

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

# **AVTOMATSKO ZAZNAVANJE IZTAKNjenih VZMETI PRI MONTAŽI KOMPRESORJEV**

DIPLOMSKA NALOGA UNIVERZITETNEGA ŠTUDIJA

**Dejan Soklič**

Mentor:izr. prof. dr. Edvard Govekar, univ. dipl. inž.  
Somentor: doc. dr. Primož Potočnik, univ. dipl. inž.

Ljubljana, 2008



**A. Copyright ©:**

- Ime in priimek avtorja-diplomanta Dejan Soklič podpis:

- Ime in priimek mentorja izr. prof. dr. Edvard Govekar podpis:

- Ime in priimek somentorja doc. dr. Primož Potočnik podpis:

Pravna oseba oz. inštitucija,

ki je delo omogočila,

finančno podprla Danfoss compressors d.o.o. podpis odgovorne osebe  
in žig pravne osebe:

Kopiranje in vsakršen drug način razmnoževanja v celoti ali posameznih delov ni dovoljeno brez predhodnega pisnega dovoljenja nosilcev te pravice.

**B. Glede na Zakon o avtorski in sorodnih pravicah UL RS št. 21/1995 in Zakon o industrijski lastnini UL RS št. 13/1992, 13/1993, 27/1993, 34/1997, 75/1997 velja še naslednje:**

Diplomsko nalogo - arhivski izvod si je možno ogledati samo v prostorih knjižnice Fakultete za strojništvo v Ljubljani s Pisnim dovoljenjem:

1. avtorja diplomanta

Ime in priimek Dejan Soklič podpis avtorja - diplomanta:

2. mentorja

Ime in priimek izr. prof. dr. Edvard Govekar podpis mentorja:

3. somentorja

Ime in priimek doc. dr. Primož Potočnik podpis somentorja:

4. pravne osebe

Ime podjetja,

inštitucije Danfoss compressors d.o.o. podpis odgovorne osebe  
in žig pravne osebe:

Če ni avtorjevega-diplomantovega podpisa, je diplomska naloga v knjižnici Fakultete za Strojništvo v Ljubljani nedostopna za vpogled.

**Pojasnilo:**

- **k točki B:** - lastnoročni podpis -dovoljuje ogled diplomske naloge le v knjižnici,
- ni lastnoročnega podpisa - ogled diplomske naloge ni dovoljen.

Ljubljana, 15.03.2005



DIPLOMSKA NALOGA UNIVERZITETNEGA ŠTUDIJA: U 5668

**NASLOV TEME: Avtomatsko zaznavanje napak vzmeti pri montaži kompresorjev**

V tovarni Danfoss Compressors d.o.o. poteka proizvodnja batnih kompresorjev za hladilnike in zmrzovalnike. Pri montaži kompresorjev se lahko pojavljajo različne napake, ki povzročijo poškodbe kompresorjev. Posebna skupina napak se pojavlja pri vstavitvi telesa kompresorja v ohišje, pri čemer se lahko telo kompresorja nepravilno namesti na podporne vzmeti in s tem povzroči tako imenovano napako vzmeti.

V okviru diplomske naloge je potrebno preučiti možnosti avtomatskega zaznavanja napak vzmeti ter podati smernice za izvedbo in vključitev sistema v proizvodno linijo.

Naloga naj vsebuje:

- pregled napak vzmeti in možnosti za zaznavanje napak,
- opis eksperimentalnega sistema za avtomatsko zaznavanje napak vzmeti,
- načrtovanje in izvedbo poskusov z vgrajenimi napakami,
- analizo dobljenih rezultatov,
- priporočila za izvedbo in vključitev sistema za avtomatsko zaznavanje napak vzmeti v proizvodno linijo.


Diplomsko nalogo je treba oddati v jezikovno in terminološko pravilni slovenščini.

Rok za oddajo tega dela je tri mesece od dneva prevzema.

Mentor

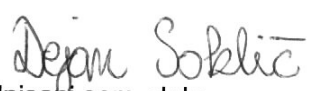
  
izr.prof.dr. Edvard Govekar, univ.dipl.inž.

Somentor

  
doc.dr. Primož Potočnik, univ.dipl.inž.

Predsednik diplomske komisije

  
prof.dr. Janez Grum, univ.dipl.inž.

  
Podpisani sem delo  
prevzel v Ljubljani

dne 15.3.2008



Prodekan za pedagoško delo –  
univerzitetni in doktorski študij

  
prof.dr. Mirko Čudina, univ.dipl.inž.



## **Zahvala**

Za raziskovalno delo me je navdušil izr. prof. dr. Edvard Govekar, za kar se mu iskreno zahvaljujem.

Posebna hvala somentorju doc. dr. Primožu Potočniku, ki me je usmerjal pri izdelavi diplomske naloge in mi s številnimi nasveti pomagal pri pripravi tega besedila. Prav tako me je spodbujal in mi bil vedno na voljo, za kar se mu iskreno zahvaljujem.

Hvala podjetju Danfoss Compressors, d.o.o. iz Črnomlja in inž. Matiji Abscu, kateremu sem hvaležen za odlično počutje, gostoljubnost in sodelovanje pri izvajanju testiranja kompresorjev.

Zaposlenim v Laboratoriju za Sinergetiko na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani se zahvaljujem za prijetno počutje in podporo.

Svoji družini sem hvaležen, ker so mi zaupali, stali ob strani ter me podpirali in spodbujali pri študiju. Brez njihove ljubeče podpore in vzpodbude verjetno ne bi nikoli uspešno dokončal študija. Najbolj sem jim hvaležen za razumevanje in pozitivno vzdušje, ki sta mi bila vedno motivacija za dokončanje študija.





## **Avtomatsko zaznavanje iztaknjenih vzmeti pri montaži kompresorjev**

Dejan Soklič

**Ključne besede:** Batni kompresorji  
Mehanske napake  
Zaznavanje napak  
Napake vzmeti  
Odločitveni pragovi  
Spremenljivi odločitveni pragovi

### **Izvleček:**

Pri montaži batnih kompresorjev se lahko pojavijo različne napake. Mednje sodijo tudi mehanske napake, med katere spadajo napake iztaknjenih vzmeti. Do teh napak najpogosteje pride pri vgradnji kompresorske grupe v ohišje kompresorja in pri njegovem transportu. Namen našega dela je bil raziskati možnosti avtomatskega zaznavanja napak iztaknjenih vzmeti na osnovi signalov sil. V ta namen je bil zgrajen eksperimentalni sistem, s katerim zajamemo signal sile in avtomatsko razvrščamo kompresorje. Ugotovili smo, da nam iztaknjena vzmet poveča vrednosti zajetega signala sile. Iz signalov sil smo izpeljali značilke, ki omogočajo avtomatsko zaznavanje iztaknjenih vzmeti pri montaži kompresorjev. Delovanje sistema smo preverili v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o., v Črnomlju. V ta namen smo v okviru izvedenih poizkusov v kompresorje na proizvodni liniji vgradili napake iztaknjenih vzmeti in jih nato s sistemom poskusili avtomatsko zaznati. Časovno vrsto značilk iz testiranja smo uporabili za izdelavo različnih odločitvenih pragov. Primerjali smo nespremenljive in spremenljive odločitvene pragove. Največji problem pravilnega razpoznavanja napak z nespremenljivimi odločitvenimi pragovi se je pojavil zaradi nihanja srednje vrednosti značilk, ki je posledica različnih dejavnikov. S spremenljivimi odločitvenimi pragovi v primerjavi z nespremenljivimi smo znatno izboljšali pravilno razpoznavanje kompresorjev. Za uporabo pragov na proizvodni liniji priporočamo uporabo spremenljivih odločitvenih pragov, s katerimi smo zelo dobro razpoznali napake iztaknjenih vzmeti pri kompresorjih.



## **Automatic detection of faults on springs during assembling of reciprocating compressors**

Dejan Soklič

**Key words:** Reciprocating compressors  
Mechanical faults  
Fault detection  
Spring faults  
Decision thresholds  
Adaptive decision thresholds

### **Abstract:**

Various faults may occur during the production of reciprocating compressors. One type of faults are mechanical faults, particularly spring faults. Such faults most often appear during assembly or transportation of compressors. The purpose of our work was to investigate the possibilities of automatic detection of spring faults based on force signals. An experimental system was built and applied to acquire force signals. We discovered that spring faults cause increased force signal. Force signals were used to extract features, appropriate for automatic detection of spring faults during assembling of reciprocating compressors. Experimental system was tested in company Danfoss Compressors, d.o.o., in Črnomelj, where different types of spring faults were built in compressors and then the experimental system was applied for automatic fault recognition. Time series from testing was used to calculate different types of decision thresholds. Non-adaptive and adaptive thresholds were compared. The problem with non-adaptive threshold strategy occurs due to fluctuations of average of extracted features. This problem was solved with adaptive thresholds that resulted in improved detection of spring faults. The adaptive threshold strategy is suggested for the application on the industrial production line.



# Kazalo

Uvod.....	15
1.1 Predstavitev problema.....	16
1.2 Pregled stanja.....	16
1.3 Potek dela.....	17
Teoretične osnove.....	19
2.1 Vrednotenje odločitvenih pragov.....	19
2.2 Nespremenljivi odločitveni prag.....	20
2.3 Optimirani nespremenljivi odločitveni prag.....	22
2.4 Spremenljiva odločitvena strategija.....	23
2.4.1 Spremenljivi odločitveni prag s konstantno deviacijo.....	23
2.4.2 Spremenljivi odločitveni prag s spremenljivo deviacijo.....	24
Eksplozivni sistem in meritve.....	27
3.1 Mehanske napake vzmeti kompresorja.....	27
3.1.1 Opis napak.....	28
3.2 Eksplozivni sistem.....	31
3.2.1 Izpeljava značilke.....	37
3.2.2 Določitev kalibracijske sile.....	37
3.3 Opis poizkusov.....	38
3.4 Prikaz rezultatov.....	42
Analiza signalov sil.....	49
4.1 Načrtovanje odločitvene strategije.....	49
4.2 Izdelava nespremenljivega odločitvenega pragu.....	49
4.3 Izdelava optimiranega nespremenljivega odločitvenega pragu.....	52
4.4 Izdelava adaptivne odločitvene strategije.....	56
4.4.1 Adaptivna strategija s konstantno deviacijo.....	56
4.4.2 Adaptivna strategija s spremenljivo deviacijo.....	58
4.5 Primerjava odločitvenih pragov.....	61
4.6 Končna priporočila za izvedbo strategije na liniji.....	62
Zaključek.....	65

## Uporabljene oznake

Oznaka	Opis oznake
$xy$	Oznake obravnavanih kompresorjev z različnimi napakami iztaknjene vzmeti. $x=\{A, B, C\}$ , $y=\{1, 2, 3\}$
$N$	Število vzorcev
$N_d$	Število dobrih vzorcev
$N_s$	Število slabih vzorcev
$Q$	Kakovost vzorca, $Q=\{0,1\}$
$N_{ed}$	Število napačno razpoznanih dobrih vzorcev
$N_{es}$	Število napačno razpoznanih slabih vzorcev
$J$	Kriterij za primerjavo odločitvenih pragov
$J_{\min}$	Minimalna vrednost kriterijske funkcije
$\varepsilon$	Utežni faktor za kriterijsko funkcijo
$\eta$	Parameter v kriterijski funkciji za lažjo primerjavo rezultatov
$m$	Srednja vrednost vzorcev
$\sigma$	Standardna deviacija vzorcev
$SL$	Srednja linija
$ZM$	Zgornji odločitveni prag
$SM$	Spodnji odločitveni prag
$z_i$	Vrednost značilke v i-tem poizkusu
$k$	Parameter, s katerim nastavljammo širino odločitvenih pragov
$k_{opt}$	Optimalni parameter $k$ , za določen odločitveni prag
$PN(t)$	Časovno spremenljivi prag s konstantno deviacijo
$PS(t)$	Časovno spremenljivi prag s spremenljivo deviacijo
$m(t)$	Časovno spremenljiva srednja vrednost
$s(t)$	Časovno spremenljiva deviacija
$z(t)$	Vrednost značilke v določenem časovnem trenutku
$\alpha$	Utežni faktor za napoved spremenljive srednje meje
$\beta$	Utežni faktor za napoved spremenljive deviacije
$\alpha_{opt}$	Optimalni utežni faktor za napoved spremenljive srednje meje
$\beta_{opt}$	Optimalni utežni faktor za napoved spremenljive deviacije
$N_{1-2}$	Število vzorcev na intervalu $[N_1, N_2]$
$N_1$	Začetna vrednost intervala
$N_2$	Končna vrednost intervala
$F_i$	Posamezna vrednost sile v določenem času

# Poglavje 1

## Uvod

Kakovost izdelkov v podjetjih je postala eden izmed glavnih odločitvenih faktorjev v večini današnjih podjetij. Ne glede na to, ali je kupec posameznik, podjetje ali združba, ko se potrošnik odloča o nakupu, ima kakovost zelo verjetno enako vplivnost kot cena. Posledično je izboljšanje kakovosti postala ena glavnih skrbi v podjetjih. Izboljšanje kakovosti pomeni načrtno odstranitev napak v proizvodnji. Uspešno vložen trud v izboljšavo kakovosti vodi do nižjih stroškov, večje produktivnosti, povečanega zadovoljstva kupcev, večjega ugleda podjetja, večjega tržnega deleža in višjega dobička podjetja.

