaže na kompleksnost interakcij med samimi parametri obdelave. Podajanje ***f*** **(mm/vrt)** pa je aksialni ali radialni pomik obdelovanca (ali rezilnega orodja) na en vrtljaj orodja ali obdelovanca, kar je ključno merilo za določanje učinkovitosti rezanja. To pomeni medsebojni premik orodja in obdelovanca v danem časovnem obdobju. V praksi podajamo njegovo velikost tudi v mm/min – recimo pri rezkanju – kar omogoča primerjavo med različnimi postopki obdelave. Pri operacijah, kot sta vrtanje in rezkanje, lahko navajamo podajanje na rezilo ali celotno podajanje rezilnega orodja (kot vsoto vseh podajanj aktivnih rezil). To namreč omogoča natančnejše načrtovanje obdelovalnih procesov. Globino prodiranja rezilnega orodja v površino obdelovanca imenujemo globina rezanja ***ap*** **[mm]**, ki je prikazana na primeru struženja na Sliki 3.3 in je ključni parameter pri sami analizi učinkovitosti obdelave. Globino rezanja merimo pravokotno na smer podajanja.



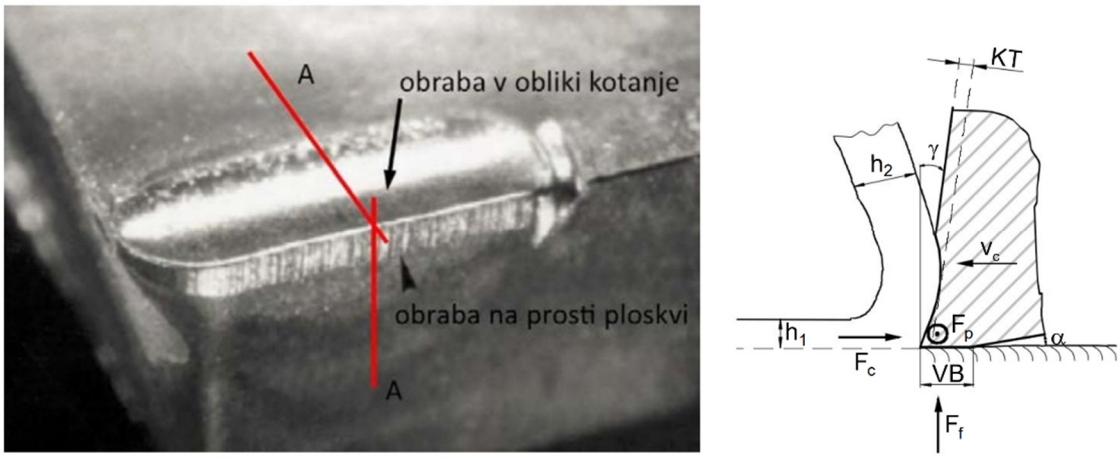
Slika 3.3: Parametri procesa odrezavanja [30].

3.1.1.3 Geometrija rezilnega orodja

Geometrija rezilnega orodja, razumevanje katere je ključno za obdelavo materialov, je definirana z različnimi dimenzijami in elementi. Razvoj na področju izdelave orodij je omogočil uporabo kompleksnejših geometrij. Ločimo med makrogeometrijo orodja, ki zajema vse glavne geometrijske značilnosti, mikrogeometrija pa se osredotoča na obliko rezilnega roba, katerega geometrija neposredno vpliva na sam proces odrezavanja. Primerna geometrija je torej ključnega pomena za dosego želenih rezultatov pri obdelavi. Pri raziskovanju geometrije rezilnih orodij za obdelavo kovin obstajajo različna, a ključna pravila, ki usmerjajo prizadevanja za optimizacijo učinkovitosti in produktivnosti. Pomembna sta zlasti dva kota: kot klina in kot pri vrhu, imenovan ε. Ta kota igrata pomembno vlogo pri delovanju orodja, predvsem pa poskrbita za odvajanje toplote, kar pomaga preprečiti pregrevanje orodja in s tem podaljšuje njegovo življenjsko dobo. Poskrbita pa tudi za hlajenje rezilnega roba, kar je bistveno za ohranjanje kakovosti obdelovancev. Poleg tega, kot kažejo raziskave, je razumevanje teh geometrijskih lastnosti podkrepljeno z empiričnimi izračuni, ki potrjujejo vpliv rezilnih sil na kakovost obdelave. Izvedene analize omogočajo razvoj učinkovitejših strategij obdelave, kar povečuje konkurenčnost v sami industriji.

Obraba rezilnega orodja med drugim povzroča spremembe geometrije, ki vplivajo na kvaliteto obdelanih izdelkov. Na rezilnem robu se zaradi specifičnih pogojev rezanja pojavljajo tipični vzorci obrabe, kot sta obraba na hrbtni strani in kotanjasta obraba. Vsaka od njiju ima svoje mehanizme in posledice za delovanje orodja (glej Sliko 3.4). Obraba na prosti ploskvi poveča dolžino stika med rezilnim orodjem in obdelovancem, kar neposredno vpliva na kakovost površine. Sčasoma prosti kot zaradi obrabe izginja in se približuje vrednosti $\alpha = 0°$ ali postane celo negativen, medtem ko se kot klina β veča. Ta proces obrabe različno vpliva na mehanizme odrezavanja. Povečana obremenitev proste ploskve vodi v večji upor proti odrezavanju, kar lahko precej zmanjša učinkovitost in življenjsko dobo orodja. Za razumevanje teh vzorcev obrabe in njihovih posledic je torej potrebna natančna analiza.

Kotanjasta obraba vpliva na zmožnost rezanja, saj zmanjšan kot ob robu zmanjša upor pri odrezavanju, kar pa nekoliko negativno vpliva na obremenljivost rezilnega roba – predvsem zaradi zmanjšanja kota klina β. Ta oblika obrabe povzroča zmanjšanje kota blizu linije roba, in primerljivo, zmanjšanje cepilnega kota proti cepilni ploskvi. V določenih okoliščinah se cepilni kot po nekem času ustali in doseže konstantno vrednost. Samo mesto kotanjaste obrabe se lahko pojavi na različnih razdaljah od linije roba, odvisno pa je predvsem od kombinacije rezilnih parametrov in materiala obdelovanca. Pri materialih, ki tvorijo krhke in kratke odrezke, se ta obraba lahko pojavi zelo blizu linije roba, celo sovpada z obrabo na prosti ploskvi. Posledično se zaradi obrabe na prosti ploskvi obrablja konica rezilnega orodja in se poveča kontaktna površina med konico in obdelovancem, kar poveča ekvivalentni radij konice. Če pri tovrstni obrabi ni motenj, recimo vibracij, je lahko hrapavost obdelane površine manjša od teoretične. Med uporabo rezilnega orodja se radij roba včasih poveča, a to ni nujno. Rob se lahko v neugodnih okoliščinah dokaj hitro obrabi ali deformira v nekaj sekundah, lahko pa ostane praktično nespremenjen skozi celotno življenjsko dobo orodja.



Slika 3.4: Primer obrabe na prosti ploskvi VB in obraba v obliki kotanje KT [30].

3.1.1.4 Okoljske obremenitve

Okoljske obremenitve, ki vplivajo na proces odrezavanja in delovanje orodja, izhajajo iz več medsebojno povezanih virov. Sem spadajo splošni procesni pogoji, kot so obdelovalni stroji, sistemi vpenjanja ter sistemi za hlajenje. Poleg tega na te obremenitve vplivajo izbrani parametri rezanja (rezilne hitrosti, podajanje in globina rezanja). K obremenitvenemu okolju prispevajo tudi zasnova in lastnosti materiala samega rezilnega orodja, vključno z njegovo trdnostjo, stabilnostjo in odpornostjo proti obrabi. Poleg tega imajo sestava, trdota in strukturne značilnosti materiala obdelovanca ter njegova geometrija bistveno vlogo pri določanju narave in velikosti okoljskih obremenitev, ki delujejo na sistem.

3.1.2 Vrste rezilnih orodij

Različne operacije CNC strojne obdelave zahtevajo namenska rezilna orodja za učinkovito odstranjevanje materiala in doseganje želenih rezultatov. Izbira orodja je odvisna od materiala, vrste operacije in zahtevane natančnosti. Ločimo orodja za rezkanje, vrtanje, struženje, povrtavanje, izdelavo navojev itd. (glej Sliko 3.5). Ker se v doktorski disertaciji bolj nagibamo k procesu struženja, je tukaj večji poudarek na orodju za struženje.

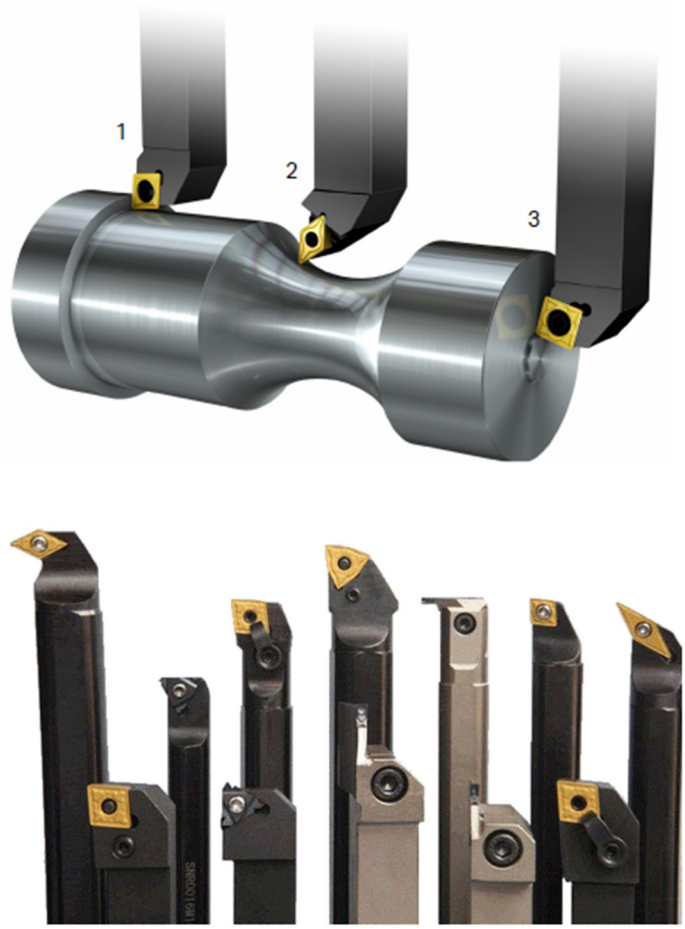


Slika 3.5: Primeri različnih vrst rezilnega orodja [32].

Struženje je ena izmed najbolj razširjenih in pomembnih postopkov za mehansko obdelavo kovin, ki se uporablja tako pri posamični kot tudi serijski proizvodnji. Glavno gibanje pri struženju je krožno in ga izvaja obdelovanec, medtem ko orodje izvaja podajno gibanje, ki je lahko vzdolžno ali prečno glede na os rotacije obdelovanca. Gibanje orodja lahko poteka po zunanji ali notranji konturi obdelovanca. Poleg tega, če orodje izvaja gibanje istočasno vzdolžno in prečno, je mogoče izdelovati konuse, profile in konture poljubnih oblik, kar še dodatno povečuje uporabnost tega postopka.

Osnovne operacije pri struženju lahko razdelimo v več kategorij (glej Sliko 3.6), ki vključujejo:

- vzdolžno struženje, ki se izvaja na zunanji in notranji površini obdelovanca,
- prečno struženje, prav tako na zunanji in notranji konturi,
- obdelavo konusov in
- profilno struženje, ki omogoča izdelavo kompleksnih profilov na obdelovancu [33].



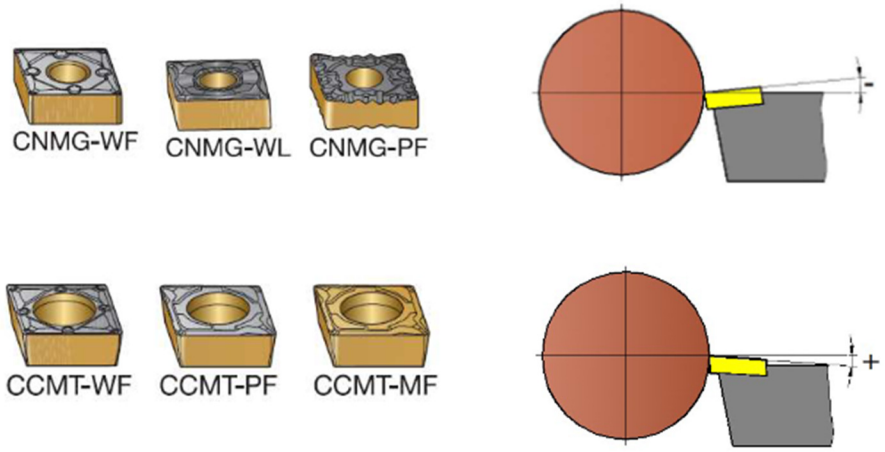
Slika 3.6: Osnovne operacije struženja in vrste rezilnih orodij [33,34].

Orodja za struženje so enorezilna in delujejo po principu klina. Rezilni del in držalo sta lahko izdelana iz enega kosa, rezilo je lahko lotano na držaj ali pa je rezilna ploščica mehansko pritrjena na ustrezno držalo. Orodja za struženje se razlikujejo glede na namen (grobo ali fino struženje), geometrijo (različni koti rezilnega roba), tehnološke lastnosti (globina reza, podajanje) ter material (hitrorezno jeklo, karbidna trdnina) in druge dejavnike. Danes so najbolj razširjena orodja z mehansko pritrjeno rezilno ploščico, ki

ponujajo številne prednosti, in sicer da ni potreben postopek ostrenja, natančna in ponovljiva geometrija rezilnega roba ter krajši čas menjave orodja.

Geometrija orodja ima ključno vlogo pri uspehu obdelave s struženjem. Pri sodobnih orodjih za struženje, ki jih sestavljata rezilna ploščica in držalo, se geometrija orodja običajno nanaša na rezilno ploščico. Obstajata dve glavni vrsti rezilnih ploščic (glej Sliko 3.7):

- osnovna negativna in
- osnovna pozitivna geometrija.



Slika 3.7: Rezilne ploščice z negativno in pozitivno geometrijo [34].

Rezilne ploščice z negativno geometrijo se uporabljajo, kadar to omogoča togost obdelovalnega stroja in zmanjšana žilavost materiala. Kakovost obdelane površine je slabša v primerjavi z orodji s pozitivno geometrijo, saj zaradi gibanja ostružkov proti obdelovancu nastaja več toplote, pogosto pa ni potrebe po lomljenju odrezkov. Rezilne ploščice s pozitivno geometrijo se uporabljajo vedno, kadar orodja z negativno geometrijo ne dajejo zadovoljivih rezultatov, na primer pri obdelavi žilavih ali mehkih materialov, v primerih nezadostne togosti orodja ali obdelovalnega stroja ter ob pojavu vibracij med obdelavo [34].

Geometrija rezilnih ploščic za struženje je razdeljena na tri osnovne oblike, prilagojene za grobo, srednjo in fino obdelavo. PR-geometrija je namenjena grobi obdelavi, pri kateri je pomembna visoka obstojnost rezilnega roba. PM-geometrija je primerna za obdelavo jekel s srednjimi zahtevami glede obdelovalnih parametrov. PF-geometrija pa je namenjena obdelavi, kjer nastopajo nizke rezilne sile in majhne globine rezanja ter podajanja.

Proizvajalci orodij ponujajo številne geometrije rezilnih ploščic, prilagojene za obdelavo različnih materialov. Najpogosteje uporabljene so štiri osnovne oblike rezilnih ploščic [35]: kvadratna, trikotna, rombična in okrogla. Vsaka od teh oblik obstaja v številnih variantah, ki lahko vključujejo pozitivno ali negativno geometrijo, prisotnost ali odsotnost lomilcev odrezkov, izvrtine za pritrditev ter različne radije zaokrožitve konice. Kvadratne ploščice imajo 4 ali 8 rezilnih robov, odvisno od zasnove držala orodja. Uporabne so za večino stružnih opravil, kjer to dopuščata tako obdelovanec kot orodje, poleg tega pa je njihova uporaba zaradi velikega števila rezilnih robov zelo ekonomična. Trikotne ploščice imajo 3 ali 6 rezilnih robov, pri čemer je kot med njimi 60°, kar je manj ugodno v primerjavi s kvadratno ploščico s kotom 90°. Zaradi manjšega števila rezilnih robov in slabše trdnosti se trikotne ploščice uporabljajo predvsem v primerih, ko ni smiselna uporaba ploščice druge oblike, na primer pri izdelavi stopnic, struženju kontur in izdelavi navojev. Rombične rezilne ploščice so bile razvite za čiščenje ostankov materiala. Koti med rezilnimi robovi so 86°, 80°, 55° in 35°, pri čemer je najbolj razširjena ploščica s kotom 55°. Okrogle rezilne

ploščice zagotavljajo dobro kakovost površine pri visokih podajanjih in so primerne za izdelavo notranjih radijev. Okrogla oblika jim nudi veliko togost in majhno debelino odrezka. Pri njihovi uporabi se pojavljajo velike rezilne sile in pogoste vibracije [34].

Vsaka geometrija rezilne ploščice je oblikovana tako, da zajema področja uporabe, ki jih določajo priporočena območja podajanja in globine rezanja. Rezilne ploščice za fino obdelavo večinoma uporabljajo le konico ploščice in so namenjene manjšemu podajanju ter globini reza, medtem ko se za grobo obdelavo uporabljajo ploščice z relativno dolgim glavnim rezilnim robom, ki so primerne za večja podajanja in globine. Pri načrtovanju obdelave se zato najprej izberejo rezilne ploščice za grobo obdelavo z ustreznimi rezilnimi parametri [36].

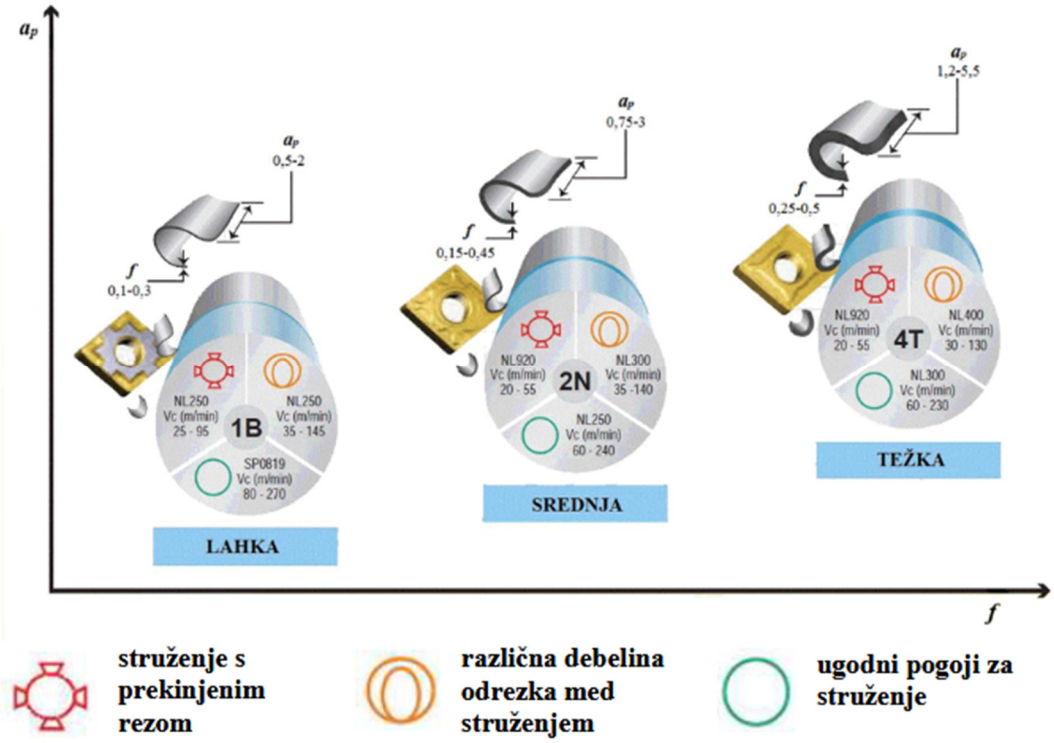
Pri grobi obdelavi je cilj odstraniti čim več materiala v čim krajšem času, pri čemer je pomembna tudi kakovost površine. Zaradi večjih rezilnih sil je treba upoštevati omejitve, kot so razpoložljiva moč stroja, togost sistema stroj–orodje, možnost nastanka vibracij ter oblika odrezka. Parametri obdelave se izbirajo tako, da sta tako čas obdelave kot stroški za orodje čim manjša, hkrati pa je odvzem materiala čim večji (glej Tabelo 3.1).

Pri fini obdelavi pa je končna geometrija in kakovost površine izdelka dosežena v zadnjem koraku, zato je treba izbrati primerne parametre obdelave. Običajno so rezilna hitrost, globina rezanja in podajanje manjši kot pri grobi obdelavi. S pravilno izvedeno fino obdelavo lahko odpade potreba po nadaljnjih operacijah, kot je brušenje in honanje.

Tabela 3.1: Vpliv parametrov obdelave na proces odrezavanja [30].

Globina rezanja a_p [mm]	
Premala	Prevelika
– slabo odvajanje odrezka, – vibracije, – nastanek toplote med odrezavanjem, – ni ekonomično.	– velika poraba moči, – poškodbe orodja, – povečevanje rezalnih sil.
Podajanje f [mm/vrt]	
Premalo	Preveliko
– hitra obraba rezalnega roba, – nastanek nalepka, – ni ekonomično.	– slabo odvajanje odrezka, – slaba kakovost površine, – velika poraba energije, – zvarjanje odrezka.

Slika 3.8 prikazuje vpliv pogojev obdelave (lahka, srednja, težka) na izbiro rezilne ploščice ter pripadajoče parametre obdelave. Lahka obdelava poteka pod ugodnimi pogoji za struženje, pri neprekinjenem rezu, predobdelanih ploskvah in togem vpetju obdelovanca. Srednja obdelava se izvaja na povprečnih pogojih za struženje, pri spremenljivi globini rezanja, manjšem togem vpetju obdelovanca in predvsem pri obdelavi odlitkov in odkovkov. Težka obdelava vključuje obdelavo s prekinjenim rezom in obdelavo trde površine obdelovanca.



Slika 3.8: Priporočljivi parametri obdelave pri operaciji struženja [30].

3.1.3 Vrste rezilnih materialov

Zahteve, ki jih imamo pri rezilnih materialih, se spreminjajo glede na to, kaj dejansko delamo. Pri vsaki posamezni nalogi se pojavlja poseben, bolj ali manj edinstven skupek obremenitev rezilnega orodja. Če sta si dve aplikaciji zelo podobni po jakosti in načinu obremenitve, ju lahko obravnavamo kot neko specifično področje obremenitve. To nam omogoča, da bolj sistematično izbiramo materiale in oblike orodja. Uporaba materiala, ki je bolj krhek, a bolj odporen proti obrabi, v kombinaciji z močnejšo obliko orodja, je lahko dobra alternativa za material, ki je bolj žilav, a ima šibkejšo geometrijsko obliko orodja. Ker imajo proizvajalci orodij različne pristope, pogosto priporočajo različne rezilne materiale za isto področje, kar seveda vodi v precejšnjo raznolikost pri optimizaciji rezilnih procesov.

Ker se obremenitve in njihovi vzorci močno razlikujejo med različnimi aplikacijami, je izbira materialov res ključnega pomena. Iščemo idealno kombinacijo žilavost (mislimo na upogibno trdnost) in odpornost proti obrabi (kar pomeni trdota in tlačna trdnost) , ki bo ustrezala določeni aplikaciji. Do danes še ni uspelo združiti visoke odpornosti proti obrabi z visoko žilavostjo v istem orodnem materialu. Trdi materiali za orodja imajo po navadi nižjo žilavost, medtem ko imajo žilavi materiali nižjo trdoto. To razliko med zahtevano odpornostjo proti obrabi in žilavostjo lahko delno nadomestimo s prevlekami ali materiali z gradientnimi lastnostmi. Tako dosežemo visoko odpornost kontaktnih površin rezilnega orodja proti obrabi posredno, medtem ko ohranjamo žilavost v drugih delih orodja. Seveda pa niso pomembni samo žilavost in odpornost proti obrabi, obstajajo tudi drugi parametri, ki vplivajo na zmogljivost in izbiro materiala. Trdota, upornost proti deformaciji, tlačna trdnost in odpornost proti abrazivni obrabi opisujejo iste materialne lastnosti. Ločimo med makro- in mikrožilavostjo rezilnega materiala. Makrožilavost pomeni maksimalno upogibno trdnost materiala, mikrožilavost pa njegovo odpornost na zareze v različnih okoljih.

Hrapavost površine in dimenzijska natančnost mikrogeometrije sta bila tudi predmet številnih raziskav. Čeprav ni veliko splošno veljavnih ugotovitev, so študije pokazale, da je hrapavost površine rezilnega orodja pomembna za ohranjanje prevleke na aktivnem delu orodja.

Tabela 3.2: Pomembne lastnosti rezilnih materialov [30].

Lastnost	Opis
Trdota	Osnovna zahteva je, da mora biti rezalni material trši od obdelovanega.
Obstojnost proti obrabi	Pogosto sinonim za trdoto in obstojnost proti abrazivni obrabi.
Žilavost	Potrebna je za preprečevanje zlomov in oblikovanja razpok. Enakovredna je upogibni trdnosti materiala in odpornosti proti lomu. Žilavost je zelo pomembna za obstojnost proti adhezijski obrabi.
Preoblikovalni odpor	Delno se prekriva s trdoto, tlačno trdnostjo in odpornostjo proti abrazivni obrabi.
Trdota v vročem	Trajna trdota pri povišanih temperaturah.
Toplotna obstojnost	Lastnost materiala, da dlje ohrani fizikalne lastnosti pri povišanih temperaturah.
Kemijska obstojnost	Odpornost proti kemijskim procesom v danih delovnih pogojih, vključno z oksidacijskimi in difuzijskimi procesi.
Sprijemanje obdelovanega na rezalni material	To lastnost je zelo težko ovrednotiti, vendar je zelo pomembna za nekatere aplikacije, npr. kadar adhezijska obraba ni sprejemljiva.
Izdelovalnost	Ta faktor opisuje, kako lahko je izdelati orodje z določenimi površinami, dimenzijami, lastnostmi in obliko.
Stroški	Stroški orodja v povezavi z njegovo zmogljivostjo in zahtevano ravnjo kakovosti obdelanega izdelka.

Razumevanje specifičnih lastnosti rezilnih orodij je pomembno za oceno njihove učinkovitosti in življenjske dobe (glej Tabelo 3.2). Med delovanjem orodja pride do različnih poškodb, kar postopoma vodi v njegovo slabšanje. Orodja z večjo žilavostjo običajno bolje ohranjajo svojo zmogljivost tudi v poškodovanem stanju. Seveda so ključne materialne lastnosti, kot so velikost zrn, upogibna trdnost in lomna žilavost. Povečanje velikosti zrn lahko zmanjša odpornost materiala na zareze, kar je mogoče pojasniti s prisotnostjo večjih zrn v deformiranem materialu, kar je pomembno za razumevanje njihovih mehanskih lastnosti. To načeloma velja za kompozitne materiale, kot so karbidne trdine s konstantno vsebnostjo veziva, kar omogoča izboljšanje mehanskih lastnosti. Lokalno povečanje trdnosti in žilavosti lahko dosežemo z gradientnimi lastnostmi, torej s prilagoditvijo sestave rezilnega materiala vzdolž aktivne kontaktne površine orodja, kar še dodatno izboljša odpornost proti obrabi. S povečanjem trdnosti rezilnega orodja tam, kjer je največja obremenitev, se lahko izognemo nastanku razpok, krušenju robov in odpovedi orodja.

Odpornost rezilnega materiala proti preoblikovanju je mogoče povečati glede na raven napetosti, ki povzroča trajno deformacijo pri določeni temperaturi. Za vsak material obstaja razmerje med odpornostjo proti plastični deformaciji in temperaturo. Ko temperatura naraste, se trdnost materiala zmanjša, kar je bistvenega pomena za optimizacijo delovnih parametrov. Temperatura zmehčanja predstavlja točko, pri kateri rezilni material izgubi svojo trdnost oziroma funkcionalnost, kar se razlikuje glede na vrsto materiala. Pri krhkih materialih z razmeroma visoko stopnjo relativne krhkosti se tlačna trdnost s povišanjem temperature v procesu zmanjša hitreje kot upogibna trdnost.

Da bi rezilno orodje dobro opravljalo svoje delo, mora biti material rezila nujno trši od materiala, ki ga obdelujemo. Pri tem pa imajo tradicionalni materiali svoje omejitve. Te omejitve lahko zaobidemo s pomočjo metalurgije prahov. S tem dosežemo želeno velikost delcev in zagotovimo potrebne lastnosti. S tehnikami metalurgije prahov lahko izdelamo različne rezilne materiale, v splošnem pa ločimo trde faze, ki zagotavljajo odpornost proti obrabi, vezivo, ki drži trde faze skupaj in dodatke, ki poenostavijo sam proizvodni proces.

Z dodatnimi fazami lahko v večini primerov izboljšamo tudi toplotno prevodnost. Pri izdelavi rezilnih orodij iz karbidne trdnine uravnavamo ravnotežje med odpornostjo proti obrabi in žilavostjo predvsem z deležem veziva. Če povečamo delež veziva in velikost zrn, dobimo bolj žilav rezilni material. Postopki metalurgije prahov omogočajo pripravo materialov, ki so izjemno odporni proti abrazivni obrabi in imajo zadovoljivo upogibno trdnost. Ustrezna izbira surovin in njihovih posebnih lastnosti, makro- in mikrogeometrije orodja, pa tudi gradientnih lastnosti orodja in prevleke orodja, je ključnega pomena za izpolnitev funkcionalnih zahtev rezilnega orodja in doseganje želenih lastnosti (glej Tabelo 3.3).

Tabela 3.3: Karakteristike rezilnih materialov [30].

	Trdota, HV [kN/mm^2]	Temperatura zmehčišča [°C]	Upogibna trdnost [N/mm^2]	Relativna krhkost, B_{tm}
Orodno jeklo	7–9	200–400	1800–2600	1,1–1,4
Hitrorezno jeklo	7,6–10,5	600–700	2000–3100	1,15–1,25
Karbidno jeklo	9–10	600–700	650–800	3–4
Stelit	6,7–7,8	700–800	2000–2800	1–1,15
Karbidna trdina	12,5–18	750–950	900–2400	1,5–5
Cermet	14–16	850–1100	2000–2500	1,8–2,5
Keramika	12–21	1100–1300	500–900	6–12
PCBN	25–67	950–1250	700–1200	2–3
Diamant DDC, PCD	50–75	800	500–1100	6–11

3.1.3.1 Orodno jeklo

Odvisno od sestave so legirana in nelegirana, imajo 0,6 do 1,3 % C. Orodna jekla zdržijo do 250 °C (300 °C), pri višjih temperaturah pa se zelo hitro zmanjšuje trdota. Zato niso primerna za velike hitrosti in se danes pri odrezavanju komaj še uporabljajo.

3.1.3.2 Hitrorezna jekla (HSS)

So legirana jekla na osnovi Cr, W, V in Mo in imajo 0,7 do 1,3 % C. S hitroreznimi jekli lahko delamo 5-x hitreje kot z orodnimi jekli. Imajo bistveno boljše rezilne sposobnosti kot orodna jekla, večjo obstojnost, večjo trdoto pri povišani temperaturi (uporabni do 650 °C). So žilava, z veliko upogibno trdnostjo, uporabna za prekinjeno odrezavanje. Namenjena so za vsa orodja v tehniki odrezavanja – stružni noži, svedri, rezkarji itd.

3.1.3.3 Karbidne trdine (KT)

So sintrani materiali na osnovi trdih karbidov (TiC, TaC, WC, VC) in vezivom Co. Naloga karbidov je doseči čim večjo trdoto pri povišani temperaturi in odpornost proti obrabi (trdota), naloga veziva pa je povezava krhkih karbidov v trdno telo (trdnost). Poznamo veliko vrst karbidnih trdin, ki se uporabljajo za odrezavanje kovin ali za strojne elemente, kjer je potrebna visoka trdota materiala.

3.1.3.4 Cermeti

Cermeti so sestavljeni materiali iz keramike in kovinske faze. Keramična faza je v večini primerov titanov nitrid, kovinska vezna faza pa je najpogosteje nikelj. Keramične sestavine cermetov so znane po velikih trdotah pri povišani temperaturi in odpornosti proti oksidaciji. Kovinske sestavine pa so nosilke odpornosti proti temperaturnim šokom. Cermete se izdeluje po postopkih metalurgije prahov v rezilne ploščice. Moderne cermete uporabljamo za končno obdelavo jekel z velikimi rezilnimi hitrostmi pri majhnih podajanjih in majhnih globinah rezanja.

3.1.3.5 Rezilna keramika

Rezilna keramika je naravno trd rezilni material na osnovi čistega aluminijevega oksida (Al_20_3), cirkonijevega oksida ZrO_2 in silicijevega nitrida Si_3N_4. Materiali so v rabi bodisi čisti bodisi z dodatki. Keramika je sintran material pod tlakom do visoke gostote. Prednosti rezilnih ploščic iz keramike v primerjavi s karbidnimi trdinami so predvsem visoka hitrost obdelave, dolgi obstojni časi in s tem velika učinkovitost in velika kemijska stabilnost tudi pri povišani temperaturi (1.200 °C). Pomanjkljivost keramike pa je predvsem krhkost ter občutljivost na mehanske udarce in termične šoke.