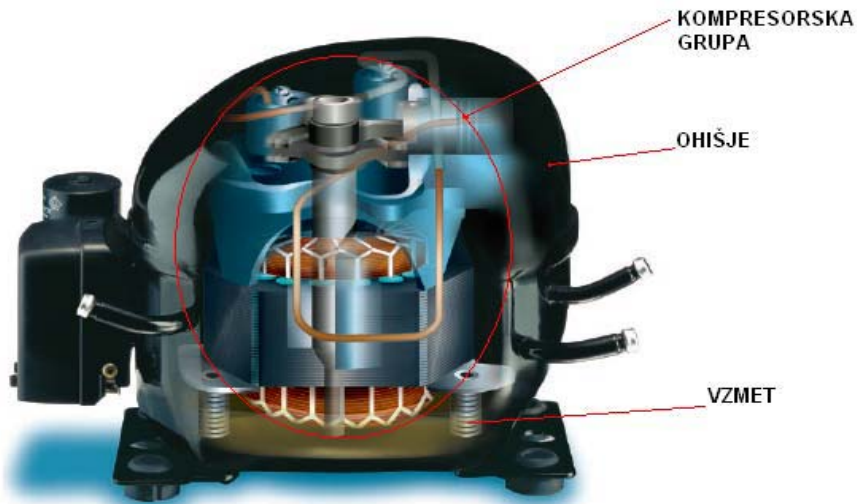
V diplomski nalogi smo se ukvarjali s problematiko zagotavljanja kakovosti izdelkov na avtomatiziranih proizvodnih linijah. Na teh izdelkih se pojavljajo napake. Te se največkrat odkrivajo po montaži, preden izdelek pripravijo za prevoz do kupcev. Najpogostejše montažne napake so manjkajoči elementi in nepravilna postavitve le-teh. Vsak izdelek ima napake, vendar morajo biti te znotraj robnih pogojev, ki veljajo za dober izdelek. Slabi izdelki ne smejo priti v uporabo, ker škodijo ugledu podjetja in slabšajo poslovni rezultat. Uspešno podjetje potrebuje zanesljiv nadzor kakovosti. Napake lahko odkrivamo na različne načine, vendar mora biti rešitev primerna za praktično industrijsko uporabo.

Odkrivanje napak največkrat izvaja človek s končno kontrolo. Človek ima svoje prednosti in slabosti v smislu nadzora kakovosti. Prednosti so prilagodljivost in odkrivanje več napak hkrati. Slabosti pa so veliki obratovalni stroški, nezanesljivost in počasnost. V industrijskem okolju moramo pri kontroli kakovosti poskrbeti za čim boljše ponovljivost meritev. Prednosti avtomatske kontrole so majhni obratovalni stroški in velika hitrost. Slabosti so ozko uporabno območje in slaba prilagodljivost. Zagonski stroški avtomatizacije so visoki glede na začetne stroške delavca, obratovalni stroški pa so napram obratovalnim stroškom delavca nizki. Odločitev za avtomatizacijo procesa mora temeljiti na primerjavi stroškov avtomatizacije in stroškov človeške delovne sile.

V tovarni Danfoss Compressors, d.o.o., v Črnomlju se na avtomatizirani proizvodnji batnih kompresorjev pojavljajo napake. Te napake bi radi našli že na proizvodni liniji in jih avtomatsko izločili. S tem bi zmanjšali stroške operaterja, ki ročno opravi kontrolo kvalitete kompresorja, in hkrati povečali zanesljivost odkrivanja napak. S tem bi povečali tudi produktivnost, saj se lahko s takojšno detekcijo napake ta enostavno popravi in vrne na linijo, medtem ko napaka na končnem izdelku pomeni odpad.

## 1.1 Predstavitev problema

Kompresorji so delovni stroji, ki skrbijo za kroženje hladilne snovi v hladilnih napravah. Najpogostejši so batni, membranski, rotacijski in turbinski kompresorji. V podjetju Danfoss Compressors, d.o.o., v Črnomlju izdelujejo batne kompresorje, ki jih razdelijo v dve skupini: kompresorji za hladilnike in zmrzovalnike ter kompresorji za profesionalno uporabo. Primer kompresorja prikazuje slika 1.



Slika 1: Shema kompresorja

Kompresorje v podjetju izdelujejo na avtomatizirani proizvodni liniji. Montaža poteka tako, da kompresorsko grupo namestijo na štiri podporne vzmeti na spodnjem delu ohišja. Nato zaprejo kompresor z zgornjim delom ohišja in ga zavarijo. Pri postavitvi kompresorske grupe na podporne vzmeti se pojavijo napake. Zgodi se, da ena ali več vzmeti ni pravilno nataknenih na zatik. Navedene napake spremenijo lego kompresorske grupe v ohišju, s tem se pri zagonu in obratovanju povečajo prenešene sile nihanja na okolico, zato takšni kompresorji niso primerni za vgradnjo. Ta vrsta napak se sedaj v podjetju odkriva na koncu montažne linije z ročno kontrolo na osnovi zvoka, ki ga kompresor oddaja med zagonom in obratovanjem. Verjetnost detekcije določenih tipov napak vzmeti je nizka. To podjetju predstavlja dovolj velik problem, da ga želijo odpraviti.

## 1.2 Pregled stanja

Moderna industrijska proizvodnja, ki temelji na obdelovalnih procesih, potrebuje zanesljiv nadzor postopkov [1]. V industrijskem okolju se pojavljajo napake na proizvodih, ki se poskušajo odpraviti s kontrolo kakovosti. Za učinkovito kontrolo kakovosti je potrebno poznati lastnosti industrijskega procesa in izdelka. Poznane so različne metode prepoznavanja napak, med njimi se največkrat uporabljajo neporušne metode [2]. V večini avtomatskega razpoznavanja se opravijo meritve določenih



fizikalnih lastnosti izdelka, s katerimi se dobijo signali, ki se nato statistično ovrednotijo in poiščejo značilne vrednosti. S temi vrednostmi se lahko avtomatsko ločijo izdelki z napako od izdelkov brez nje. Razpoznavanje napak kompresorjev sedaj v podjetju opravlja operater, ki z mikrofonom in slušalkami izvaja kontrolo kompresorjev ob zagonu in obratovanju. Možna metoda za avtomatsko zaznavanje napak iztaknjenih vzmeti je uporaba neporušne metode na osnovi analize signalov akustične emisije [3], podobno, kot se uporablja za detekcijo napak sesalnih enot [4]. Za avtomatsko iskanje napak na elektromotorjih in vodnih črpalkah se uporablja analiza signalov vibracij [5, 6]. Merjenje sile je ena od možnih metod za pridobitev signalov, s katerimi se avtomatsko odkrivajo napake [7].

Iz signalov pridobljenih iz merilnega sistema, se izračunajo vrednosti značilke, ki imajo lastnosti naključne spremenljivke [8]. Značilke vsebujejo informacije o stanju merjenega kompresorja. Z njimi se lahko ugotovi prisotnost napake. Za avtomatsko razvrščanje kompresorjev z napako ali brez nje se uporabljajo odločitveni pragovi. Odločitveni pragovi imajo pomemben vpliv na točnost in občutljivost sistema za avtomatsko razpoznavanje napak [9]. Odločitveni pragovi so lahko nespremenljivi ali spremenljivi. V primeru pogostega nihanja kakovosti industrijskega procesa uporabimo sprotno spreminjanje odločitvenih pragov glede na trenutno stanje procesa [10]. Poznani sta dve vrsti večjih neželenih sprememb vrednosti značilke: zaradi nihanja kakovosti industrijskega procesa ali napake na merjenih kompresorjih. V obeh primerih lahko prekoračimo odločitveno mejo [11]. Z uporabo spremenljivih pragov se doseže, da so odločitveni pragovi tesneje prilagojeni tekoči proizvodnji [12]. S temi pragovi se zmanjša število lažnih alarmov, ki jih nespremenljivi odločitveni pragovi napačno prepoznajo zaradi različnih sprememb na proizvodnji liniji [13].

### ***1.3 Potek dela***

Naloga je opisana v štirih poglavjih. Prvo poglavje prikaže problematiko diplomske naloge, opiše sedanje pristope reševanja in predstavi naš pristop k reševanju problema.

V drugem poglavju so predstavljene teoretične osnove, ki jih potrebujemo za določitev odločitvenih pragov s katerimi ločimo kompresorje brez napak od kompresorjev z napakami. Opisana je osnova za kriterij, na osnovi katere določimo najprimernejši odločitveni prag.

V tretjem poglavju je predstavljen eksperimentalni del naloge. V tem poglavju najprej predstavimo mehanske napake vzmeti in opišemo delovanje eksperimentalnega sistema. V nadaljevanju se osredotočimo na sistem z enim senzorjem, ki je bil postavljen na proizvodno linijo kompresorjev v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o. Opisan je potek preizkusov, s katerimi smo na liniji testirali sistem za avtomatsko razpoznavanje napak na kompresorjih. V zadnjem podpoglavju so predstavljeni rezultati testiranja, ki smo ga izvedli v podjetju.

Četrto poglavje zajema izračun in analizo odločitvenih pragov. S pomočjo teoretičnih osnov določimo različne odločitvene pragove iz podatkov, ki smo jih dobili pri testiranju v podjetju. Primerjamo štiri različne odločitvene pragove, ki jih med seboj

primerjamo in izberemo najprimernejšega ter pojasnimo izbor za primer avtomatičnega razpoznavanja napak iztaknjenih vzmeti na kompresorjih.

V zadnjem poglavju je strnjeno podan namen naloge in glavne ugotovitve predstavljenega dela.

Namen našega dela je bil izmeriti signale sil, ki se pojavijo ob pritisku kompresorske grupe ob ohišje ter določiti značilke signalov, ki so primerne za avtomatsko zaznavanje napak vzmeti. Izbrati je bilo potrebno odločitveno strategijo, s katero smo dosegli cilj, ki je bil zanesljivo razpoznavanje napak vzmeti. Pri tem smo uporabili nespremenljivo in spremenljivo strategijo odločitve. S pomočjo strategij smo izračunali štiri različne pragove. Na osnovi primerjave rezultatov pravilnega razpoznavanja izračunanih odločitvenih pragov smo izbrali najprimernejšega za dosego cilja. Pri našem delu smo v ta namen uporabljali orodja programskega paketa Matlab [14].

## Poglavje 2

### Teoretične osnove

V tem poglavju so opisane teoretične osnove določanja nespremenljivih in spremenljivih odločitvenih strategij, ki smo jih uporabili pri izračunu odločitvenih pragov. Odločitveno strategijo smo izvajali nad populacijo vzorcev, izmerjenih na proizvodni liniji. Z odločitveno strategijo smo skušali določiti, kateri vzorci so ustrezne kakovosti, kateri pa neustrezne. Za obravnavano problematiko se je neustrezna kakovost kazala kot povečana vrednost vzorca, ki smo jo lahko zaznali z ustreznim pragom odločanja. Pri nastavljanju odločitvenih pragov smo iskali optimalno vrednost, ki bi izločila čim več nekakovostnih vzorcev in pri tem čim več kakovostnih vzorcev pravilno razpoznala kot dobre. Z opisanimi metodami smo primerjali odločitvene pragove za avtomatsko razpoznavanje napak vzmeti pri kompresorjih v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o.

#### 2.1 Vrednotenje odločitvenih pragov

Za pravilno primerjavo odločitvenih pragov je bilo potrebno določiti kriterij, po katerem smo te odločitvene pragove primerjali. Primerna možnost je bila, da smo odločitvene pragove vrednotili glede na delež pravilno razpoznanih vzorcev, ki smo ga opisali prek kriterijske funkcije  $J$ . Za pragove z manjšo vrednostjo kriterijske funkcije  $J$  smo privzeli, da so primernejši. Na razpolago smo imeli število vrednosti značilnk  $N$ . Vrednosti in število vzorcev smo pridobili iz sistema na liniji v podjetju. Podatki so morali vsebovati informacije o številu dobrih vzorcev  $N_d$  in številu slabih vzorcev  $N_s$ . Vsota števil dobrih  $N_d$  in števil slabih  $N_s$  je morala biti enaka številu vseh vzorcev  $N$ .

Kakovost vzorcev smo označili s simbolom  $Q$ , ki ima vrednost  $Q = 1$ , če je vzorec dober, in  $Q = 0$ , če je vzorec slab. Vzorec smo pravilno razpoznali, če smo dobremu vzorcu priredili kakovost  $Q = 1$  in slabemu vzorcu kakovost  $Q = 0$ . V nasprotnem primeru smo vzorec napačno razpoznali. Napačno lahko prepoznamo dober vzorec ali slab vzorec. Število napačno razpoznanih vzorcev, ki so imeli vgrajeno eno izmed napak iztaknjenih vzmeti označimo z  $N_{es}$ . Število napačno razpoznanih vzorcev, ki so bili brez napak iztaknjenih vzmeti pa označimo z  $N_{ed}$ . Na osnovi števila napačno razpoznanih vzorcev  $N_{es}$  in  $N_{ed}$ , smo izračunali kriterijsko funkcijo  $J$  z enačbo:

$$J = \frac{\varepsilon \cdot N_{es} + N_{ed}}{N} \cdot \eta \quad (1)$$

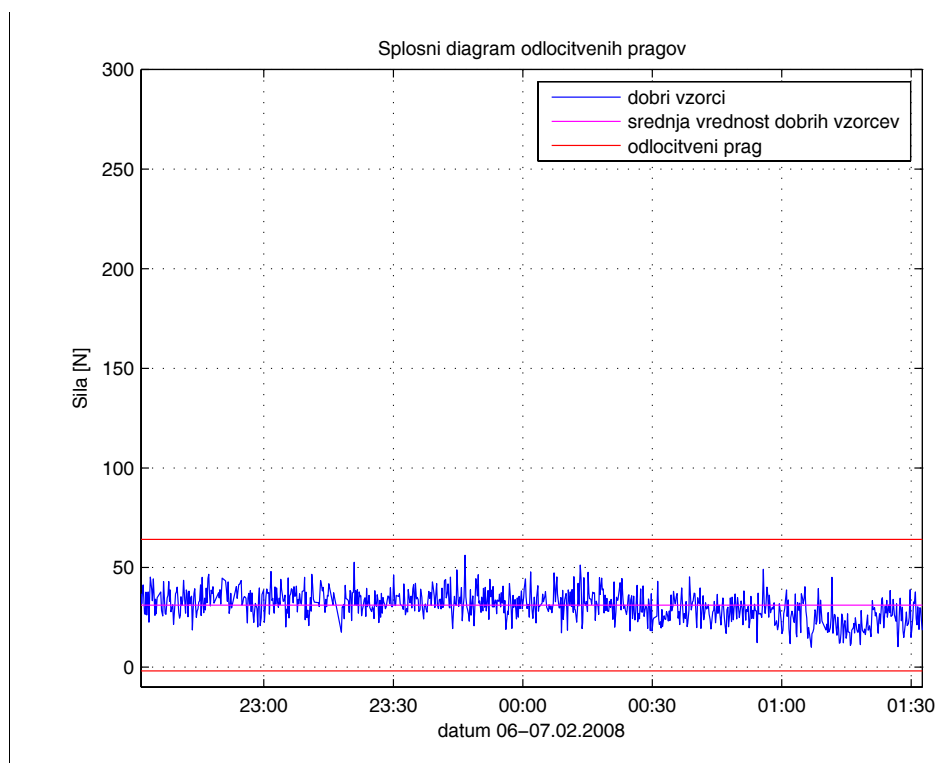
Enačbo (1) sestavljajo različne spremenljivke in parametri. Parameter  $N$  predstavlja število testiranih vzorcev. Parameter  $\varepsilon$  predstavlja utežni faktor. Njegovo vrednost smo določili glede na izkušnje in v našem primeru smo izbrali vrednost 10. Za podjetje je veliko bolj pomembno, da se pravilno razpoznajo kompresorji z napakami iztaknjenih

vzeti, kot da se pravilno razpoznajo kompresorji brez napak. To smo upoštevali v kriterijski funkciji za primerjavo pragov s pomočjo utežnega faktorja  $\varepsilon$ . Kriterijsko funkcijo  $J$  smo pomnožili s faktorjem  $\eta$ , ki smo mu pripisali vrednost 1000. S tem faktorjem smo dobili vrednosti kriterijske funkcije  $J$  večje od 1. Faktor  $\eta$  smo vpeljali zaradi lažje primerjave kriterijskih funkcij  $J$ . Odločitvene strategije smo primerjali glede na vrednost kriterijske funkcije  $J$ . Cilj je bil z izračunom različnih odločitvenih pragov dobiti najmanjšo vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$ . Za prag, ki je imel najmanjšo vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$ , smo sklepali, da je optimalni odločitveni prag. Primerjali smo štiri različne odločitvene pragove:

- nespremenljivi odločitveni prag,
- optimirani nespremenljivi odločitveni prag,
- spremenljivi odločitveni prag s konstantno deviacijo,
- spremenljivi odločitveni prag s spremenljivo deviacijo.

## 2.2 Nespremenljivi odločitveni prag

Nespremenljivi odločitveni prag ima vedno konstantno vrednost odločitvenega pragu. Pri določanju nespremenljivega odločitvenega pragu smo uporabili Shewhartovo odločitveno strategijo. To je splošna metoda odločitvene strategije, ki jo je prvi predlagal Dr. Walter A. Shewhart [15]. Metoda je uporabljena v mnogih različnih primerih sprotne tehnične diagnostike. Podatki o vrednostih vzorcev so zbrani in uporabljeni za izračun odločitvenih meja. V primeru, da so vzorčne vrednosti znotraj odločitvenih pragov in ne presežejo nobenega odločitvenega pragu, pravimo, da je proces stabilen. Splošni diagram odločitvenih pragov prikazuje slika 2.



Slika 2: Splošni diagram odločitvenih pragov

Diagram na sliki 2 prikazuje karakteristiko kakovosti, ki je bila izmerjena iz vzorcev pridobljenih na testiranju v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o. Diagram sestavlja x os, na kateri je časovni potek merjenja vzorcev. Os y prikazuje vrednost značilke vzorca, ki smo jo izračunali iz signala. Sestavni del diagrama so še tri ravne črte. Zgornja in spodnja črta prikazujeta odločitvena pragova. Imamo zgornji *ZP* in spodnji *SP* odločitveni prag. Predpostavljali smo, da imamo normalno porazdeljene vrednosti vzorcev. Ta dva odločitvena pragova sta postavljena tako, da so skoraj vse vrednosti vzorcev znotraj teh meja. Srednjo črto imenujemo srednjo linijo *SL* in predstavlja povprečno vrednost *m* vzorcev, izmerjenih v procesu.

Podamo lahko splošni model za izračun kontrolnega diagrama. Naj bo  $z_i$  vrednost vzorca, ki ga izmerimo v določenem časovnem trenutku. Število vseh vzorcev označimo z  $N$ . Izračunamo srednjo vrednost dobrih vzorcev  $m$ :

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad (2)$$

Srednja vrednost  $m$  predstavlja srednjo linijo, ki je prikazana na sliki 2 med odločitvenima pragovoma. Za določitev zgornje in spodnje odločitvene meje potrebujemo standardno deviacijo vzorcev  $\sigma$ .

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - m)^2} \quad (3)$$

Zgornja in spodnja odločitvena pragova sta tako:

$$ZP = m + k \cdot \sigma \quad (4)$$

$$SP = m - k \cdot \sigma \quad (5)$$

Prameter  $k$  predstavlja "razdaljo" kontrolnih meja. V našem procesu predpostavljamo, da smo imeli normalno porazdeljene vzorce. Karakteristična lastnost normalne porazdelitve je, da približno 68% vseh opazovanih vrednosti vzorcev zajamemo z odločitvenimi mejami, ko je  $k = 1$ , kar pomeni prvi red standardne deviacije. V primeru  $k = 2$  z mejami zajamemo približno 95% vseh normalno porazdeljenih vzorcev. W. A. Shewhart v svoji metodi predlaga  $k = 3$ . To imenujejo 3-sigma odločitvena strategija in je ena najbolj splošnih odločitvenih strategij. V primeru določitve meja po metodi 3-sigma zajamemo približno 99% vrednosti vzorcev normalno porazdeljenega procesa [16].

Tabela 1 prikazuje intervale zaupanja za normalno porazdelitev:

$\sigma$	68,26 %
$2\sigma$	95,44 %
<b><math>3\sigma</math></b>	<b>99,73 %</b>
$4\sigma$	99,99 %

**Tabela 1: Prikaz intervalov zaupanja**

Navedeno velja za normalno porazdelitev vzorcev. Normalno porazdelitev za praktično izmerjeno populacijo vzorcev ugotavljamo s pomočjo različnih testov statističnih hipotez. Primera takega testa statistične hipoteze sta: prilagoditveni test  $\chi^2$  in test Kolmogorova. Take hipoteze, ki se nanašajo na tip porazdelitve, imenujemo neparametrične [8]. Izberemo si hipotezo, o kateri odločamo, in jo imenujemo ničelna hipoteza. Hipoteza je pravilna, če ustreza lastnostim pojava, v nasprotnem primeru pa je nepravilna. V primeru, da je porazdelitev vrednosti vzorcev procesa normalno porazdeljena, ničelno hipotezo sprejmemo.

V diplomskem poročilu smo pri preverjanju normalne porazdelitve vzorcev procesa uporabili Lillieforsjev test [17]. To je Kolmogorov-Smirnov test za testiranje normalnosti procesa, kadar srednja vrednost in standardna deviacija predpostavljene normalne porazdelitve nista poznani. Pri našem delu smo v ta namen uporabljali orodja programskega paketa Matlab [14].

Pri praktični uporabi odločitvene strategije smo v našem primeru uporabljali samo zgornji odločitveni prag  $ZP$ , brez spodnjega odločitvenega pragu  $SP$ , ki ga izračunamo po enačbi (5). To izhaja iz narave procesa. Napaka iztaknjene vzmeti povzroči premik kompresorske grupe iz ravnovesne lege. S pritiskom pnevmatičnega valja kompresorske grupe navzdol proti ohišju se vzmeti stisnejo. Iztaknjene vzmeti povzročijo, da se pri enakem navpičnem premiku ena izmed vzmeti bolj stisne. To se rezultira v povečani sili, ki jo zaznamo s senzorjem. Posledično se povečajo vrednosti značilke. Tako lahko razpoznavamo napake vzmeti v kompresorjih. S spodnjim odločitvenim pragom ne moremo razpoznavati napak iztaknjene vzmeti, ker na osnovi zmanjšane sile na senzorju ne moremo izpeljati značilke, s katero bi lahko razpoznavali napake iztaknjenih vzmeti.

### ***2.3 Optimirani nespremenljivi odločitveni prag***

Odločitveni prag, ki ga dobimo s pomočjo 3-sigma strategije, je splošen odločitveni prag in zato ni optimalen. Z optimiranjem parametra  $k$  poiščemo optimalni odločitveni prag s pomočjo vrednosti kriterijske funkcije  $J$ . Prag, ki ima najnižjo vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$  imenujemo optimalni nespremenljivi odločitveni prag. Namen optimiranja odločitvenega pragu je izboljšati kakovost odločanja. Vsak proces ima svoje lastnosti in z optimiranjem odločitvenega pragu želimo doseči najboljšo možno razpoznavnost vzorcev.

Izračun optimalnega nespremenljivega odločitvenega pragu poteka tako, da si izberemo več vrednosti parametra  $k$ . Vzamemo eno od izbranih vrednosti parametra  $k$  in poiščemo vrednost kriterijske funkcije  $J$  pri tej vrednosti. To ponovimo za vse izbrane parametre  $k$ . Vrednosti kriterijske funkcije  $J$ , ki jih dobimo, nato med seboj primerjamo in določimo vrednost parametra  $k$ , kjer je kriterijska funkcija najmanjša  $J_{min}$ . S tem dobimo optimirani nespremenljivi odločitveni prag.

## 2.4 Spremenljiva odločitvena strategija

V primeru pogostega nihanja kakovosti industrijskega procesa lahko uporabimo sprotno spreminjanje odločitvenih pragov. Kot strategijo spreminjanja odločitvenih pragov predlagamo metodo, ki temelji na tehnikah eksponentnega glajenja [18]. Obstajajo različne metode eksponentnega glajenja. Vsem je skupna značilnost, da se nedavnim vrednostim daje večjo težo v napovedovanju kot starejšim vrednostim. Metoda eksponentnega glajenja je razširjena metoda gibajočega povprečja, saj uporablja obteženo gibajoče povprečje. Metoda uporablja uteži, s katerimi so obtežene vse vrednosti vzorcev. Pri spremljanju procesa se vidi, da nedavne vrednosti vzorcev bolje odražajo trenutno stanje v procesu. Metoda eksponentnega glajenja je postavljena tako, da imajo starejše vrednosti vzorcev padajoče uteži in s tem manj vplivajo na prag.

S pomočjo spremenljive odločitvene strategije smo določili dva tipa odločitvenih pragov: spremenljivi odločitveni prag s konstantno deviacijo in spremenljivi odločitveni prag s spremenljivo deviacijo.

### 2.4.1 Spremenljivi odločitveni prag s konstantno deviacijo

Pri odločitvenem pragu s konstantno deviacijo je spremenljiva samo srednja vrednost, medtem ko za deviacijo uporabimo standardno deviacijo, ki jo izračunamo z enačbo (3). Pri spremenljivem odločitvenem pragu s konstantno deviacijo sta srednja vrednost in odločitveni prag časovno odvisni  $m(t)$ ,  $PN(t)$ . Odločitveni prag s konstantno deviacijo izračunamo z enačbo:

$$PN(t) = m(t) + k \cdot \sigma \quad (6)$$

Parameter  $k$  pomeni večkratnik standardne deviacije  $\sigma$ . Z njim lahko povečamo ali zmanjšamo razdaljo odstopanja pragu od srednje vrednosti. Vrednost parametra je odvisna od opazovanega procesa. Odvisno od porazdelitve vrednosti vzorcev iz procesa izberemo vrednost  $k$ .

Enačba za spremenljivo srednjo vrednost je sestavljena iz dveh delov. Prvi del vsebuje vrednost zadnjega vzorca iz procesa, drugi del vsebuje vrednost srednje vrednosti preteklih vrednosti iz procesa. Obema deloma dodamo parameter uteži  $\alpha$ . Enačba za izračun spremenljive srednje vrednosti  $m(t+1)$  je:

$$m(t+1) = \alpha \cdot z(t) + (1 - \alpha) \cdot m(t) \quad (7)$$

Enačba (7) je oblika uporabe metode eksponentnega glajenja za izračun srednje vrednosti  $m(t+1)$ . Spremenljivka  $z(t)$  predstavlja vrednost vzorca v tem času, parameter  $m(t)$  pa srednjo vrednost ob času  $t$ . Prav tako se z uporabo te metode zmanjša problem shranjevanja podatkov, saj ni potrebno shranjevati celotne zgodovino podatkov. Uporabljajo se samo nedavni podatki in vrednost parametra  $\alpha$ , ki predstavlja utežni faktor. Večji kot je ta faktor, bolj se upošteva zadnja vrednost vzorca. Vrednosti so med 0 in 1. V primeru  $\alpha = 1$  se upošteva pri napovedovanju samo zadnji vzorec, kar pomeni, da bo srednja vrednost zelo spreminjala svoje vrednosti. V primeru  $\alpha = 0$  se zadnja

vrednost vzorca ne upošteva, upošteva pa se zgodovinska srednja vrednost. Nihanje srednje vrednosti je veliko manjše kot v primeru, ko ima parameter  $\alpha$  vrednost blizu 1. V našem primeru pričakujemo, da bo primerna vrednost parametra  $\alpha$  okrog 0,01.

## 2.4.2 Spremenljivi odločitveni prag s spremenljivo deviacijo

Pri spremenljivemu odločitvenemu pragu s spremenljivo deviacijo so srednja vrednost, deviacija in prag časovno odvisni  $m(t)$ ,  $s(t)$ ,  $PS(t)$ . Časovno odvisni prag s spremenljivo deviacijo izračunamo z enačbo:

$$PS(t) = m(t) + k \cdot s(t) \quad (8)$$

Parameter  $k$  pomeni večkratnik deviacije  $s(t)$ . Z njim lahko povečamo ali zmanjšamo razdaljo odstopanja pragu od srednje vrednosti. Vrednost parametra je odvisna od opazovanega procesa. Odvisno od porazdelitve vrednosti vzorcev iz procesa izberemo vrednost  $k$ .