3.1.3.6 Polikristalni diamant (PKD)

Polikristalni diamant (PKD) je sintetični material iz diamanta, ki se ustvari s sintranjem finih diamantnih prahov pod visokim pritiskom in visoko temperaturo z uporabo kovinskega veziva. V nasprotju z enokristalnim diamantom, ki ima neprekinjeno kristalno strukturo, je PKD sestavljen iz številnih majhnih medsebojno povezanih diamantnih kristalov. Zaradi te edinstvene mikrostrukture ima PKD odlično kombinacijo trdote, odpornosti proti obrabi in žilavosti, zaradi česar je primeren za različne industrijske aplikacije. PKD ima več ključnih lastnosti, ki prispevajo k njegovi učinkovitosti pri aplikacijah odrezavanja, in sicer izjemno trdoto, zaradi česar je odporen proti abrazivni obrabi, visoko odpornost proti obrabi zaradi medsebojno povezane mikrostrukture diamantnih kristalov, žilavost zaradi naključne usmerjenosti diamantnih kristalov in prisotnosti vezivnega materiala, toplotno stabilnost, zaradi česar je primeren za visoko hitrostne operacije odrezavanja, ter kemično inertnost, saj ne reagira z večino materialov, kar zagotavlja stabilnost odrezavanja in preprečuje obrabo orodja. Kljub številnim prednostim ima PKD nekatere omejitve, in sicer višjo začetno investicijo, saj so PKD orodja dražja od tradicionalnih rezilnih orodij. Čeprav ima PKD večjo žilavost kot enokristalni diamant, je še vedno lahko krhek v določenih aplikacijah odrezavanja. PKD ni primeren za odrezavanje železnih materialov pri visokih temperaturah zaradi kemijske reakcije med diamantnimi ogljiki in železom. Rezilna orodja PKD se predvsem uporabljajo za obdelavo neželeznih materialov, kompozitov, aluminija, keramike in ostalih abrazivnih materialov.

3.1.3.7 Kubični kristalni borov nitrid (CBN)

Je izjemno trd sintetični material in je drugi najtrši material po diamantu. Gre za umetni borov nitrid, proizveden pod visokim pritiskom in visokotemperaturnimi pogoji. CBN ima več ključnih lastnosti, ki prispevajo k njegovi učinkovitosti kot rezilnemu materialu, in sicer izjemno trdoto (skoraj tako visoko kot diamant), kar mu omogoča učinkovito rezanje trdih in abrazivnih materialov, visoko toplotno stabilnost v nasprotju z diamantom, ki se ob prisotnosti železa pri visokih temperaturah odziva, kemično inertnost, saj ne reagira z večino materialov, kar preprečuje obrabo orodja, visoko odpornost proti obrabi, kar

omogoča orodju CBN, da ohrani svoj rezilni rob dlje časa, in visoko žilavost, zaradi česar je manj verjetno, da se bo okrušil ali zlomil med obdelavo. Kljub številnim prednostim ima CBN tudi nekatere omejitve, in sicer visoke stroške, saj so orodja CBN dražja od konvencionalnih rezilnih orodij, vendar se višji stroški večinoma izravnajo z daljšo življenjsko dobo orodja in povečano produktivnostjo. Ni primeren za odrezavanje neželeznih materialov, kot so aluminij, baker in magnezij, saj ti materiali reagirajo s CBN pri visokih temperaturah. Čeprav je CBN bolj žilav kot keramika, je še vedno lahko krhek pod visokimi obremenitvami. Zaradi vseh teh specifičnih lastnosti ostaja CBN idealen rezilni material za obdelavo trdih železnih zlitin in drugih zahtevnih materialov.

3.2 Mehanizmi obrabe rezilnega orodja

3.2.1 Splošno o obrabi orodja

Obraba orodja igra ključno vlogo pri mehanski obdelavi, saj neposredno vpliva na kakovost površine in učinkovitost obdelave, zaradi česar je ključni dejavnik pri ocenjevanju delovanja rezilnega orodja. Številne raziskave so bile namenjene razumevanju in napovedovanju obrabe orodja, vendar mnoge od teh raziskav ostajajo večinoma empirične. Obraba orodja nastane zaradi različnih vplivov, vključno z lastnostmi obdelovanca, značilnostmi obdelovalnega stroja, zasnovo rezilnega orodja, nanosom hladilne tekočine in pogoji rezanja. Zaradi medsebojnega delovanja teh dejavnikov so pogoji na stikih med orodjem, odrezkom in obdelovancem med rezanjem zelo lokalizirani in jih je težko opisati, saj vključujejo intenzivne temperature na površini. Poleg tega je termomehansko obnašanje obdelovanca v tako težkih pogojih zelo nelinearno in kompleksno. Med obdelavo je rezilno orodje v neposredni interakciji z obdelovancem. Iz območja rezanja v rezilno orodje se prenaša precejšnja toplota, kar zviša temperaturo na stiku med orodjem in obdelovancem ter poveča obrabo. Rezilno orodje mora zato prenesti visoke mehanske obremenitve in toplotne napetosti, kar sčasoma vodi do postopne obrabe orodja [37].

3.2.2 Merila obstojnosti in obrabe orodja

Merila za obrabo orodja niso enaka merilom obstojnosti orodja. Medtem ko obstojnost orodja določa točko, ko orodje ne dosega več želenih rezultatov, merilo obrabe nakazuje, kdaj zamenjati orodje, da bi preprečili njegovo odpoved. Merilo obrabe torej vključuje določeno rezervo pred koncem življenjske dobe rezilnega orodja. Izbira merila je odvisna od zahtev same naloge, ki jo mora orodje izpolniti. Pri tem pomembno vplivajo dejavniki, kot so kakovost površine, tolerance in morebitne posebne lastnosti obdelovanca. Če imamo opravka z robustnimi procesi, merilo obrabe ustreza najdaljšemu dovoljenemu času delovanja. V praksi se lahko ne glede na izbrano merilo odločimo za zamenjavo orodja tudi prej. Pri fini obdelavi lahko včasih dopustimo lokalne poškodbe rezilnega roba, celo določene napake na površini. Nasprotno pa lahko že manjše poškodbe rezilnega roba pri fini obdelavi poslabšajo topografijo obdelane površine.

Merila obrabe pri grobi obdelavi so tesno povezana z merili obstojnosti, torej s točko, ko orodje zaradi sprememb geometrije ne opravlja več svoje funkcije. Orodje takrat povsem odpove po predhodni plastični deformaciji in obrabi. Enakomerna obraba proste ploskve lahko podaljša življenjsko dobo orodja in zmanjša glavne napetosti v njem. Medtem ko lokalizirana in kotanjasta obraba lahko privedeta do hitre odpovedi orodja.

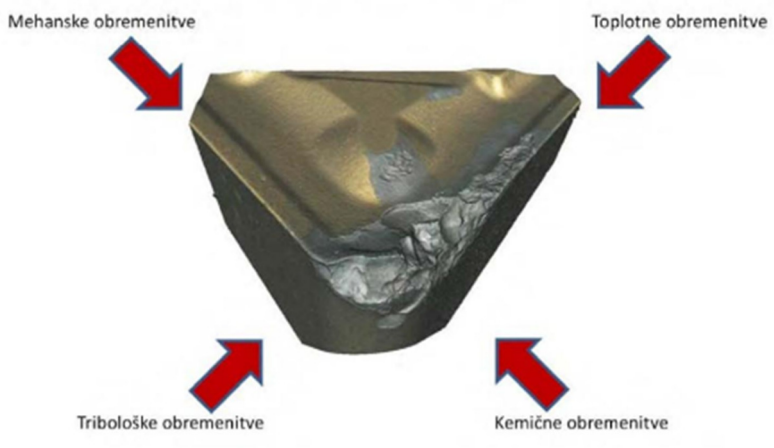
Kot kriterij za obrabo pri grobi in fini obdelavi pogosto predstavlja površina stika med obdelovancem in hrbtno ploskvijo. To je povezano s porabo energije in temperaturo na tem mestu. Kontaktna površina ni vedno enaka, kar otežuje razumevanje obrabe. V preteklosti,

ko prevleke na orodjih še niso bile tako dobre, je bila stopnja obrabe hrbtne ploskve (VB) glavno merilo. Če pa se obraba na hrbtni ploskvi ne pojavi enakomerno, lahko namesto tega gledamo povprečno obrabo vzdolž roba. To nam nudi boljšo sliko o tem, kako se orodje obnaša. Včasih lokalizirana zarezna obraba povzroči več težav kot enakomerna obraba. Takrat lahko določimo, koliko zarezne obrabe je še dopustne, da ne pride do težav pri obdelavi ali neustreznih obdelovancev. Če pa se zareze pojavljajo na obeh rezilnih robovih, moramo biti še posebej previdni, da ne pride do odpovedi orodja. Še huje je, če zarezno obrabo spremlja kotanjasta obraba, saj to še bolj zmanjša trdnost orodja. Orodja z majhnim kotom konice so še posebej občutljiva na takšne spremembe. Pomembno je, da se izognemo obremenitvam, ki nastanejo zaradi manjše globine rezanja, ko se pojavi zarezna obraba na glavnem rezilnem robu. Takšne obremenitve namreč povzročijo največjo napetost na mestu zareze, kar seveda ni dobro. Če te obremenitve zmanjšamo, zmanjšamo tudi možnost, da orodje nenadoma odpove. Lahko rečemo, da obrabo hrbtne ploskve opišemo z ekvivalentno obrabo VBe, ki ustreza tamkajšnjim rezilnim silam. Pri orodjih z boljšimi prevlekami se pogosto zgodi kombinacija plastične deformacije in lokalne obrabe, kar dodatno zaplete razumevanje obrabe.

Obraba je pogosto odraz splošnega stanja poškodovanosti. Absolutna velikost rezilnih sil bi lahko bila posreden pokazatelj obrabe pri precizni obdelavi. Če so rezilne sile prevelike, lahko pride do deformacij obdelovanca in orodja. Te deformacije povzročijo, da dimenzije celotnega sistema odstopajo od predpisane tolerance, pri čemer kriterij obrabe izgubi svojo vrednost. Poleg tega, ko je kontaktna površina med obdelovancem in rezilnim orodjem premajhna, je zelo težko doseči zahtevano toleranco površine. Tako lahko pride do slabe kakovosti končne obdelave zaradi vibracij ali pa zaradi neenakomernih sledi, ki jih pušča sekundarni rezilni rob. Izbira ustreznega kriterija za obrabo je odvisna tudi od potrebe po nadzoru temperature in omejevanju porabe energije na hrbtni strani orodja. Primer za to je obdelava kaljenega jekla. V tem primeru pride do sprememb v strukturi materiala na površini obdelovanca, kar vodi do nastanka bele plasti. Zato je treba obrabo na hrbtni strani VB_{max} omejiti na 0,2–0,3 mm, čeprav jo je v pogojih zmanjšanja rezilne hitrosti vc mogoče tudi nekoliko povečati.

3.2.3 Slabšanje orodja v relaciji z obrabo

Postopek odrezavanja je sam po sebi kompleksen zaradi različnih obremenitev, ki delujejo na rezilni rob in njihovega vpliva na nosilnost orodja, kar povzroča različne vzorce obrabe in propadanja. Mehanske obremenitve povzročajo utrujenost, lom in deformacijo rezilnih robov. Toplotne obremenitve ustvarjajo visoke temperature in temperaturne gradiente, ki pospešujejo mehanizme obrabe in propadanja. Tribološke obremenitve povzročajo trenje, abrazijo, erozijo in oprijem na stičišču med orodjem in obdelovancem. Kemične obremenitve vodijo do procesov, kot so oksidacija, korozija in difuzija, kar dodatno prispeva k degradaciji orodja (glej Sliko 3.9). Posledično vsaka vrsta obremenitve edinstveno vpliva na rezilni rob in ustvarja značilne vzorce obrabe in propadanja, ki vplivajo na delovanje in življenjsko dobo orodja. Razumevanje teh interakcij in njihovih učinkov je ključnega pomena za izbiro ustreznih materialov orodja, geometrij in rezilnih pogojev za optimizacijo življenjske dobe orodja in zmogljivosti obdelave.



Slika 3.9: Možne poškodbe rezilnega roba [30].

Nosilnost rezilnega roba je v prvi vrsti odvisna od izbire rezilnega materiala, vključno s substratom in prevleko, ter od geometrije rezanja, ki zajema tako mikro- kot makroznačilnosti. Prilagajanje rezilnega materiala za vplivanje na nosilnost se šteje za pasiven pristop, saj vključuje izbiro ali optimizacijo lastnosti materiala, da prenese pričakovane obremenitve. Ta metoda se običajno uporablja, kadar delovni pogoji ostanejo relativno konstantni ali se postopoma spreminjajo. Po drugi strani pa spreminjanje geometrije rezanja ponuja aktivnejši pristop k izboljšanju delovnih pogojev. S spreminjanjem geometrije je mogoče rezilni rob prilagoditi tako, da bolj ustreza specifičnim aplikacijam. To ne le izboljša nosilnost, temveč vpliva tudi na sam proces rezanja, kar lahko vodi do večje učinkovitosti, boljše kakovosti površine in daljše življenjske dobe orodja.



Slika 3.10: Kompleksnost procesov odrezavanja kovin [30].

Postopna izguba materiala zaradi obrabe je na splošno gledano povezana s številnimi fizikalnimi dejavniki. **Abrazivna** obraba nastopi, ko trdi delci ali vključki v materialu, ki ga obdelujemo, delujejo kot nekakšna brusilna zrna na rezilno orodje, kar običajno privede do zmanjšanja njegove učinkovitosti. Abrazivna obraba je bistveno večja, če so v

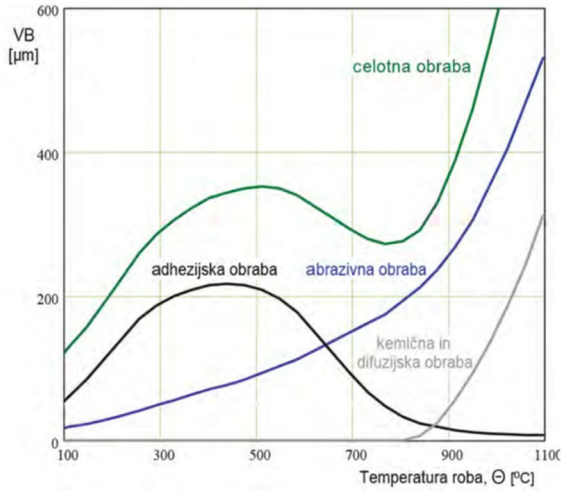
obdelovalnem materialu trdi delci ali je prisotna utrjena površinska plast. Abrazivno obrabo v večji meri pospešujejo tudi kovinski elementi, ki se uporabljajo za tvorbo karbidov, kot sta krom in vanadij. **Adhezijska** obraba se zgodi, ko pride do "zvarjenja" materialov obdelovanca z rezilnim robom na mikroravni (adhezija), kar lahko povzroči krušenje rezilnega roba in posledično skrajša življenjsko dobo orodja. **Difuzija**, po drugi strani opisuje prehajanje materiala med obdelovancem in rezilnim orodjem na atomski ravni. Difuzijska obraba orodja je močno odvisna od temperature. V območju 800—1.100 °C se obdelovalni material intenzivno deformira. To omogoča, da se oblikuje res popoln stik med rezilnim robom in odrezki. Velik gradient koncentracij med obdelovanim in rezilnim materialom ustvari neugodne razmere za difuzijo, kar je ključno za razumevanje te obrabe. Med samo obdelavo z odrezavanjem je material izpostavljen res hitremu strižnemu delovanju. Relativna hitrost med rezilnim orodjem in obdelovancem je lahko nizka. Material se močno deformira blizu rezilnega orodja, kjer se relativna hitrost znižuje. Difuzija prek kontaktne površine je tam intenzivnejša. Atomi železa migrirajo iz obdelovanca v orodno karbidno trdino, atomi kobalta pa obratno. Iz volframovega karbida lahko v obdelovanec difundirajo tudi atomi ogljika, kar dinamiko obrabe še dodatno zaplete. Rezultat je poslabšanje lastnosti orodja in hitrejša obraba delov. Difuzijo je mogoče preprečiti s površinskimi prevlekami, kar je ključno za daljšo življenjsko dobo orodja. **Kemična** obraba se lahko zgodi, ko karbidna trdina v prisotnosti kisika oksidira že pri temperaturi okoli 800 °C, kar prispeva k hitrejšemu propadanju orodja. Trdi vključki v obdelovanem materialu, sestavljeni iz karbidov in oksidov, na primer Al_2O_3, ki nastaja pri proizvodnji jekla, še dodatno poslabšajo situacijo (glej Sliko 3.10).

Z obrabo se stalno izgublja material, spreminja pa se tudi geometrija rezilnega orodja. Te spremembe vplivajo na rezultate obdelave (tolerance, kakovost površine) in delovanje orodja. Obraba pa ne vpliva samo na to, kako dobro orodje reže, ampak tudi na to, ali bo obdelovanec imel ustrezne dimenzije. Različni fizikalni pojavi vplivajo na to, kakšne dimenzije ima obdelovanec, vendar jih je mogoče nekako kompenzirati, zato je pomembno razumeti, kako vplivajo. Ob povečani obrabi proste ploskve lahko pride do odklona držala orodja, samega obdelovanca ali celo stroja, kar pogosto povzroči nepravilnosti.

Kotanjasta obraba na cepilni ploskvi orodja se običajno pojavi tik ob rezilnem robu, še posebej pri materialih, ki tvorijo kratke odrezke. Študije so pokazale, da je kotanjasta obraba najpogostejša tam, kjer je temperatura najvišja. Pogosto je povezana z večjo porabo energije, zlasti v coni sekundarnih deformacij. V tem primeru se kontaktna površina med orodjem in materialom spremeni, kar posledično poveča rezilno silo.

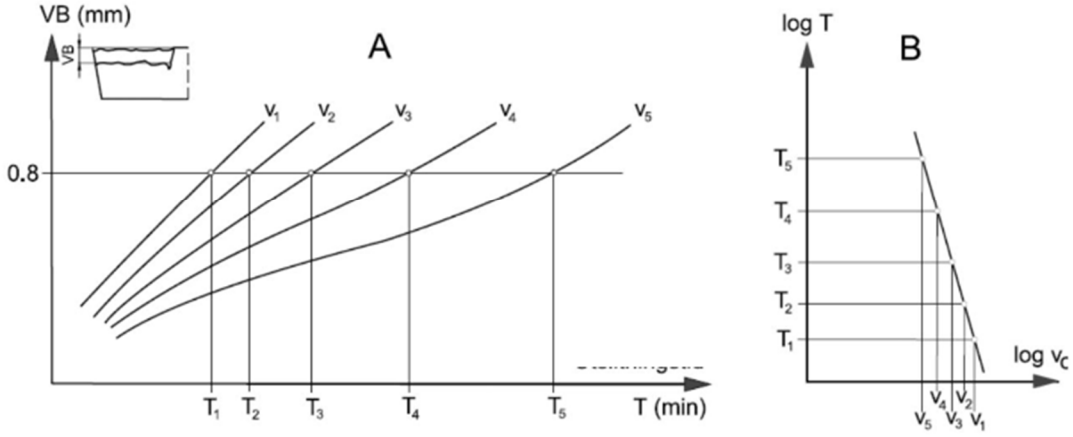
Zarezna obraba se pojavlja predvsem na prosti ploskvi orodja, in sicer tam, kjer se stik med odrezki in orodjem konča. Kisik iz zraka lahko doseže dele površine orodja, ki so segreti na visoko temperaturo in tam oksidira material orodja, kar povzroča hitro obrabo. Dodaten dejavnik, ki lahko vodi do zarezne obrabe, je preoblikovalno utrjevanje površinske plasti obdelovanca, kar dodatno poslabša razmere. Tveganje za zarezno obrabo je večje pri obdelavi ulitkov in odkovkov.

Do obrabe orodja lahko pride zaradi enega samega mehanizma ali kombinacije več mehanizmov, odvisno od materiala orodja in obremenitvenega vzorca, ki mu je izpostavljeno. Celotna obraba orodja je torej vsota različnih mehanizmov obrabe (glej Sliko 3.11). Kot je razvidno iz slike, pri povišanih temperaturah pogosto prevladuje difuzijska obraba, prisotna pa sta tudi kemična in korozivna obraba.



Slika 3.11: Diagram različnih mehanizmov obrabljanja rezilnega orodja [30].

Taylor je temeljito preučeval obrabo prostih površin ter obstojnost rezilnega orodja. Natančneje, raziskoval je razvoj obrabe v odvisnosti od časa pri različnih rezilnih hitrostih, kar je povzel v diagramu, prikazanem na sliki 3.12.



Slika 3.12: Povezava med obrabo na hrbtni strani VB in obstojnostjo orodja pri različnih rezilnih hitrostih v_c [30].

Rezilni rob je skrhan, ko je dosežena določena stopnja obrabe proste ploskve. Pripadajočo obstojnost orodja lahko tedaj odčitamo na osi x. Linearen približek krivulje pa je osnova za poenostavljeno Taylorjevo enačbo:

$$v_c \cdot T^{\alpha_t} = C_T \tag{3.1}$$

pri čemer sta α_t in C_T v enačbi konstanti. Konstanta C_T je teoretična rezilna hitrost, pri kateri bi obstojnost orodja znašala eno minuto.

3.3 Vibracije v strojih in vpliv na obrabo

3.3.1 Osnove in dejavniki

Vibracije so pogost pojav pri strojnih obdelavah in lahko pomembno vplivajo na kakovost površine, natančnost orodja, življenjsko dobo orodja in stroja ter varnost. Razumevanje vibracij je ključnega pomena za optimizacijo procesov strojne obdelave, zmanjševanje napak in povečanje produktivnosti. Vibracije se lahko pojavijo zaradi različnih dejavnikov pri strojni obdelavi in se lahko razdelijo na notranje in zunanje.

Notranji dejavniki vibracij izvirajo iz samega postopka strojne obdelave in so povezani z interakcijami med rezilnim orodjem, obdelovancem in fiziko rezanja. Sem spada prekinjen rez, ki nastane, ko rezilno orodje občasno vstopa v material in iz njega. Pogosto se pojavi pri operacijah obdelave obdelovancev z nepravilnimi oblikami. Medtem ko orodje pride v stik z materialom, pride do udarca in spremembe sile rezanja. Ko orodje zapusti material, sila rezanja pade na nič. Ti nenadni nastanki sile rezanja vzbujajo vibracije v sistemu. Njegov učinek se kaže skozi t. i. stres na orodje, katerega posledica je krajša življenjska doba ter slaba kakovost površine. Na notranje dejavnike vpliva tudi geometrija rezilnega orodja, vključno s kotom klina, kotom konice, prostim kotom in samo geometrijo utora, ter heterogenost materiala, saj material obdelovanca nima enotnih lastnosti skozi celoto. Razlike v trdoti, mikrostrukturi ali kemijski sestavi lahko povzročijo spremembe sile rezanja med strojno obdelavo. Na primer obdelava materiala, ki ima trše področje znotraj mehkejšega področja, lahko vodi do sprememb sile rezanja in posledično do vibracij. Njegov učinek se kaže skozi nepredvidljive sile rezanja in vibracijskimi odzivi, slabo kakovostjo površine in natančnostjo dimenzij ter povečano obrabo rezilnega orodja. Prav tako na notranje dejavnike vibracij vpliva tudi obraba orodja, saj med obdelavo na rezilna orodja postopoma učinkuje trošenje zaradi trenja, toplote in sil rezanja. Ko se orodje obrablja, izgubi ostrino in se njegova geometrija spreminja. To vodi do povečanih sil rezanja, več trenja in nastanka vibracij. Učinek se lahko kaže skozi poslabšanje kakovosti površine in natančnosti ter potencialne odpovedi orodja (lom).

Zunanji dejavniki izvirajo iz okolice strojne obdelave in niso neposredno povezani s fiziko rezanja, pa vendar imajo lahko pomemben vpliv na vibracije in stabilnost postopka. Med najbolj vplivnimi dejavniki so neuravnoteženost stroja, ki nastane z neenakomerno porazdelitvijo mase po rotacijski osi. Ta nepravilnost povzroča centrifugalno silo, ki vodi do periodičnih vibracij, kar se lahko izraža v povečanem hrupu, slabi kakovosti površine in natančnosti dimenzij ter povečanem obrabljanju ključnih komponent, kot so vreteno in ležaji. Vibracije tal, ki jih povzročajo druge operacije v bližini, se lahko prenašajo na stroj ter vplivajo na stabilnost delovnega procesa. Te vibracije, prenašane skozi temelje in strukturo stroja, lahko povzročijo nenadne spremembe v kakovosti površine in natančnosti ter dodatno nestabilnost pri strojni obdelavi. Poleg tega zračnost v komponentah stroja, kot so vodila, vijaki in držala orodij, omogoča neželeno premikanje in vibriranje pod obremenitvijo, kar še dodatno povečuje vibracije, ki se prenašajo na obdelovanec. Nezadostno vpetje obdelovanca pa lahko dodatno poslabša situacijo, saj lahko nezadostno pritrjen obdelovanec med procesom vibrira ali se premika, kar rezultira v slabi kakovosti površine.

3.3.2 Vrste vibracij pri strojni obdelavi

Razlikujemo tri glavne vrste vibracij, ki se pojavljajo pri strojni obdelavi. Razumevanje leteh pa je bistveno za poznavanje in sprejetje ustreznih ukrepov. **Proste vibracije** se

pojavijo, ko je sistem (stroj, orodje ali obdelovanec) začetno moten in mu je dovoljeno, da vibrira brez kakršnih koli zunanjih sil ali vzbujanj. Pogostost vibracij določajo lastnosti sistema (masa in togost) in jo imenujemo tudi naravna frekvenca. Če frekvenca stroja ustreza naravni frekvenci sistema, obstaja verjetnost, da bo prišlo do resonančnega stanja in amplituda postane visoka. **Prisilne vibracije** so posledica periodične sile ali vzbujanja, ki deluje na sistem. Frekvenco določa vzbujalna sila, ne pa naravna frekvenca sistema. Na primer neuravnoteženost rotirajoče komponente povzroča prisilne vibracije. **Samovzbujene vibracije** so samo vzdrževane vibracije, ki se pojavljajo zaradi medsebojnega delovanja med postopkom rezanja, strukturo stroja in dinamiko orodja. So med najbolj težavnimi vrstami vibracij v strojni obdelavi. Lahko se razvijejo tudi iz manjših vibracij, ki jih povzroči interakcija med orodjem za rezanje in obdelovancem. Pri prehodih, ki jih opravi orodje, se pojavi valovitost, ki lahko poveča vibracije med naslednjimi prehodi.

3.3.3 Povezava med vibracijami in obrabo orodja

Obraba rezilnega orodja je kompleksen pojav, ki nastaja kot posledica mehanskih, termičnih in kemijskih obremenitev med postopki odrezavanja. Glavni mehanizmi, adhezijska, abrazivna, difuzijska in oksidacijska obraba, so medsebojno prepleteni in pogosto nastopajo sočasno, kar zahteva celovit pristop k razumevanju njihovega vpliva na življenjsko dobo in učinkovitost orodja. Učinkovito obvladovanje obrabe vključuje optimalen izbor rezilnega materiala, ustreznih obdelovalnih parametrov, pravilno uporabo hladilno-mazalnih sredstev ter kontinuirano spremljanje stanja orodja. Med najpomembnejše kazalnike obrabe sodijo geometrijske spremembe rezilnega roba, spremembe v kakovosti obdelane površine ter porast vibracij in rezilnih sil. Zlasti vibracije imajo pomembno vlogo, so kot posledica in tudi sprožilec obrabe, saj prispevajo k razvoju mikropoškodb, toplotnih obremenitev in sprememb v kontaktni geometriji.

Z naraščajočo obrabo orodja se geometrija rezilnega roba spreminja, kar povzroča neenakomeren stik z obdelovancem. To vodi do zmanjšanja togosti kontaktne cone, kar poveča verjetnost za pojav dinamičnih nestabilnosti oziroma vibracij. Ti dinamični pojavi se pogosto manifestirajo v obliki mikrosunkov, povečane drsne interakcije med orodjem in obdelovancem, ter cikličnih toplotno-mehanskih obremenitev. Posledično pride do naslednjih mehanizmov obrabe:

- mikrokrhanje (micro-chipping), ki nastane kot posledica utrujanja materiala na rezilnem robu zaradi ponavljajočih se dinamičnih sil,
- pospešena abrazivna obraba, kjer vibracije povečajo relativno drsno gibanje, kar okrepi mehansko odnašanje materiala z rezilne površine,
- difuzijska obraba, ki je posledica lokalnih temperaturnih vrhov zaradi trenja in oscilacij, kar spodbuja prehajanje atomov med orodjem in obdelovancem in
- utrujanje materiala, ki se kaže v obliki mikrorazpok kot posledica nihajočih napetosti na rezilnih robovih.

Povečanje amplitude in frekvence vibracij ima eksponenten vpliv na hitrost obrabe, še posebej v primeru, ko se frekvenčna vibracija približa lastni frekvenci sistema. Takrat pride do resonance, kar lahko v zelo kratkem času vodi do resne poškodbe ali celo lom orodja.
Zaradi izrazite povezanosti med vibracijami in obrabo je vibracijska analiza ena najučinkovitejših metod za zgodnje zaznavanje obrabe orodja. Sodobni senzorji vibracij (pospeškomeri, piezoelektrični pretvorniki, laserski vibrometri) omogočajo neprekinjeno spremljanje obratovalnih pogojev ter identifikacijo anomalij v realnem času. Najpogosteje se spremljajo parametri kot so RMS vrednost vibracij (kvadratni povprečni koren), ki se z napredovanjem obrabe sistematično povečuje, frekvenčni spekter (FFT analiza), ki razkriva pojav značilnih frekvenc, povezanih s specifičnimi tipi obrabe (npr. krhanje, resonančni pojavi) in časovne karakteristike vibracijskega signala, ki omogočajo detekcijo impulznih

pojavov, značilnih za mikrolome. Sodobni pristopi vključujejo tudi uporabo strojnega učenja, kjer na podlagi velike količine zbranih vibracijskih podatkov treniramo modele, sposobne napovedovanja stopnje obrabe ter preostale življenjske dobe orodja. Takšni modeli uporabljajo algoritme, kot so podporni vektorji, nevronske mreže ter odločitvena drevesa in hkrati omogočajo tudi napredno preventivno vzdrževanje.

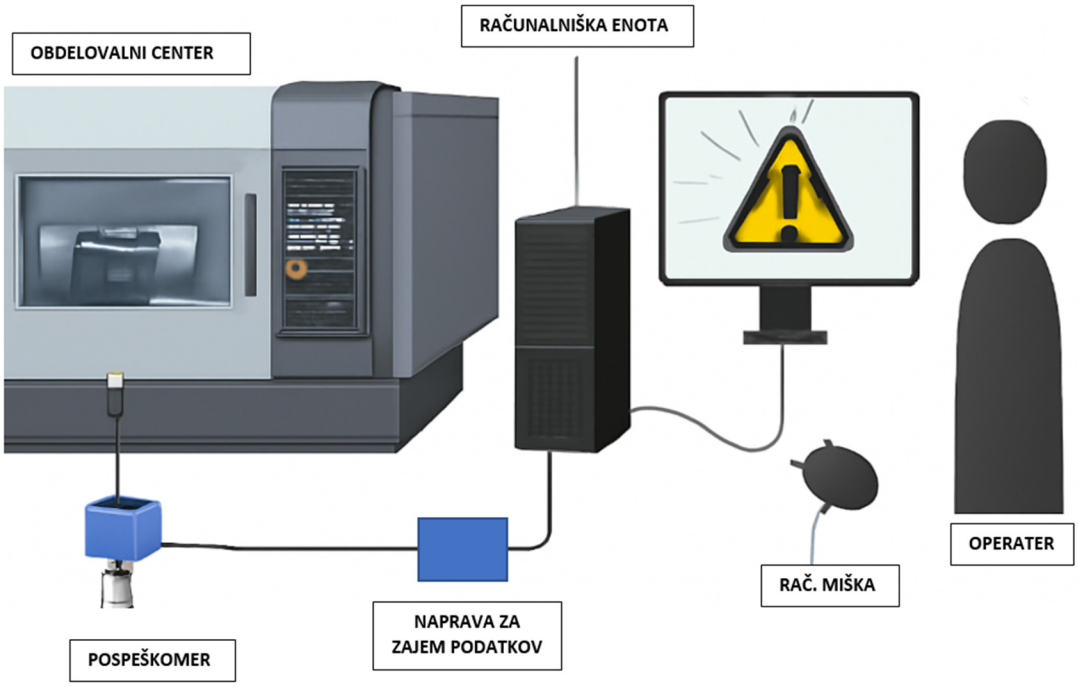
Med vibracijami in obrabo orodja se vzpostavi degenerativna povratna zanka**.** Obraba povzroči povečano vibracijsko odzivnost sistema, kar še dodatno pospešuje obrabo. Ta zanka vodi v eksponentno rast poškodb, zmanjšanje natančnosti reza in lahko rezultira v nenadnem lomu orodja. Zato je nujno, da vibracije ne obravnavamo zgolj kot simptom obrabe, temveč kot ključen dejavnik, ki aktivno prispeva k obrabnim procesom. Spremljanje vibracij v obdelovalnih strojih ni več le diagnostično orodje, temveč postaja sestavni del inteligentnih sistemov za upravljanje orodij. Razumevanje kompleksne interakcije med vibracijami in obrabo je ključno za zagotavljanje visoke kakovosti obdelave, optimizacijo življenjske dobe orodja in zmanjšanje stroškov vzdrževanja. Integracija vibracijske diagnostike z naprednimi algoritmi za analizo podatkov omogoča pravočasno zaznavo obrabe, preprečuje nenadne okvare in podpira prehod v smeri preventivnega vzdrževanja v sodobnih proizvodnih okoljih.

Poglavje 4

Metodologija

4.1 Arhitektura sistema za spremljanje obrabe

Napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja, kot smo si ga zastavili v tej doktorski disertaciji, je kompleksen izziv, ki zahteva integracijo različnih strokovnih področij, od senzorike in zajema podatkov do obdelave signalov in strojnega učenja. Da bi učinkovito rešili ta izziv, je bila zasnovana modularna in fleksibilna arhitektura sistema za spremljanje obrabe, kot jo lahko razberemo iz Slike 4.1. Sistem je sestavljen iz obdelovalnega stroja, kamor se je prigradil pospeškomer. Le-ta je povezan z napravo za zajem podatkov, kamor se nato podatki (vibracije) prenašajo na računalnik, kjer se strojno obdelujejo, primerjajo glede na predhodno stanje in operaterju nudijo informacijo o stanju rezilnega orodja. Kako vse te komponente delujejo, so medsebojno povezane in kakšna je njihova vloga, je podrobneje opisano v nadaljevanju.