Spremenljivo srednjo vrednost  $m(t)$  za spremenljivi odločitveni prag s spremenljivo deviacijo  $PS(t)$  izračunamo po enačbi (7). Podobno kot spremenljivo srednjo vrednost  $s(t)$  lahko izračunamo tudi spremenljivo deviacijo. Spremenljivo deviacijo  $s(t)$ , ki jo izračunano po enačbi (9), ne moremo imenovati spremenljiva standardna deviacija, ker je pojem standardna deviacija točno določen. Enačba je sestavljena iz dveh delov, prvi del predstavlja odmik zadnjega vzorca od srednje linije, drugi del pa predstavlja deviacijo preteklih vrednosti vzorcev. Obema deloma dodamo parameter uteži  $\beta$ . Enačba za izračun deviacije  $s(t+1)$ :

$$s(t+1) = \beta \cdot |z(t) - m(t)| + (1 - \beta) \cdot s(t) \quad (9)$$

Enačba (9) je oblika uporabe metode eksponentnega glajenja za adaptivni izračun deviacije  $s(t+1)$ . Parameter  $\beta$  predstavlja utežni faktor, ki ima enako vlogo kot parameter  $\alpha$  v primeru izračuna spremenljive srednje vrednosti. Vrednosti so med 0 in 1. V našem primeru pričakujemo, da bo primerna vrednost parametra  $\beta$  okrog 0,01. V enačbi z absolutno vrednostjo označimo odstopanje zadnjega vzorca od tekoče srednje vrednosti, nato s tem odstopanjem in utežnim parametrom  $\beta$  popravimo predhodno deviacijo.

Za primerno uporabo teoretičnih metod je potrebno iz procesa pridobiti kakovostne podatke. Določitev parametrov je kakovostna toliko, kolikor je kakovosten vzorec podatkov, na katerem določimo neznane parametre. S pomočjo teoretičnih metod skušamo določiti optimalne odločitvene pragove za čim boljše razpoznavanje kompresorjev z napako iztaknjene vzmeti. Predvidevamo, da bomo z uporabo spremenljivih pragov enako dobro ali bolje razpoznavali napake iztaknjenih vzmeti. Predstavili in opisali smo tri metode določanja odločitvenih pragov:

- nespremenljivi odločitveni prag,
- optimirani nespremenljivi odločitveni prag,
- spremenljiva odločitvena strategija.



V nadaljevanju bomo s pomočjo opisanega kriterija za vrednotenje odločitvenih pragov skušali določiti optimalni odločitveni prag za primer razpoznavanja iztaknjenih vzmeti kompresorjev.



## Poglavje 3

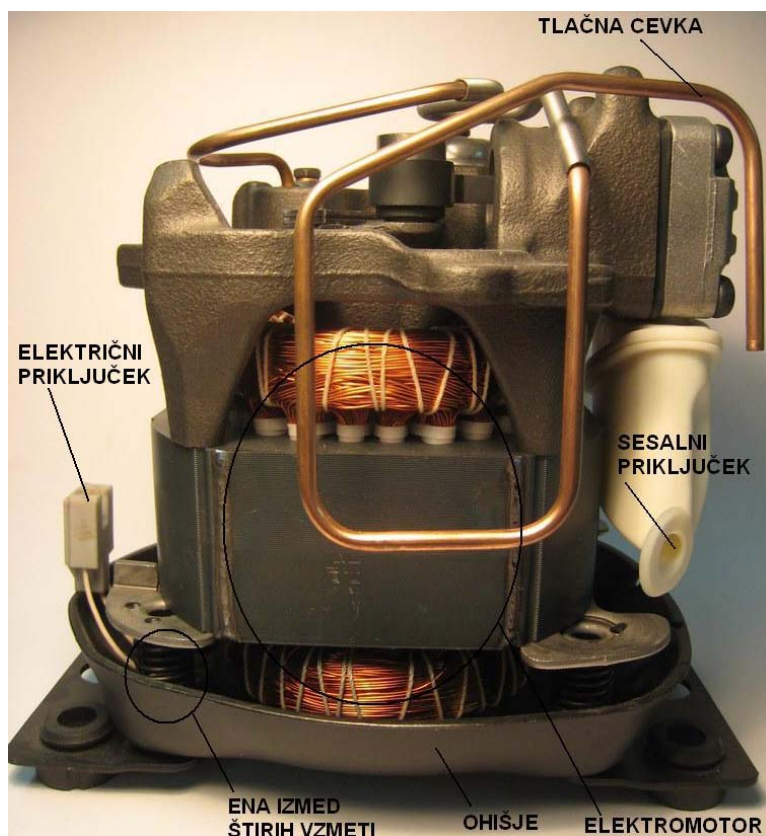
### Eksperimentalni sistem in meritve

To poglavje je sestavljeno iz opisa mehanskih napak vzmeti na kompresorjih, opisa eksperimentalnega sistema za avtomatsko razpoznavanje napak kompresorjev z napakami vzmeti in opisa poizkusov, ki so bili izvedeni na proizvodni liniji v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o.

#### *3.1 Mehanske napake vzmeti kompresorja*

Pri proizvodnji kompresorjev prihaja do različnih napak. Eden izmed teh sklopov pojavljajočih se napak so montažno-mehanske napake, kamor spadajo napake vzmeti. Te napake se pojavijo pri nameščanju kompresorske grupe v ohišje ali pri transportu kompresorja po proizvodni liniji. Možnih je več napak vzmeti. Iztaknjene vzmeti spadajo pod napake vzmeti. Pri montaži kompresorske grupe v ohišje se zgodi, da vzmet ne nasede na zatik, kar imenujemo napaka iztaknjene vzmeti. Iztaknjene vzmeti zavzamejo stabilen položaj ob zatiku. Možne stabilne položaje iztaknjenih vzmeti smo poiskali, in sicer v okviru raziskave možnosti avtomatskega zaznavanja napak na osnovi signalov merjenja sil. Pri raziskavah smo uporabili različne tipe batnih kompresorjev proizvajalca Danfoss Compressors, d.o.o.

Primer kompresorja brez zgornjega dela ohišja prikazuje slika 3. Na sliki vidimo, da so sestavni deli kompresorja ohišje, kompresorska grupa, tlačna cevka, sesalni priključki ter električni priključek. Kompresorska grupa stoji na štirih vijačnih vzmeteh, nameščenih na dnu ohišja (prikazane so na sliki 3). Iz slike se vidi, da kompresorska grupa ni simetrična. Vzmeti so namenjene blaženju sil nihanj, ki se med zagonom in obratovanjem kompresorja prenašajo na okolico. V primeru napake iztaknjene vzmeti se kompresorska grupa izmakne iz ravnovesne lege. Povečajo se vibracije in sile, ki jih kompresor prenaša na okolico pri zagonu in med obratovanjem. V najslabšem primeru lahko vzmet poškoduje navitje elektromotorja. Tedaj se električna napetost preko vzmeti prenese na ohišje in lahko poškoduje človeka, ki pride v stik s takim kompresorjem.

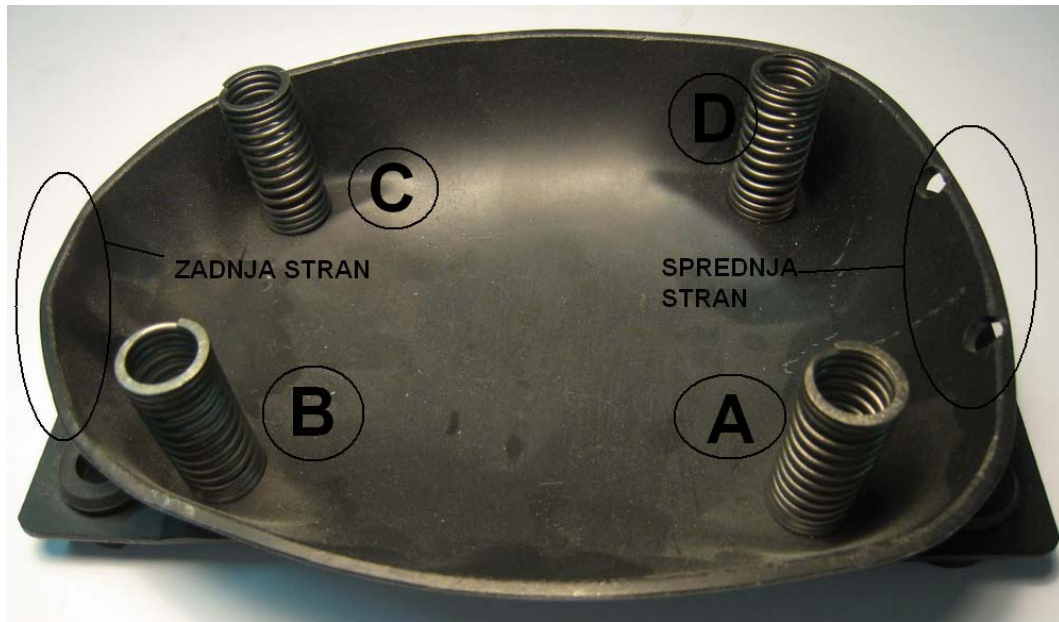


Slika 3: Posnetek batnega kompresorja proizvajalca Danfoss Compressors, d.o.o.

### 3.1.1 Opis napak

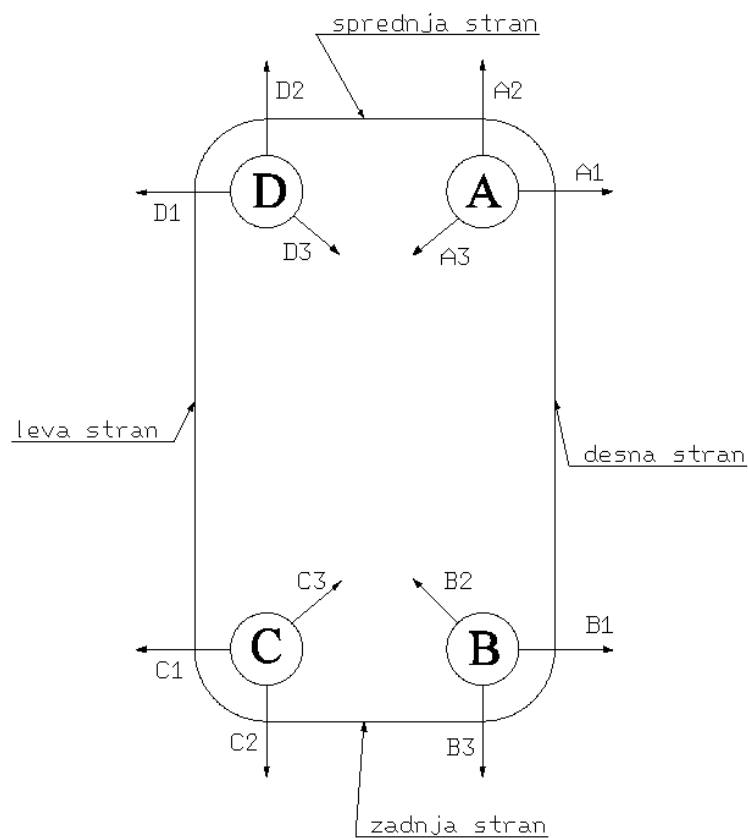
Pri nameščanju kompresorske grupe v ohišje se lahko zgodi, da grupa ni pravilno nameščena na vse štiri vzmeti v spodnjem delu ohišja. Zaradi nepravilne namestitve vzmet potiska grupo iz ravnovesne lege. Kompresor z iztaknjeno vzmetjo ni primeren za vgradnjo, ker se pri obratovanju poveča hrup in prenesejo vibracije v okolico. V podjetju so te napake dokaj redke, pogostost pojavljanja je okrog 2 %, toda nekatere lege iztaknjene vzmeti operaterji s končno kontrolo slabo razpoznavajo. Take kompresorje dobavijo kupcem, ki naredijo kontrolo kompresorjev tako, da testirajo določeno število le-teh in če ugotovijo napako na vzorcu, zavrnejo celotno serijo. S tem nastane velik strošek, čemur se v podjetju želijo izogniti.

Pri nameščanju lahko pride do treh različnih primerov iztaknjene vzmeti, ki se med seboj ločijo po smeri, v katero iztaknjena vzmet potiska kompresorsko grupo. Posamezne vzmeti smo na sliki 4 označili s črkami A, B, C in D. Vsaka vzmet lahko potiska kompresorsko grupo v eno izmed treh smeri, ki so na sliki 5 označene s številkami 1, 2 in 3. Smeri puščic na sliki ponazarjajo smeri, kamor se izmakne vzmet. Poznamo še poseben primer napake vzmeti: napaka manjkajoče vzmeti. Tedaj grupa na mestu z manjkajočo vzmetjo ni podprta. To napako odkrivajo v podjetju z drugim postopkom, zato v tem primeru ni zahteva, da bi jo prepoznali.



Slika 4: Posnetek spodnjega dela ohišja z vzmetmi, na katere je natakljena kompresorska grupa s posebnimi nastavki

Skupno smo razvrstili 12 različnih realizacij napak iztaknjene vzmeti. Njihove oznake in opis so podani v tabeli 2.



Slika 5: Označevanje različnih tipov napak, povezanih z iztaknjeno vzmetjo. Črke označujejo posamezno vzmet, številke pa njene različne lege. Puščice kažejo smer, kamor se izmakne vzmet.

Oznaka napake	Opis napake
A1	Vzmet A tišči grupo proti levi strani ohišja
A2	Vzmet A tišči grupo proti zadnji strani ohišja
A3	Vzmet A tišči grupo proti sprednji strani ohišja
B1	Vzmet B tišči grupo proti levi strani ohišja
B2	Vzmet B tišči grupo proti sprednji strani ohišja
B3	Vzmet B tišči grupo proti sprednji strani ohišja
C1	Vzmet C tišči grupo proti desni strani ohišja
C2	Vzmet C tišči grupo proti sprednji strani ohišja
C3	Vzmet C tišči grupo proti sprednji strani ohišja
D1	Vzmet D tišči grupo proti desni strani ohišja
D2	Vzmet D tišči grupo proti zadnji strani ohišja
D3	Vzmet D tišči grupo proti sprednji strani ohišja

**Tabela 2: Oznake in opis različnih napak iztaknjene vzmeti**

Slika 6 prikazuje spodnji del kompresorja, ki ima pravilno nameščene vzmeti na zatike. Slika 7 prikazuje kompresor z napako iztaknjene vzmeti na mestu C, saj vzmet potiska kompresorsko grupo proti sprednjem delu, tako da ji priredimo število 3. Napako imenujemo C3. Slika 8 prikazuje kompresor, ki ima iztaknjeno vzmet na mestu C, vendar vzmet pritiska kompresorsko grupo proti zadnjem delu ohišja, zato ji priredimo število 2. Napako označimo z C2. Slika 9 prikazuje iztaknjeno vzmet na mestu 2. Vzmet sili kompresor v stran, zato ji priredimo število 1. Napako imenujemo B1. Na sliki 9 se vidi, kako se kompresorska grupa izmakne iz ravnovesne lege, če pogledamo vzmet na mestu C.



**Slika 6: Pravilna postavitev vzmeti**



**Slika 7: Kompresor z napako C3, ki kompresorsko grupo potiska naprej proti sprednji strani ohišja**



**Slika 8: Kompresor z napako C2, ki kompresorsko grupo potiska proti zadnji strani ohišja**

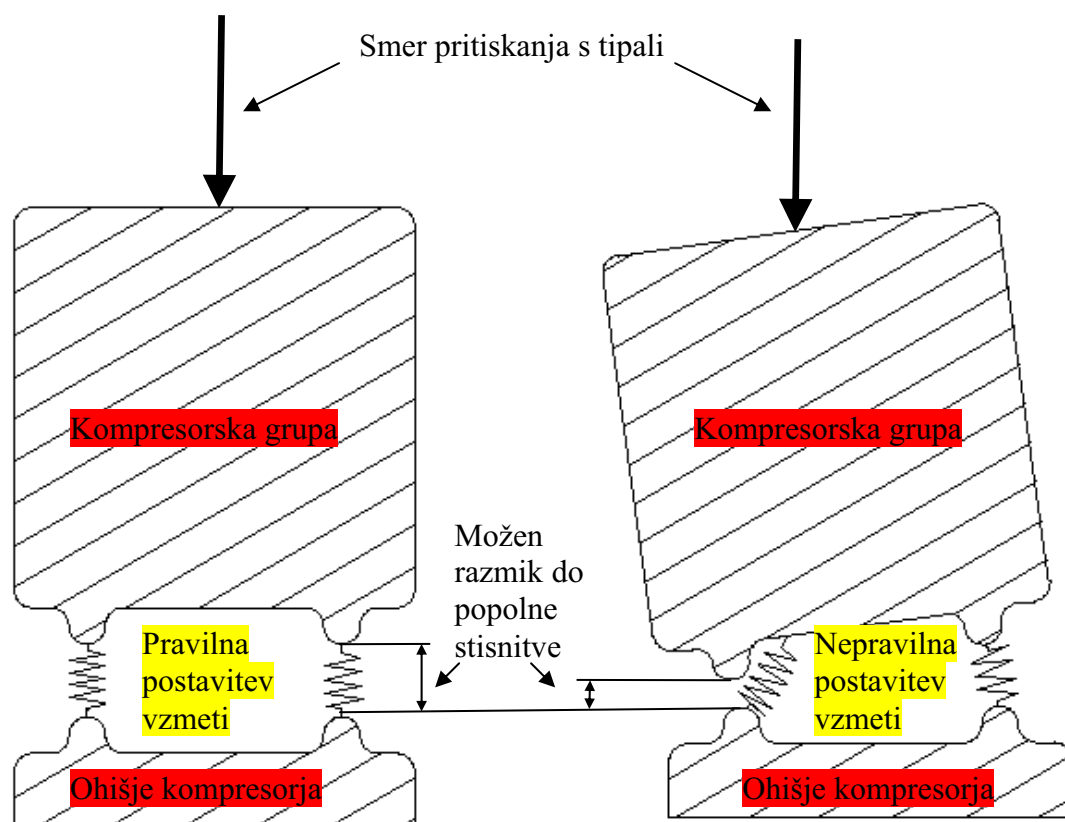


**Slika 9: Kompresor z napako B1, ki kompresorsko grupo potiska vstran**

### ***3.2 Eksperimentalni sistem***

Namen sistema za avtomatsko razpoznavanje napak je zajemanje signalov sil, pretvorba zajetih signalov v diskretno časovno vrsto ter prenos in shranjevanje časovnih vrst signalov v računalnik. Najpomembnejši del sistema je diagnostika, s katero razpoznavamo napake iztaknjenih vzmeti pri kompresorjih. Diagnosticiramo na osnovi časovnih vrst signalov, dobljenih iz procesa.

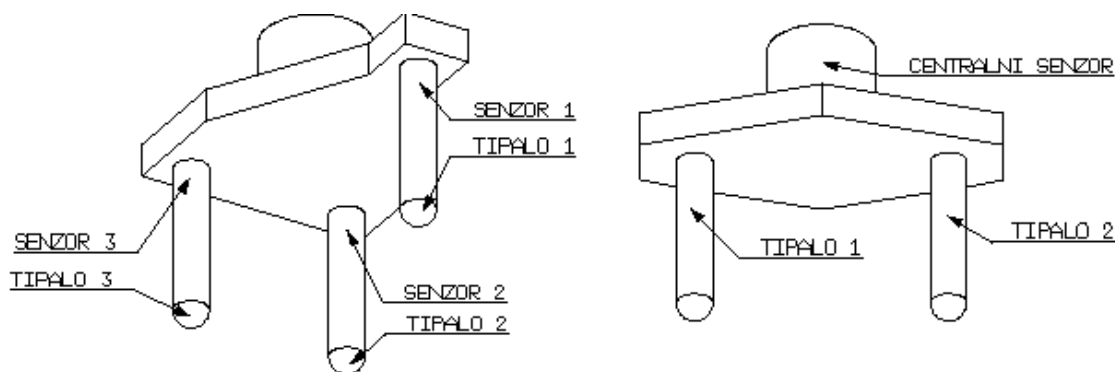
Napake iztaknjenih vzmeti želimo razpoznavati s pomočjo signalov sil, ki jih dobimo, ko zvrha pritismo kompresorsko grupo ob ohišje. Iztaknjena vzmet povzroči, da se kompresorska grupa izmakne iz osnovnega položaja. Pritisk pnevmatičnega valja na kompresor z iztaknjeno vzmetjo povzroči, da iztaknjena vzmet zavira pritisk grupe in posledično je na tem mestu možen manjši vertikalni pomik. Pnevmatični valj s tipali je nastavljen tako, da ima vedno enak vertikalni pomik. V primeru iztaknjene vzmeti je možen manjši vertikalni pomik, kot bi ga imeli, če bi bil kompresor brez napak iztaknjenih vzmeti. Manjši vertikalni pomik zaznamo s povečanjem sile na senzorju. Na tak način razpoznavamo napake vzmeti. Slika 10 shematsko prikazuje kompresor s pravilno postavitvijo vzmeti in kompresor z nepravilno postavitvijo vzmeti. Iz slike vidimo, da če imamo iztaknjeno vzmet, se razmik do popolne stisnitve zmanjša, kar se rezultira v povečani sili na senzorju.



**Slika 10: Shematski prikaz kompresorja s pravilno postavitvijo vzmeti (leva slika) in nepravilno postavitvijo vzmeti (desna slika)**

Pri izgradnji sistema smo najprej preskusili različne možnosti za zajem signalov sil. Poskuse smo izvajali z dvema različnima senzorskima glavama, ki sta pritrjeni na koncu bata pnevmatičnega valja. Slika 11 shematsko prikazuje senzorski glavi, kjer so označena tipala in senzori za vsako glavo. Prva senzorska glava je bila opremljena s tremi tipali in tremi senzori. V tem primeru dobimo tri časovne vrste signalov, iz katerih lahko določimo več značilk. Na osnovi primerjave značilk kompresorjev brez napak in kompresorjev z napakami nato razpoznavamo in razvrščamo kompresorje. Slabost sistema s tremi tipali je zapletenost sistema za uporabo na proizvodni liniji v podjetju.



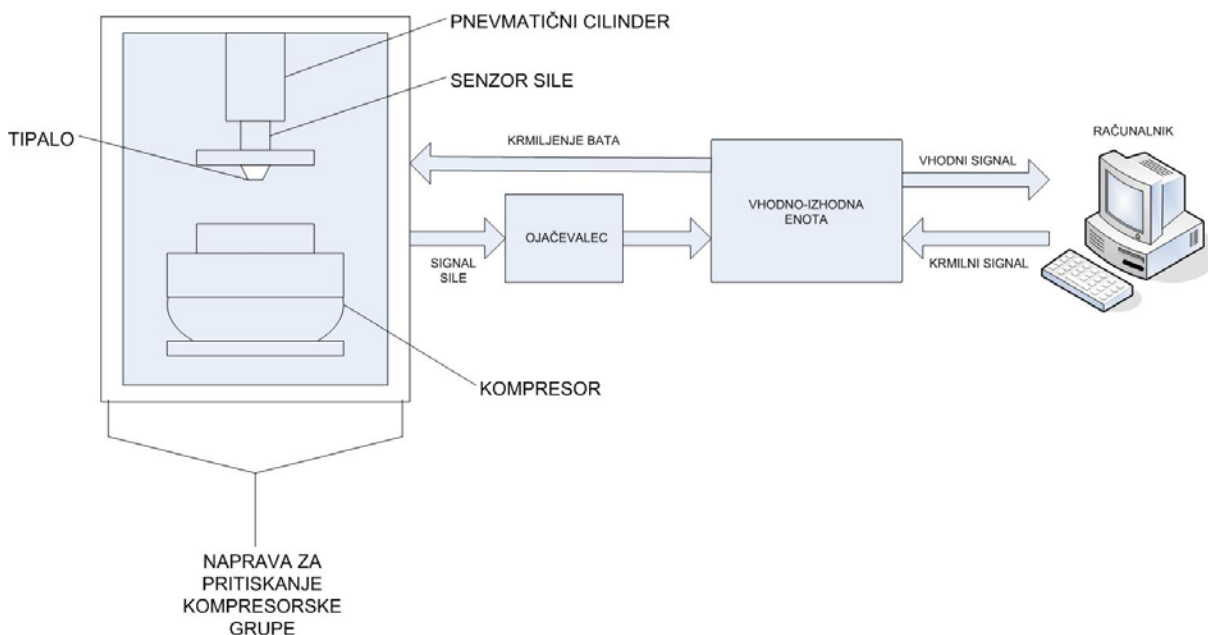


Slika 11: Prikaz različnih senzorskih glav

Druga glava pa ima dvoje tipal in le en centralni senzor sile. S tem senzorjem dobimo eno časovno vrsto signalov, iz katere določimo eno značilko. Z primerjavo značilk kompresorjev brez napak in kompresorjev z napakami nato razpoznavamo in razvrščamo kompresorje. Prednost sistema z enim centralnim senzorjem je enostavna uporaba v industrijskem okolju.

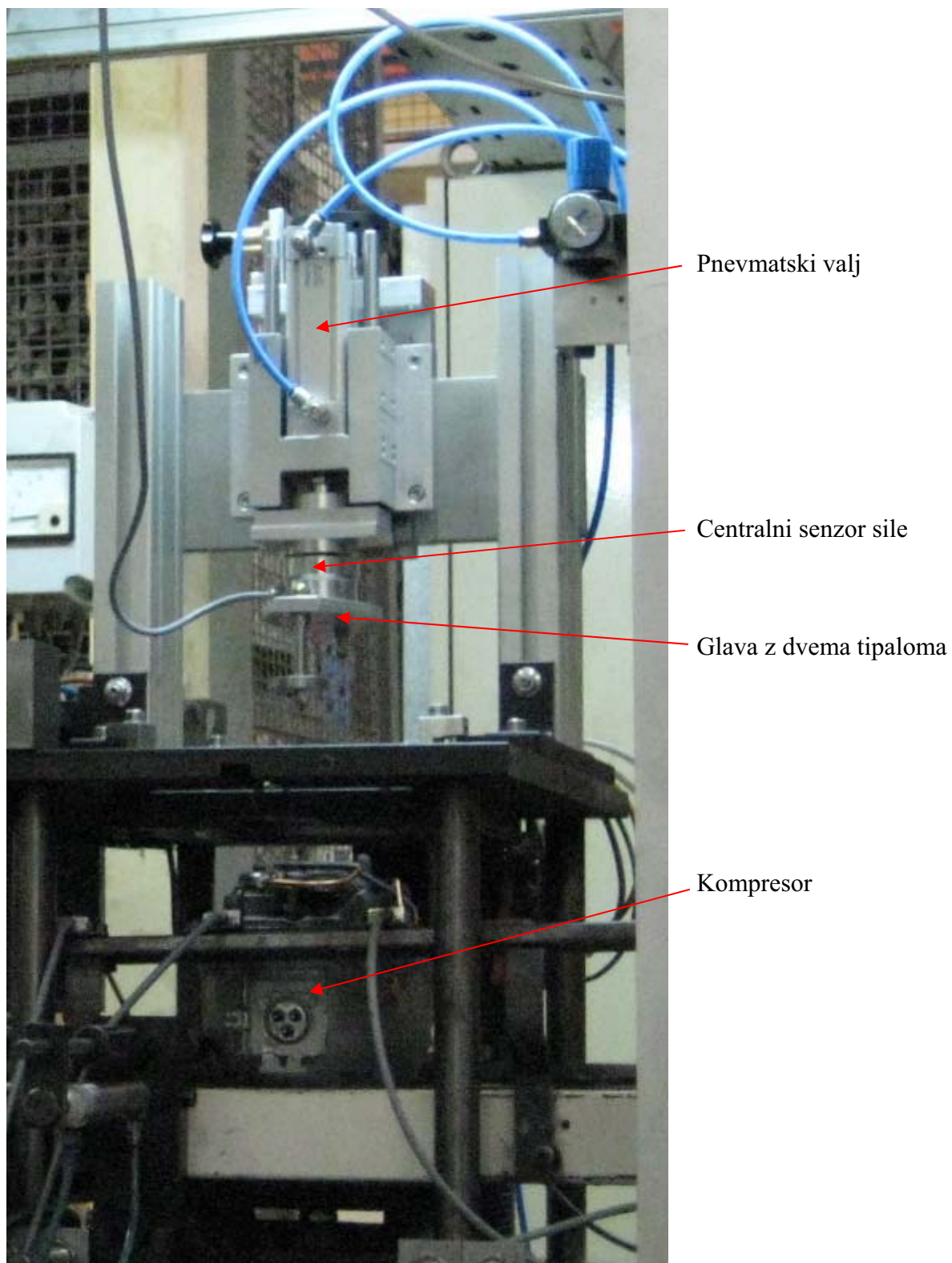
Tipala na senzorski glavi so postavljena tako, da lahko pritisnemo na kompresorsko grupo. Zaradi zelo razgibane zgornje površine kompresorske grupe lahko pritisnemo kompresorsko grupo le na določenih mestih, zato dobimo tako postavitev tipal na glavi.