Slika 4.1: Arhitektura sistema za spremljanje obrabe z različnimi sestavnimi komponentami [lastni].

4.2 Izbira triosnega pospeškomera

Izbira ustreznega triosnega pospeškomera je ključnega pomena za uspešno zajemanje podatkov o vibracijah in posledično dovolj natančno napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja. Pospeškomer mora biti zmožen zaznati širok spekter vibracij v vseh treh smereh *(x, y, z)* s primerno občutljivostjo in frekvenčnim odzivom. Poleg tehničnih specifikacij je treba upoštevati tudi druge dejavnike, kot so velikost, teža, robustnost, enostavnost namestitve in cena. Pod terminom robustnost je definirana zmožnost implementacije pospeškomera ob pogoju, da se le-ta med rednim obratovanjem stroja ne poškoduje. S tem zagotovimo nemoteno pridobivanje podatkov v daljšem časovnem okvirju. Tukaj je treba upoštevati zaščito pred vplivom medijev (odrezki, hladilna tekočina), ki so del procesa odrezavanja. Pomemben je tudi faktor implementacije (vgraditve), in sicer na kakšen način se pospeškomer implementira oziroma vgradi za namen merjenja veličine. Prav tako je pomembno, da se meritev izvaja neposredno med samim proizvodnim procesom in čim bližje coni odrezavanja. Nezanemarljiva pa je tudi enostavnost vgradnje in čim manjši vpliv zunanjih faktorjev.

4.2.1 Specifikacije pospeškomerov

Preučili smo vodilne proizvajalce in modele, ki bi potencialno ustrezali našim zahtevam glede robustnosti, natančnosti in primerne IP zaščite za industrijsko okolje. Podrobneje smo pogledali modele proizvajalcev PCB Piezotronics, Kistler, Dytran in ostali.

PCB Piezotronics s serijami, kot je 356Axx, ponuja robustne triosne IEPE pospeškomere z visoko IP zaščito (IP67 ali IP68) in širokim frekvenčnim razponom, zasnovane za težke industrijske pogoje. Njihovi senzorji so priznani po zanesljivosti in odpornosti na udarce ter temperaturne spremembe, kar jih uvršča med primeren izbor. Podobno je podjetje Kistler s serijo 8763B, znano po proizvodnji visoko natančnih in zanesljivih IEPE pospeškomerov, ki so kompaktni, robustni in pogosto opremljeni z IP67/IP68 zaščito. Produkti podjetja Kistler so cenjeni zlasti v aplikacijah, kjer je ključna izjemna natančnost in stabilnost meritev v zahtevnih industrijskih okoljih z izpostavljenostjo hladilnim tekočinam in ostružkom. Tudi drugi proizvajalci, kot sta IMI Sensors (je del PCB Piezotronics) in Bruel & Kjaer, ponujajo senzorje, ki bi tehnično lahko ustrezali določenim zahtevam.

Čeprav so zgoraj omenjeni proizvajalci ponujali tehnično primerljive rešitve, ki bi ustrezale večini naših tehničnih zahtev glede robustnosti, IP zaščite, frekvenčnega odziva in občutljivosti, smo se v luči praktičnih omejitev projekta in zaradi **razpoložljivosti** odločili za **Dytran 3623A4T** (glej Sliko 4.2). Senzor je bil v danem trenutku takoj dobavljiv, kar je bilo ključnega pomena na zadano časovnico, hkrati pa je v celoti izpolnjeval vse tehnične kriterije. Pomembnejši atribut tega pospeškomera je IP68 zaščita, ki omogoča nemoteno delovanje v okolju, kjer je prisotna velika količina ostružkov, olja, hladilne tekočine in njenih hlapov. Vrednost IP68 zagotavlja, da vdor ostružkov in prahu (IP6x) ali vdor tekočin pod tlakom v daljših časovnih obdobjih (IPx8) ni možen. Tako se lahko zavarujemo pred vdrtjem hladilne tekočine ali slabim spojem med kablom in ohišjem pospeškomera, ki je pri teh senzorjih šibka točka. Senzor se ponaša s 500 g merilnim območjem in je bil izbran nekoliko z rezervo, saj pred testnimi meritvami nismo natančno vedeli, kakšne amplitude bomo dosegali. Sam senzor ima tudi relativno ravno temperaturno krivuljo, ki v predvidenem temperaturnem območju delovanja nima večjega odklona občutljivosti. V Tabeli 4.1 so še preostali tehnični podatki.

Tabela 4.1: Detajlni tehnični podatki pospeškomera Dytran 3623A4T [11].

Tip	triosni ICP® pospeškomer (integrirani piezoelektrični)
Občutljivost	10 mV/g (po osi)
Merilno območje	±500 g
Frekvenčni odziv	±5 %: 1 Hz do 5 kHz
	±10 %: 0.5 Hz do 10 kHz
Resonančna frekvenca	~28 kHz
Šum	150 µg RMS
Vhodna impedanca	< 100 Ω
Napajanje	18–30 VDC
Tokovna poraba	2–20 mA
Priključitev	4-pin MIL-C-5015
Montaža	magnet
Material ohišja	Titan
Teža	14 g
Temperaturno območje	–54 °C do +121 °C

Frekvenčno območje delovanja z ±5 % natančnostjo se giba od 1 Hz do 5.000 Hz oziroma s ±10-% natančnostjo od 0,5 Hz do 10.000 Hz. Ker obdelovalni center, konkretno v našem primeru stružnica, ne dosega izredno visokih obratov, te specifikacije zadoščajo našim predvidenim potrebam za analizo vibracij.



Slika 4.2: Pospeškomer Dytran 3623A4T [lastni].

Izbira tega tipa pospeškomera je bila v veliki meri pogojena z več pomembnimi dejavniki. Njegova visoka občutljivost omogoča natančno zaznavanje tudi najšibkejših vibracij, ki se pojavijo zaradi obrabe rezilnega orodja. To je pomembno, ker le tako lahko predvidimo morebitne težave in napovemo življenjsko dobo rezilnega orodja. Poleg tega širok frekvenčni razpon omogoča zajemanje širokega spektra vibracij, od nizkih do visokih frekvenc. Ta vidik je pomemben za celostno razumevanje dinamike stroja in samega procesa obdelave. Nadalje triosna meritev omogoča zaznavanje vibracij v vseh treh smereh, kar zagotavlja bolj popolno sliko vibracijskega stanja stroja. Prav tako uporaba ICP® tehnologije

poenostavlja napajanje in zajem signala, saj omogoča uporabo dolgih kablov brez večje izgube signala. Sam dizajn je precej robusten, saj je ohišje iz titana, temperaturno območje pa široko, kar zagotavlja odpornost na težke pogoje v obdelovalnem stroju, vključno z vibracijami in temperaturnimi spremembami. Majhna velikost in teža pospeškomera omogočata enostavno namestitev na različne lokacije brez negativnega vpliva na njegovo delovanje. Tukaj je še tudi zanesljivost proizvajalca, saj je Dytran uveljavljeno podjetje, ki izdeluje visokokakovostne senzorje vibracij.

4.2.2 Namestitev pospeškomera

Vibracije lahko obravnavamo kot nihanje ali ponavljajoče se gibanje predmeta okoli ravnotežnega položaja. Ravnotežni položaj je položaj, ki ga bo predmet dosegel, ko bo sila, ki deluje nanj, nič. Do vibracij običajno pride zaradi dinamičnih učinkov proizvodnih toleranc, zračnosti, različnega trenja med posameznimi deli stroja ter neravnovesnih sil v vrtljivih elementih.

V našem primeru se vibracije rezilnega orodja in obdelovanca prenašajo preko vpetja obdelovanca na ležaj glavnega vretena. Ta ležaj preko notranjega obroča, kotalnih elementov in zunanjega obroča te vibracije prenaša na ohišje ležaja, kjer smo namestili triosni pospeškomer (glej Sliko 4.3). Pred tem je bilo treba odstraniti nekaj zaščitne pločevine, da smo lahko dostopali do ležaja ohišja glavnega vretena obdelovalnega stroja. Pred namestitvijo pospeškomera se je površina očistila z alkoholom, da so se odstranile morebitne nečistoče. Prav tako se je poiskalo mesto s čim bolj ravnimi površinami, da je bila pritrditev čim bolj učinkovita. Pospeškomer je bil poravnan z osmi stroja, magnetno pritrdišče pa je bilo preverjeno za trdnost oprijema. Kabel pospeškomera je bil napeljan skozi manjšo izvrtino zaščitne pločevine in prilepljen/pritrjen na mestih, kjer ni neposredno delovno območje stroja, da se izogne gibljivim delom stroja.

Pospeškomer s pomočjo piezoelektričnega elementa zaznane pospeške spremeni v napetostni signal, ki ga lahko zajamemo in analiziramo. Za to lokacijo smo se odločili, ker se vibracije prenašajo po kovinah in nam ta postavitev pospeškomera omogoča relativno dobro izolacijo od ostalih neželenih izvorov, obenem pa olajša montažo in poenostavi merilni sistem.



Slika 4.3: Lokacija pritrditve pospeškomera na obdelovalnem stroju [lastni].

Meritev se na ta način izvaja posredno, pospeškomer ni izpostavljen odrezkom oziroma hladilni tekočini in s tem še kakšna dodatna zaščita ni potrebna. Prav tako zaradi te postavitve ne posegamo v sam proizvodni proces, kar je bila tudi ena od zahtev. Meritve lahko izvajamo za različne artikle, ki se obdelujejo na tem obdelovalnem stroju in kar je še pomembneje, za obdelavo z več rezilnimi orodji.

4.3 Zajem podatkov

Po izbiri in namestitvi pospeškomera je naslednji korak zajem podatkov o vibracijah. Pravilen zajem podatkov je ključen za pridobivanje kakovostnih in zanesljivih informacij, ki so potrebne za analizo vibracij in napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja. Pri zajemu podatkov moramo biti pozorni na faktorje, kot so vzorčna frekvenca, podpora senzorjev, delovno okolje itd.

Ker pospeškomer ne zaznava kvalitetno več kot 5.000 Hz, je za tak senzor priporočljiva minimalna vzorčna frekvenca oz. vsaj dvojna frekvenca maksimalne frekvence pospeškomera. Zato mora sistem za zajem podatkov vzorčiti vsaj z 10 kHz ali več. Zaradi tipa senzorja IEPE (angl. Integrated Electronics Piezo-Electric) je potrebna izbira ojačevalnika, ki ima pravo napajanje in po možnosti podpira TEDS čipe. IEPE je standard za arhitekturo piezoelektričnih senzorjev, ki vsebujejo interno elektroniko za pretvorbo signalov. Napajalni tok se giblje od 2–20 mA, komunikacija pa poteka preko enega oklopljenega kabla. TEDS tehnologija pametnih senzorjev pa nam omogoča, da na senzor zapišemo podatke o specifikacijah senzorja, ki jih naprava ob priklopu senzorja prebere in z njimi nastavi ojačevalnik.

Glede na navedene specifikacije, smo za zajem podatkov izbrali DAQ napravo SIRIUSm 3 x ACC, 1 x ACC+ s štirimi ACC ojačevalniki, ki so namenski za takšne aplikacije, podjetja DEWESoft. Naprava SIRIUSm je prikazana na Sliki 4.4. Omenjena naprava ima BNC konektor, ki je tipičen za te vhode in IEPE senzorje. Vsak kanal lahko zajema vzorce z 200 kS/sec, kar nam z varnostnim faktorjem omogoči zajemanje frekvenc do 78 kHz. Tehnologija DualCoreADC, ki uporablja dva merilna območja hkrati (±10 V in ±500 mV), omogoča 160 dB dinamičnega razpona in omogoča kvaliteten zajem velikih kot tudi malih amplitud vibracij. Poleg tega je naprava kompaktne velikosti in brez prisilnega hlajenja, ki bi lahko predstavljal problem v industrijskem okolju s prisotnostjo olja v zraku. Prenos podatkov in napajanje je urejeno preko dveh USB kablov, ki omogočata napajanje direktno iz računalnika.



Slika 4.4: Naprava za zajem podatkov SIRIUSm [38].

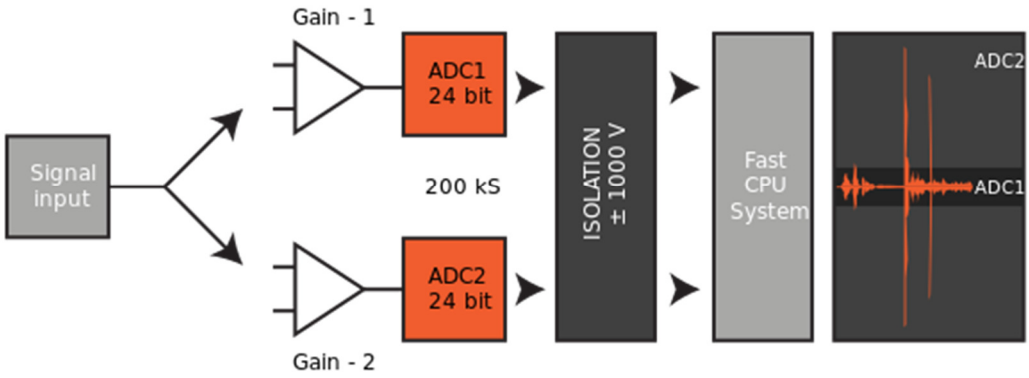
Za obdelavo podatkov smo izbrali računalnik Intel NUC i5 (glej Sliko 4.5), ki je kompaktne velikosti in ustrezne specifikacije, ki zadostujejo maksimalnim zahtevam za izvajanje aplikacije DEWESoft X3. V sami aplikaciji DEWESoft X3 se ne izvajajo zahtevnejše matematične operacije, temveč le preprosti prikazi časovnih in frekvenčnih spektrov.



Slika 4.5: Računalnik za obdelavo podatkov Intel NUC i5 [lastni].

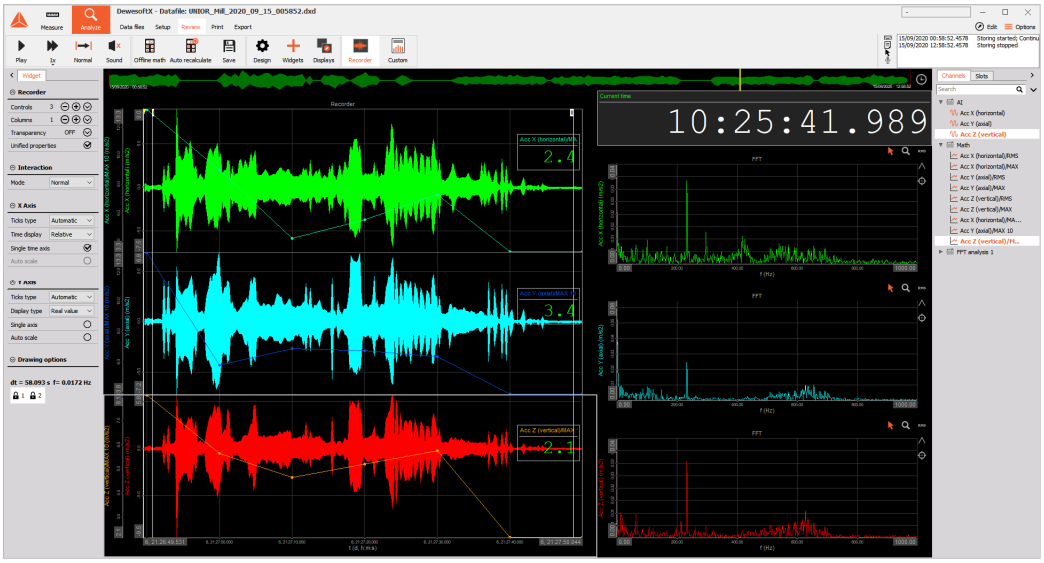
4.3.1 Nastavitve zajema

Naprava SIRIUSm s pomočjo analogno–digitalnega pretvornika (angl. ADC) in vdelane programske opreme izmerjene analogne signale pretvori v digitalne. V fazi zajema se izvaja tudi filtriranje, ki je glede na tip in vrednost lahko izvedeno s fizičnimi komponentami ali s programskimi filtri. Vsak analogni signal tako dobi svoj digitalni kanal, ki se zajema, obdeluje in shranjuje znotraj programske opreme DEWESoft X3 (glej Sliko 4.6).



Slika 4.6: Diagram DEWESoft DualCoreADC pretvornika [39].

Zajem podatkov se izvaja znotraj programske opreme DEWESoft X3. Na tej stopnji se ti podatki lahko tudi obdelujejo, kot na primer filtrirajo, pretvorijo iz časovne v frekvenčno domeno, povprečijo itd. Vse obdelane in neobdelane podatke lahko na monitorju računalnika spremljamo s pomočjo vizualnih pripomočkov za prikaz v časovni ali frekvenčni domeni ali s pomočjo numeričnih prikazov (glej Sliko 4.7). V tej programski opremi se podatki, ki so bili zajeti in obdelani, tudi pretvorijo in preko vtiča TCP/IP-Master pošiljajo v namenski program. Razvijalec pa lahko s pomočjo programa Python dostopa do kanalov.



Slika 4.7: Posnetek zajetih podatkov v programu DEWESoft X3 [lastni].

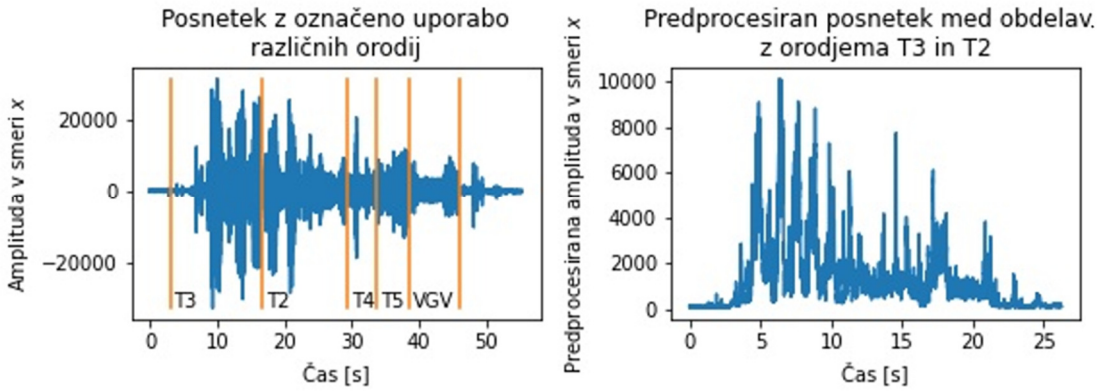
4.3.2 Obdelava signalov

Surovi podatki o vibracijah, zajeti s pospeškomerom, so pogosto preobremenjeni s šumom in drugimi motnjami, ki lahko otežujejo identifikacijo pomembnih značilnosti, povezanih z obrabo rezilnega orodja. Za pripravo podatkov za analizo in izboljšanje razmerja signal/šum je potrebna obdelava signalov. Za to smo uporabili vrsto tehnik, ki so ključnega pomena za ekstrakcijo ustreznih značilnosti vibracij za napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja. Predobdelava signalov se je izvajala s pomočjo programske opreme DEWESoft X3 [40]. Le-ta omogoča napredno obdelavo zajetih signalov v realnem času ali postprocesiranju, kar je omogočilo učinkovito izvajanje spodaj opisanih tehnik za izboljšanje kakovosti podatkov.

Razredčenje je tehnika obdelave signalov, ki se uporablja za zmanjšanje hitrosti vzorčenja signala. V našem primeru se je razredčenje uporabljalo za zmanjšanje količine podatkov o vibracijah, ki jih je bilo treba obdelati brez bistvene izgube informacij, potrebnih za analizo in napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja. S tem se izognemo veliki količini podatkov in zahtevam po veliki računalniški moči za obdelavo. V našem sistemu smo uporabili enostavno razredčenje s faktorjem 20. To pomeni, da smo vzeli le vsaki 20 vzorec iz surovega signala vibracij v smeri X. Tovrstni faktor smo lahko uporabili brez večje izgube zaradi velike količine zajetih podatkov in relativno velikega števila zabeleženih dogodkov.

Glajenje je tehnika obdelave signalov, ki se uporablja za zmanjšanje šuma in poudarjanje splošnih trendov v podatkih. Podatki o vibracijah so pogosto preobremenjeni s šumom, ki ga povzročajo različni dejavniki. Šum lahko otežuje identifikacijo pomembnih značilnosti, povezanih z obrabo orodja. Glajenje omogoča zmanjšanje šuma in poudarjanje splošnih trendov v podatkih, kar olajša analizo in učinkovitejše napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja. V našem primeru se glajenje uporablja za zmanjšanje šuma v podatkih o vibracijah, ki ga povzročajo različni dejavniki, kot so mehanske vibracije in ostale motnje v delovnem okolju stroja. Uporabili smo tekoče povprečje z oknom velikosti 10. To pomeni, da smo izračunali povprečno vrednost vsakih 10 sosednjih vzorcev in to povprečno vrednost uporabili kot novo vrednost za srednji vzorec v oknu. Okno velikosti 10 zagotavlja dobro ravnotežje med zmanjševanjem šuma in ohranjanjem pomembnih

značilnosti v zajetih podatkih, kar omogoča dosego nizkega usipa, kar prispeva k natančnejšemu prikazu signalov (glej Sliko 4.8).



Slika 4.8: Levo referenčni signal z označenimi orodji, ki obdelujejo kos. Desno predprocesiran signal med obdelavo z orodjema T3 in T2 [41].

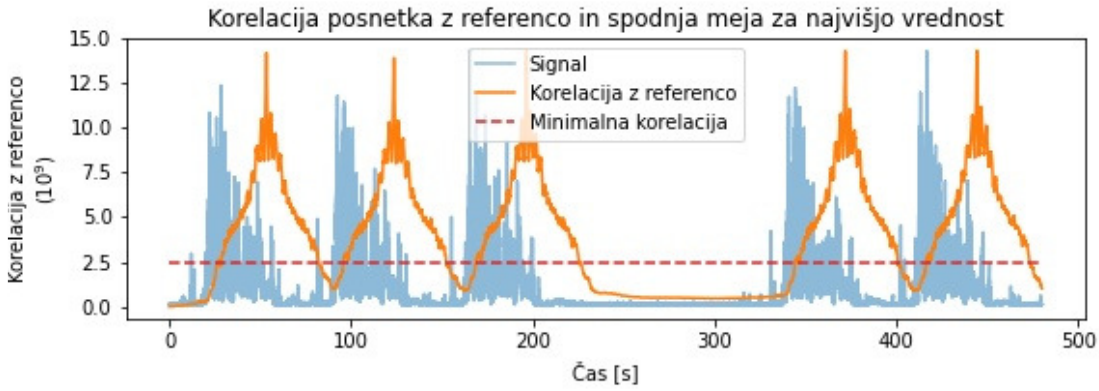
Za poravnavo in primerjavo podatkov o vibracijah med različnimi cikli obdelave je bila uporabljena tehnika **korelacije z referenco**. Ta tehnika omogoča identifikacijo in poravnavo podobnih vzorcev vibracij, tudi če so časovno zamaknjeni ali rahlo spremenjeni zaradi variacij v procesu obdelave ali obrabe orodja. Korelacija je mera podobnosti med dvema signaloma kot funkcija zamika enega glede na drugega. Korelacija z referenco vključuje primerjavo signala (v našem primeru posnetek vibracij med obdelavo) z referenčnim signalom (posnetkom vibracij v standardnih pogojih). Korelacija med signalom x[n] in referenčnim signalom y[n] se izračuna po naslednji enačbi [41]:

$$R_{xy}[\mathrm{m}] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mathrm{x[n]y[n-m]} \tag{4.1}$$

kjer je,

$R_{xy}[m]$	korelacija med signaloma x in y pri zamiku m,
$x[n]$	signal (posnetek vibracij),
$y[n]$	referenčni signal,
n	indeks vzorca,
m	je zamik (število vzorcev, za katerega se referenčni signal zamakne).

Izbrali smo reprezentativen posnetek vibracij kot referenco, s katero smo primerjali in poravnali vsak del posnetka. Za vsak zamik m smo izračunali vrednost korelacije $R_{xy}[m]$ med signalom in referenčnim signalom. Višja vrednost korelacije pomeni večjo podobnost med signaloma pri tem zamiku. Poiščemo zamik m, pri katerem je vrednost korelacije $R_{xy}[m]$ največja. Ta zamik predstavlja časovni premik med signalom in referenčnim signalom. Signal $x[n]$ poravnamo z referenčnim signalom $y[n]$ za izračunani zamik m. To pomeni, da signal $x[n]$ premaknemo za m vzorcev. Korelacija z referenco omogoča natančno poravnavo podatkov o vibracijah, tudi če so prisotne časovne variacije ali motnje v procesu obdelave. Poleg tega omogoča identifikacijo podobnih vzorcev vibracij, kar je ključnega pomena za prepoznavanje obrabe orodja. Iz Slike 4.9 zaznamo, da so vrhovi opazno višji od minimalne korelacije, ki je potrebna, da vrh obravnavamo kot konec obdelave z orodjem T2.



Slika 4.9: Korelacija posnetka petih obdelav z referenco [41].

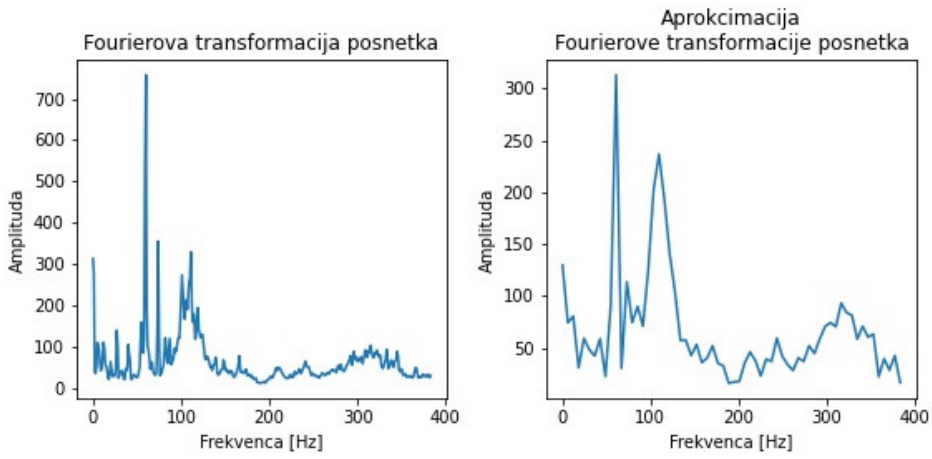
Za analizo frekvenčne vsebine podatkov o vibracijah in identifikacijo značilnosti, povezanih z obrabo rezilnega orodja, sta bili uporabljeni tehniki **spektrogram** in **Fourierjeva transformacija**. Ti tehniki omogočata pretvorbo časovnega signala v frekvenčni prikaz, ki razkrije dominantne frekvence in njihovo spreminjanje s časom. Ker so podatki o vibracijah diskretni (zajeti v določenih časovnih intervalih), je bila uporabljena diskretna Fourierjeva transformacija (DFT), ki jo računamo po enačbi [42]:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j2\pi \frac{k}{N} n} \tag{4.2}$$

kjer je,

$X[k]$	frekvenčna komponenta pri frekvenci k,
x_n	signal v časovni domeni,
N	število vzorcev,
j	imaginarna enota.

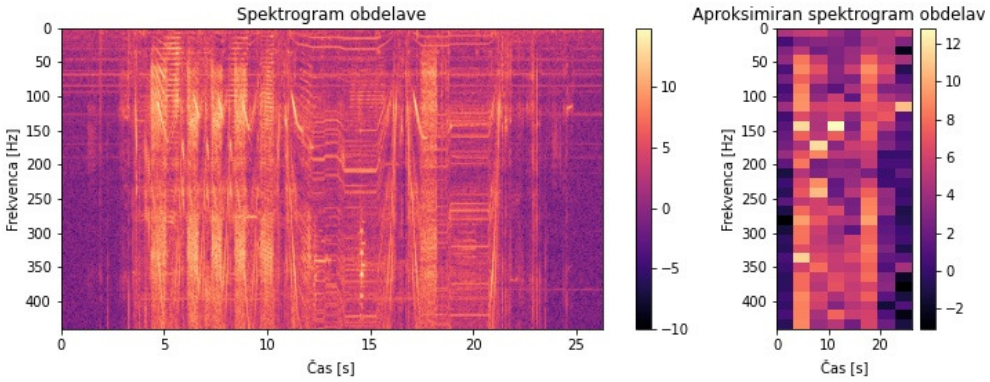
Fourierjeva transformacija omogoča identifikacijo dominantnih frekvenc v podatkih o vibracijah, ki so lahko povezane z različnimi viri vibracij, kot so vrtenje vretena, delovanje rezilnega orodja in obraba orodja. Frekvence smo omejili navzgor na 400 Hz. Fourierjevo transformacijo pa aproksimirali z vektorjem dolžine 64 (glej Sliko 4.10).



Slika 4.10: Fourierjeva transformacija in njegova aproksimacija [41].

Spektrogram je vizualni prikaz frekvenčne vsebine signala, ki se spreminja s časom. Izračuna se z izvedbo Fourierjeve transformacije na kratkih segmentih signala in prikazom amplitude frekvenčnih komponent kot funkcije časa. Spektrogram omogoča opazovanje, kako se frekvenčna vsebina podatkov o vibracijah spreminja s časom. To je uporabno za identifikacijo sprememb v delovanju stroja ali procesa obdelave, ki so lahko povezane z obrabo orodja. V tej disertaciji so bili spektrogrami uporabljeni za vizualizacijo sprememb v frekvenčni vsebini vibracij med različnimi fazami procesa obdelave in za identifikacijo frekvenčnih komponent, ki so se spreminjale zaradi obrabe orodja. Spektrogram smo aproksimirali z matriko dimenzije 8 v časovni smeri in 32 v frekvenčni smeri.

Slika 4.11 levo predstavlja spektrogram obdelave, ki vizualizira, kako se frekvenčne komponente vibracijskega signala spreminjajo skozi čas. Na x-osi je čas, na y-osi frekvenca, barvna intenzivnost pa ponazarja amplitudo ali moč vibracij pri določeni frekvenci v posameznem časovnem intervalu. Ta podroben prikaz omogoča prepoznavanje dinamičnih vzorcev in morebitnih anomalij, ki so povezani z dogajanjem med obdelavo. Slika 4.11 desno pa prikazuje aproksimirani spektrogram, ki prikazuje le najbolj dominantne frekvenčne komponente in njihovo časovno spreminjanje. Vidimo različne bloke barv, ki predstavljajo povprečno jakost frekvenc v določenih časovnih in frekvenčnih intervalih. Aproksimacija spektrograma tako omogoča zmanjšanja dimenzionalnosti, ki poenostavi podatke, hkrati pa ohrani ključne informacije o frekvenčni vsebini vibracij. S tem se zmanjša računska zahtevnost obdelave, kar je bistveno za delovanje sistema v realnem času in za izboljšanje napovedne zmogljivosti modelov strojnega učenja.



Slika 4.11: Spektrogram in njegova aproksimacija [41].

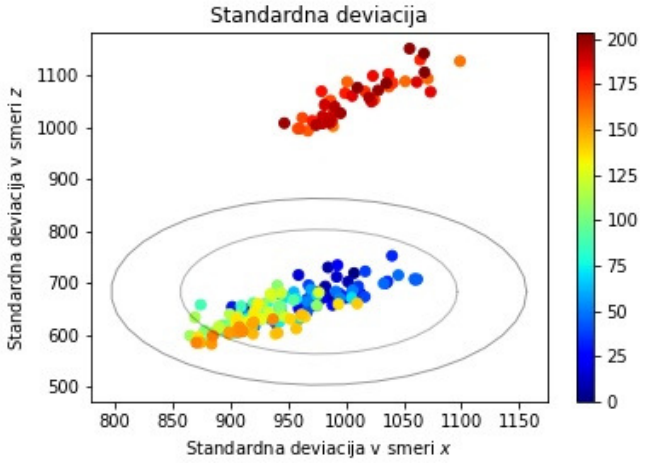
Fourierjeva transformacija in spektrogram se dopolnjujeta. Fourierjeva transformacija zagotavlja informacije o frekvenčni vsebini celotnega signala, medtem ko spektrogram zagotavlja informacije o tem, kako se frekvenčna vsebina signala spreminja s časom. S kombinacijo teh dveh tehnik smo pridobili celovito sliko o vibracijskem stanju stroja in samega procesa obdelave.

S tehnikami obdelave signalov smo uspešno zmanjšali šum in izboljšali kakovost zajetih podatkov, kar je ključnega pomena za natančno analizo vibracij in napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja. S tem smo pridobili tudi ustrezne podatke za strojno učenje.