Za izgradnjo industrijskega sistema za razpoznavanje napak je bila izbrana druga senzorska glava, saj smo ugotovili, da z enim senzorjem zadovoljivo prepoznavamo napake iztaknjenih vzmeti na kompresorju. Glavne prednosti sistema z enim centralnim senzorjem so enostavnost sistema za zajemanje signalov, enostavnost programskega dela za obdelavo časovnih vrst signalov in diagnostike na osnovi ene značilke. V podjetju Danfoss Compressors, d.o.o. je postavljen merilni sistem za avtomatsko razpoznavanje iztaknjenih vzmeti na kompresorjih z enim senzorjem. Shema uporabljenega sistema je prikazana na sliki 12.



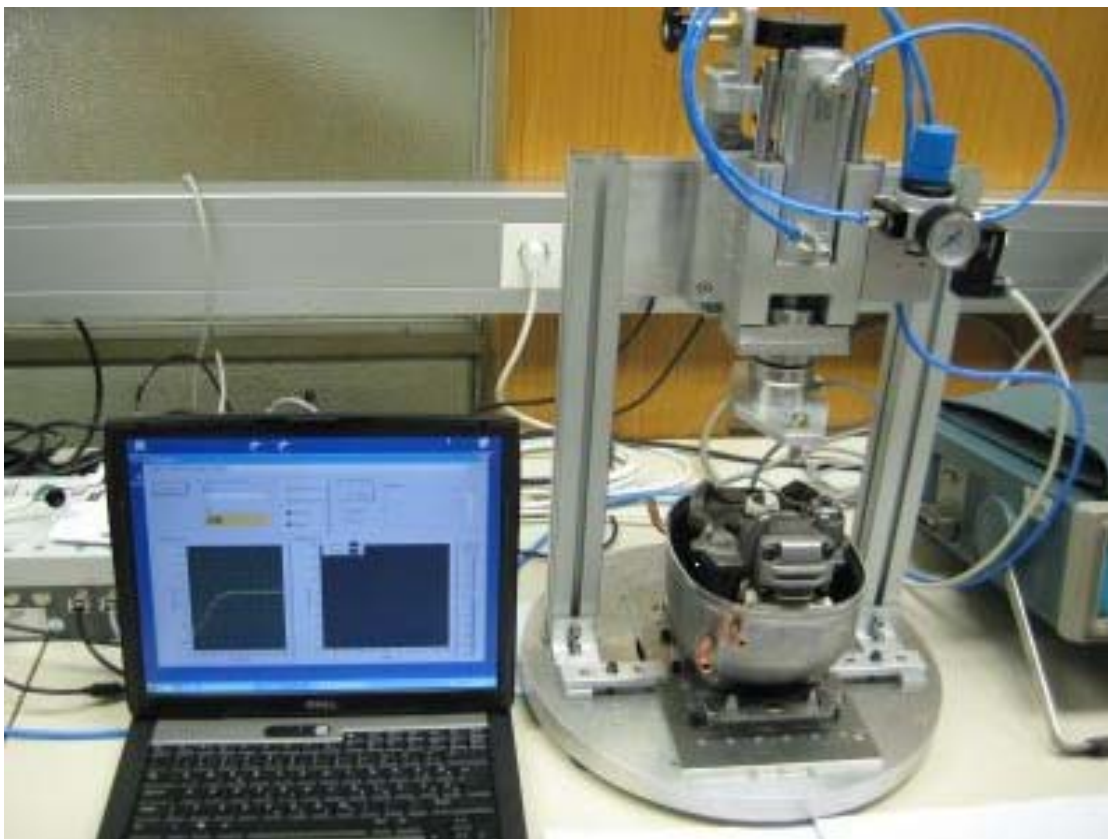
Slika 12: Shema sistema za avtomatsko razpoznavanje napak iztaknjenih vzmeti

Slika 13 prikazuje sistem za avtomatsko razpoznavanje napak iztaknjenih vzmeti na kompresorjih. Na sliki so predstavljeni osnovni deli sistema za zajem signala sile.



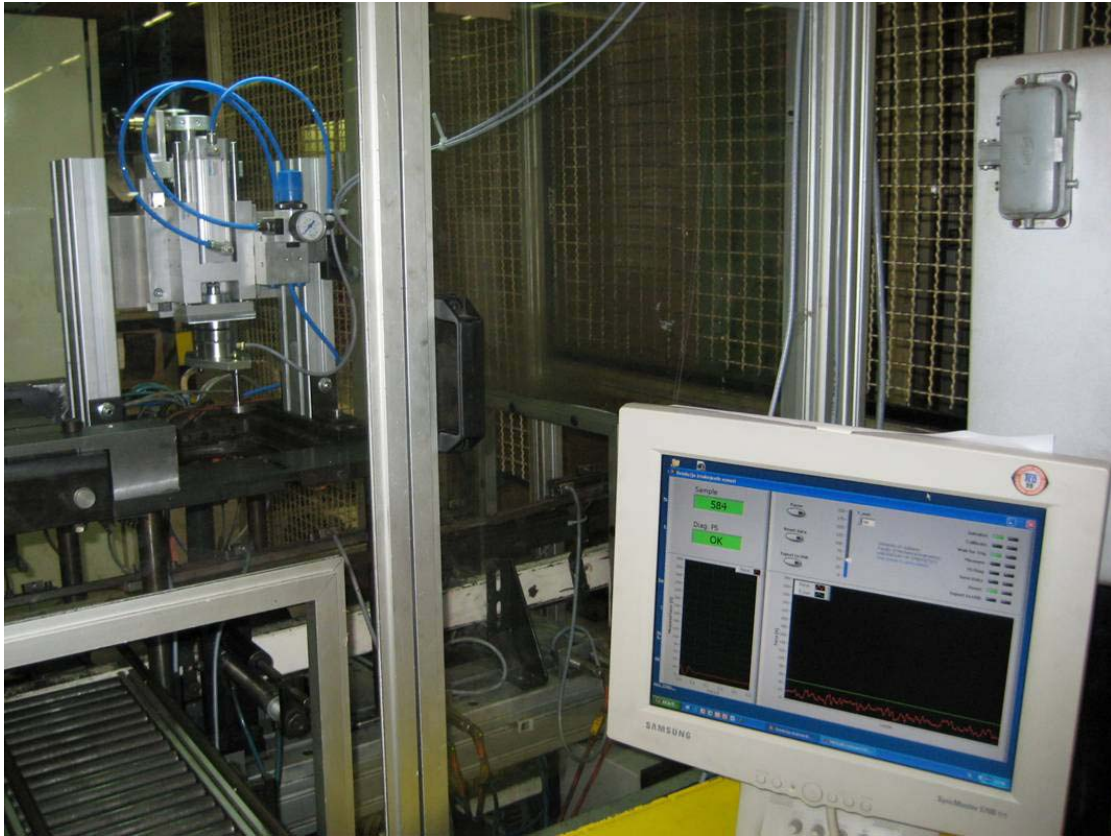
**Slika 13: Prikaz glavnih delov sistema za avtomatsko razpoznavanje napak na kompresorjih v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o.**

Sistem za avtomatsko razpoznavanje napak se sestoji iz naprave za pritiskanje grupe, ojačevalca, vhodno-izhodne enote in računalnika. Naprava za pritiskanje grupe je sestavljena iz nosilne konstrukcije, na kateri je pritrjen pnevmatični cilindar (FESTO: DNC-32-60-PPV-A). Na bat cilindra je vpet senzor sile (HBM U3/5kN). Na koncu imamo vpeto posebno glavo, izdelano v Laboratoriju za Sinergetiko, ki ima dve tipali, ki pritiskata kompresorsko grupo ob ohišje. Po pritisku bata kompresorske grupe vodimo signal sile iz senzorja na ojačevalec (HBM AE301). Ojačan signal vodimo na merilno kartico (National Instruments NI PCI-6232), v kateri se izvaja pretvorba v diskretno časovno vrsto. Merilno kartico upravljamo z lastno razvito programsko opremo v okolju LabView 8.2. Na sliki 14 je prikazan eksperimentalni sistem v Laboratoriju za Sinergetiko Fakultete za strojništvo v Ljubljani.



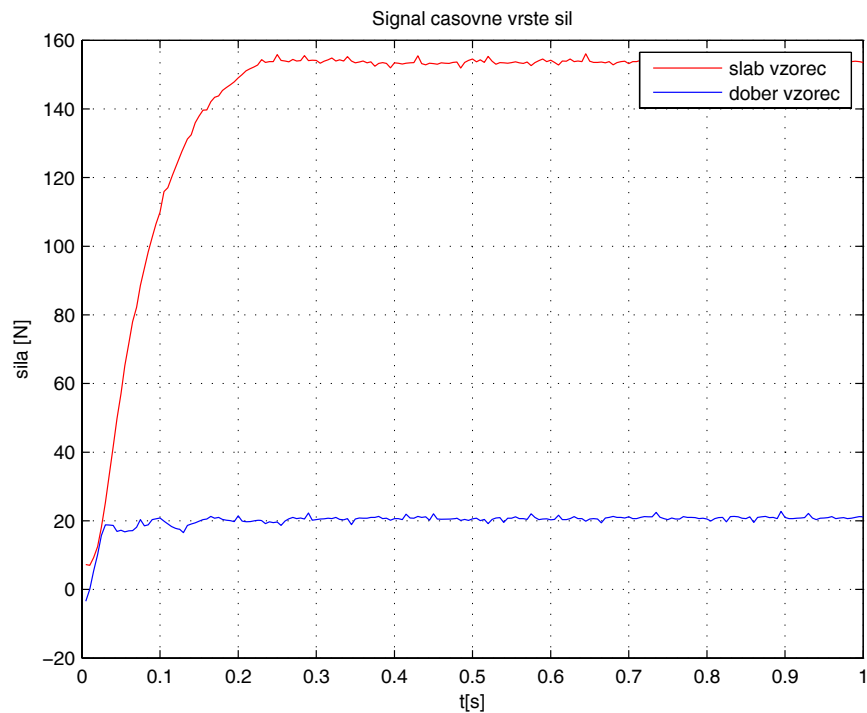
**Slika 14: Slika prikazuje eksperimentalni sistem v Laboratoriju za Sinergetiko Fakultete za strojništvo v Ljubljani**

Slika 15 prikazuje sistem za avtomatsko razpoznavanje iztaknjenih vzmeti, ki je postavljen na proizvodni liniji v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o.



**Slika 15:** Slika prikazuje sistem za avtomatsko razpoznavanje iztaknjenih vzmeti, ki postavljen na proizvodni liniji v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o.

Slika 16 prikazuje časovno vrsto signala sile, ki ga zajamemo na sistemu za avtomatsko zaznavanje napak iztaknjenih vzmeti z eno meritvijo.



**Slika 16:** Prikaz časovne vrste signala sile, ki ga zajamemo z eksperimentalnim sistemom

Na sliki 16 sta prikazana dva signala. Z modro je prikazan signal sile, ko opravimo meritev kompresorja brez napak, z rdečo pa je prikazan signal sile, ko kompresor vsebuje eno od napak iztaknjenih vzmeti.

### 3.2.1 Izpeljava značilke

Vektorske časovne vrste je težko primerjati med seboj, ker vsebujejo veliko podatkov, zato je potrebno vpeljati pojem značilke. Značilka je v našem primeru skalarno število, ki smo ga izpeljali iz časovne vrste signala sile. To smo naredili z namenom, da se lahko signali sil primerjajo med seboj. V našem primeru smo si za značilko izbrali nivo, ki ga doseže signal sile po prehodnem pojavu. Značilko definiramo z naslednjo enačbo, ki pomeni povprečenje signala sile  $F$  v izbranem intervalu  $[N_1, N_2]$ :

$$z = \frac{1}{N_{1-2}} \sum_{i=N_1}^{N_2} F_i \quad (10)$$

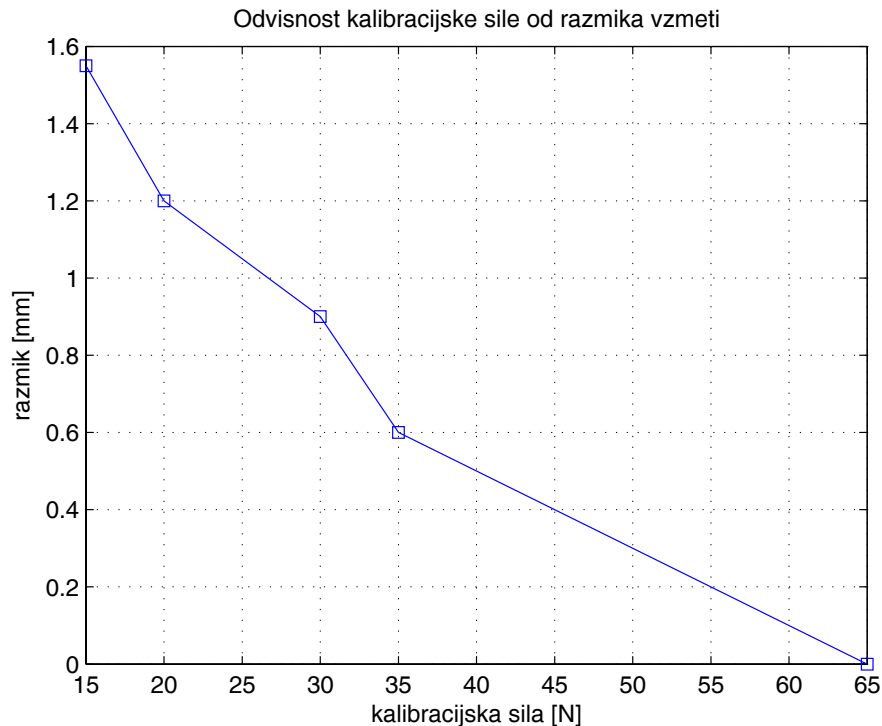
Število vzorcev v tem intervalu označimo z  $N_{1-2}$ . Interval sile izberemo v času  $t = [0,3, 1]$  sekunde, ko je že dosežen maksimalni nivo sile. Posamezno vrednost sile v določenem času označimo z  $F_i$ . Na sliki 13 je nivo vzorca brez napake okrog 20 N, medtem ko je nivo vzorca z napako okrog 150 N. Ta dva nivoja imenujemo značilki. Iz primerjave teh dveh značilk lahko takoj ugotovimo, da ima kompresor z napako iztaknjene vzmeti višjo vrednost značilke kot kompresor brez napak. Na osnovi teh značilk razlikujemo kompresorje brez napak in kompresorje z napakami iztaknjenih vzmeti.

### 3.2.2 Določitev kalibracijske sile

Kalibracijska sila je sila, s katero tipala v končni (spodnji) legi pritiskajo na kompresorsko grupo. Za pravilno delovanje sistema za avtomatsko razpoznavanje iztaknjenih vzmeti pri kompresorjih je potrebno izbrati kalibracijsko silo, s katero zagotovimo stabilno populacijo značilk. Nastavitev kalibracijske mora biti takšna, da dobimo stabilno populacijo vrednosti značilk in da hkrati te vrednosti značilk niso premajhne, saj nam manjša stisnitev vzmeti pomeni manjšo občutljivost sistema za avtomatsko razpoznavanje napak iztaknjenih vzmeti.

Pri testiranju smo ugotovili, da je pritisk z veliko kalibracijsko silo s tipali na kompresorsko grupo povzročil povečane vrednosti značilk. Pri tem se je lahko zgodilo, da smo dobili nestabilno populacijo vrednosti značilk zaradi prevelikega nihanja kakovosti kompresorjev. Izvedli smo test z merilnimi lističi, kjer smo merili zračnost vzmeti med pritiskom na kompresorsko grupo z določeno silo. Pri montaži kompresorjev na liniji v podjetju se kompresorska grupa namesti na podporne vzmeti. Pri tem se podporne vzmeti malo stisnejo zaradi teže kompresorske grupe. Preostali razmik imenujemo razdaljo do popolne stisnitve vzmeti. Večja kalibracijska sila pomeni

manjši razmik do končne stisnitve vzmeti. Na sliki 17 je prikazana odvisnost razmika od kalibracijske sile.



Slika 17: Diagram razmerja sila-razmik za vzmeti v kompresorju

Testiranje smo pričeli s kalibracijsko silo 40 N, v tem primeru nismo dobili stabilne populacije. Z zmanjšanjem kalibracijske sile na 20 do 30 N smo dosegli stabilno populacijo. Iz diagrama na sliki 17 se vidi, da je razmik ali zračnost do popolne stisnitve vzmeti pri sili 25 N še okrog 1 mm. Iz navedenega smo sklepali, da je nihanje proizvodnega procesa in kakovosti izdelave tolikšna, da višine kompresorskih grup nihajo za 1 mm. Z manjšo zračnostjo nismo dobili stabilne populacije. Senzorski sistem je zelo občutljiv na povečanje sile. V primeru, da je vzmet stisnjena, vsak mali dodatni vertikalni pomik tipala pomeni velikanski skok sile, kar se odraža na povečani vrednosti značilke.

### 3.3 Opis poizkusov

Testiranje in prilagajanje sistema za avtomatsko zaznavanje nepravilne lege vzmeti je potekalo v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o. Sistem, ki deluje na liniji v podjetju ima en centralni senzor sile in glavo z dvema tipaloma. S tem senzorjem se zajame pri eni meritvi ena časovna vrsta signala sile. Iz signala sile se izpelje skalarna značilka z za vsako opravljeno meritev. S to značilko smo poskusili ločiti kompresorje z eno izmed napak iztaknjene vzmeti od kompresorjev brez napak. V ta namen smo naredili testiranja v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o., kjer smo testirali postavljeni sistem za avtomatsko razpoznavanje napak vzmeti. Testirali smo več vrst kompresorjev z različnimi vzmetmi, ki jih izdelujejo v podjetju. Podatki o vrednostih značilk so se

shranjevali s pomočjo računalniškega programa v podatkovne datoteke. Podatke smo nato uporabili za določevanje različnih odločitvenih pragov. Testiranje je potekalo na proizvodni liniji kompresorjev med rednim obratovanjem proizvodnje. Cilji testiranja na liniji so bili naslednji:

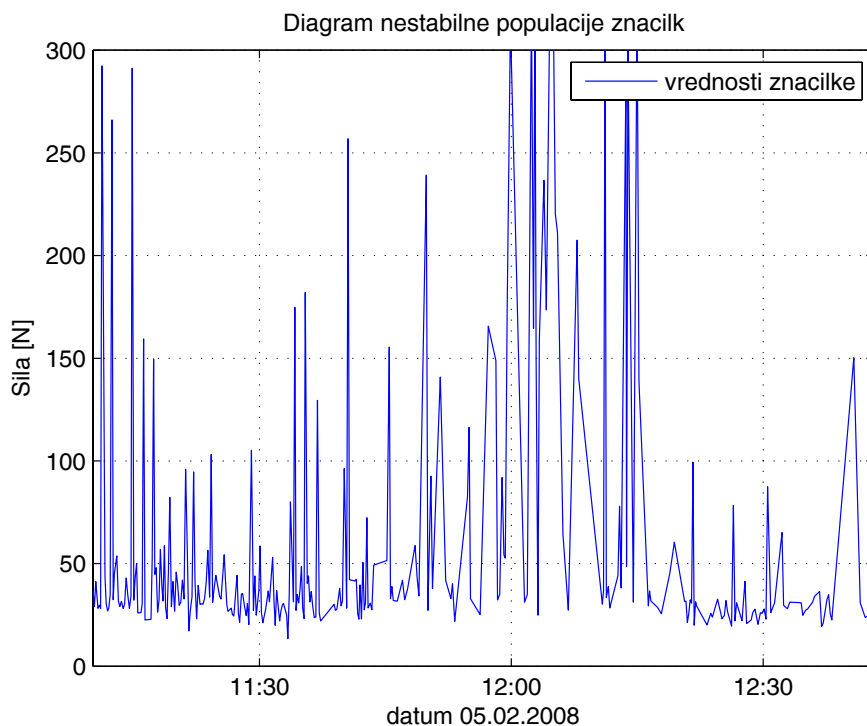
- ugotoviti zmožnost sistema za zaznavanje napak iztaknjenih vzmeti,
- ugotoviti ustrezen interval kalibracijske sile,
- ugotoviti primerno strategijo za nastavitev odločitvenega pragu,
- preskusiti metodo na različnih tipih kompresorjev.

Testiranje je potekalo tako, da smo določili silo, s katero naj pnevmatični cilinder pritisne prek tipal na zgornji del kompresorja. Sila je morala biti takšna, da smo zagotovili stabilno populacijo vrednosti značilnk. Zatem smo začeli z vnosom napak v kompresorje. Vgradili smo možne napake iztaknjenih vzmeti. Kompresorje z napako smo postavili na linijo, kjer smo jih nato razpoznavali s pomočjo značilnk, izpeljanih iz signala sile, ki smo ga dobili z meritvijo. Najprej smo napake vgrajevali v hladne kompresorje, nato še v tople kompresorje, saj sistem za avtomatsko razpoznavanje napak stoji za pečjo in so kompresorji na liniji še topli. Testiranje v podjetju je potekalo po naslednjih korakih:

1. Natančen popis kompresorja, ki se nahaja na liniji.
2. Spremljanje populacije dobrih kompresorjev in opazovanje stabilnosti značilke.
3. Preskušanje različnih kalibracijskih sil.
4. Iskanje primernega razpona kalibracijske sile.
5. Vnašanje napak v kompresorje. Pošiljanje kompresorjev z napako na linijo.
6. Iskanje primernega ročno nastavljivega odločitvenega pragu.

Najprej je bilo potrebno ugotoviti, ali je sistem z enim senzorjem primeren za reševanje problematike. Z zajemom signalov smo morali zagotoviti stabilno populacijo vrednosti značilnk vzorcev, to pomeni populacijo, ki ima približno normalno porazdelitev vzorcev. V nasprotnem primeru nismo mogli uporabljati odločitvenih pragov po prvi strategiji, ker smo imeli prevelik raztros vrednosti značilnk. Stabilno populacijo vrednosti značilnk smo si zagotovili s pravilno izbiro kalibracijske sile. Kalibracijska sila je sila, s katero pritisnemo tipalo ob kompresorsko grupo.

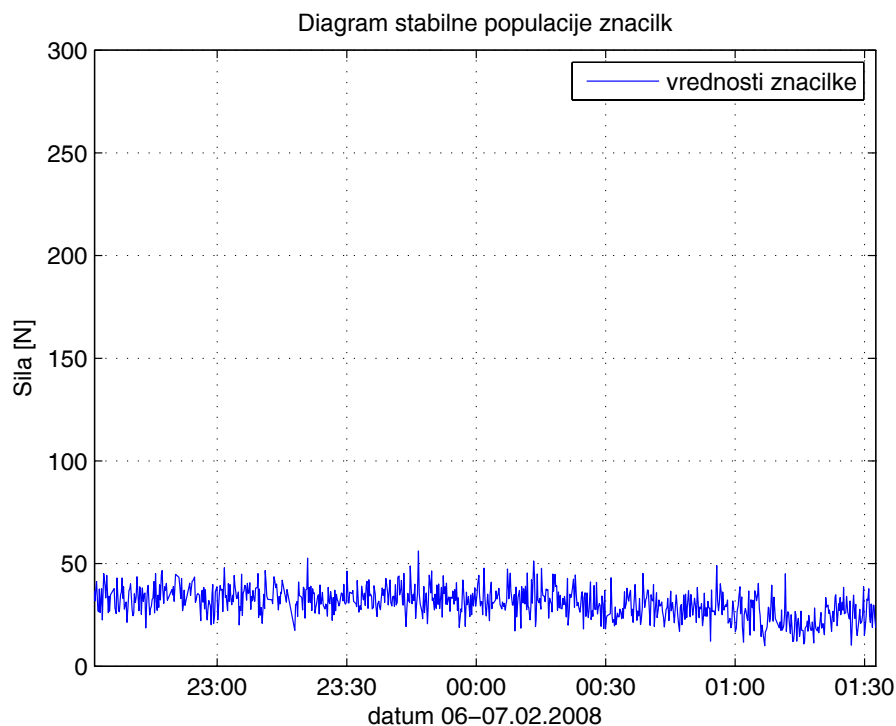
Slika 18 prikazuje diagram nestabilne populacije vrednosti značilnk, ki smo jo izmerili na proizvodni liniji. Ugotovili smo, da je bila kalibracijska sila prevelika, zato nam že majhne spremembe kakovosti kompresorjev rezultirajo v zelo povečani sili na senzorju. V tem primeru nismo mogli določiti odločitvene meje, ker nam je sistem prevečkrat napačno prepoznal kompresorje brez napake. To ni bilo sprejemljivo, ker operaterji ne morejo pregledati tako velikega števila kompresorjev.



**Slika 18: Primer diagrama nestabilne populacije značilk**

Slika 19 prikazuje primer stabilne populacije, ki jo dobimo iz meritev, opravljenih na proizvodni liniji kompresorjev v podjetju. Iz diagrama se vidi, da so bile vrednosti značilk stabilnejše, zato smo lahko določili uporabno odločitveno mejo. Iz diagrama vidimo tudi nihanje industrijskega procesa. Na različnih odsekih grafa se povprečne vrednosti značilk razlikujejo, zato smo sklepali, da bi z spremenljivim pragom odločitve dobili boljšo razpoznavnost napak iztaknjenih vzmeti. Za optimalno prepoznavanje vzorcev je bilo potrebno določiti pravilno kalibracijsko silo. Večja kalibracijska sila nam je pomenila boljšo razpoznavnost vzorcev, vendar nismo dobili stabilne populacije. Manjša kalibracijska sila nam je dala bolj stabilno populacijo, vendar na račun slabše razpoznavnosti. Poiskati je bilo potrebno območje kalibracijske sile, ki nam da optimalno razpoznavanje vzorcev.

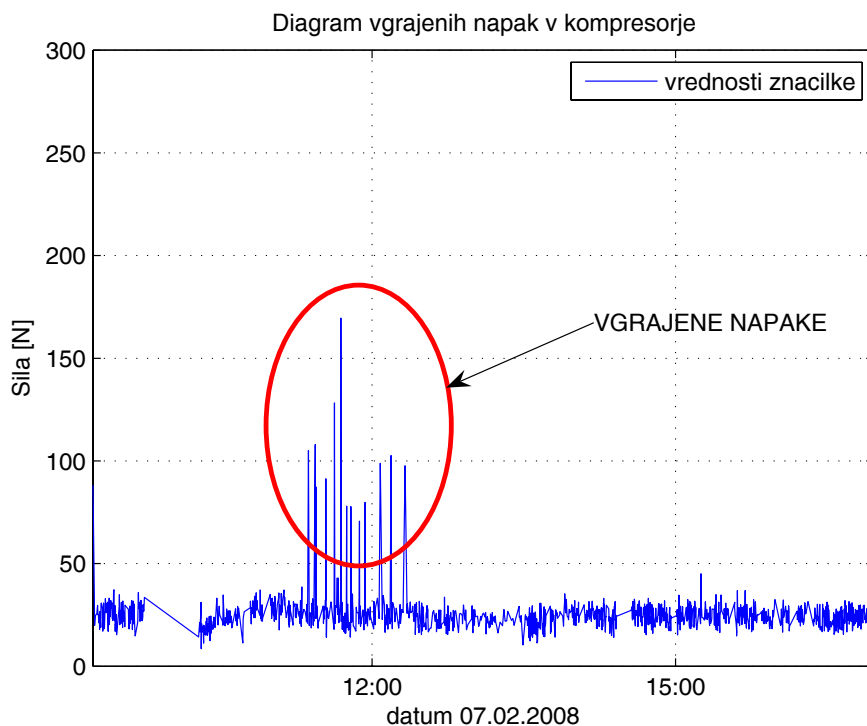




**Slika 19: Primer diagrama stabilne populacije značilk**

Pri testiranju smo uspešno dosegli stabilno populacijo, kar je bil pogoj za nadaljevanje. Nadaljevali smo z vgrajevanjem napak v kompresorje. Kompresorje smo vzeli iz proizvodne linije in vanje vgradili napake iztaknjene vzmeti. Te smo postavili nazaj na linijo in preskušali razpoznavnost napak s pomočjo postavljenega sistema. Odločitveno mejo smo ročno nastavili na 50 N. Pri testiranju smo ugotovili, da je razpoznavnost različnih vrst napak iztaknjenih vzmeti različna. Nekatere izmed napak so zelo povečale silo na tipalih in so bile zelo dobro razpoznane. Največ problemov smo imeli z napako iztaknjene vzmeti na mestu B.