4.3.3 Primerjava z uporabo matrike razdalj

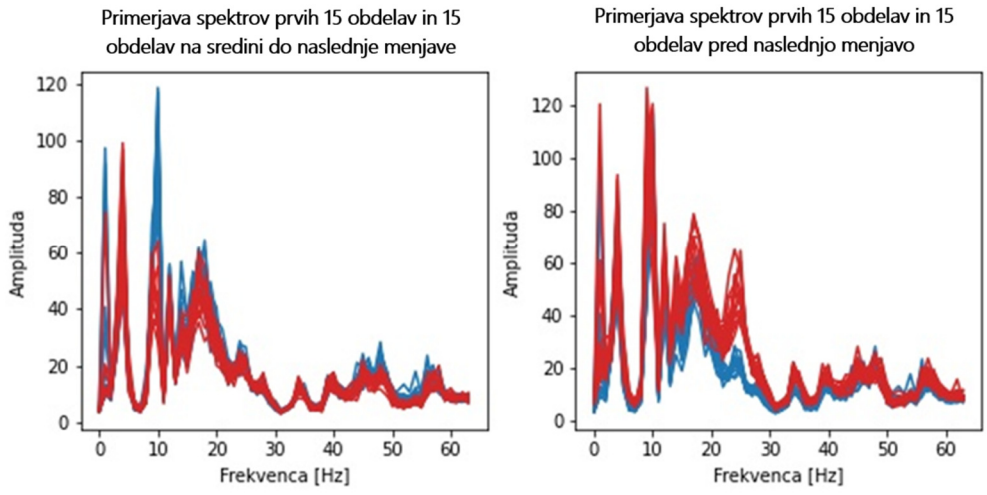
Po obdelavi in poravnavi posnetkov vibracij si želimo posnetke med seboj primerjati, da lahko ocenimo obrabljenost rezilnega orodja. Absolutne vrednosti vibracij nam pri tem malo pomagajo, pomembno je, da opazujemo relativne spremembe, predvsem nenadne

vzpone. Pristop je nekoliko podoben pristopu avtorja Wanga s sodelavci [43], vendar se v določenih elementih razlikuje. Ključna točka primerjave z matrikami razdalj je najti način kvantificiranja podobnosti oziroma razlik med vibracijskimi signali, zajetimi v različnih obdelavah, kar se lahko smatra kot pomembno orodje za kvantificiranje in vizualizacijo progresivne obrabe rezilnega orodja na podlagi analize vibracijskih podatkov. Te matrike omogočajo primerjavo podobnosti oziroma različnosti med obdelavami, izvedenimi v različnih fazah življenjske dobe orodja. Spremljanje sprememb pri standardnem odklonu ali Fourierjevi transformaciji je ključno opazovanje, saj se opazi, da obdelave vedno bolj odstopajo od prvih po menjavi. V primeru loma orodja je ta razlika še večja. Spreminjanje standardne deviacije lahko vidimo na Sliki 4.12 od začetka po menjavi rezilnega orodja (modre pike) proti naslednji menjavi. Vmes je zaznan tudi večji preskok, ki se zgodi ob lomu orodja.



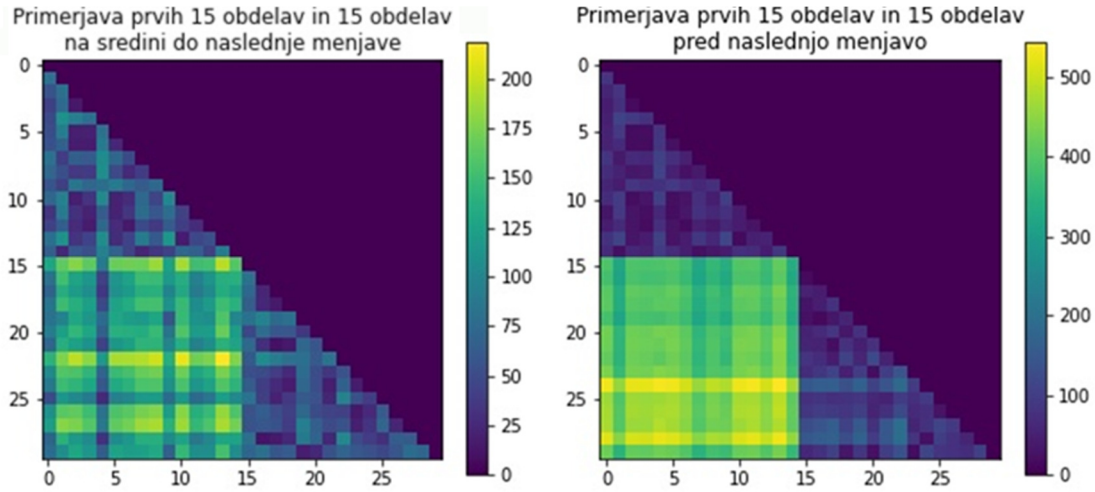
Slika 4.12: Spreminjanje standardne deviacije tekom obdelav [41].

Poleg tega se primerjajo Fourierjeve transformacije obdelav (glej Sliko 4.13), kjer modre krivulje predstavljajo prvih 15 obdelav po menjavi orodja, medtem ko rdeče krivulje na levi sliki prikazujejo 15 obdelav na sredini do naslednje menjave, na desni sliki pa zadnjih 15 obdelav pred naslednjo menjavo.



Slika 4.13: Primerjava Fourierjevih transformacij obdelav v različnih fazah življenjske dobe rezilnega orodja [41].

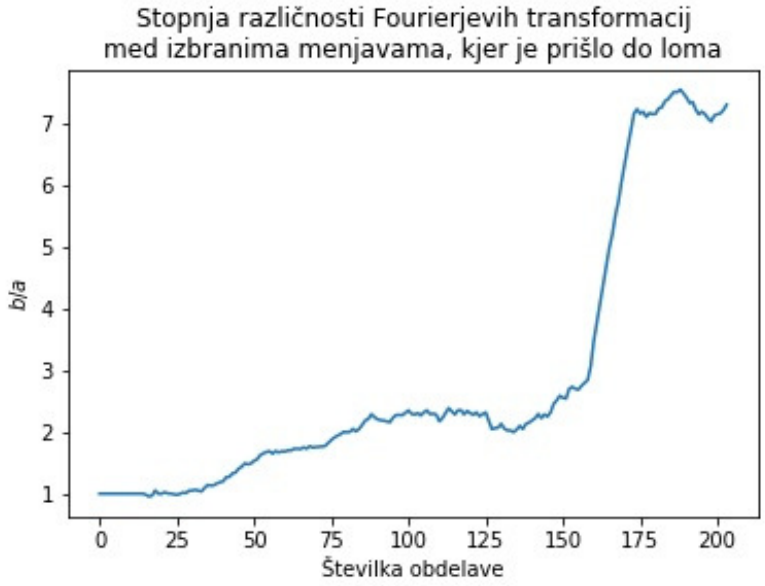
Za primerjavo posnetkov uporabimo matrike razdalj. Obdelavo primerjamo v dveh pogledih, njeno Fourierjevo transformacijo (povprečje transformacij v vseh treh oseh, torej skupno 64-dimenzionalen vektor) ter njene standardne odklone v vseh treh oseh (torej 3-dimenzionalen vektor). Izračunamo evklidsko matriko razdalj med vektorji v izbranem pogledu za prvih in zadnjih 15 obdelav. Tako dobimo matriko velikosti 30 x 30, ki jo razdelimo na 4 bloke. Povprečje zgornjega desnega bloka (b = mean(B)) delimo s povprečjem zgornjega levega bloka (a = mean(A)), kar nam pove, koliko bolj so zadnje obdelave drugačne od prvih v primerjavi z različnimi obdelavami (glej Sliko 4.14).



Slika 4.14: Matriki razdalj na sredini med menjavama in pred naslednjo menjavo [41].

Matrika na sliki 4.14 levo je sestavljena tako, da vključuje primerjavo prvih 15 obdelav, izvedenih takoj po menjavi orodja (ko je orodje še novo) s predvideno življenjske dobo orodja na sredini (ko je orodje na polovici iztrošenosti). Matrika na sliki desno pa primerjavo prvih 15 obdelav s predvidenim iztekom življenjske dobe orodja (ko je orodje obrabljeno). Vizualna analiza teh matrik omogoča hitro prepoznavanje progresije obrabe. Ko se orodje obrablja, je opazen večji kontrast in to je tisto, kar iščemo. Vrednost v matriki je določena kot razdalja med izbranima vrednostnima glede na mesto v matriki, kar pomeni, da je zgornji levi blok enak razdaljam med prvimi petnajstimi obdelavami, spodnji levi blok pa je enak razdaljam med prvimi in zadnjimi.

Tako dobimo dve vrednosti, za vsak pogled na obdelavo po eno. S pomočjo teh vrednosti se operater lahko lažje odloči o trenutnem stanju rezilnega orodja, saj vrednosti obeh indikatorjev lepo rasteta in se ob lomu orodja močno povečata. Gibanje stopnje razlike med zadnjimi in prvimi obdelavami orodja T3 lahko vidimo na Sliki 4.15.



Slika 4.15: Stopnja različnosti tekom obdelav med izbranima menjavama orodja [41].

Okoli 160 obdelanega artikla opazimo velik skok vrednosti, ki je posledica loma orodja. Pri tem absolutne vrednosti nimajo pomena, ampak je pomembna relativna razlika, ki nam pove, kdaj se zgodijo opazne spremembe. Matrike razdalj nam omogočajo kvantificiranje podobnosti oziroma razlik med posnetki vibracij. Čeprav ta pristop ni popoln, nam omogoča, da lažje opazujemo spremembe v vibracijskem signalu, ki so povezane z obrabo orodja. Te informacije pa so ključne za predvidevanje življenjske dobe orodja.

4.4 Uporabljeni algoritmi strojnega učenja

Strojno učenje predstavlja temeljno razumevanje algoritmov in njihovih značilnosti, kar je ključnega pomena za napredne procese obdelave podatkov. V današnjem digitalnem svetu, kjer so podatki dosegljivi v neomejenih količinah, postajajo algoritmi, ki temeljijo na metodah strojnega učenja, vse pomembnejši pri reševanju kompleksnih problemov v realnem času. Gre za specializirane tehnike, kot so klasifikacija in regresija, ki se uporabljajo za analizo in napovedovanje trendov.

Definicija strojnega učenja se osredotoča na sposobnost računalniških sistemov, da se samodejno izboljšujejo s pomočjo izkušenj in analize podatkov. Strojno učenje je ključno področje umetne inteligence, ki vključuje razvoj algoritmov, ki analizirajo in interpretirajo kompleksne podatkovne nize. Je študija računalniških algoritmov, ki se lahko samodejno izboljšujejo z izkušnjami in uporabo podatkov. Pri tem se uporablja širok spekter metod, od nadzorovanega do nenadzorovanega učenja, ki omogočajo prilagodljive rešitve za širok spekter aplikacij. Ključna značilnost strojnega učenja je njegova sposobnost obravnavanja nenehno spreminjajočih se podatkovnih okolij, kar zahteva robustne algoritme. Učinkovitost teh algoritmov je povezana z natančnostjo napovedi in sposobnostjo obvladovanja kompleksnosti uporabniških situacij.

Vrste strojnega učenja so razvrščene predvsem v tri glavne kategorije: nadzorovano, nenadzorovano in polnadzorovano učenje. Nadzorovano učenje se osredotoča na razvoj modelov, ki predvidijo izhode na podlagi vnaprej označenih podatkov, kar omogoča natančno učenje iz preteklosti. Nasprotno pa nenadzorovano učenje raziskuje strukturo podatkov brez predhodno določenih oznak, kar je uporabno pri razvrščanju ali združevanju

podatkov v skupine. Polnadzorovano učenje predstavlja kombinacijo združitve obeh pristopov, kjer model uporablja omejene oznake, da izboljša učinkovitost analize.

S pomočjo algoritmov strojnega učenja želimo bolj oprijemljivo oceno obrabljenosti rezilnega orodja. Razviti model se bo sčasoma lahko naučil predvideti primeren čas menjave rezilnega orodja in to na podlagi različnih lastnosti in ne samo izbranih vrednosti, ki jih primerjamo.

4.4.1 Priprava podatkov

Preden smo lahko uporabili algoritme strojnega učenja za napovedovanje obrabljenosti rezilnega orodja, je bilo treba pripraviti podatke. Ta proces je vključeval izbiro ustreznih značilk (angl. features) iz obsežnih podatkov o vibracijah, ki jih smo jih zajeli med procesom odrezavanja, ter pripravo teh značilk v obliko, primerno za učenje strojnega modela. Cilj je bil ustvariti nabor podatkov, ki zajame različna stanja rezilnega orodja, s čimer omogočamo identifikacijo in analizo povezave med značilkami in obrabljenostjo rezilnega orodja. Uporaba teh podatkov v algoritmih strojnega učenja pripomore k boljši natančnosti pri predvidevanju stanja orodja kot tudi k optimizaciji procesov in povečanju učinkovitosti proizvodnje.

Želeli smo naučiti modele, ki bodo izglasovali skupno oceno iztrošenosti. Da bi to dosegli, smo na podatke pogledali z več zornih kotov, kar nam omogoča pridobitev različnih perspektiv, kar je ključno za izboljšanje rezultatov napovedovanja. Te perspektive vključujejo: **Percentili matrike razdalj** – prvi pogled je vključeval 5., 10., 25., 50., 75., 90. in 95. percentil iz vseh treh spodnje trikotnih blokov obeh matrik. Vsaka matrika razdalj je predstavljala različne razdalje, spodnji trikotni bloki pa zajemajo različne vrednosti teh matrik, kar omogoča analizo razpršenosti podatkov. Z uporabo percentilov smo dobili strnjen opis porazdelitve vrednosti v teh blokih, kar je prispevalo k celovitosti našega pristopa. Skupno 7 x 3 x 2 = 42 vrednosti. **Vrednosti iz pomanjšanega spektrograma** – drugi pogled je bil sestavljen iz vrednosti na pomanjšanem spektrogramu. Spektrogram je vizualna predstavitev frekvenčnih informacij skozi čas, ki omogoča napredno analizo signalov. S pomanjšanjem spektrograma na dimenzije 8 x 32 smo dobili strnjen opis frekvenčne aktivnosti signala, kar je ključno za razumevanje vedenja orodja. Skupno 8 x 32 vrednosti = 256. **Vrednosti iz Fourierjeve transformacije** – tretji pogled je bil sestavljen iz vrednosti iz Fourierjeve transformacije. Fourierjeva transformacija razkrije frekvenčne komponente signala, ki so lahko povezane z različnimi načini delovanja stroja in obrabo orodja, kar zagotavlja dodatne vpoglede v analizo obratovalne učinkovitosti strojev. Skupno 64 vrednosti.

Da bi dobili popolnejšo sliko o stanju rezilnega orodja, smo kombinirali podatke iz različnih obdelav. To vključuje podatke zadnje obdelave, mediano zadnjih 10 obdelav, mediano obdelav 90–99 pred opazovano obdelavo in mediano obdelav 180–189 pred opazovano obdelavo. S tem smo ujeli trende in spremembe v obnašanju orodja. Skupno 1024 vrednosti ob pogledu s spektrogramom in 256 vrednosti ob pogledu s Fourierjevo transformacijo. Iz dobljenih treh pogledov smo sestavili še tri poglede, ki so le vsi trije možni pari osnovnih pogledov in vsi trije pogledi skupaj. Na ta način smo ujeli interakcije med različnimi značilkami. Skupno torej 7 pogledov.

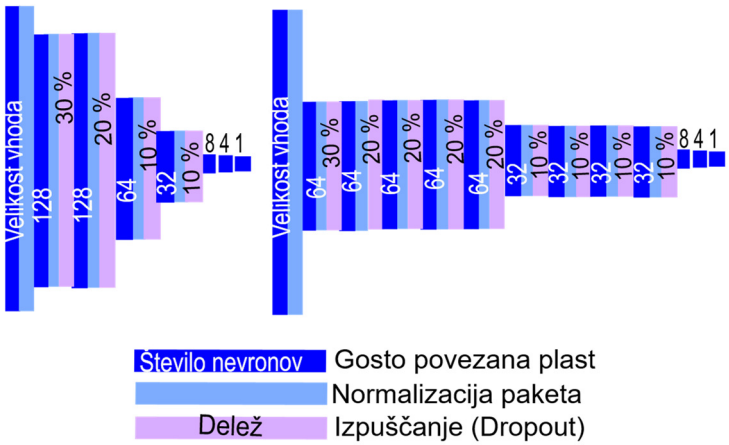
Vsakemu pogledu smo dodali tudi število obdelav od zadnje menjave orodja. Ta informacija je pomembna, saj pove, koliko življenjske dobe orodja je še v uporabi. Vrednost, ki jo želimo oceniti, je delež opravljenih obdelav do naslednje menjave orodja. To je torej napoved, koliko življenjske dobe orodja je še preostalo, kar omogoča boljše planiranje in optimizacijo procesov. S temi koraki smo ustvarili nabor podatkov, ki zajema različna stanja orodja in omogoča algoritmom strojnega učenja, da identificirajo povezave med temi značilnostmi in preostalo življenjsko dobo orodja. Izbira različnih obdelav in kombiniranje

podatkov med njimi nam je omogočilo, da ujamemo trende in spremembe v obnašanju orodja, kar je ključno za natančno napovedovanje.

Za uspešno uporabo strojnega učenja je velikega pomena pravilna razdelitev razpoložljivih podatkov na učno, validacijsko in testno množico. Namen te razdelitve je zagotoviti, da se modeli učinkovito naučijo povezave med vhodnimi podatki in ciljno spremenljivko, hkrati pa preprečijo prilagoditev modela podatkom (angl. overfitting). Za učenje modelov smo izvzeli eno tretjino menjav za namen testiranja na nikoli videnih podatkih. Ti podatki niso bili uporabljeni v procesu učenja, ampak samo za oceno njihove sposobnosti na nove podatke. To nam omogoča oceno zmogljivosti modelov na realnih podatkih, ki jih niso videli med učenjem. Ostali dve tretjini podatkov smo uporabljali za učni proces. Vsak model smo naučili na naključno izbranih 70 % podatkov, kjer smo izbrali za validacijo prejšnjih 30 % obdelav znotraj učnih podatkov. S tem smo poskrbeli za učenje na učnih in validacijskih podatkih ter za manjše preprileganje celotni učni množici. S tem zagotovimo, da se modeli učijo zakonitosti v podatkih, ne pa le zapomnijo specifičnih primerov. Ta pristop je pomemben, ker želimo zagotoviti, da se modeli dobro obnesejo tudi na novih, neznanih podatkih, kar je ključno za uspešno uporabo v praksi. S pravilno razdelitvijo podatkov smo zagotovili, da se modeli strojnega učenja učinkovito naučijo povezav med značilnostmi in obrabljenostjo orodja, hkrati pa smo preprečili prilagoditev modelov podatkom. S tem smo povečevali natančnost naših napovedi in zagotovili, da se bodo modeli dobro obnesli tudi v realnih proizvodnih pogojih.

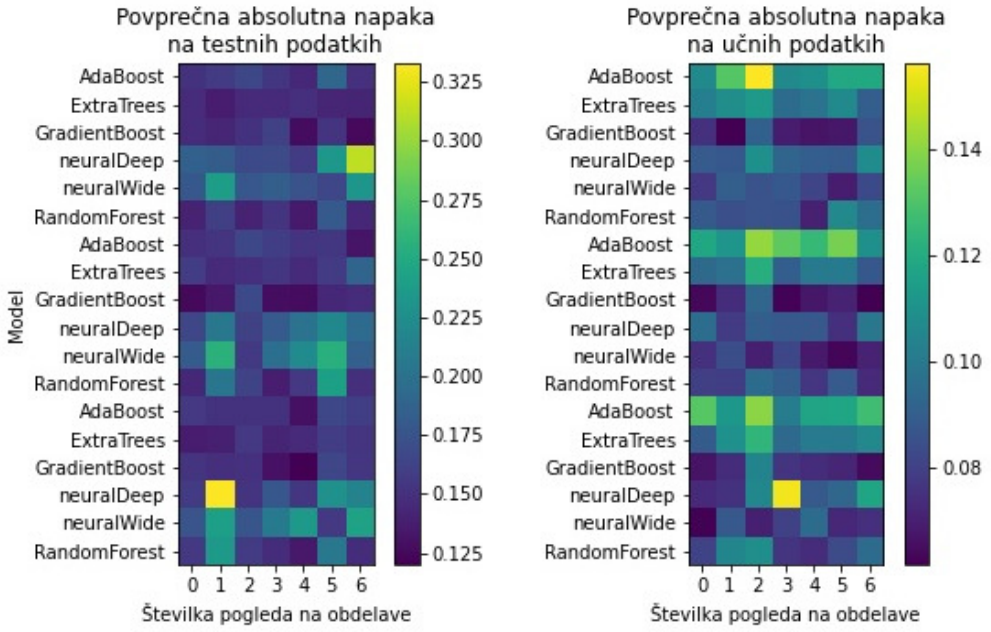
4.4.2 Gradnja modelov in glasovanje

Za vsako množico podatkov, ki smo jo obravnavali z določenega zornega kota, smo sestavili nabor šibkih modelov. Izbrati smo želeli modele, ki so se sposobni naučiti pravil tudi ob menjavi orodja, namreč vsako orodje in proizvodna šarža ima tudi druge lastnosti, ki pa so neodvisne od obrabe rezilnega orodja. Poleg različnih vhodov imamo tudi različne modele strojnega učenja, ki smo jih uporabili. Izbrani algoritmi so bolj usmerjeni v napovedovanje in prepoznavanje vzorcev v podatkih. Le-ti so AdaBoost Regresor s 50 cenilkami, GradientBoost Regresor prav tako s 50 cenilkami, Regresor z naključnim gozdom s 30 drevesi globine največ 5 in Regresor z dodatnimi drevesi (angl. Extra Trees) prav tako s 30 drevesi globine največ 5. Tem štirim klasičnim modelom strojnega učenja smo dodali še dve različni nevronski mreži. Eno širšo in eno globljo z arhitekturama, prikazanima na Sliki 4.16.



Slika 4.16: Arhitekturi dveh nevronskih mrež, levo širša in desno globlja [41].

Zgradili smo tri take množice modelov in dobili 6 x 7 x 3 = 126 (število različnih modelov x število različnih pogledov x število ponovitev) modelov, ki podajo vsak svojo oceno. Na Sliki 4.17 lahko vidimo povprečno absolutno napako posameznih modelov.



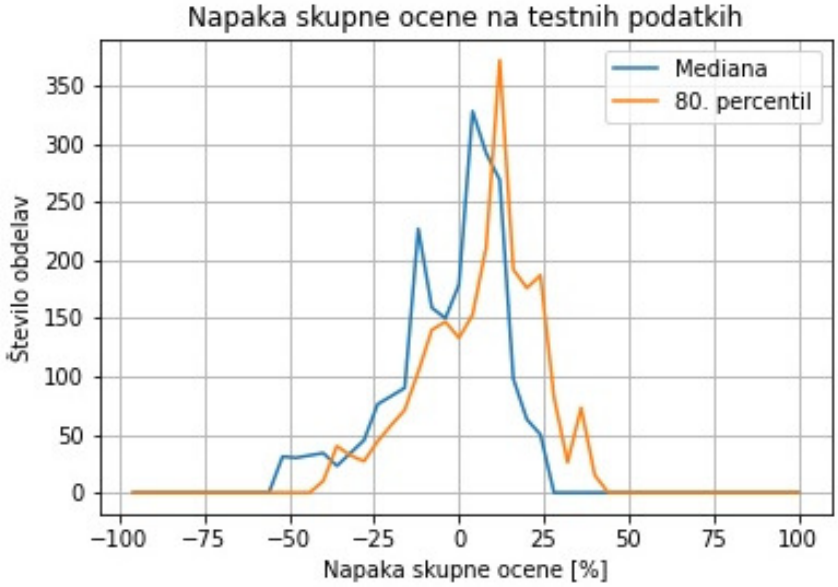
Slika 4.17: Povprečna absolutna napaka na podatkih. Svetle barve (rumena) označujejo nižje napake, temnejše pa višje [41].

Tako smo dobili veliko število ocen za obrabljenost. Med njimi smo vzeli mediano in 80. percentil. S tem smo dodatno zmanjšali preprileganje posameznih modelov in ignorirali preveč optimistične ali pesimistične ocene. Vrednosti smo pridobili empirično z nekaj različnimi percentili. Rezultat je razviden v Tabeli 4.2.

Tabela 4.2: Povprečna (absolutna) napaka [41].

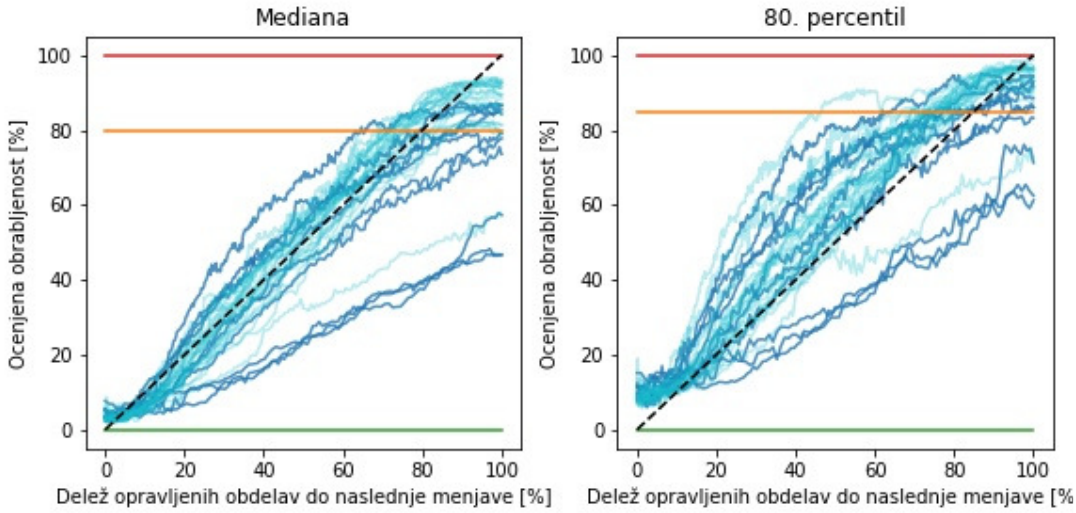
	Povprečna absolutna napaka	**Povprečna napaka**
Mediana	12,86 %	–5,36 %
80. percentil	14,20 %	4,28 %

Opazimo, da nam mediana vrne nekoliko nižjo oceno obrabljenosti, 80. percentil pa nekoliko višjo, kot je v resnici. Nadalje si lahko porazdelitev napak za obe oceni ogledamo na Sliki 4.18.



Slika 4.18: Porazdelitev napak na testnih podatkih za izbrani oceni [41].

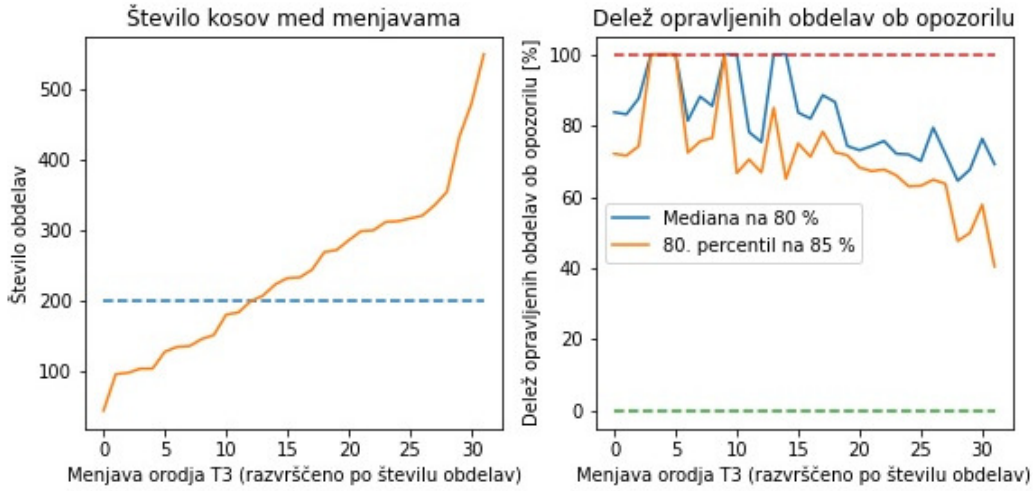
Na Sliki 4.19 pa lahko vidimo primerljivost ocene z iskano vrednostjo. Temno modre krivulje predstavljajo obdelave med menjavami iz testne množice, s svetlo modro so narisane obdelave med menjavami iz učne množice. Za obe oceni smo postavili vrednost, nad katero bomo opozorili operaterja na iztrošenost orodja, da ta postane bolj pozoren. Pri mediani se zdi primerna ocena 80 %, pri 80. percentilu pa 85 %, kar na Sliki 4.19 vidimo kot oranžno črto. Poleg tega bi opozorili tudi, ko je z istim orodjem izvedenih vsaj 200 obdelav.



Slika 4.19: Vrednosti obeh ocen med menjavami orodja [41].

Na Sliki 4.20 lahko vidimo, da bi bilo v opazovanih primerih opozorilo pri 200 kosih večinoma pravočasno, drugi dve opozorili pa bi se pojavili 20–60 % obdelav bolj zgodaj, kot je operater v praksi menjal orodje. V nekaterih primerih program do menjave še ne bi opozoril z nobenim opozorilom, ampak to je lahko tudi posledica slabega beleženja menjav, premajhne količine učnih podatkov ali posledica menjave, izvedene zgolj preventivno in

prezgodaj. Z več učenja, boljšim beleženjem menjav orodja in menjavami ob trenutkih, ko je to dejansko treba, je program lahko še boljši.



Slika 4.20: Mesto opozorila o iztrošenosti orodja [41].

Poglavje 5

Meritve in analiza podatkov (empirično)

5.1 Eksperimentalna postavitev

Osrednji del disertacije je razvoj sistema, ki na podlagi analize vibracij napoveduje življenjsko dobo rezilnega orodja, kar omogoča pravočasno zamenjavo in preprečuje nepredvidene zastoje oz. z njimi nastale stroške. Vendar pa je učinkovitost in zanesljivost takega sistema močno odvisna od kakovosti vhodnih podatkov. Zato je natančno načrtovanje in izvedba eksperimentov za zbiranje podatkov o vibracijah bistvenega pomena (glej Sliko 5.1).

V tem poglavju se zato posvetimo podrobnemu opisu eksperimentalne postavitve, ki je bila uporabljena za zbiranje podatkov o vibracijah med procesom obdelave. Poudarek je na zagotavljanju transparentnosti in ponovljivosti, kar pomeni, da mora biti vsak korak natančno dokumentiran; od izbire primernega obdelovalnega stroja, ki omogoča natančen nadzor nad parametri procesa in minimalen vpliv zunanjih motenj, do skrbne izbire rezilnega orodja in materiala obdelovanca, ki ustrezata industrijski praksi in omogočata simulacijo realnih pogojev obdelave. Posebna pozornost je namenjena tudi določitvi parametrov obdelave, kot so hitrost rezanja, podajanje in globina reza, ki imajo ključen vpliv na nastanek vibracij in obrabo orodja.



Slika 5.1: Osnovni diagram poteka za zbiranje informacij o vibracijah med potekom obdelave [lastni].

5.1.1 Izbira obdelovalnega stroja

Za namene izvedbe testiranja, kjer smo integrirali opremo, našteto v poglavju 4, je bilo treba definirati tudi obdelovalni center. V našem primeru smo se odločili za stružnico, predvsem zaradi načina obdelave, saj se pri struženju obdelovanec vrti, medtem ko je rezilno orodje fiksno pritrjeno v revolver in opravlja linearno gibanje v smeri odstranjevanja materiala oz. struženja. S tem smo imeli možnost pritrditve pospeškomera na ležaj ohišja vretena, ki ni premikajoč. V primeru rezkalnega centra se vreteno, kjer je vpeto rezilno orodje, pomika v vseh oseh, kar zahteva drugačen pristop pritrditve pospeškomera kot tudi zajemanja podatkov.

Izbrali smo dvovretensko stružnico proizvajalca Mori Seiki ZL-203, katere posluževanje je potekalo ročno (glej Sliko 5.2), prvenstveno zaradi lažjega spremljanja in beleženja dogodkov oz. menjav rezilnega orodja. Je visoko zmogljiva CNC stružnica z dvojnim vretenom, zasnovana za učinkovito obdelavo kompleksnih izdelkov. Stružnica je primerna za srednjo do visoko serijsko proizvodnjo kompleksnejših izdelkov. Več podatkov v Tabeli 5.1.

Tabela 5.1: Osnovni tehnični podatki o dvovretenski stružnici Mori Seiki [lastni].

Model:	ZL-203SMC
Serijska številka:	ZL200DH0468
Tip:	CNC stružnica
Leto izdelave	2004

Glavno (levo) vreteno:

Maks. premer struženja	≈210 mm
Hitrost vretena	do 6.000 vrt/min
Premer vpenjalne glave	od 150 mm do 200 mm

Desno vreteno:

Maks. premer struženja	≈150 mm
Hitrost vretena	do 6.000 vrt/min
Premer vpenjalne glave	do 150 mm

Revolver:

Število orodij	12 postaj
Velikost držala	25 mm



Slika 5.2: Stružnica Mori Seiki in glavno (levo) vreteno, v čigar ohišje smo implementirali pospeškomer [lastni].

V nadaljevanju projekta, kjer smo posnetke že imeli zbrane, smo vso opremo z aplikacijo premestili na avtomatizirano stružnico Doosan PUMA GT2100M z namenom kasnejše nadgradnje in integracije z avtomatizacijo. Hkrati je bil namen tega tudi izvesti evalvacijo delovanja aplikacije na ostalih obdelovalnih strojih.

Doosan PUMA GT2100M je univerzalna enovretenska CNC stružnica z opcijo gnanih orodij oz. enostavnejšim rezkanjem (glej Sliko 5.3). Zasnovana je za obdelavo zahtevnejših proizvodov v enem vpetju, kar povečuje učinkovitost in natančnost. Odlikuje jo močan motor vretena in toga struktura. Več podatkov v Tabeli 5.2.

Tabela 5.2: Osnovni tehnični podatki o enovretenski stružnici Doosan [lastni].

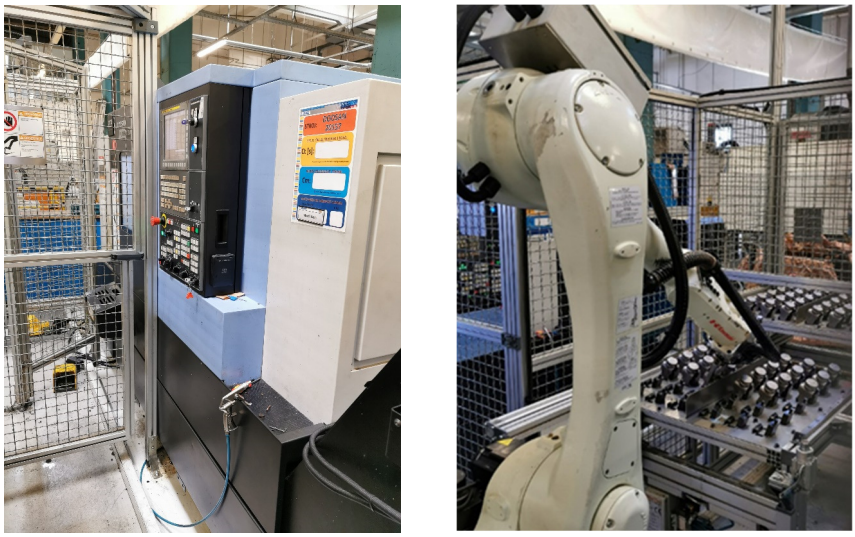
Model:	PUMA GT 2100M
Serijska številka:	ML0237-000285
Tip:	CNC stružnica
Leto izdelave	2015

Glavno vreteno:

Maks. premer struženja	≈350 mm
Hitrost vretena	do 4.500 vrt/min
Premer vpenjalne glave	od 170 mm do 200 mm

Revolver:

Število orodij	12 postaj
Velikost držala	25 mm



Slika 5.3: Stružnica PUMA GT 2100 M v povezavi z industrijskim robotom Kawasaki RS010L [lastni].

Za sprotno spremljanje podatkov o vibracijah iz stroja in beleženje dogodkov se je poleg že naštete ključne opreme v poglavju 4, neposredno na delovnem mestu zraven dogradila tudi ostala osnovna oprema, tj. računalniški zaslon, tipkovnica in miška (glej Sliko 5.4).



Slika 5.4: Oprema neposredno na delovnem mestu stružnice [lastni].

5.1.2 Izbira artikla in materiala obdelovanca

Za namene izvajanje meritev vibracij se je določil velikoserijski artikel vilice iz družine artiklov AKC (aktivni kinematični nadzor). Tehnološki postopek izdelave artikla se začenja z narezom osnovnega materiala 30MnVS6, ki se v veliki meri uporablja za kovane izdelke. Sledi proces segrevanja materiala na cca. 1250 °C, valjanja oz. predoblikovanja, kovanja v več fazah na stiskalnici, obrezovanja in t. i. kontroliranega ohlajevanja iz kovaške temperature za dosego ustrezne strukture in mehanskih lastnosti (glej Tabelo 5.3).

Tabela 5.3: Materialne lastnosti šarže ″P″, ki smo jo prvenstveno uporabili za testiranje [lastni].

Osnovni podatki	
Številka A-testa	287832/2020
Standard	EN 10204 – 3.1
Naročnik	UNIOR, d. d., (OOK)
Izdelek	"D"
Risba odkovka	27059
Material	30MnVS6+P EN10267 W.Nr:1.1302
Proizvajalec	ŠTORE STEEL, d. o. o.
Standard	ISKIZ 121.026-BY/3 "D"

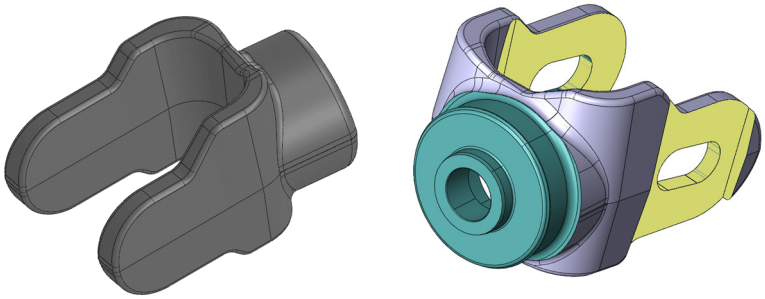
Kemična sestava			
Ogljik (C)	0.28	Krom (Cr)	0.13
Silicij (Si)	0.61	Nikelj (Ni)	0.07
Mangan (Mn)	1.4	Molibden (Mo)	0.02
Fosfor (P)	0.011	Vanadij (V)	0.09
Žveplo (S)	0.033	Baker (Cu)	0.12

Toplotna obdelava	
Trdota [238-280 HBW]	243–264 HBW (jedro), 244–262 HBW (površina)
Natezna trdnost [800–950 N/mm^2]	823–892 N/mm^2 (jedro), 826–884 N/mm^2 (površina)

Metalografija	
Velikost Zrn	7;7
Zgradba	Kovana perlitna struktura, ustrezna

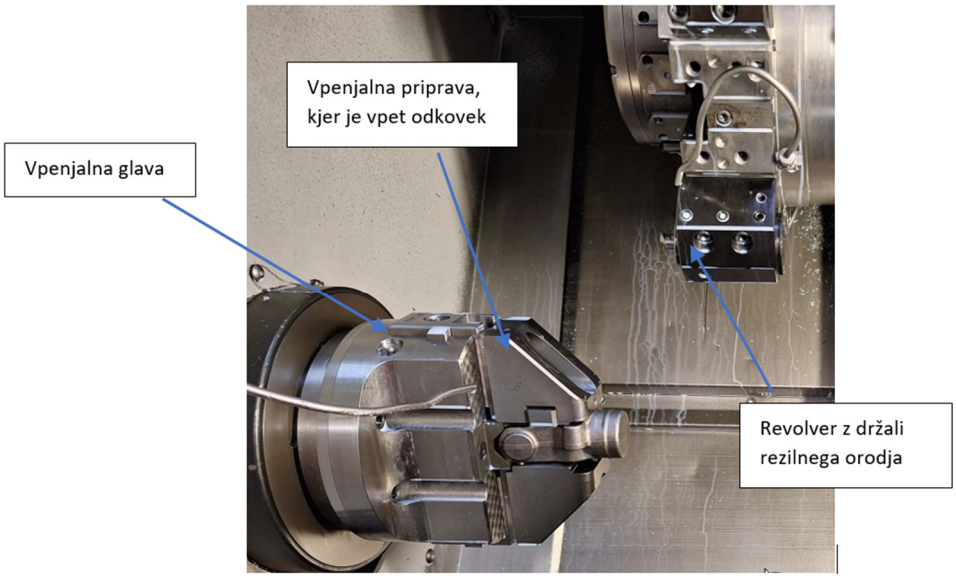
Mehanske lastnosti	
Meja tečenja $Rp_{0,2}$ [min 500 N/mm^2]	585–595 N/mm^2
Natezna trdnost Rm [800–950 N/ mm^2]	892–935 N/mm^2
Raztezek A5 [min 15 %]	16–20,8 %
Kontrakcija Z [min 30 %]	42–44 %

Po procesu kovanja sledi mehanska obdelava za dosego končnih mer. Obdelava vilice poteka v dveh fazah, in sicer prva operacija je obojestransko struženje, druga operacija pa rezkanje vilic in izdelava ovalnih izvrtin. Kaj vse je predmet operacije struženja, je na Sliki 5.5 označeno z zeleno barvo in kaj predmet rezkanja z rumeno barvo.



Slika 5.5: 3D-model končnega odkovka (siva barva) in obdelane vilice [lastni].

V našem primeru smo se glede na že predhodno našteta dejstva odločili za merjenje vibracij pri operaciji struženja – prva stran oz. na mestu, kjer je odkovek vpet preko vpenjalne priprave v vpenjalno glavo glavnega vretena (glej Sliko 5.6).



Slika 5.6: Primer vpetja odkovka v stružnico [lastni].

5.1.3 Izbira rezilnega orodja in določitev parametrov obdelave

Pri procesu struženja je ključnega pomena pravilna strategija postavitve in uporaba tehnologije mehanske obdelave, da se dosežejo želene dimenzije, tolerance in kakovost površine. Vključuje izbor pravega orodja, optimizacijo poti orodja ter določitev ustreznih parametrov, kot so hitrost, globina rezanja in podajanje. Izbor rezilnega materiala in tehnologije odrezavanja na primeru artikla vilice iz družine artiklov AKC je razviden iz t. i. nastavnega plana (glej Tabelo 5.4).

Tabela 5.4: Nastavni plan za operacijo struženja prva stran [lastni].

Št.orodja (T):	Opis delovne operacije:	Rezilno orodje		Pomožno orodje		Vrtljaji vretena S (min^{-1})	Pomik F (mm/vrt) oz. (mm/min)
		Naziv:	Ident:	Naziv:	Ident:		
Glava 1:							
T3	Grobo struženje	Stru.pl. SANDVIK WNMG 080408 WM		Stru.nož SANDVIK MWLNL 2525 M-08W Podložna ploščica IWSN 433		2900	0,4
T2	Profilno struženje	Stru.pl. SANDVIK N123 H2 0400-02 Vijak je narejen interno - nahaja se v skladišču		Stru.nož SANDVIK LF123H13 2020BM		3300	0,1
T5	Vrtanje Ø14mm	Str.pl 880-0202 W05 Str.pl 880-020204 HC Vijak 5513 020-28		Vrt.drog SANDVIK Ø14 mm 880-D1400L20-02		2800	0,18
T6	Struženje izvrtine Ø14,1	Str.pl TCMT 090204-5015 Vijak 5513 020-05		Str.nož SANDVIK A10K – STFCR 09		2500	0,12

Pri **grobem struženju (T3)** je ključno, da se uporablja rezilno orodje, ki je odporno na visoke obremenitve in temperature, saj se pri odstranjevanju velike količine materiala ustvarja veliko toplote. Stružna ploščica SANDVIK WNMG 080408 WM je izbrana zaradi svoje robustnosti in geometrije, ki omogoča učinkovito odstranjevanje materiala. Pomemben je tudi stružni nož SANDVIK MWLNL 2525 M-08W, ki zagotavlja stabilno držanje ploščice in s tem preprečuje vibracije ter omogoča bolj gladko in učinkovito obdelavo. Parametri rezanja, kot so vrtljaji vretena 2900 min^{-1} in podajanje 0.4 mm/vrt, so optimizirani za doseganje visoke produktivnosti pri tem postopku.

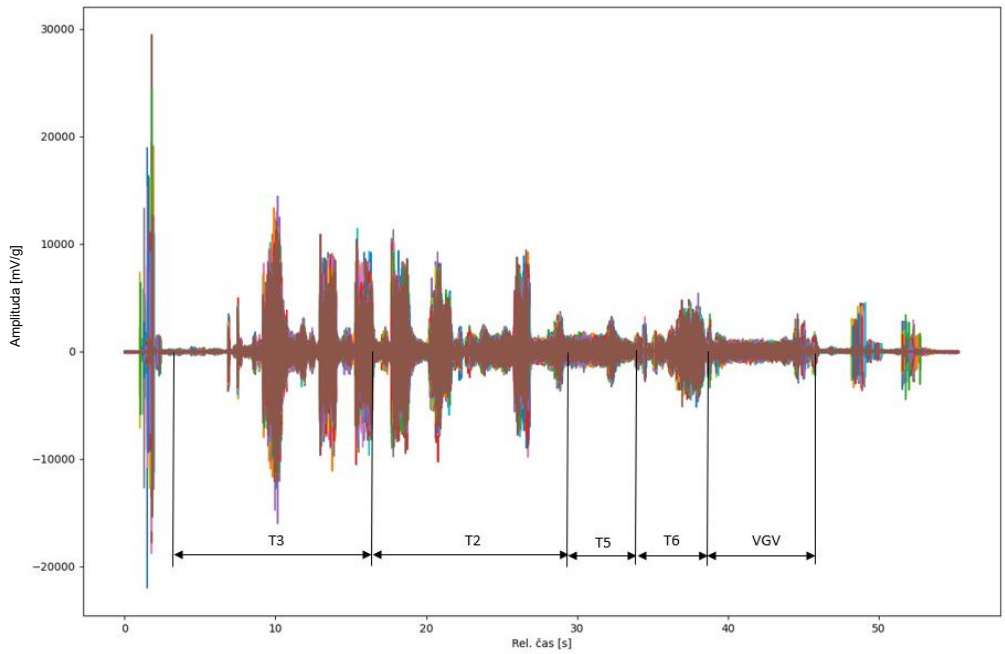
Pri **profilnem struženju (T2)** je poudarek na natančnosti in doseganju končne oblike obdelovanca. Za to operacijo je izbrana stružna ploščica SANDVIK N123 H2 0400-02, ki je primerna za fino obdelavo in ustvarjanje kompleksnih oblik. Stružni nož SANDVIK LF123H13 2020BM zagotavlja stabilno držanje ploščice in omogoča natančno vodenje orodja po želeni poti. Parametri rezanja, kot so vrtljaji vretena 3300 min^{-1} in podajanje 0.1 mm/vrt, so nastavljeni tako, da omogočajo natančno in kontrolirano odstranjevanje materiala, kar je ključno za doseganje želenega profila.

Pri vrtanju **izvrtine premera ϕ14 mm (T5)** je ključno, da se zagotovi natančna in ravna izvrtina. Uporabljen je vrtalni drog SANDVIK 880-D1400L20-02 v kombinaciji s ploščico SANDVIK 880-0202 W05 in SANDVIK 880-0202204 HC, ki sta zasnovani za učinkovito odvajanje odrezkov in zmanjšanje toplote. Izbran vrtalni drog zagotavlja stabilnost in natančnost pri vrtanju. Parametri rezanja, kot so vrtljaji vretena 2800 min^{-1} in podajanje 0.18 mm/vrt, so definirani za doseganje optimalne hitrosti vrtanja. Pomembno je tudi, da se med vrtanjem uporablja ustrezna koncentracija in pretok hladilnega sredstva, ki pomaga pri odvajanju toplote in preprečuje pregrevanje orodja in obdelovanca.

Pri struženju **izvrtine s premerom Ø14,1 mm (T6)** je cilj izdelati izvrtino na končno mero in zagotoviti gladko notranjo površino. Uporabljena je ploščica SANDVIK TCMT 090204-5015, ki je primerna za natančno obdelavo notranjih površin. Stružni nož SANDVIK A10K – STFCR 09 je ključen za stabilno držanje ploščice in natančno vodenje orodja med obdelavo. Parametri rezanja, kot so vrtljaji vretena 2500 min^{-1} in podajanje 0.12 mm/vrt, so nastavljeni tako, da omogočajo natančno in kontrolirano odstranjevanje materiala, kar je ključno za doseganje želenega premera in kakovosti površine izvrtine.

5.2 Postopek merjenja vibracij

Kot že opisano v poglavju 4.2.2 smo na pokrov ležaja glavnega vretena namestili pospeškomer, s katerim smo med obdelavo merili vibracije v vseh treh oseh *(x, y, z)*. Po nekaj poskusih obdelave kosov in ustrezne pretvorbe signalov smo izdelali diagram, kot prikazan na Sliki 5.7.



Slika 5.7: Diagram obdelave operacije struženja prva stran po posameznih orodjih [lastni].

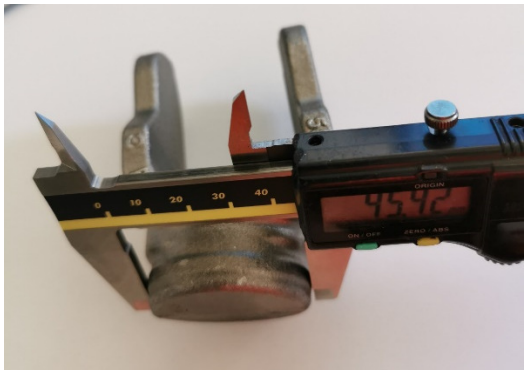
Slika prikazuje diagram, ki predstavlja časovni potek vibracijskih podatkov, zajetih med procesom obdelave. Vertikalna os prikazuje amplitudo vibracij. Višja amplituda pomeni večjo intenzivnost vibracij. Amplituda se meri v mV/g. Horizontalna os predstavlja relativni čas v sekundah. Prikazuje časovni potek posnetih vibracij ob uporabi različnih orodij, ki se uporabljajo v procesu. Na začetku diagrama, tik pred oznako T3, je opazen močan in nenaden skok amplitude. To predstavlja začetek obdelave oz. primik revolverja k obdelovancu za pričetek obdelave. Vsaka naslednja faza obdelave (T3, T2, T5, T6) ima značilno obliko vibracijskega signala, ki je posledica samega odrezavanja. VGV pomeni vrtenje vretena ob zaključevanju procesa, kjer ni prisotno nobeno orodje.

Iz diagrama tako lahko razberemo, da traja celoten cikel obdelave prve strani približno 45 sekund in da je orodje T3 najbolj obremenjeno (najvišja amplituda). Razlike v amplitudi in obliki signala pa lahko uporabimo kot indikator obrabe orodja in primerjanje teh oblik za določanje stanja rezilnega orodja. Na osnovi zapisov zgoraj je bila podana odločitev, da bomo za razvoj aplikacije spremljali vibracije orodja T3, ki je najbolj obremenjeno in ima posledično zaradi tega tudi najkrajšo življenjsko dobo.

5.3 Analiza zbranih podatkov

Da se v največji meri izognemo ostalim vplivnim faktorjem pri določitvi referenčnega signala, smo pred pričetkom obdelave izmerili nekaj ključnih veličin, s katerimi smo želeli kar se da minimizirati ostale možne vplive. Zajeti smo želeli najbolj reprezentativni vzorec,

zato smo merili debelino in trdoto odkovka. Debelino odkovka smo merili s pomičnim merilom, trdoto osnovnega materiala (odkovka) po vnaprej definirani zunanji površini po postopku merjenja trdote Brinell (glej Sliko 5.8).





Specifikacija merilnega sredstva za merjenje trdote	
Naziv in tip merilne opreme	EMCO TEST M4U 075 G3
Št. certifikata umeritve stroja	21-0119-A
Merilna metoda	HBW 2.5/187.5-94.8x
Testna sila	187.5 [kg]
Premer kroglice	2,5 [mm]

UNIOR — POROČILO O VHODNI KONTROLI

Izdelek:	Št. Sarže:	Oznaka:		Spr.
AUDI Gabel PL73	"P"			
	Št. Kos: 27059 / 582			Spr.

D-del		KARAKTERISTIKE						
DA	NE	Koordinate	Hrapavost	Premer končni	Izmerjen premer odkovka	Trdota	Čas	Št. Kosa
	Karakteristike	X - Z	Rz [µm]	D [mm]	d [mm]	Brinell HB	h:min [ura:minuta]	
IZMERJENO			3,1	41,95	44,86	249; 248		10
			4,1	41,95	44,84	269; 255		39
			5,0	41,93	44,79	255; 271		57
			4,5	41,95	45,01	249; 254		129
			3,6	41,94	44,87	255; 265		133
			3,2	41,97	45,05	241; 250		203

Slika 5.8: Izmera zunanjega premera in meritev trdote odkovka vilice AKC [lastni].

Po določitvi referenčnega diagrama, ki je služil za izhodiščno bazo, je sledilo petmesečno spremljanje produkcije z ročnim zapisovanjem menjav rezilnih orodij oz. beleženjem dogodkov (glej Sliko 5.9). Podatki so se spremljali skozi redno produkcijo, dogodki pa zapisovali v posebno tabelo z identifikacijsko številko artikla, za katerega so se izvajale menjave orodja, šaržo proizvodnje, kar je omogočalo nadaljnjo razčlenitev menjav orodij glede na serijo proizvodnje, natančen datum in čas, ko je bila menjava orodja izvedena, kar je ključno za analizo časovnih trendov in intervalov med menjavami in identifikacijske številke orodij, ki so bila zamenjana. Pri tem je imela tabela več stolpcev, saj se lahko pri eni menjavi zamenja več orodij hkrati. Razlog za menjavo orodja so bili "iztrošenost",

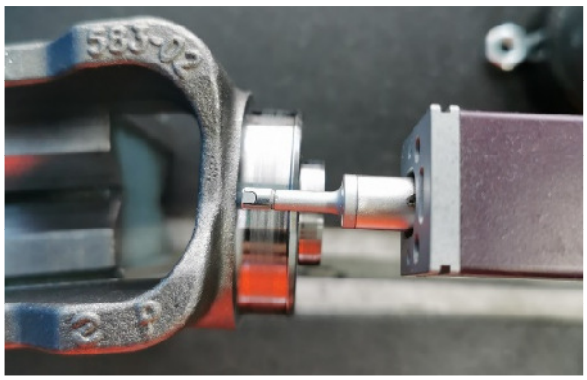
"LOM" (zlom), ali "redna menjava". Ta podatek je pomemben za razumevanje glavnih vzrokov menjav orodij.

Št. artikla	Šarža	Datum in čas menjave	Št. orodja	Št. orodja	Št. orodja	Št. orodja	Vzrok menjave
27059	EI	28.08.2020 11:30					redna menjava
27059	EI	28.08.2020 12:30	T2				iztrošenost
27059	EI	29.08.2020 08:30		T3			iztrošenost
27059	EI	29.08.2020 14:10	T2	T3			iztrošenost
27059	EI	29.08.2020 19:00	T2	T3	T5		iztrošenost
27059	EI	31.08.2020 08:00					iztrošenost
27059	EI	31.08.2020 12:40		T3			iztrošenost
27059	EI	31.08.2020 16:00	T2	T3			iztrošenost
27059	EI	31.08.2020 22:00		T3	T5	T6	redna menjava
27059	EI	1.09.2020 00:38	T2				iztrošenost
27059	EI	1.09.2020 01:34	T2	T3			iztrošenost
27059	EI	1.09.2020 08:20					iztrošenost
27059	EI	1.09.2020 10:15	T2	T3			iztrošenost
27059	EI	1.09.2020 14:15	T2	T3			iztrošenost
27059	EI	1.09.2020 16:50					iztrošenost
27059	EI	1.09.2020 22:00	T2	T3	T5	T6	redna menjava
27059	EI	2.09.2020 01:55	T2	T3			iztrošenost
27059	EI	2.09.2020 10:30	T2	T3	T5		iztrošenost
27059	EI	2.09.2020 14:10	T2	T3			iztrošenost
27059	EI	2.09.2020 15:50	T2	T3		T6	iztrošenost
27059	EI	3.09.2020 18:30	T2				iztrošenost
27059	EI	4.09.2020 06:15	T2	T3			iztrošenost
27059	EI	4.09.2020 11:59		T3	T5		iztrošenost
27059	EI	5.09.2020 06:10	T2	T3			iztrošenost

Slika 5.9: Spremna tabela beleženja dogodkov (čistopis v Excelu) [lastni].

Obdobje zajemanja podatkov je trajalo od 28. avgusta 2020 do 18. decembra 2020. Skupno je bilo zabeleženih 299 menjav rezilnega orodja. Najbolj prevladujoč zabeležen razlog za menjave orodij je bila ″iztrošenost″, manj pogosti ″LOM″, ″redna menjava″ pa zgolj občasno. Pogostost menjave orodij T2 je bila 174-krat , T3 157-krat, T5 67-krat, in T6 31-krat. Najpogostejša kombinacija orodij, ki se pojavlja pri menjavah, je T2 in T3. Podatki kažejo, da je iztrošenost glavni razlog za menjavo orodij.

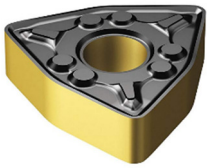
Kriterij iztrošenosti rezilnega orodja je bil hrapavost, ki jo operater meri v določenih časovnih intervalih glede na predviden kontrolni plan. Hrapavost kosa se meri na obodu obdelanega polizdelka, pravokotno na obdelano površino. Meritev se izvaja z vhodnimi nastavitvami $\lambda_c = 0{,}8$ in korakom $N = 5$. Postopek izvedbe meritev je predstavljen na Sliki 5.10, nekaj izmerjenih vrednosti pa zabeleženih v tabeli na Sliki 5.8.



Slika 5.10: Postopek izvedbe meritev hrapavosti na struženem delu [lastni].

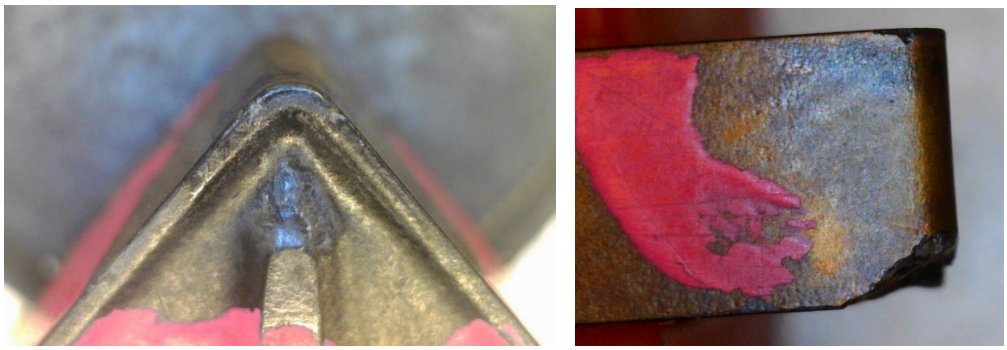
5.3.1 Analiza zamenjane rezilne ploščice T3 zaradi iztrošenosti

Kot je bilo že predhodno omenjeno, se za grobo struženje oz. pod oznako orodja T3 uporablja rezilna ploščica SANDVIK WNMG 080408 WM. Gre za trikotno ploščico z 80-stopinjskim kotom, 8 mm dolžino rezilnega roba, debeline 4,76 mm in radijem zaokrožitve 0,8 mm (glej Sliko 5.11).



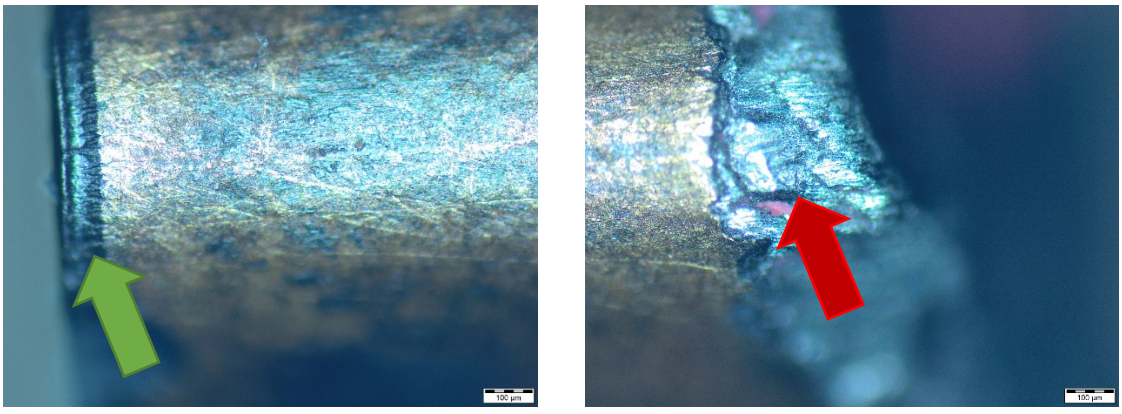
Slika 5.11: 3D-model rezilne ploščice WNMG 080408 WM pod oznako T3 [44].

V fazi izvedbe testa smo nadzorovali stopnjo iztrošenosti rezilnega roba ploščice z namenom upravičenosti zamenjave. Na spodnjih slikah je označen rezilni rob ploščice, kjer se je v sklopu testiranja ploščica obrabila do stopnje neuporabnosti za nadaljnje izvajanje procesa. Vidimo prikaz obrabe rezilnega roba iz zgornje strani ter pogled s strani (glej Sliko 5.12). Slike so bile zajete z mikrokamero.



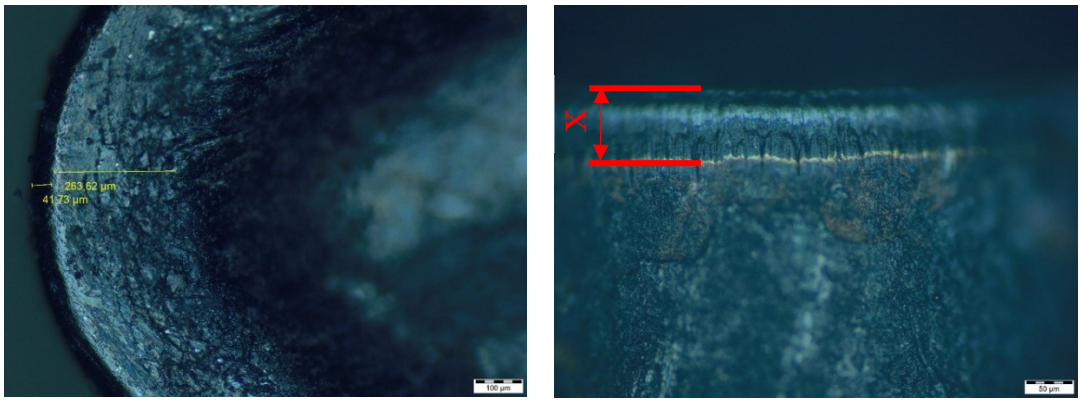
Slika 5.12: Obraba roba rezilne ploščice orodja T3 s pogledom z vrha in s strani [lastni].

V nadaljevanju tudi primera normalne obrabe rezilnega roba in primer loma rezilne ploščice (glej Sliko 5.13).



Slika 5.13: Normalna obraba (levo) in lom ploščice (desno) [lastni].

Na sliki 5.14 imamo prikazan vpliv obrabe ploščice, kjer je dejanski rezilni rob, ki je bil v stiku s obdelovancem, izmerjen 41,73 µm. Na osnovi spremembe kemične strukture pa je viden pojav termičnega vpliva na sestavo ploščice na razdalji 263,62 µm od rezilnega roba, ki je bil v neposrednem stiku z odrezovalno površino. Slika je bila zajeta z elektronskim mikroskopom in 100 µm povečavo.



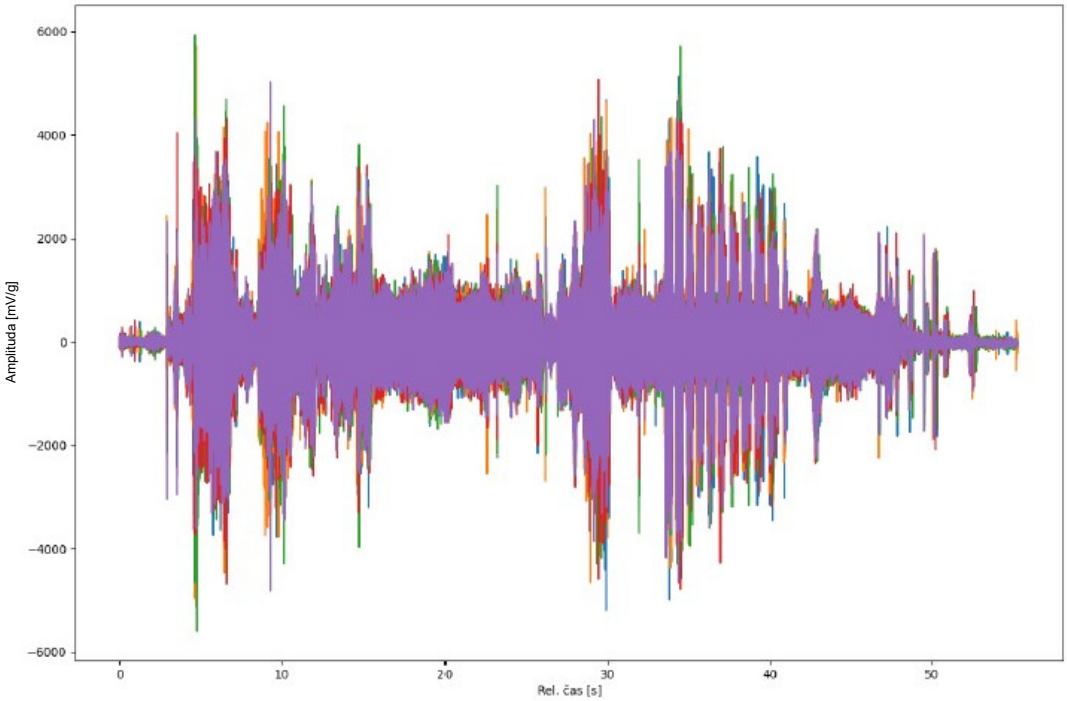
Slika 5.14: Toplotno vplivne cone in obraba rezilnega orodja [lastni].

5.3.2 Korelacija med vibracijami in obrabo

Izvajali smo analizo obrabljenosti rezilnega orodja pri obdelavi vilice AKC na podlagi vibracij, ki so nastale na ohišju glavnega vretena ležaja dvovretenske stružnice. Z uporabo pospeškomera v treh pravokotnih smereh smo v določenem časovnem obdobju snemali vibracije. Osnovna naloga je bila ugotoviti, če na podlagi posnetkov lahko predvidimo optimalni čas menjave orodja, tj. kdaj se frekvenca vibracij spremeni zaradi obrabljenosti orodij.

Dvanajsturne posnetke v *.wav* formatu smo razrezali in v seznam shranili posamezne obdelave vilic. Nato smo naredili analize v frekvenčnem in časovnem prostoru. Za detekcijo obdelav smo uporabljali predvsem posnetek vibracij v X-osi, izrezali pa pri zaznanem času posnetek obdelave v vseh treh oseh. Za detekcijo obdelav smo uporabljali en posnetek obdelave kot referenco. Po celotnem posnetku smo se premikali z oknom širine enake referenčnemu posnetku. Opazovani del mora imeti najvišjo vrednost amplitude. Empirično smo izbrali spodnjo mejo 45 enot, saj je to najbolj očitna lastnost iskanih dogodkov, sicer vibracij skorajda ni. S tem smo zaznali vse obdelave kosov, a najdemo tudi dele, kjer obdelave ni bilo. Opazovani del in referenčni del smo predhodno obdelali, absolutno vrednost amplitude zgladili, da smo se izognili šumu. Nato smo obdelana posnetka poravnali glede na mesto najvišje korelacije in opazovali povprečno absolutno vrednost in velikost zamika. S tem smo odstranili dele posnetka, kjer ni bilo obdelave, saj je razlika z referenčnim posnetkom prevelika ter da smo se izognili ponovitvam iste obdelave v seznamu obdelav, saj je zamik lahko velik največ za dve dolžini koraka, s katerim smo premikali okno po celotnem posnetku. Po zaznani obdelavi smo shranili poravnani posnetek v vseh treh oseh in čas dogodka. Nato smo povečali korak z oknom toliko, da prestopimo že zaznani dogodek.

Na Sliki 5.15 lahko vidimo 20 poravnanih obdelav vilice šarže K. Vsaka barva predstavlja en posnetek, krivulje pa so zložene ena vrh druge.



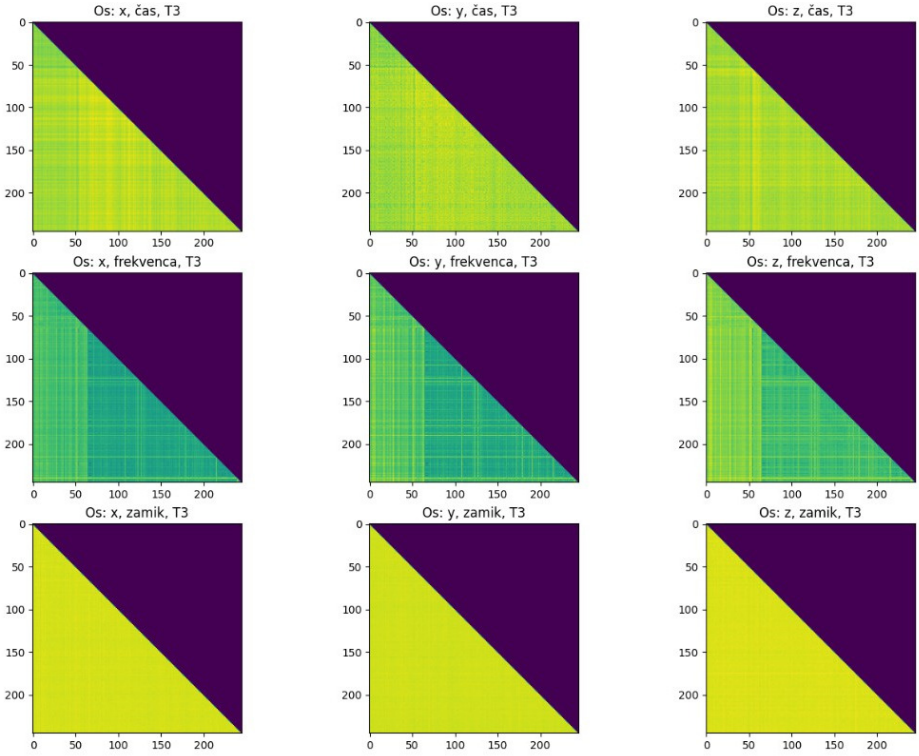
Slika 5.15: Poravnanih 20 posnetkov obdelovalne šarže K [41].

Ob ogledu časov zabeleženih menjav smo zaznali, da je operater nekatere menjave naredil naključno, saj se nekatere ure pojavljajo pogosteje. Eden izmed takšnih časov je natanko 22.00, ko se prične nova izmena in je očitno operater orodje zamenjal takoj, ne da bi bil pozoren na dejansko obrabo rezilne ploščice. Za nekatere zamenjave orodja pa smo zaznali, da sploh niso bile zabeležene.

Prvo orodje v obdelavi je orodje T3 in je zato najbolj obremenjeno. Zaradi spreminjajočih se dimenzij lahko pričakujemo večja nihanja med posameznimi posnetki. Kljub temu smo se odločili, da se bomo osredotočili na posnetke v času obdelave s T3, saj je zaznavnost napak tu največja in najbolj neodvisna od drugih orodij. Obrabljenost T3 namreč vpliva na obremenitev orodja T2, ne pa tudi obratno.

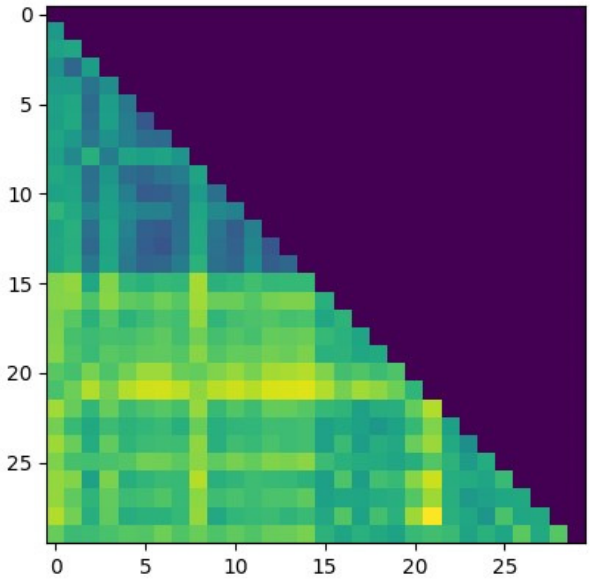
Osnovna teza je torej ta, da pričakujemo več vibracij in višje amplitude, ko je orodje bolj obrabljeno. Primerjali smo tri različne prostore in nekaj različnih razdalj. Če paroma primerjamo različne posnetke, lahko izrišemo matrike razdalj z višjo (svetlejšo) vrednostjo, kjer je razlika med posnetkoma večja.

Na Sliki 5.16 lahko za vsako izmed osi vidimo matrike razdalj, izrisane kot sliko za različne prostore: časovni (originalen posnetek) ter frekvenčni prostor (posnetek, transformiran s pomočjo Fourierjeve analize), pri čemer glede na frekvenco primerjamo amplitudo ali zamik. Opazimo lahko, da pri primerjavi zamika (spodnja vrsta slik) ni opaziti nobenih razlik in so obdelave na začetku in na koncu dela z istim orodjem praktično enake, kar nam pravzaprav pove, da so posnetki dobro poravnani. Zgornja dva prostora (zgornji vrsti slik) pa vsebujeta opazne stopnice in robove, ki so zanimivi za analizo. Vsak stolpec na sliki predstavlja eno os (x, y in z), vrstice pa predstavljajo različne prostore, čas, amplitudo, odvisno od frekvence, in zamik, odvisen od frekvence. Opazimo, da se nekatere razlike med posnetki opazne predvsem pri zgornjih dveh prostorih, pri spodnjem pa je matrika preveč homogeno obarvana, da bi lahko karkoli zaznali.



Slika 5.16: Matrike razdalj za vsako izmed osi [41].

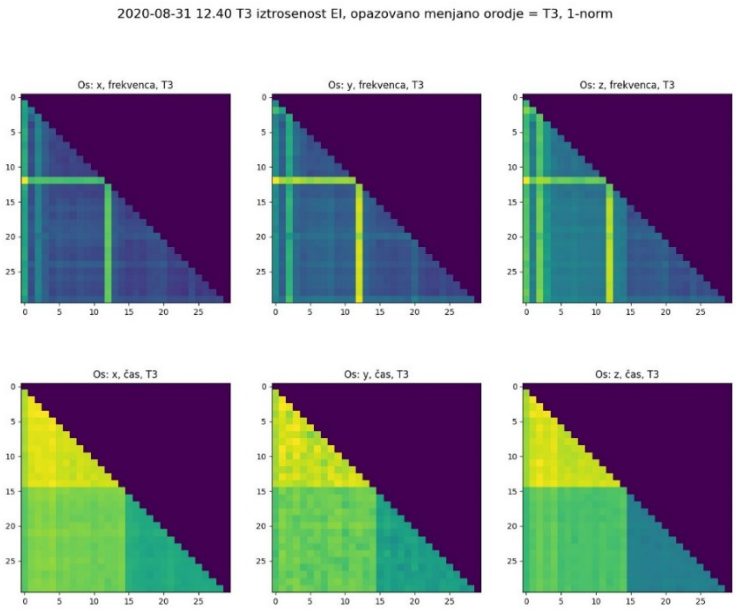
Če analiziramo le prvih in zadnjih 15 obdelav ob vsaki menjavi, pričakujemo, da so si prvi posnetki med seboj bolj podobni, zadnji pa manj. V tem primeru lahko pričakujemo, da so matrike razdalj podobne matriki na Sliki 5.17.



Slika 5.17: Matrika razdalj [41].

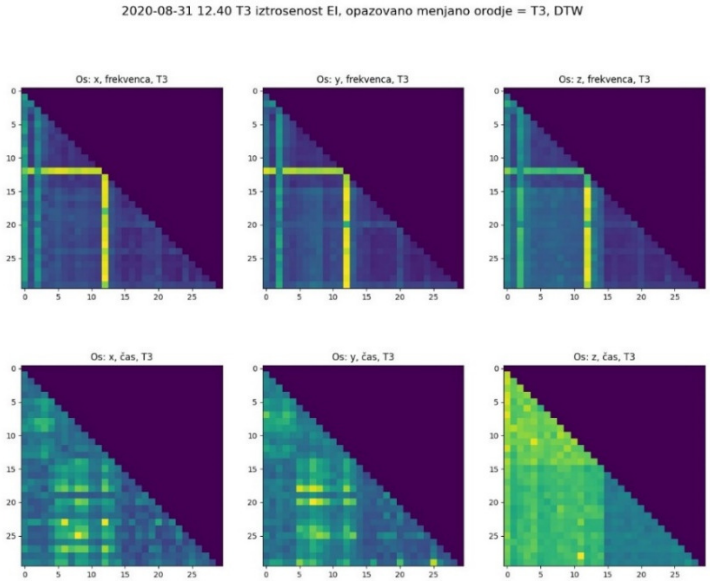
Pričakovan izid, kjer je spodnji levi blok najsvetlejši, sledi mu spodnji desni in najtemnejši (najmanjše razlike) pri zgornjem levem bloku. Pri tem bi si želeli večji kontrast med spodnjim levim blokom in ostalo matriko (glej Sliko 5.18). Žal pa je večina slik precej

drugačnih in včasih celo nerazumljivih, zato smo raziskali več različnih razdalj, s katerimi smo določi vrednost vsake točke v matriki razdalj.



Slika 5.18: Matrike razdalj za prvo vektorsko normo [41].

Ogledali smo si rezultate za DTW razdaljo, prvo in drugo vektorsko normo, povprečno razliko, standardno deviacijo razlike in mediano razlike (glej Sliko 5.19). Slike so si do neke mere podobne, najbližje želenemu rezultatu pa so za DTW razdaljo in prvo normo (povprečna absolutna razlika).



Slika 5.19: Matrike razdalj za DTW razdaljo [41].

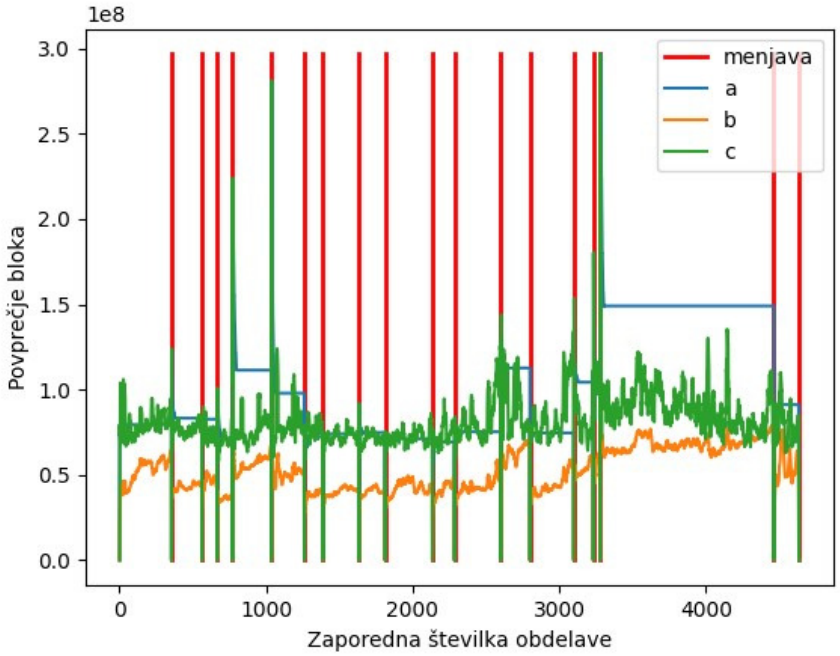
Zaznali pa smo težavo, da so se menjave orodij izvajale preveč po občutku operaterja in je bilo težko definirati, kdaj je bil pravi čas za menjavo samo na podlagi posnetkov. Druga težava je bila, da vsako orodje povzroča nekoliko drugačne vibracije in zato ni mogoče

vnaprej določiti splošne meje za menjavo, ampak je to mejo treba postaviti glede na prve obdelave z opazovanim orodjem.

V ta namen najprej izračunamo 30 x 30 matriko razdalj za vsako obdelavo. Pri tem je prvi 15 x 15 blok (A) primerjava prvih 15 obdelav po zadnji menjavi orodja, zadnji blok (C) je primerjava zadnjih 15 obdelav, obdiagonalni blok (B) pa je primerjava prvih in zadnjih obdelav. Nadalje za vsak blok izračunamo povprečje, pri čemer upoštevamo le elemente pod diagonalo matrike razdalj:

$$\begin{bmatrix} A & 0 \\ B & C \end{bmatrix} \xrightarrow{Povprečje} \begin{bmatrix} a & 0 \\ b & c \end{bmatrix} \tag{5.1}$$

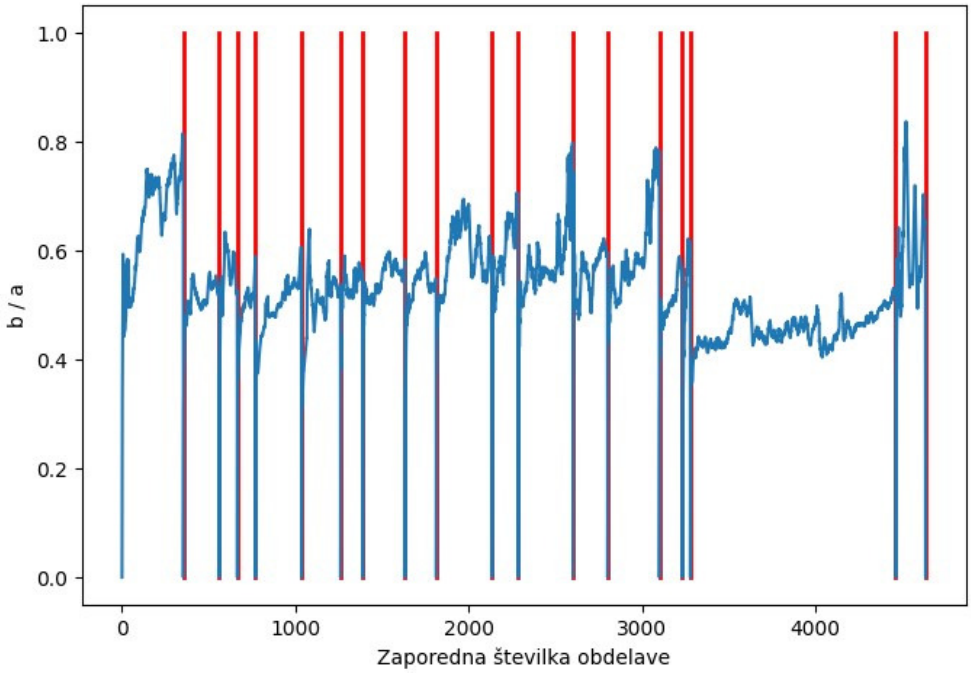
Na Sliki 5.20 si lahko ogledamo gibanje teh povprečij tekom obdelav. Modra črta je povprečje prvega bloka (a), zelena povprečje zadnjega bloka (c) in oranžna črta povprečje obdiagonalnega bloka (b). Navpične črte predstavljajo menjave orodja. Opazimo postopno naraščanje ″b″ med posameznimi menjavami, kar je pričakovano. Ostale vrednosti nimajo druge posebne koristi razen ″a″, ki smo ga uporabili za izračun relativne spremembe.



Slika 5.20: Gibanje povprečij tekom obdelav [41].

Iz teh vrednosti smo želeli izračunati vrednost, ki bi nam pomagala pri odločanju glede menjav orodja. Če pogledamo parameter ″b/a″ na Sliki 5.21, lahko opazimo, da vrednost običajno narašča od menjave do menjave. Cilj je, da bi se naučili odločati s pomočjo umetne inteligence, kjer bi nevronska mreža sama izračunala neko vrednost na podlagi 30 x 30 matrike razdalj, predhodnih izhodov nevronske mreže za prejšnje obdelave in števila obdelav od menjave.

Nakazuje se, da bi s tem pristopom lahko dobro ocenjevali obrabljenost orodja. Želeli pa smo najti prostor in razdaljo za izračun bolj očitne matrike razdalj, kjer bi bil levi spodnji blok opazno svetlejši.



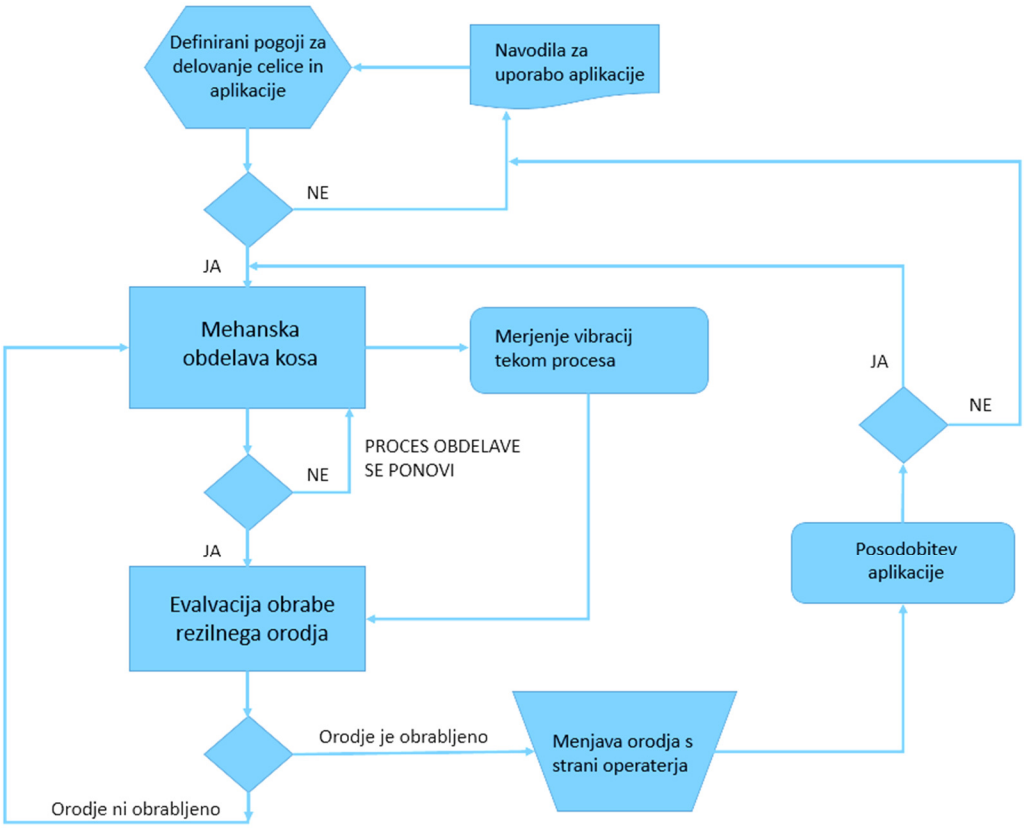
Slika 5.21: Gibanje razmerja ″b/a″, kjer je opazen trend naraščanja med menjavami [41].

Poglavje 6

Razvoj sistema (tehnika in aplikacija)

6.1 Razvoj programske opreme za zajem in obdelavo podatkov

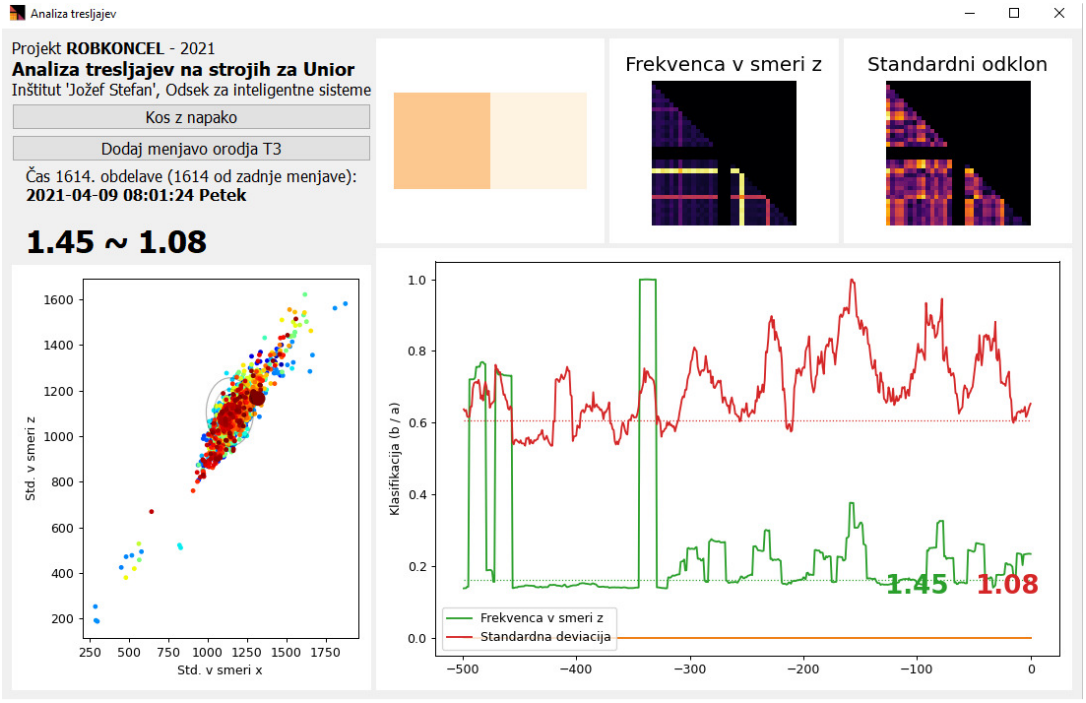
Proces in analiza kontrole sistema za nadzor obrabe rezilnega orodja na obdelovalnem stroju poteka po zaporednih operacijah, ki so med seboj soodvisne in predstavljajo pogoje za izvedbo naslednje operacije v zaporedju. Na tokovnem prikazu (Slika 6.1) imamo prikazano smiselno zaporedje delovnih operacij in posledičnega ukrepanja ob izvedbi ali neizvedbi potrebnih pogojev. Le-ta ponazarja robusten proces upravljanja z mehansko obdelavo, ki vključuje nadzor obrabe, preprečevanje napak in stalno izboljševanje operativne učinkovitosti.



Slika 6.1: Tokovni diagram poteka sistema [lastni].

6.1.1 Uporabniški vmesnik

Aplikacija in uporabniški vmesnik, ki je osnova za pregled podatkov in podajanja povratne informacije operaterju, se je tekom izvajanja meritev in testiranj izpopolnjevala oziroma nadgrajevala. Prvotna verzija aplikacije je prikazovala pregled odstopanja standardne deviacije kosov v dveh oseh, ki je omogočala nadzor in pregled odstopanja zaporednih kosov s strani odgovorne osebe, ki je proces nadzorovala (glej Sliko 6.2).



Slika 6.2: Pregled prvotnega uporabniškega vmesnika za nadzor procesnih parametrov [41].

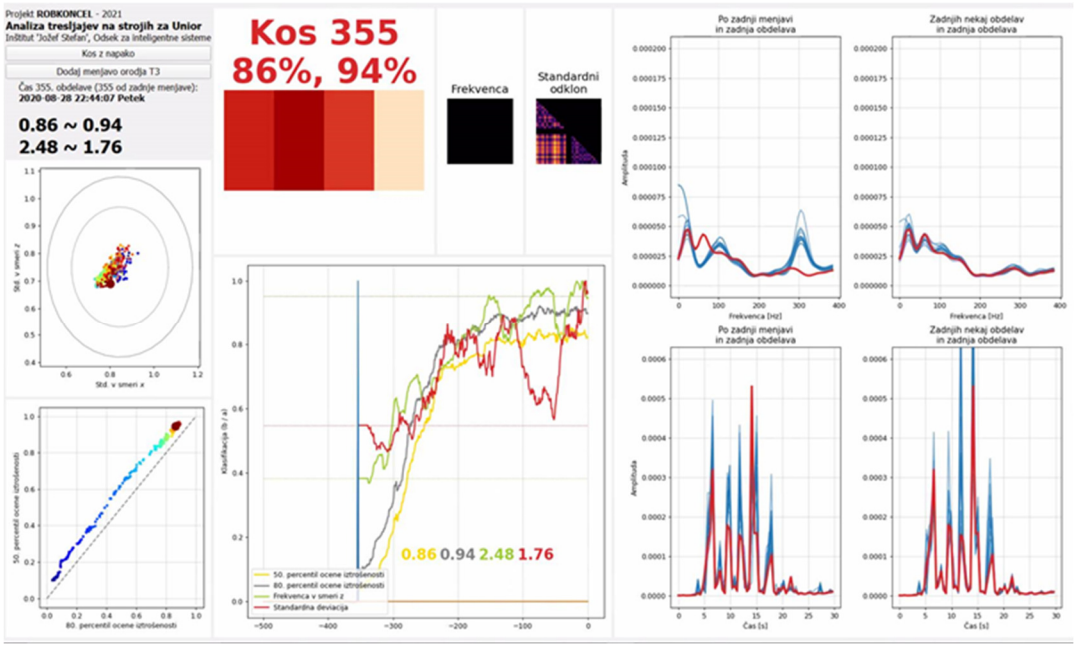
Prikazan uporabniški vmesnik je bil za namene testiranja zadovoljiv. V nadaljevanju so se za namene večje aplikativnosti uporabe uporabniškega vmesnika dodali ključni grafi in vizualni signali za možnost interpretacije povratnega signala aplikacije.

6.1.2 Vizualizacija podatkov

Uporabniški vmesnik je namenjen uporabi operaterju, ki nadzira proces in je zato prilagojen z namenom enostavne in uporabniku prijazne uporabe. Zaslonska slika uporabniškega vmesnika je prikazana na Sliki 6.3. Program operaterju omogoča izvajanje sprotne analize v proizvodnem procesu ″način snemanje″, ki poda dejansko stanje stopnje obrabe rezilnega orodja ali način ″analiziraj podatke″, ki nam poda analizo predhodno pridobljenih podatkov. Na primer pregled stopnje obrabe rezilnega orodja v delovni izmeni, ali če se orodje v predhodni delovni izmeni ni zamenjalo itd.

Ob zagonu programa se nam pokaže okno, kjer izberemo način in barvno temo. V primeru, da želimo sprotno analizo v proizvodnji, izberemo način **Snemanje**, če pa želimo analizirati stare podatke, ki so shranjeni v mapi Posnetki, izberemo način **Analiziraj podatke**. V slednjem načinu se med obdelavami premikamo z vrtenjem kolesca na miški ali s tipkama J (50 obdelav nazaj) ali K (50 naprej). Program vključuje mnogo prikazov, ki so potrebni za napredno razumevanje dogajanja.

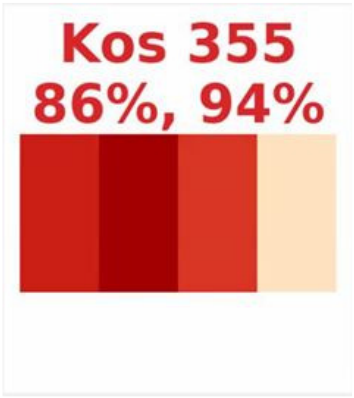
V okviru razvitega sistema uporabniški vmesnik omogoča vizualizacijo ključnih kazalnikov obrabljenosti orodja (glej Sliko 6.3). Med drugim so v programu prikazane Fourierjeve transformacije za prvih in zadnjih 15 obdelav, časovni graf gibanja vrednosti klasifikacij ter ocene iztrošenosti skozi zaporedne obdelave. Poleg grafične predstavitve so izpisane tudi numerične vrednosti izračunanih kazalnikov. V primeru, da katera izmed napovedi modelov strojnega učenja preseže vnaprej določene pragove (npr. 50. percentil ocen preseže 80 % ali 80. percentil preseže 85 %) oziroma če število obdelanih kosov z istim orodjem preseže 200 kosov, sistem samodejno sproži opozorilo. To se operaterju prikaže v obliki vizualnega sporočila na zaslonu, ki ga spremlja zvočni signal. Operater ima nato možnost ustreznega ukrepanja, bodisi zamenjave rezilnega orodja bodisi povečanega nadzora nad nadaljnjim potekom obdelave. V primeru fizične zamenjave rezilnega orodja to potrdi s pritiskom na gumb za registracijo menjave v vmesniku.



Slika 6.3: Zaslonska slika uporabniškega vmesnika [41].

Zgoraj levo vidimo rdeče opozorilo za menjavo orodja T3. V primeru opozorila in ob upoštevanju ostalih grafov v čim boljšem trenutku menjamo orodje T3. Ta program se navezuje le na obrabljenost orodja T3. Levo zgoraj sta dva gumba, ki nam omogočata beleženje menjave orodja T3 ali beleženje slabega kosa. S pritiskom na enega izmed obeh gumbov se sprememba vidi ob koncu naslednje obdelave na vsaj enem grafu.

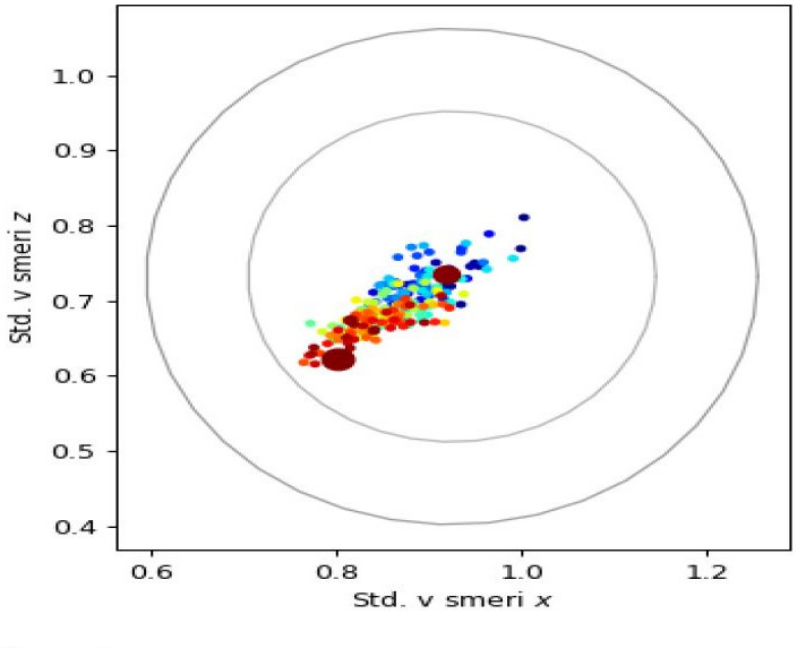
Za namene večje preglednosti in smotrnosti uporabe se je v sklopu izvedene aplikacije pripravil dodatni vizualni signal, katerega izsek je prikazan na Sliki 6.4. Vizualni signal je pomemben predvsem zaradi enostavnejšega in enovitega razbira potrebe po menjavi rezilnega orodja. Izsek nam prikaže procentualno stopnjo obrabe rezilnega orodja med spodnjo optimistično mejo (Slika 6.4; 86 %) ter zgornjo pesimistično mejo (Slika 6.4; 94 %). Osnovni pogoj za številski prikaz je izpolnitev enega izmed pogojev, in sicer za **optimistični** prikaz, ki nam poda podatek o zaporednem kosu, ko vrednost podatka preseže 80 % predvidene obrabe s strani programa ter **pesimistični** prikaz, ki nam poda podatek o zaporednem kosu, ko vrednost podatka preseže 85 % predvidene obrabe s strani programa.



Slika 6.4: Barvna vrstica za prikaz potrebe menjave rezilnega orodja [41].

6.1.3 Definiranje stopnje obrabljenosti – grafi

Pri ugotavljanju obrabljenosti rezilnega orodja je ključni del prav tako graf na uporabniškem vmesniku, ki grafično nakazuje obrabljenost oziroma večjo spremembo na rezilnem robu orodja. Na Sliki 6.5 imamo prikazan graf preračuna standardne deviacije, ki operaterju pri uporabi nakazuje odklon od standardnih vrednosti vibracij pri obdelavi. Na grafu s standardnimi deviacijami opazujemo čas večjih skokov izven običajnega območja. Pri tem je pomembna tudi pogostost točk izven običajnega območja. Če so zadnje obdelave (rdeče pike) pogosteje daleč od modrih, to kaže na večjo spremembo na rezilnem orodju. Če so ti skoki izven krožnice redki, gre najverjetneje le povečano geometrijsko spremembo ali mehanske lastnosti obdelovanca.

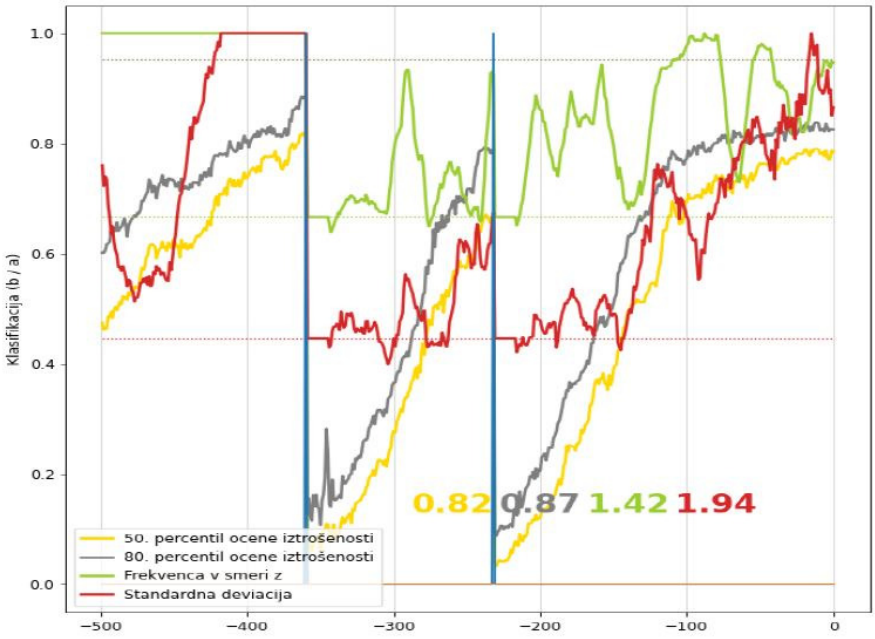


Slika 6.5: Graf standardnih deviacij iz uporabniškega vmesnika [41].

Operater oziroma uporabnik ukrepa ob pogostem prikazu rdečih točk (z rdečimi točkami nakazujemo nove meritve, z modrimi meritve iz prvotnih obdelav) izven standardnega

območja notranjega kroga grafa. Pogostost točk izven notranjega kroga nakazuje povečano stopnjo obrabe, s čimer operater pridobi povratno informacijo o menjavi rezilnega orodja.

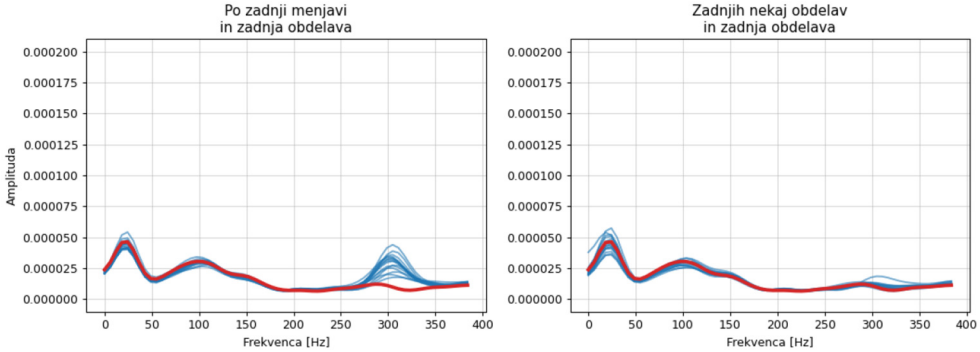
Operaterju je na voljo tudi graf iztrošenosti – prikazan na Sliki 6.6, ki nakazuje oceno iztrošenosti rezilnega orodja glede na predviden čas, preden pride do končne obrabe rezilnega roba (pred lomom rezilnega roba).

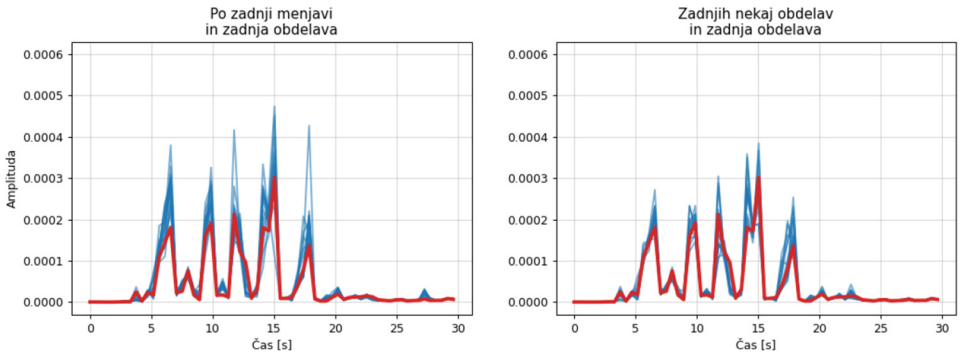


Slika 6.6: Graf ocene iztrošenosti [41].

Kadar želimo program naučiti boljšega ocenjevanja obrabljenosti, opazujemo rdečo in zeleno krivuljo. Pri tem dejanska vrednost ni pomembna, ampak opazujemo relativne spremembe. Opazujemo postopno naraščanje in večje skoke. Kadar pa je strojno učenje primerno naučeno, si lahko pri ocenjevanju iztrošenosti rezilnega orodja pomagamo tudi z rumeno in sivo krivuljo. Ta krivulja ocenjuje čas, ko smo običajno zamenjali rezilno orodje. Iz grafa dobimo oceno z določeno mero pogreška, kdaj lahko pričakuje izrabo rezilnega orodja in s tem dobimo povratni signal o potrebni zamenjavi orodja. S tem zagotovimo, da ne pride do morebitnega zloma oziroma poškodbe sestavnih delov procesa obdelave.

Poleg omenjenih grafov so pomembni tudi grafi, razvidni na desni strani uporabniškega vmesnika, kjer vedno vidimo zadnjo obdelavo z rdečo in 15 menjav pred njo ali takoj po menjavi rezilnega orodja (glej Sliko 6.7).





Slika 6.7: Spremembe amplitud pri frekvencah [41].

Uporabljen uporabniški vmesnik predstavlja uporabniku prijazno uporabo, s čimer je razbiranje trenutka potrebe po menjavi enostavno in enolično določeno z vizualnim signalom v zgornjem levem kotu programa. Enostavna uporaba je ključni del, kajti le tako lahko zagotovimo ustrezno in dejansko smotrno uporabo aplikacije na delovnem stroju oz. na obdelovalni celici.

Uporaba aplikacije in merjenje vibracij predstavlja dodano vrednost v sklopu proizvodnega procesa tako z vidika kontrole, kjer pravočasno identificiramo obrabljenost rezilne ploščice ter posledično preprečimo neustrezno kakovost posameznih karakteristik, kot tudi s stroškovnega vidika, s čimer lahko identificiramo (z določeno negotovostjo) trenutek, zloma orodja, kar lahko privede do dodatnih poškodb stroja oziroma drugega inventarja v procesu, kar je nezaželeno.

6.1.4 Zaznava in analiza obdelav

Program na vsaki dve sekundi, v primeru, da je od zadnje obdelave minila že vsaj ena dolžina obdelovalnega cikla, podatke o tresljajih v zadnji minuti z uporabo korelacije izračuna vrednost in mesto najvišje korelacije z referenčnim posnetkom v smeri osi X. Če je največja korelacija večja od 350 enot, posnetek poravnamo z referenco in iz njega v vseh treh smereh izrežemo del, kjer je v uporabi izbrani tip rezilnega orodja (v našem primeru za orodje T3 v obdelovalnem ciklu).

Za zaznano obdelavo z določenim rezilnim orodjem izračunamo še nekaj lastnosti obdelave, ki jih bomo uporabljali za ocenjevanje iztrošenosti ter izrisovanje v uporabniški vmesnik. Te lastnosti obdelave so *spektrogram frekvenc* do 400 Hz tekom obdelave z izbranim rezilnim orodjem z resolucijo 8 v časovni smeri in 32 v frekvenčni smeri, *Fourierjeva transformacija* do 400 Hz z resolucijo 64, *standardna deviacija* v vsaki izmed treh smeri, *evklidski matriki razdalj* za prvih 15 obdelav po zadnji menjavi in zadnjih 15 obdelav vključno z opazovano glede na vektor.

Program podatke sproti shranjuje in se na vseh shranjenih podatkih vsako nedeljo, ko proizvodnja stoji, uči novih, natančnejših modelov. Učenje traja nekaj deset minut pri 6.000 obdelavah. S časom je program vedno bolje predvideval, kdaj bi operater moral zamenjati orodje, vendar je operater na začetku potreboval dodatna opozorila in stopnje raznolikosti. Ko je program dosegel zadostno natančnost, se je posodabljanje modelov ustavilo, da operater ni mogel več naučiti programa napačnih vzorcev. Učenje je potekalo v obdobju od 28. avgusta 2020 do 18. decembra 2020, v tem času pa je bilo obdelanih 41.906 kosov.

Poglavje 7

Eksperimenti in evalvacija

7.1 Metrike evalvacije modela

7.1.1 Natančnost napovedi in zanesljivost sistema

Upoštevajoč kompleksnost spremljanja obrabe in zahteve industrijskih aplikacij smo uporabili večstranski pristop, ki združuje podatke na podlagi senzorjev s tradicionalnimi tehnikami pregleda orodja. Namen tega je bil zagotoviti obsežno potrditev zmogljivosti sistema in kvantificirati njegovo zanesljivost pri napovedovanju obrabe orodja.

Podrobni podatki o lokaciji in konfiguraciji triosnega pospeškomera, uporabljenega za zbiranje podatkov o vibracijah, so bili dokumentirani. Specifikacije senzorja (npr. občutljivost, frekvenčni odziv, območje merjenja) so bile upoštevane za zajemanje natančnih in reprezentativnih podatkov o vibracijah. Lokacija senzorja je bila določena na ohišju ležaja glavnega vretena stroja, tako da se je zagotovilo zajemanje relevantnih vibracij, ki so bile povezane z mehanizmi obrabe orodja, medtem ko se je s tem minimaliziral vpliv zunanjih virov hrupa.

Določeni so bili natančni protokoli zajemanja podatkov, da se zagotovi doslednost in standardizacija v vseh poskusih. Surovi podatki o vibracijah so bili shranjeni v strukturirani obliki za nadaljnjo obdelavo in analizo. Po zbiranju so bili surovi vibracijski podatki podvrženi korakom predobdelave za izboljšanje kakovosti podatkov in izboljšanje razmerja med signalom in šumom. Izvedeni so bili vizualni pregledi, da se oceni stanje rezilnega orodja v različnih intervalih med strojnim obdelovanjem. Te preglede so izvedli usposobljeni operaterji, za določene primere tudi z uporabo mikroskopov za posnetke visoke ločljivosti rezilnega roba. Podatki na podlagi senzorjev so bili poravnani in sinhronizirani s podatki, zabeleženimi v fazi menjave in pregledov rezilnega orodja. Ta poravnava je bila ključnega pomena za usposabljanje modelov strojnega učenja za učenje odnosov med podatki o vibracijah in napredovanjem obrabe orodja.

Izvedene so bile vizualne primerjave med napovedmi obrabe sistema in dejanskim stanjem rezilnih robov orodja, ki je bil ugotovljen med vizualnimi pregledi. Te preiskave so razkrile visoko raven korelacije med napovedmi in opazovano obrabo, kar je potrdilo zanesljivost sistema pri zajemanju različnih faz obrabe. Izvedena je bila tudi podrobna analiza stroškov, da se kvantificirajo gospodarske koristi, ki so posledica uvedbe sistema. Te analize so vključevale pregled stroškov orodja, stroškov izpada, stroškov dela in učinkov obrabe orodja na kakovost izdelka. Rezultati so pokazali, da je uvedba sistema privedla od 20–30 % zmanjšanje stroškov orodja zaradi optimizirane življenjske dobe orodja.

Poleg natančnosti napovedi je zanesljivost ključna lastnost sistema za napovedovanje življenjske dobe orodja. Zanesljiv sistem daje dosledne in zaupanja vredne napovedi v različnih pogojih obdelave, kar operaterjem omogoča, da se nanje zanesejo pri načrtovanju

proizvodnje in vzdrževanja. Sistem deluje dobro tudi, ko se razmere nekoliko spremenijo. Je dovolj robusten, da se osredotoči na prave vibracije, ki so povezane z obrabo orodja, in ignorira vse ostalo. To smo dosegli s posebnimi filtri in algoritmi, ki so odporni na šum.

Hitrost stroja se lahko spreminja. Tudi temperatura v proizvodnih prostorih ni vedno enaka. Sistem prepozna znane vzorce v podatkih, tudi če so nekoliko drugačni kot prej. Zagotovi enake napovedi. Prav tako razumljivo in predvidljivo reagira na informacije, ki jih prejema. Ko se orodje troši, postopoma in enakomerno spreminja svojo napoved, se uči iz podatkov vsakega orodja in se s tem izboljšuje.

7.2 Primerjava z obstoječimi metodami

7.2.1 Primerjava na podlagi uporabljenih tehnik

Vizualni pregled zahteva prekinitev proizvodnega procesa, subjektivno oceno operaterja in je nepraktičen za avtomatizacijo. Direktne metode, kot je merjenje z merilnimi instrumenti, so natančne, a zahtevajo prekinitev proizvodnje in odstranitev orodja, kar omejuje njihovo uporabnost v dinamičnih proizvodnih okoljih. Realno spremljanje obrabe s temi metodami je težko izvedljivo, saj se pogosto srečujemo z izzivi, ki nastanejo ob prekinjanju proizvodnje. Posredne metode, ki vključujejo merjenje sil, vibracij, temperature in zvoka, nudijo alternativo s kontinuiranim spremljanjem stanja orodij. Kljub temu so te metode manj natančne, kar lahko vpliva na zanesljivost rezultatov.

7.2.2 Primerjava na podlagi integracije s strojnim učenjem

Tradicionalne metode pogosto temeljijo na ročnem zbiranju podatkov ali preprostih vnaprej definiranih vrednostih ter ne izkoriščajo strojnega učenja za avtomatizacijo in optimizacijo. Sistem, integriran s strojnim učenjem, omogoča prilagajanje različnim vzorcem obrabe in napovedovanje preostale življenjske dobe rezilnega orodja, kar bistveno izboljšuje natančnost in učinkovitost procesov. Ta pristop ponuja pomembne prednosti pred parcialnimi metodami, omenjenimi v doktorski disertaciji, ki ne upoštevajo kompleksnosti in dinamičnosti sodobnih operacijskih procesov.

7.2.3 Primerjava na podlagi celostnega pristopa

Delni sistemi se osredotočajo na omejen nabor dejavnikov, kot so samo vibracije ali vizualni pregled in ne upoštevajo kompleksnosti procesa obrabe. Celostni sistem združuje napredni senzor, strojno učenje in podatkovno analitiko za celovito spremljanje obrabe rezilnega orodja. Ta sistem upošteva raznolikost materialov, orodij, parametrov obdelave in kompleksnost procesa obrabe, kar vodi do natančnejših napovedi. S tem pristopom se izboljšuje tudi zanesljivost in učinkovitost procesov v obdelavi, saj integracija različnih tehnologij omogoča boljše razumevanje dinamičnih interakcij med dejavniki, ki vplivajo na obrabo orodij. Tovrstna celostna rešitev predstavlja pomemben korak naprej v optimizaciji in inovacijah na področju obdelave in lahko bistveno pripomore k izboljšanju produktivnosti ter zmanjšanju stroškov proizvodnje.

7.2.4 Primerjava na podlagi prilagodljivosti in prenosljivosti

Številni obstoječi sistemi za specifične naloge so zasnovani tako, da jih je mogoče prenesti na druge stroje ali procese, kar zagotavlja njihovo večjo aplikativnost in uporabnost v različnih industrijskih scenarijih. Poudariti je treba, da je naš sistem zasnovan kot

prilagodljiv in prenosljiv, kar omogoča njegovo široko uporabo v različnih domenah in procesih. Algoritmi strojnega učenja, ki so jedro našega sistema, so zasnovani tako, da se lahko prilagajajo novim podatkom, kar omogoča enostavno širitev sistema v različna delovna okolja.

Generalno se disertacija od drugih pristopov loči s tem, kako prispevajo k robustnemu in celovitemu sistemu za napovedovanje obrabe orodja. Te razlike izhajajo iz same izbire tehnik, integracije teh tehnik ter poudarka na praktičnosti. Raziskava izkorišča uporabo triosnega pospeškomera za zajemanje podatkov o vibracijah v vseh treh ortogonalnih smereh, kar nam omogoča bolje razumeti dinamično obnašanje orodja med obdelavo. Poleg tradicionalnih metod filtriranja šuma disertacija uporablja korelacijo z referenčnim okvirom za izboljšano obravnavo podatkov o vibracijah med različnimi cikli obdelave. Pomembno vlogo imajo tudi izbrani algoritmi strojnega učenja, ki igrajo ključno vlogo pri izboljšanju natančnosti modela. Mnogo obstoječih pristopov uporablja statične modele strojnega učenja, medtem ko se ta disertacija osredotoča na razvoj dinamičnega sistema, ki se avtomatično prilagaja spremembam v proizvodnem procesu. Sistem je zasnovan tako, da je stroškovno ugoden in ne preveč kompleksen, hkrati pa ga je možno integrirati k že obstoječim tehnologijam.

Glavna razlika je v tem, da disertacija ponuja celovit, dinamičen in stroškovno učinkovit sistem, ki je posebej prilagojen za praktično uporabo v realnem industrijskem okolju, medtem ko se tradicionalni pristopi pogosto osredotočajo na posamezne tehnične vidike in so manj prilagojeni za sprotno napovedovanje ter ne vzamejo dinamiko obdelave v realnem času v okolju proizvodnje.

7.3 Analiza stroškovne učinkovitosti

Pri analizi stroškovne učinkovitosti sistema za nadzor obrabe rezilnih orodij je ključno upoštevati tako stroške implementacije kot tudi dolgoročne koristi. Nepričakovane odpovedi rezilnih orodij lahko povzročijo ustavitve obdelovalnega stroja in zamude v proizvodnji, zato bi avtomatski sistem napovedovanja zmanjšal te izpade, kar vodi do boljše produktivnosti. Natančnejši podatki o obrabi omogočajo popolnejšo uporabo orodja in preprečujejo prezgodnjo zamenjavo, kar je ključno za optimizacijo proizvodnih procesov. Pravočasna menjava neustreznega orodja lahko bistveno izboljša kakovost obdelanih kosov, kar zmanjšuje število izmeta. Sistem operaterju omogoča lažjo odločitev o menjavi orodja, kar zmanjšuje možnost napak in povečuje zanesljivost delovnega procesa. Prav tako lahko vodi do večje produktivnosti, s čimer se zaposleni posvetijo bistvenim nalogam, kar lahko tudi vpliva na splošno počutje in zadovoljstvo na delovnem mestu.

Elementi v analizi stroškovne učinkovitosti vključujejo naložbo v opremo, ki zajema stroške nakupa in namestitve potrebnega senzorja, sistema za zajem podatkov, računalniške opreme ter druge strojne opreme, stroške programske opreme, ki vključuje stroške razvoja ali nakupa programske opreme za nadzor in obdelavo podatkov, stroške integracije, ki pokrivajo stroške vključitve sistema v trenutne proizvodne procese, stroške usposabljanja, ki obsegajo stroške usposabljanja zaposlenih za učinkovito delo s sistemom, in stroške vzdrževanja, ki vključujejo stroške rednega vzdrževanja, posodabljanja sistema ter zamenjave opreme. Ključno je, da se stroški analizirajo celovito, saj lahko le tako zagotovimo točno sliko investicije in njene donosnosti. V Tabeli 7.1 so prikazani bazni podatki.

Tabela 7.1: Oprema, potrebna za delovanje sistema za nadzor obrabe rezilnega orodja [lastni].

Postavka	Količina	Cena [EUR]	Vrednost [EUR]
SIRIUSm-3xACC-1xACC+	1	5.855	5.855,00
Sensor Dytran – 3623A4T-10	1	2.089	2.089,00
Magnet Dytran – 6196	1	106	106,00
PC INTEL NUC NUC7i5BNK i5-7260U/500GB	1	390	390,00
15” monitor, miška, tipkovnica	1	280	280,00
Stroški usposabljanja	3	50	150,00
Aplikacija	1	2.300	2.300,00
Inštalacija in zagon	1	1200	1.200,00
SKUPAJ:			**12.370,00 EUR**

Analiza donosnosti naložbe je ključen dejavnik, ki omogoča razumevanje ekonomskih koristi, ki jih takšne investicije prinašajo. Za izračun analize donosnosti smo spremljali porabo rezilnega orodja v obdobju od 28. avgusta 2020 do 18. decembra 2020, tj. pred izdelano testno aplikacijo. Podatki so podrobneje razdelani v Tabeli 7.2.

Tabela 7.2: Zaključeni delovni nalogi s stroškom rezilnega orodja v fazi zbiranja in beleženja menjav [lastni].

DELOVNI NALOG	Datum zaključka DN	Št. kosov	STROŠEK REZ. materiala na kos [EUR]
IZDELEK : 630066/67 (Vilica 27059/60)			
1909xxx	31.12.2020	7.718	0,436
1847xxx	31.10.2020	11.761	0,056
1899xxx	31.10.2020	6.344	0,195
1892xxx	31.10.2020	6.280	0,100
1889xxx	11.10.2020	1.443	0,087
1847xxx	28.09.2020	8.360	0,116
	SKUPAJ	**41.906**	**0,165**

Iz Tabele 7.2 lahko razberemo, da smo v tem času izdelali cca. 41.906 kosov. Povprečni strošek rezilnega orodja pa je znašal **0,165 EUR/kos**. Iz preglednice je tudi razvidno, da se stroški na delovne naloge niso zaključevali enakovredno, kar izstopa predvsem z zadnjima dvema delovnima nalogama, kjer je strošek rezilnega orodja neuravnotežen.

Po izdelani testni aplikaciji, ki smo jo integrirali k stružnici, smo rezilno orodje zamenjali glede na smernice, ki jih je podajala aplikacija. V tem obdobju smo izdelali cca. 18.119 kos, katerih povprečni strošek je znašal **0,126 EUR/kos.** Detajlni podatki so zajeti v Tabeli 7.3.

Tabela 7.3: Zaključeni delovni nalogi s stroškom rezilnega orodja – po testni uporabi aplikacije [lastni].

DELOVNI NALOG	Datum zaključka DN	Št. kosov	STROŠEK REZ. materiala na kos [EUR]
IZDELEK : 630066/67 (Vilica 27059/60)			
2125xxx	20.07.2021	3.061	0,018
2047xxx	16.07.2021	1.984	0,282
2046xxx	30.04.2021	1.293	0,252
2008xxx	19.04.2021	3.908	0,107
2011xxx	15.04.2021	2.374	0,055
1997xxx	15.04.2021	2.374	0,114
1997xxx	02.03.2021	3.125	0,055
		18.119	**0,126**

Če obe tabeli primerjamo med sabo, lahko razberemo, da je strošek porabe rezilnega orodja za cca. **24% nižji**, kot pred uporabo aplikacije za nadzor obrabe rezilnega orodja. To pomeni, da bi za isto število izdelanih kosov prihranili cca. 707 EUR.

Da bi ugotovili, ali je investicija v tovrstno opremo in aplikacijo smiselna, je ključno oceniti donosnost naložbe (ROI) in čas, potreben za povračilo te investicije. V našem primeru smo predpostavili naslednje izhodiščne podatke:

Investicija v opremo	12.370 EUR
Strošek rezilnega orodja pred testno uporabo aplikacije	0,165 EUR/kos
Strošek rezilnega orodja po testni uporabi aplikacije	0,126 EUR/kos
Letna proizvodnja	168.000 kosov

Na podlagi teh podatkov smo najprej izračunali letni strošek rezilnega orodja pred in po uvedbi nove aplikacije.
Letni strošek rezilnega orodja pred testno uporabo aplikacije:

$$168.000 \text{ kosov} \cdot 0{,}165 \text{ EUR/kos} = 27.720 \text{ EUR} \tag{7.1}$$

Ta izračun nam pokaže, koliko bi nas stalo rezilno orodje, če ne bi uvedli nove aplikacije.

Letni strošek rezilnega orodja po testni uporabi aplikacije:

$$168.000 \text{ kosov} \cdot 0{,}126 \text{ EUR/kos} = 21.168 \text{ EUR} \tag{7.2}$$

Ta izračun nam pokaže, koliko nas dejansko stane rezilno orodje po uvedbi nove aplikacije, ki naj bi optimizirala porabo.

Letni prihranek:

$$27.720 \text{ EUR} - 21.168 \text{ EUR} = \mathbf{6.552\ EUR} \tag{7.3}$$

Ta izračun nam pove, koliko denarja prihranimo na letni ravni zaradi manjše porabe rezilnega orodja.

Izračun donosnosti naložbe (ROI):

$$\begin{aligned} &\text{ROI} = (6.552\ \text{EUR} - 12.370\ \text{EUR}) \,/\, 12.370\ \text{EUR} \\ &\text{ROI} = -5.818\ \text{EUR} \,/\, 12.370\ \text{EUR} \\ &\text{ROI} = -0{,}470 \text{ ali } -47{,}0\% \text{ (po prvem letu še vedno negativen)} \end{aligned} \tag{7.4}$$

Rezultat nam pove, da je ROI po prvem letu še vedno negativen (-47,0%). To pomeni, da investicija v tem letu še ni prinesla dobička in da je še vedno "v minusu". Da bi ugotovili, kdaj se bo investicija povrnila, uporabimo naslednjo formulo:

Izračun časa za povračilo investicije:

$$\begin{aligned} &\text{Čas za povračilo investicije} = 12.370\ \text{EUR} \,/\, 6.552\ \text{EUR} \\ &\text{Čas za povračilo investicije} = \text{približno } \mathbf{1{,}89\ leta} \end{aligned} \tag{7.5}$$

Ta izračun nam pove, da traja približno 1,89 leta, da se investicija povrne, če bomo ohranili enako stopnjo letnega prihranka. Seveda je pri tem treba upoštevati, da so to predvidevanja, ki temeljijo na predpostavki konstantne letne proizvodnje in stroškov rezilnega orodja. Potencial je večji, če aplikacijo nadgradimo na celoten asortima uporabljenih rezilnih orodij, uspeh pa odvisen predvsem od razumevanja tveganj, povezanih z uvedbo takšnega sistema.

Poglavje 8

Zaključek

8.1 Povzetek ugotovitev

Doktorska disertacija se osredotoča na ključne vidike in prispevke na področju napovedovanja življenjske dobe rezilnih orodij, kar je ključnega pomena za avtomobilsko industrijo, kjer se nenehno povečujejo zahteve po visoki kakovosti in učinkovitosti. V uvodnem delu disertacije se je poudaril pomen te problematike ter njenega vpliva na proizvodne procese. Temu je sledila podrobna analiza obstoječih metod napovedovanja obrabe orodij, pri čemer so se ti pristopi povezali z raznolikostjo vplivnih dejavnikov. V teoretičnem delu so se obravnavale standardne metode napovedovanja obrabe orodij, temeljni koncepti vibracij in osnove strojnega učenja, ki so nujne za razumevanje kompleksnosti tega področja. Glavni cilj disertacije je bil razvoj celovitega sistema za napovedovanje življenjske dobe orodij na podlagi naprednih tehnik senzorjev in strojnega učenja ob uporabi analitike v realnem proizvodnem okolju. Za dosego tega cilja je bilo zastavljenih več nalog, med katerimi so podrobnejša analiza obrabljenosti rezilnega orodja, analiza in izbira optimalnega pospeškomera, razvoj aplikacije za napovedovanje življenjske dobe ter iskanje kakovostnih in stroškovnih optimumov.

Pristop, ki se je zasnoval, se bistveno razlikuje od obstoječih metod zaradi združevanja podatkov iz triosnega pospeškomera z drugimi viri informacij, kot so parametri obdelave in informacije o materialu, kar je ključno za razumevanje kompleksnosti proizvodnih sistemov in izboljšanje njihove učinkovitosti. Poudarek je bil na razvoju sistema, ki je preprost za uporabo v realnem proizvodnem okolju, saj tak sistem ne le da povečuje produktivnost, ampak tudi zmanjšuje stroške, kar je ključnega pomena na današnjem konkurenčnem trgu.

Z izvedenimi eksperimenti in analizo smo prišli do zaključka, da uporaba triosnega pospeškomera v kombinaciji s tehnikami strojnega učenja omogoča napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja z zadovoljivo natančnostjo. Iskanje stroškovnih in kakovostnih optimumov je bilo možno, saj lahko sistem operaterjem priporoča optimalne parametre obdelave za doseganje želenih ciljev, kar dodatno potrjuje vrednost integracije teh metod v industrijskih aplikacijah. Sistem je mogoče integrirati z obstoječimi sistemi za upravljanje proizvodnje, kar omogoča avtomatizirano spremljanje stanja orodja in pravočasno ukrepanje.

Disertacija prispeva k znanosti z razvojem inovativne metodologije za napovedovanje življenjske dobe rezilnih orodij, ki presegajo omejitve obstoječih pristopov. Inovativna kombinacija tehnik omogoča natančnejše in zanesljivejše napovedi ter prilagodljivost različnim proizvodnim scenarijem.

8.2 Izpolnjeni cilji in potrditev hipotez

Razvoj celovitega sistema za napovedovanje življenjske dobe rezilnih orodij temelji na modularni in prilagodljivi arhitekturi, ki omogoča integracijo različnih komponent, kot so senzorji, obdelava signalov in strojno učenje. Sistem se opira na uporabo triosnega pospeškomera, nameščenega na vretenu stroja, za zajem relevantnih podatkov o vibracijah. Vključuje razvite algoritme strojnega učenja za analizo vibracij in napovedovanje obrabe orodja v realnem času, kar omogoča učinkovitejšo optimizacijo procesov. Izdelan je uporabniški vmesnik, ki je prilagojen operaterjem. S pomočjo aplikacije je možno videti stanje rezilnega orodja, možnost prejemanja opozoril in optimizacijo parametrov obdelave. Sistem se tudi prilagaja raznolikosti materialov, orodij in procesov obdelave. Algoritmi strojnega učenja so zasnovani tako, da se prilagajajo spreminjajočim se pogojem.

Praktičnost sistema je bila potrjena v realnem proizvodnem okolju podjetja, ki se ukvarja z mehansko obdelavo odkovkov, kar dokazuje njegovo uporabnost in učinkovitost. Poudarek je bil na razvoju uporabniku prijaznega vmesnika, ki je enostaven za uporabo s strani operaterjev, hkrati pa je bil sistem zasnovan kot cenovno ugoden in omogoča integracijo z obstoječimi proizvodnimi sistemi. Razvita metodologija prinaša nove pristope k spremljanju obrabe orodij, ki so uporabni tudi v drugih panogah in aplikacijah, ne le pri mehanski obdelavi kovin. Uporaba tehnike korelacije z referenčnimi parametri omogoča natančno spremljanje podatkov o vibracijah med različnimi pogoji, medtem ko modeli strojnega učenja, ki vključujejo princip mnogoterega znanja, znatno izboljšujejo napovedno natančnost sistema.

H1: Z uporabo triosnega pospeškomera in vibracij je možno napovedovati življenjsko dobo orodja. Analiza vibracij v treh ortogonalnih smereh je zagotovila celovit vpogled v dinamično obnašanje orodja med obdelavo. S podrobno analizo vibracij je bilo mogoče zaznati vzorce, ki kažejo na določene faze obrabe orodja. Z uporabo teh vzorcev in algoritmov strojnega učenja je bil razvit model, ki omogoča napovedovanje življenjske dobe orodja, kar podpira obstoječe raziskave na tem področju. Uspešna potrditev te hipoteze je pokazala, da je spremljanje vibracij lahko učinkovit način za spremljanje stanja rezilnega orodja.

H2: Razviti sistem omogoča dovolj točno napovedovanje življenjske dobe orodja. Sistem je dosegel visoko stopnjo natančnosti pri napovedovanju življenjske dobe rezilnega orodja, kar je potrjeno z obsežnimi eksperimenti v realnem proizvodnem okolju. Napovedi sistema so bile primerjane z dejansko življenjsko dobo orodij, pri čemer je ocenjena natančnost sistema dosegla raven, ki je zadostovala za praktično uporabo. Dosežena stopnja natančnosti omogoča zanesljivo načrtovanje proizvodnih procesov in učinkovito optimizacijo uporabe rezilnih orodij. Ta rezultat potrjuje teoretične povezave med natančnimi napovedmi in izboljšanim upravljanjem virov ter zmanjšanjem stroškov, kar dodatno potrjuje vrednost in relevantnost sistema v sodobnih procesih avtomobilske industrije.

H3: Razviti sistem omogoča doseganje stroškovnih in kakovostnih optimumov. Sistem omogoča tudi optimizacijo parametrov obdelave za dosego najboljšega kompromisa med stroški in kakovostjo, kar je pomembno za izboljšanje celotne produktivnosti v industriji. Upoštevani so bili različni dejavniki, kot so stroški orodja, čas obdelave, kakovost površine obdelovanca ter izmet, kar potrjuje kompleksnost procesa odločanja v proizvodnji. Z uporabo modelov strojnega učenja sistem lahko tudi omogoča iskanje optimalnih parametrov obdelave za dosego želenih ciljev, kot sta zmanjšanje stroškov in izboljšanje kakovosti.

8.3 Prispevki k znanosti

Disertacija zagotavlja praktično uporabo konceptov pametne proizvodnje (Industrija 4.0) z uporabo umetne inteligence za optimizacijo procesov obdelave. Gre pretežno za prispevke k aplikativni znanosti in vključuje temeljito validacijo sistema z realnimi podatki iz avtomobilske industrije. To ne le dokazuje njegovo praktično uporabnost in zanesljivost v zahtevnih industrijskih pogojih, temveč tudi potrjuje prenosljivost razvitih metodologij v dejansko proizvodnjo.

Disertacija predstavlja celovit sistem za napovedovanje življenjske dobe rezilnega orodja, ki s pomočjo naprednih algoritmov strojnega učenja in analize vibracijskih podatkov generira opozorila v aplikaciji. Ta opozorila delujejo na dveh ravneh: napovedujejo, kdaj se bliža čas za zamenjavo orodja, kar omogoča predčasno načrtovanje, in signalizirajo, kdaj je dejanski čas za zamenjavo orodja, da se prepreči nadaljnja škoda.

Z nenehnim spremljanjem vibracij, ki so posredno odraz tudi stanja stroja, sistem posredno omogoča prehod od preventivnega k napovedanemu vzdrževanju ne le rezilnih držal orodja, temveč tudi širših komponent, kot sta glavno vreteno stružnic in stanje vpenjalnih glav stružnic na splošno. S tem je omogočeno tudi zgodnje odkrivanje anomalij, ki lahko kažejo na obrabo ležajev, neuravnoteženost vretena ali druge mehanske težave, preden pride do večjih okvar.

Z zagotavljanjem realnočasovnega spremljanja in objektivnih podatkovnih analiz sistem bistveno zmanjšuje tveganje za neustrezne odločitve operaterjev. Ti pogosto nimajo dovolj strokovnega znanja ali ustreznih merilnih sredstev za objektivno oceno obrabljenosti orodja. Sistem operaterju zagotavlja podatkovno podprte informacije za sprejemanje bolj informiranih in doslednih odločitev o menjavi orodja.

Pomemben prispevek je tudi razvoj intuitivnega in uporabniku prijaznega vmesnika. Ta omogoča enostavno spremljanje stanja orodja, vizualno opozarjanje na potrebo po menjavi in aktivno podporo pri odločanju v realnih obdelovalnih pogojih. Uporabniška izkušnja je ključna, saj zmanjšuje potrebo po kompleksnem usposabljanju in povečuje zaupanje v sistem.

S prehodom na bolj natančno napovedno menjavo rezilnega orodja sistem prispeva k zmanjšanju proizvodnih stroškov. To se doseže z izogibanjem prezgodnjim menjavam še uporabnih rezilnih orodij, kar zmanjšuje nepotrebne izdatke za nova orodja in povečuje njihovo izkoriščenost do konca njihovega optimalnega življenjskega cikla.

Sistem bistveno zmanjšuje tveganje za izpade proizvodnje, strojelome in nepredvidene stroške, povezane s poškodbami držal orodja ali celo stroja, ki bi lahko nastali zaradi nepričakovanih lomov rezilnega orodja. Eden od vplivnejših razlogov za nenadne lome rezilnega orodja je nehomogena struktura ali spreminjajoča se trdota polizdelkov, konkretno v našem primeru odkovkov.

Sistem posredno omogoča optimizacijo in spremljanje uporabe rezilnih orodij skozi prilagajanje različnih nastavitev tehnoloških parametrov (npr. hitrosti rezanja, podajanja, globine reza) glede na realno stanje obrabe orodja. To lahko vodi do daljše življenjske dobe orodja, boljše kakovosti obdelave in boljše izkoriščenosti stroja.

S preprečevanjem obdelave z obrabljenimi orodji je zaznana izboljšana kakovost končnih izdelkov, saj se izognemo proizvodnji neustreznih kosov. Posledično se zmanjšajo riziki iz naslova reklamacij, kar prispeva k povečanemu zadovoljstvu končnih kupcev.

Sistem omogoča učinkovitejšo rabo virov, saj podaljšuje življenjsko dobo orodij in zmanjšuje količino odpadnega materiala, povezanega z obrabo ali lomom orodja. S tem prispeva k razvoju trajnostnih rešitev, ki so v skladu z načeli krožnega gospodarstva.

Disertacija prispeva k boljšemu razumevanju vpliva različnih tehnoloških in okoljskih parametrov (kot so vibracije, temperatura in tehnološki parametri) na obrabo rezilnih orodij. Posebej je bilo potrjeno, da so vibracije ključni indikator napovedovanja obrabe.

Zasnova sistema temelji na uporabi standardnih, tržno dostopnih komponent, kar zagotavlja njegovo ekonomsko upravičenost za industrijsko implementacijo. Prav tako je zasnovan modularno, kar zagotavlja visoko prilagodljivost in razširljivost na različne obdelovalne stroje in procese ter omogoča enostavno integracijo v obstoječo proizvodno infrastrukturo.

Sistem je dosegel dobre rezultate pri napovedovanju obrabe orodja z uporabo strojnega učenja. Primerjava različnih algoritmov strojnega učenja je pokazala, kateri algoritmi so primernejši za tovrstne aplikacije. To raziskovanje se navezuje na širši kontekst uporabnosti generativnih umetnih inteligenc in potrjuje potencial teh pristopov pri optimizaciji procesov in napovedovanju kritičnih rezultatov.

Prispevek k razvoju znanosti in tehnologije na področju proizvodnje je nepogrešljiv za napredek industrijskih procesov in optimizacijo proizvodnih sistemov. Sodobne metodologije, kot je uporaba umetne inteligence za napovedovanje obrabe rezilnih orodij, omogočajo natančnejše analize in povečujejo učinkovitost proizvodnje. Uporaba metod strojnega učenja je pokazala potencial za izboljšanje odločitev v procesu načrtovanja in upravljanja proizvodnje, saj te tehnike omogočajo obdelavo velikih količin podatkov in prepoznavanje skritih vzorcev, kar je ključno za napovedovanje obrabe rezil. S tem se odpira nova dimenzija za raziskovalno delo in praktične aplikacije, ki krepijo sinergijo med znanostjo, tehnologijo in proizvodnjo.

Razvoj znanosti in tehnologije na področju proizvodnje prispeva k izboljšanju konkurenčnosti in daje pomemben pečat napredku v industriji. Poleg tega so ti pristopi uporabni tudi v drugih panogah in aplikacijah, kar dodatno krepi njihov pomen in široko uporabnost.

Poglavje 9

Prihodnje delo

9.1 Omejitve raziskave

Kljub doseženim rezultatom raziskava ni brez omejitev. Kakovost in zanesljivost senzorskih podatkov sta ključni za uspeh sistema, saj sta odvisni od kakovosti podatkov, pridobljenih s triosnim pospeškomerom. Industrijsko okolje je pogosto polno motenj strojev in drugih zunanjih vplivov, kar lahko bistveno vpliva na kakovost izmerjenih vibracij. Za zagotovitev zanesljivih meritev je bila nujna uporaba naprednih tehnik filtriranja in obdelave signala, vendar tudi te ne morejo popolnoma odpraviti vseh motenj. Reprezentativnost podatkov o obrabi orodja je prav tako ključna, saj so bili podatki zbrani v specifičnih pogojih obdelave, kot so material obdelovanca, geometrija orodja in parametri obdelave.

Za učinkovito napovedovanje življenjske dobe orodja v širšem spektru aplikacij bi bilo treba zbrati podatke v bolj raznolikih delovnih pogojih. Subjektivnost ocen obrabe ostaja pomemben dejavnik, saj so kot referenca za obrabo orodja uporabljene ocene operaterjev. Ta pristop je sicer praktičen, vendar vključuje določeno stopnjo subjektivnosti, s čimer se porajajo vprašanja o zanesljivosti takšnih podatkov. Vizualna ocena obrabe rezilnega roba je odvisna od izkušenj operaterja in natančnosti merilnih instrumentov, kar lahko vpliva na točnost napovednih modelov. Kompleksnost analize vibracij je zahtevna in zahteva strokovno znanje o dinamiki strojev, parametrih obdelave in lastnostih materialov. Povezava med vibracijskimi vzorci in specifično obrabo ni vedno enostavna in zahteva poglobljeno analizo frekvence ter uporabo naprednih algoritmov strojnega učenja.

Algoritmi strojnega učenja lahko podležejo prekomernemu učenju, kar pomeni, da se modeli preveč prilagodijo učnim podatkom in ne delujejo dobro na novih, neznanih podatkih. Za preprečitev prekomernega učenja je bila uporabljena tehnika validacije, vendar ni mogoče popolnoma izločiti vpliva pristranskosti modelov na točnost napovedi. Zaradi kompleksnosti procesa obrabe orodja in raznolikosti industrijskih okolij je težko razviti splošen model, ki bi bil uporaben za vse aplikacije. Razviti sistem je bil optimiziran za specifične vrste in materiale orodij, zato je njegova prenosljivost na druge stroje in proizvodne procese še nekoliko neznana. Uspešna integracija sistema za napovedovanje obrabe orodja z obstoječimi sistemi upravljanja proizvodnje je lahko tehnično zahtevna. Treba je zagotoviti združljivost podatkovnih formatov in komunikacijskih protokolov, kar lahko zahteva dodatne stroške razvoja in integracije.

V okviru spremljanja in napovedovanja obrabe rezilnih orodij je treba upoštevati tudi stroške rednega vzdrževanja, kalibracije senzorjev in posodabljanja programske opreme. Splošna ocena teh omejitev je ključna za razumevanje dosegljivosti raziskave in usmerjanje prihodnjih raziskav.

9.2 Priložnosti za izboljšave sistema

Ena od priložnosti za izboljšave je implementacija bolj sistematičnega in zanesljivejšega pristopa k beleženju vseh menjav orodja z navedbo glavnih razlogov za te menjave, kot so iztrošenost, lom ali redna menjava. Pomembno je, da operaterji dosledno beležijo vse relevantne informacije o pogojih obdelave ob vsaki menjavi orodja. Ta pristop bi omogočal zbiranje zanesljivejših podatkov, ki so lahko uporabni za nadaljnjo optimizacijo aplikacije.

Smiselno bi bilo razviti postopke za validacijo podatkov ter odkrivanje napak ali anomalij, saj je to ključno za zagotavljanje zanesljivosti analitičnih rezultatov. Testiranje sistema v različnih okoljih, ki vključujejo različne materiale in pogoje obdelave je ključno za oceno njegove robustnosti in prenosljivosti.

Nadgradnja uporabniškega vmesnika, ki mora biti intuitiven in še bolj enostaven za uporabo, poudarja pomembnost dostopnosti tehnologije za uporabnike. Uporaba še dodatnih vizualizacij ali pa npr. odštevalnika kosov lahko znatno izboljša razumevanje trenutnega stanja orodja, napovedane življenjske dobe ter priporočene parametre obdelave. Prav tako je smiselna integracija aplikacije in opozoril z avtomatsko ustavitvijo stroja. Opozorila morajo biti prilagodljiva, kar vključuje možnost nastavitve mejnikov, ki ustrezajo specifičnim potrebam različnih uporabnikov.

Predlagana je uvedba adaptivnih algoritmov, ki se prilagajajo spreminjajočim se pogojem v realnem času in omogočajo izboljšano obvladovanje kompleksnih in dinamičnih proizvodnih okolij, prav tako tudi uporaba velikih jezikovnih modelov, ki omogočajo tudi prepoznavanje vzorcev med opisi težav ter podatki iz senzorjev. Poleg tega lahko LLM generira priporočila operaterjem za optimizacijo parametrov obdelave ali izbiro orodja na podlagi trenutnih pogojev, kar dodatno prispeva k izboljšanju uspešnosti proizvodnje.

Zmanjšanje dimenzionalnosti je ključen korak v procesu obdelave podatkov. Optimizacija kodiranja algoritmov za obdelavo podatkov je prav tako smiselna, saj omogoča zmanjšanje zahtevnosti in povečuje splošno učinkovitost sistema. Poleg tega je smiselno razmisliti o uporabi računanja v oblaku, kar bi pripomoglo k učinkovitejši obdelavi podatkov in izvajanju algoritmov strojnega učenja, kar dodatno zmanjša obremenitev računalniških virov.

Integracija podatkov iz različnih senzorjev, kot so termometri, merilniki sile in mikrofoni, je ključnega pomena za pridobitev celostnega pogleda na proces obdelave, saj omogoča boljše razumevanje in nadzor nad delovanjem sistemov, predvsem v kontekstu avtonomnih sistemov in avtomatizacije, kjer je natančnost napovedi obrabe odločilna za zanesljivost in varnost operacij. Uporaba teh senzorjev v kombinaciji s sodobnimi tehnologijami, kot je oblak računalništva, ponuja priložnosti za izboljšanje učinkovitosti in varnosti, hkrati pa postavlja izzive na področju zasebnosti in varnosti podatkov.

Obetavna smer nadaljnjega razvoja je tudi integracija avtoenkoderjev. Avtoenkoderji, vrsta nevronske mreže, ki se uporablja za nenadzorovano učenje, se lahko uporabijo za ekstrakcijo značilk in zmanjšanje dimenzionalnosti vibracijskih signalov. V okviru spremljanja obrabe rezilnega orodja se lahko avtoenkoderje usposablja na podatkih novih ali delno obrabljenih rezilnih orodij. Te naučene značilnosti se nato lahko uporabijo kot vhod v druge modele strojnega učenja, kar lahko izboljša njihovo natančnost in sposobnost posploševanja. Prav tako se avtoenkoderji lahko usposobijo za filtriranje šuma v vibracijskih signalih, kar lahko vodi do bolj robustnih in zanesljivih napovedi obrabe.

9.3 Razširitev na druge vrste obdelovalnih strojev in procesov

Cilj je zasnovati in implementirati modularno ter prilagodljivo arhitekturo sistema za napovedovanje življenjske dobe orodij, ki bo omogočala njegovo uporabo v različnih obdelovalnih procesih in na različnih strojih. Pri tem je pomembno, da je sistem zasnovan tako, da omogoča enostavno integracijo in zamenjavo/nadgradnjo senzorjev, kot so pospeškomeri, merilniki sil, termometri ter merilniki električne energije, glede na specifične potrebe posameznega obdelovalnega procesa. Vsak modul senzorja naj ima jasno definirane vmesnike za komunikacijo z ostalim delom sistema, kar bo omogočilo nemoteno izmenjavo podatkov in enostavno integracijo. Pomembno je tudi razviti prilagodljivo programsko opremo, ki podpira več različnih komunikacijskih protokolov in podatkovnih formatov, pri čemer je priporočljivo zagotoviti podporo standardiziranim protokolom, kot so MTConnect, OPC UA in DDS. To bo omogočilo enostavno povezovanje z obstoječimi sistemi v proizvodnem okolju.

Poleg tega je ključno ustvariti standardizirane vmesnike, ki bodo poenostavili integracijo, nadgradnjo in zamenjavo posameznih modulov sistema. Razviti je treba tudi API, ki podpira različne programske jezike in platforme, kar bo omogočilo razvoj prilagojenih aplikacij in razširitev funkcionalnosti s strani razvijalcev. Cilj je ustvariti razširljiv, interoperabilen in prilagodljiv sistem, ki bo lahko učinkovito podpiral različna proizvodna okolja z modularno strojno opremo in fleksibilno programsko opremo.

Cilj je tudi prilagoditi in razviti metode strojnega učenja, ki bodo upoštevale edinstvene lastnosti posameznih proizvodnih procesov, s čimer bomo dosegli še natančnejše napovedovanje obrabe orodja in boljšo optimizacijo parametrov obdelave za izboljšanje rezultatov. Poleg tega je pomembno še bolj temeljito raziskati in modelirati specifične mehanizme obrabe, da bi še bolj razumeli njihov vpliv na materiale ter lahko še učinkoviteje napovedovali in optimizirali obdelavo. V okviru teh aktivnosti je treba graditi knjižnico preverjenih modelov za različne vrste obdelav, kot so struženje, rezkanje in vrtanje, kar bo omogočilo shranjevanje modelov in podatkov za vsak posamezen proces, s čimer bomo povečali zanesljivost in dostopnost informacij. Pri izbiri in razvoju algoritmov je pomembno izvajati postopke optimizacije učenja ter razvijati prilagodljive modele, ki se samodejno prilagajajo materialnim lastnostim orodja in obdelovanca, vključno s kemično sestavo in mehanskimi lastnostmi, ter glede na specifične pogoje obdelave. Pri tem je prav tako ključno redno ocenjevati in spremljati metrike uspešnosti, natančnost in zanesljivost sistemov, da bi lahko kontinuirano izpopolnjevali in prilagajali modele za dosego optimalnih rezultatov.

Naslednji cilj je zagotoviti široko uporabnost sistema za napovedovanje življenjske dobe orodja, zato je treba razviti rešitve, ki podpirajo različne vrste strojev. Pri tem je ključno izvesti celovito analizo različnih strojev, vključno s stružnicami, rezkalnimi in vrtalnimi stroji, s poudarkom na parametrih, ki vplivajo na vibracije in obrabo orodja. Analiza naj zajema tako karakteristike togosti stroja, hitrosti vretena, sistema podajanja, ležajev kot tudi drugih komponent, ki vplivajo na dinamiko stroja. Modularna zasnova senzorjev mora omogočiti uporabo različnih vrst senzorjev in postavitev, prilagojenih specifičnim potrebam posameznega stroja. Na primer, nekateri stroji bodo zahtevali manjše senzorje za merjenje vibracij na težko dostopnih mestih, drugi pa robustnejše senzorje za delovanje v zahtevnih okoljih.

Pri razvoju algoritmov je treba uporabiti tehnike, ki omogočajo prenos znanja med različnimi stroji in se prilagajajo novim pogojem obdelave z minimalnim naporom. Algoritmi morajo biti odporni na šum in motnje, značilne za različne strojne pogoje. Sistem mora biti tudi enostavno integriran z obstoječimi sistemi v proizvodnji. Za učinkovito

upravljanje podatkov je treba zagotoviti varno shranjevanje, redno varnostno kopiranje, arhiviranje ter dostop do podatkov glede na potrebe uporabnikov. Pri nameščanju in konfiguraciji je ključno razviti uporabniška navodila ter enostavna, intuitivna orodja za prilagajanje nastavitev sistema, ki omogočajo prilagoditev na različne vrste CNC strojev in preprečujejo morebitne težave s združljivostjo.

Še eden od zadnjih ciljev je izvajati temeljito validacijo in obsežno dokumentacijo sistema, da zagotovimo njegovo zanesljivost, uporabnost in vzdrževanje. Dokumentacija za uporabnike mora vsebovati podrobne in jasne informacije o nameščanju, konfiguraciji ter vsakodnevni uporabi sistema, vključno s primeri in navodili po korakih za namestitev senzorjev, kalibracijo, vodenje uporabniškega vmesnika in reševanje pogostih težav. Pri tem je pomembno pripraviti primere uporabe, vadnice in realne primere, ki prikazujejo uporabo sistema v različnih obdelovalnih pogojih ter omogočajo uporabnikom hitro razumevanje in učinkovito uporabo. Na koncu je treba organizirati usposabljanje za uporabnike, s čimer bomo zagotovili učinkovito implementacijo, uporabo in vzdrževanje sistema v prihodnje.

Literatura

[1] Kakovosten.si. "Ishikawa diagram." [Na spletu]. Dostopno: http://kakovosten.si/2017/10/11/ishikawa-diagram/. [Dostopano: 07/13/2025].

[2] M. AlJuhani, "Factors affecting tool life in machining processes" [Na spletu]. Dostopno: https://www.slideshare.net/slideshow/factors-affecting-tool-life-in-machining-processes/21374435#1. [Dostopano: 02/11/2025].

[3] P. De Vos and J-E. Stähl , "Tool deterioration – Practical Models", SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden, 2014. Prevedel M. Oreškovič, "Slabšanje orodja – Praktični modeli", PROFIDTP, d. o. o., Škofljica, 2019.

[4] A. A. Thakre, A. V. Lad, and K. Mala, "Measurements of tool wear using machine vision system," *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2019, Article ID 1876489, 9 strani, 2019. DOI: https://doi.org/10.1155/2019/1876489.

[5] D. Wu, C. Jennings, J. Terpenny, R. X. Gao, and S. Kumara, "A comparative study on machine learning algorithms for smart manufacturing: Tool Wear prediction using Random Forests," *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 139, no. 7, p. 071018, July 2017. DOI: https://doi.org/10.1115/1.4036350

[6] Manufacturingguide.com. "Cutting Tool Wear." [Na spletu]. Dostopno: https://www.manufacturingguide.com/en/ordlista/cutting-tool-wear. [Dostopano: 05/25/2025].

[7] Medikal.net. "Konfokalni Mikroskopi." [Na spletu]. Dostopno: https://www.medikal.net/sl/oprema-za-patologijo-in-histologijo/mikroskopi/konfokalni-mikroskopi/. [Dostopano: 08/06/2025].

[8] Sick.com. "Ranger3." [Na spletu]. Dostopno: https://www.sick.com/cl/en/products/machine-vision-and-identification/machine-vision/ranger3/c/g448354. [Dostopano: 08/05/2025].

[9] Cmmxyz.com. "DEA." [Na spletu]. Dostopno: https://www.cmmxyz.com/blog/dea/. [Dostopano: 08/05/2025].

[10] P. De Vos and J-E. Stähl , "Applied metal cutting physics – Best practise", SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden, 2016. Prevedel M. Oreškovič, "Uporabna fizika odrezavanja kovin – Dobre prakse", PROFIDTP, d. o. o., Škofljica, 2017.

[11] HBKworld.com. "3623A." [Na spletu]. Dostopno: https://www.hbkworld.com/web/dytran/global/en/products/accelerometers/voltage--iepe-ccld-/triaxial/3623a#Overview-bb27c4321a. [Dostopano: 09/19/2025].

[12] R. Munaro, A. Attanasio, and A. Del Prete, "Tool wear monitoring with artificial intelligence methods: A review," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, no. 4, p. 129, 2023.

[13] P. M. Sieberg, D. Kurtulan, and S. Hanke, "Wear mechanism classification using artificial intelligence," *Materials*, vol. 15, no. 7, p. 2358, 2022.

[14] L. Colantonio, L. Equeter, P. Dehombreux, and F. Ducobu, "A systematic literature review of cutting tool wear monitoring in turning by using artificial intelligence techniques," *Machines*, vol. 9, no. 12, p. 351, 2021.

[15] R. G. Silva, S. J. Wilcox, and R. L. Reuben, "Development of a system for monitoring tool wear using artificial intelligence techniques," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 220, no. 8, pp. 1333–1346, 2006.

[16] S. Kasiviswanathan, S. Gnanasekaran, M. Thangamuthu, and J. Rakkiyannan, "Machine-learning- and internet-of-things-driven techniques for monitoring tool wear in machining process: A comprehensive review," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 13, no. 5, p. 53, 2024.

[17] R. Shah, N. Pai, G. Thomas, S. Jha, V. Mittal, K. Shirvni, and H. Liang, "Machine learning in wear prediction," *Journal of Tribology*, vol. 147, no. 4, p. 040801, Nov. 2024.

[18] A. Bustillo, D.Yu. Pimenov, M. Matuszewski, and T. Mikolajczyk, "Using artificial intelligence models for the prediction of surface wear based on surface isotropy levels," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 53, pp. 215–227, 2018.

[19] M. Danish, M.K. Gupta, S.A. Irfan, S.M. Ghazali, M.F. Rathore, G.M. Krolczyk, and A. Alsaady, "Machine learning models for prediction and classification of tool wear in sustainable milling of additively manufactured 316 stainless steel," *Results in Engineering*, vol. 22, p. 102015, 2024.

[20] A. de Farias, S.L.R. de Almeida, S. Delijaicov, V. Seriacopi, and E.C. Bordinassi, "Simple machine learning allied with data-driven methods for monitoring tool wear in machining processes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 109, pp. 2491–2501, 2020.

[21] S. Val, M. P. Lambán, J. Lucia, and J. Royo, "Analysis and Prediction of Wear in Interchangeable Milling Insert Tools Using Artificial Intelligence Techniques," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 24, p. 11840, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/app142411840

[22] J. Gao, H. Qiao, and Y. Zhang, "Intelligent Recognition of Tool Wear with Artificial Intelligence Agent," *Coatings*, vol. 14, no. 7, p. 827, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/coatings14070827

[23] M. Marani, M. Zeinali, J. Kouam, V. Songmene, and C. K. Mechefske, "Prediction of cutting tool wear during a turning process using artificial intelligence techniques," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 111, pp. 505–515, 2020.

[24] P. M. Sieberg, D. Kurtulan, and S. Hanke, "Wear Mechanism Classification Using Artificial Intelligence," *Materials*, vol. 15, no. 7, p. 2358, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15072358

[25] J. W. Chen, M. S. Tsai, and C. L. Hung, "Towards an Effective Tool Wear Monitoring System with an AI Model Management Platform," *22nd IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Beijing, China, Aug. 2024. DOI: 10.1109/INDIN58382.2024.10774399

[26] M. Soori, B. Arezoo, and R. Dastres, "Machine learning and artificial intelligence in CNC machine tools: A review," *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, vol. 2, p. 100009, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100009

[27] W. J. Lee, H. Wu, H. Yun, H. Kim, M. B.G. Jun, and J. W. Sutherland, "Predictive maintenance of machine tool systems using artificial intelligence techniques applied to machine condition data," *Procedia CIRP*, vol. 80, pp. 506–511, 2019.

[28] M. Gjoreski, M. Luštrek, M. Gams, and H. Gjoreski, "Monitoring Stress with a Wrist Device Using Context," *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 73, pp. 159–170, 2017.

[29] M. Gams, "The Oath of Researchers and Developers," *Informatica*, vol. 49, no. 1, pp. 1–6, 2025. DOI: https://doi.org/10.31449/inf.v49i1.8149

[30] P. De Vos and J-E. Stähl , "Metal Cutting – Theories in Practice", SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden, 2014. Prevedel M. Oreškovič, "Odrezavanje kovin – Teorije v praksi", PROFIDTP, d. o. o., Škofljica, 2019.

[31] V.D. Calatorua, M. Balazinskia, J.R.R. Mayer, H. Paris, and G. L'Espe´ rance, "Diffusion wear mechanism during high-speed machining of 7475-T7351 aluminum alloy with carbide end mills," *Wear, Elsevier*, 2008.

[32] Omcd.it. "Metal Cutting Tools." [Na spletu]. Dostopno: https://www.omcd.it/dimotek/en/what-we-do/metal-cutting-tools/. [Dostopano: 09/18/2025].

[33] AB Sandvik Coromant, ″Training Handbook: Metal Cutting Technology. 2017.″ Dostopno: www.sandvik.coromant.com. [Dostopano: 09/19/2025].

[34] Z. Botak, "Inteligentni sistem za večkriterijsko optimizacijo tehnološkega načrta dvoosnega struženja," Doktorska disertacija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, december 2016.

[35] G. Schneider, "Cutting Tool Applications" [Na spletu]. Dostopno: http://www.opensourcemachinetools.org/archive-manuals/Cutting-Tool-Applications.pdf. [Dostopano: 07/22/2025].

[36] Z. Botak, "Integrirani model inteligentnega CNC-programiranja in izbire rezalnega orodja," Magistrsko delo, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, Maribor, 2010. Dostopno: http://dkum.uni-mb.si/Dokument.php?id=18484. [COBISS.SI-ID 14531862]

[37] J. A. Olortegui-Yume and P. Y. Kwon, "Tool wear mechanisms in machining," *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, vol. 2, no. 3, 2007.

[38] Dewesoft.com. "SIRIUS MINI Technical Specifications." [Na spletu]. Dostopno: https://dewesoft.com/products/sirius-mini/tech-specs. [Dostopano: 06/02/2025].

[39] Dewesoft.com. "Dewesoft Data Acquisition Technology Explained." [Na spletu]. Dostopno: https://dewesoft.com/blog/dewesoft-data-acquisition-technology-explained. [Dostopano: 08/06/2025].

[40] Dewesoft.com, "DewesoftX3 SP12 Released." [Na spletu]. Dostopno: https://dewesoft.com/blog/dewesoft-x3-sp12-released. [Dostopano: 06/10/2025].

[41] L. Žlajpah in M. Gams, "Poročilo o izvajanju projekta ROBKONCEL – Unior na IJS," Institut "Jožef Stefan," Ljubljana, Slovenija, Avg. 2021.

[42] Wikipedia. "Discrete Fourier Transform." [Na spletu]. Dostopno: https://en.wikipedia.org/wiki/Discrete_Fourier_transform. [Dostopano: 24/05/2025].

[43] D. Wang, K. Tsui, and Q. Miao, "Prognostics and Health Management: A Review of Vibration Based Bearing and Gear Health Indicators," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 665–-676, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2774261.

[44] Sandvik Coromant. "WNMG 432-WM 4315." [Na spletu]. Dostopno: https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/product-details?c=wnmg%20432-wm%204315&m=6699190. [Dostopano: 09/13/2025].

[45] J.F. Tasič, "Postopki digitalne obdelave signalov". 2. dopolnjena in razširjena izd. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko, 2002. ISBN: 961-6371-33-9. COBISS-ID: 118293760

[46] J. M. Rožanec, G. Petelin, J. Costa, G. Cerar, B. Bertalanič, M. Guček, G. Papa, and D. Mladenić, "Dealing with zero-inflated data: Achieving state-of-the-art with a two-fold machine learning approach," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 149, p. 110339, June 2025.

[47] J. Gotlih, T. Karner, T. Rojko, and S. Frlež, "Koncept algoritmov za učenje gibanja robotov in za kolaborativno delo robota in človeka: indirektno programiranje robotov," Raziskovalno poročilo, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za robotizacijo (LaRo), Univerza v Mariboru, Maribor, 2020. COBISS.SI-ID 23109910

[48] D. Torkar and G. Papa, "Ocena natančnosti sistema robotskega vida = Robot vision accuracy estimation," *Elektrotehniški vestnik*, vol. 76, no. 1/2, pp. 25–30, 2009. COBISS.SI-ID 22958887.

[49] J. Ravničan, A. Marinko, G. Noveski, S. Kalabakov, M. Jovanovič, S. Gazvoda, and M. Gams, "A prestudy of machine learning in industrial quality control pipelines,"

Informatica, An International Journal of Computing and Informatics, vol. 46, no. 2, pp. 187–196, 2022. DOI: https://doi.org/10.31449/inf.v46i2.3938

[50] A. Marinko, J. Ravničan, T. Hohler, and M. Gams, "Naprava in postopek za napovedovanje življenjske dobe rezilnih orodij s primerjavo tresljajev v času obdelave," SI Patent 26419, 29-Mar-2024. Available: https://www2.uil-sipo.si/s/ds.dll/00?A=1030194010037823a50000011409

[51] O. I. Provotar, Y. M. Linder, and M. M. Veres, "Unsupervised Anomaly Detection in Time Series Using STM-Based Autoencoders," 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information heory (ATIT), pp. 513–517, 2019. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030505

[52] L. Ahrens, J. Ahrens, and H.D. Schotten, "A machine-learning phase classification scheme for anomaly detection in signals with periodic characteristics," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2019, p. 27, 2019. DOI: doi.org/10.1186/s13634-019-0619-3

[53] G. Chen, G. Lu, Z. Xie, and W. Shang, "Anomaly Detection in EEG Signals: A Case Study on Similarity Measure," *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2020, Article ID 6925107, 16 pages, 2020. DOI: doi.org/10.1155/2020/6925107

[54] B. Luo, H. Wang, H. Liu, B. Li, and F. Peng, "Early Fault Detection of Machine Tools Based on Deep Learning and Dynamic Identification," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 1, pp. 509–518, Jan. 2019. DOI: 10.1109/TIE.2018.2807414

[55] SMM proizvodni sistemi, d. o. o. (koordinator), DEWESOFT, d. o. o., UNIOR, d. d., GORENJE, d. d., UM FERI, UM FS, "Demonstrator sistema za nadzor procesa" Projekt ROBKONCEL, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport, 2018–2021.

Bibliografija

Objave v povezavi z delom

Članek v reviji

J. Ravničan, A. Marinko, G. Noveski, S. Kalabakov, M. Jovanovič, S. Gazvoda, and M. Gams, "A prestudy of machine learning in industrial quality control pipelines," *Informatica, An International Journal of Computing and Informatics*, vol. 46, no. 2, pp. 187-196, 2022. DOI: https://doi.org/10.31449/inf.v46i2.3938.

Patent

A. Marinko, J. Ravničan, T. Hohler, and M. Gams, "Naprava in postopek za napovedovanje življenjske dobe rezilnih orodij s primerjavo tresljajev v času obdelave," SI Patent 26419, 29-Mar-2024. Available: https://www2.uil-sipo.si/s/ds.dll/00?A=1030194010037823a50000011409

Prispevki na konferencah

D. Golob, P. Kocuvan, J. Ravničan, J. Bizjak, M. Gams, S. Kalabakov, and G. Dolanc, "Detekcija napak na industrijskih izdelkih," *Slovenska konferenca o umetni inteligenci [Elektronski vir] = Slovenian Conference on Artificial Intelligence*, 6-7 Oct. 2020, Ljubljana, Slovenia, pp. 27-31. Available: https://plus.cobiss.net/cobiss/si/sl/bib/34230787

S. Kalabakov, A. Marinko, J. Ravničan, and M. Gams, "Detection of scratches on the surface of metallic objects," *Ljudje in okolje [Elektronski vir] = People and environment*, 6 Oct. 2021, Ljubljana, Slovenia, pp. 64-67. Available: https://plus.cobiss.net/cobiss/si/en/bib/87012867.

A. Marinko, J. Ravničan, and M. Gams, "Cutting tool life estimator," 14th International Technology Transfer Conference, Ljubljana, Slovenia, 2021, pp. 108-109. Available:http://library.ijs.si/Stacks/Proceedings/InformationSociety/2021/IS2021 Volume_E.pdf

Druge objave

J. Ravničan and K. Kuzman, "Statistical and FEM analysis of cold finishing operations after hot forging," Conference proceedings, pp. 331-336, 2009. Available: https://plus.si.cobiss.net/opac7/bib/11113755

J. Ravničan and K. Kuzman, "Some comments on cold finishing operations of hot forging," *Proceedings of the 5th JSTP international seminar on precision forging*, Kyoto TERRSA, Kyoto, Japan, pp. 111-116, March 2009. Available: https://plus.si.cobiss.net/opac7/bib/10936091

Biografija

Jože Ravničan je diplomiral leta 2002 na univerzitetnem študiju strojništva v Mariboru, smer Gospodarsko inženirstvo. Istega leta se je zaposlil v podjetju UNIOR, d. d. kot tehnolog konstrukter na programu Odkovki, kasneje pa je opravljal funkcijo vodje razvojnih projektov, kjer je sodeloval z mnogimi zunanjimi razvojnimi inštitucijami na področju razvoja novih materialov in tehnologij. Želja po pridobivanju dodatnih znanj, ga je privedla do nadaljevanja študija na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani, kjer je leta 2009 uspešno zaključil magisterij z naslovom "Model obvladovanja zaključnih operacij pri utopnem kovanju". Leta 2010 je v podjetju UNIOR, d. d. prevzel vlogo Vodje tehnologije in razvoja obrata Mehanske obdelave odkovkov, kjer je zaposlen še danes. Skrbi za razvoj, implementacijo in avtomatizacijo novih projektov, vse do serijske proizvodnje. V tem času je uspešno vpeljal 154 novih projektov in 141 produktnih tehnoloških sprememb.

Leta 2017 se je vpisal na Mednarodno podiplomsko šolo Jožefa Stefana na programu Informacijske in komunikacijske tehnologije, s ciljem pridobivanja znanj na področju IKT ter njihovega združevanja z industrijskimi izkušnjami, kar mu omogoča slediti sodobnim industrijskim trendom. Med njegovimi delovnimi dejavnostmi so tudi interni ter zunanji razvojni projekti, ki so usklajeni z najnovejšimi tehnološkimi smernicami avtomobilske industrije in digitalizacije proizvodnih procesov. Kot del tega so uspešno pridobili različne sofinancirane razvojno-raziskovalne in investicijske projekte, med njimi FOKKS, SIMIT, PARRIZ in ROBKONCEL, pri čemer je sodeloval tudi Institut Jožef Stefan. Projekt ROBKONCEL se je uspešno zaključil avgusta 2021, sodelovanje pri prenosu znanstvenih in tehnoloških dosežkov pa mu je prineslo tudi častno listino Instituta Jožef Stefan.

Podjetje UNIOR, d. d. je eno redkih večjih podjetij v Sloveniji, ki sodeluje z državami po vsem svetu, predvsem v Evropski uniji. Je pomemben razvojni partner, ki podpira znanost, raziskave in visoko šolstvo. Kot mednarodno priznan proizvajalec, si je podjetje zagotovilo trdno mesto kot zanesljiv dobavitelj avtomobilske industrije, s tradicijo kovaštva, izdelki visoke kakovosti in lastno proizvodnjo CNC strojev. Njegovi kupci vključujejo ugledne avtomobilske znamke, kot so Volkswagen, Audi, Škoda, Porsche, Bentley, BMW, Ferrari, Renault, Jaguar, Daimler, itd.