Na sliki 20 so prikazane meritve z vgrajenimi napakami. Vrednosti značilk kompresorjev v primerjavi z vrednostmi značilk kompresorjev brez napak so veliko višje. Take vrednosti enostavno ločimo z odločitveno mejo. Pri poizkusih so se pojavljali problemi. Določeni tipi napak niso bili zaznani, ker so bile vrednosti značilk pod ročno nastavljenim odločitvenim pragom. Ugotovili smo, da se razpoznavnost z različnimi tipi kompresorjev in vzmeti bistveno ne spreminja.



**Slika 20: Izvedene meritve z vgrajenimi napaki iztaknjenih vzmeti**

### 3.4 Prikaz rezultatov

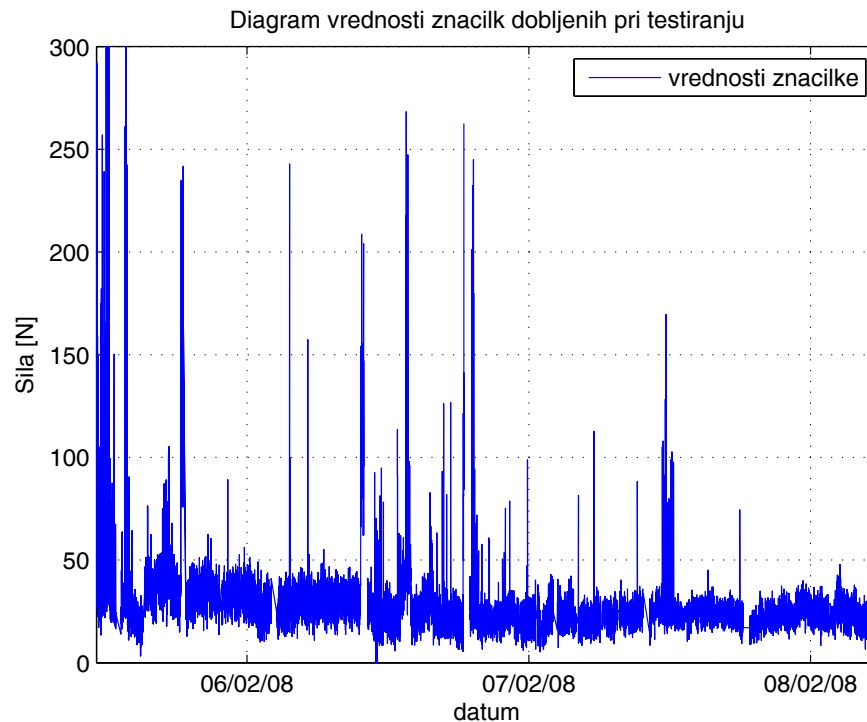
V podjetju Danfoss Compressors, d.o.o. je testiranje in prilagajanje sistema potekalo tri dni, od 5. 2. 2008 do 7. 2. 2008. V tem času smo poskušali zagotoviti stabilno populacijo vzorcev in testirati čim več napak iztaknjenih vzmeti na različnih tipih kompresorjev. V treh dneh smo na liniji preizkusili okrog 17000 kompresorjev. Od tega smo vgradili več kot 120 različnih napak iztaknjenih vzmeti v kompresorje in jih razpoznavali s pomočjo avtomatskega sistema. Tabela 3 prikazuje tipe kompresorjev in tipe vzmeti, ki smo jih testirali v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o.

datum	ura	tip kompresorja	tip vzmeti	hod vzmeti [mm]
5.2.2008	/	5620	4964	48,5
5.2.2008	15:10	6773 (nižji tip)	4965	neopredeljen
6.2.2008	10:10	neopredeljen	neopredeljen	neopredeljen
6.2.2008	19:00	6731 (najnižji tip)	4958	33

**Tabela 3: Prikaz različnih tipov vzmeti in kompresorjev, na katerih smo izvajali testiranje**

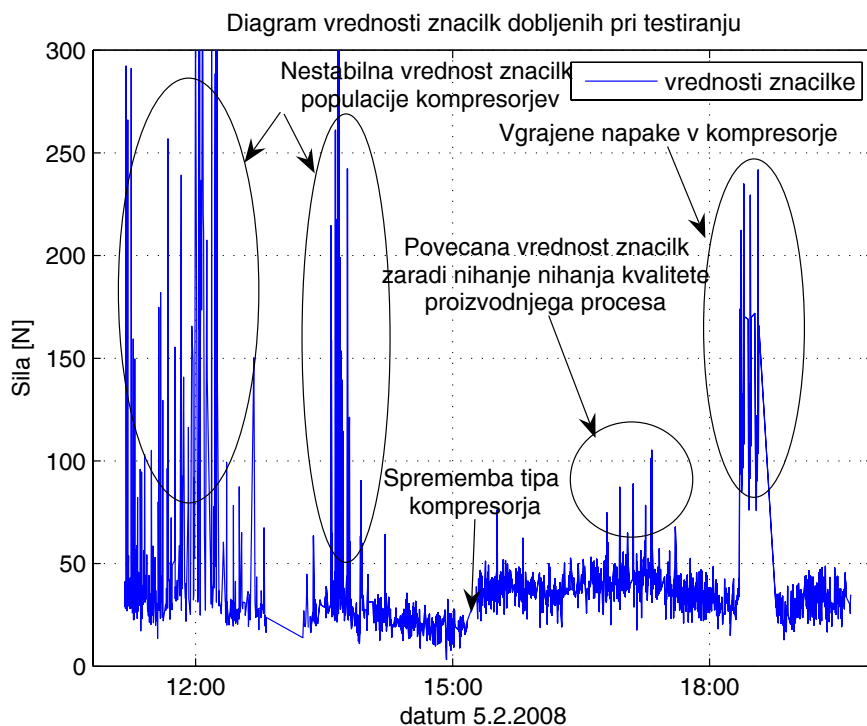
Testirali smo štiri različne tipe vzmeti in kompresorjev. Bistvenih razlik med tipi vzmeti in tipi kompresorjev nismo opazili. Sistem za avtomatsko razpoznavanje je na vseh tipih vzmeti in kompresorjev deloval zadovoljivo. Za primerjavo in iskanje razlik razpoznavanja med tipi kompresorjev in vzmeti bi bilo potrebno narediti več in bolj usmerjenih meritev v podjetju. Slika 21 prikazuje podatke dobljene pri testiranju v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o. Zelo povečane vrednosti značilnk nam prikazujejo napake iztaknjenih vzmeti. Naša naloga je bila določiti prag, kjer bo največ

kompressorjev z napako vzmeti prepoznanih kot slabih in kar največ kompressorjev brez napake vzmeti prepoznanih za dobre.



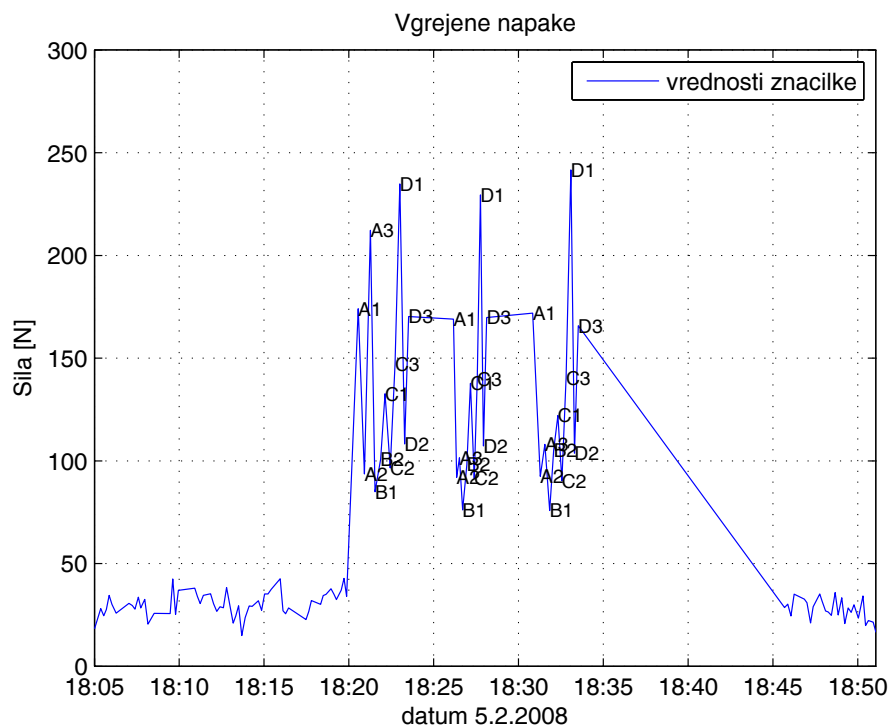
**Slika 21: Diagram prikazuje vrednosti značilke, ki smo jih dobili pri testiranju sistema za avtomatsko razpoznavanje napak vzmeti v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o.**

Slika 22 prikazuje pričetek meritev na sistemu za avtomatsko razpoznavanje napak iztaknjenih vzmeti v podjetju. V diagramu vidimo, da smo imeli približno do 13:00 ure problem s stabilizacijo vrednosti značilke. Stabilnost značilke smo nato dosegli z zmanjšanjem kalibracijske sile. Okrog 15:00 vidimo na diagramu dvig srednje vrednosti značilke, takrat se je zamenjal tudi tip kompresorja. Vrednosti značilke so se bolj stabilizirale, vendar so se pojavili primeri, ki so zelo odstopali od povprečja. Te kompresorje smo pregledali in ugotovili, da so brez napak iztaknjenih vzmeti. Povečano silo smo pripisali nihanju kvalitete proizvodnje kompresorjev. Po 18:00 uri smo vgradili set napak iztaknjenih vzmeti, povišane vrednosti so lepo vidne na sliki 22.



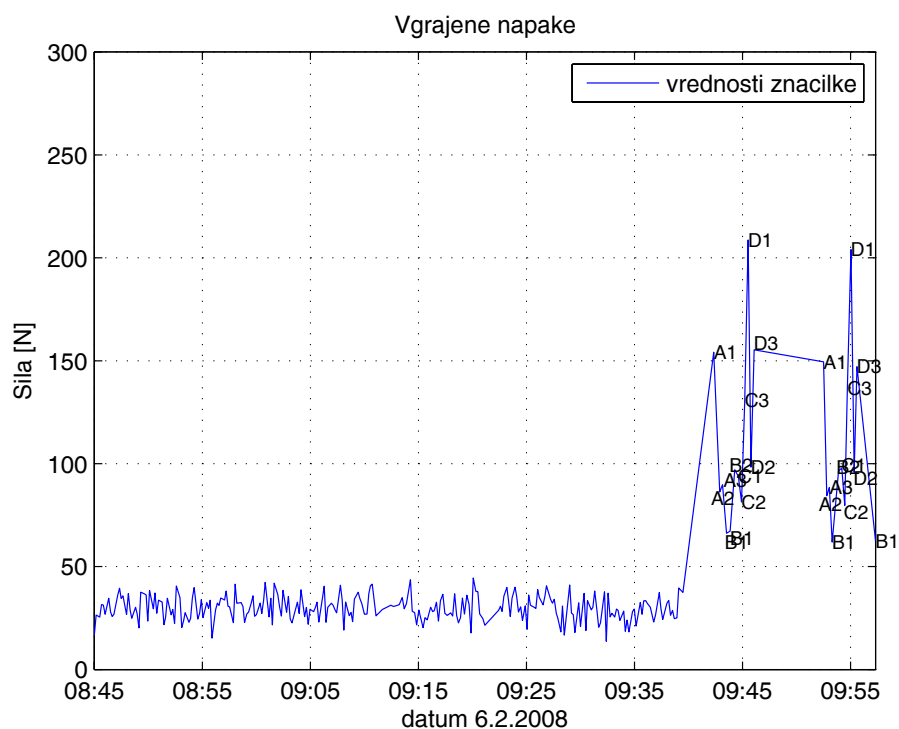
**Slika 22: Diagram prikazuje pričetek testiranja v podjetju, menjavo tipa kompresorja in vgrajevanje napak iztaknjenih vzmeti v kompresorje**

Slika 23 prikazuje povečavo dela testiranja, kjer smo vgrajevali napake. Kompresorje smo vzeli iz montažne linije. V te kompresorje smo nato vgradili možne napake in jih postavili nazaj na linijo v podjetju. Rezultati so prikazani na sliki 23. Pri testiranju v podjetju smo z opazovanjem procesa določili odločitveni prag, s katerim smo ločevali kompresorje brez napak od kompresorjev z napakami iztaknjenih vzmeti. Prag je bil ročno nastavljen in je imel vrednost 50 N. Na diagramu vidimo, da imajo vgrajene napake vrednosti značilke, ki so višje od 50 N, kar pomeni da bi s tem odločitvenim pragom razpoznali vse napake iztaknjenih vzmeti na kompresorjih, ki so prikazane na sliki 23. Najnižja vrednost značilke napake iztaknjene vzmeti je bila, ko smo imeli napako na mestu, kjer je bila vzmet označena s črko B. Po pogovoru s kontrolorjem kakovosti smo ugotovili, da je ta napaka najbolj kritična, saj vzmet najde zelo stabilno lego izven zatika. Ta napaka je zelo težko izsledljiva s končno kontrolo, kar lahko razpoznajo samo najbolj izkušeni operaterji. Povečane vrednosti značilke pri napaki iztaknjene vzmeti na mestu B ne odstopajo vedno tako, da bi to lahko zaznali z ročno nastavljenim odločitvenim pragom.



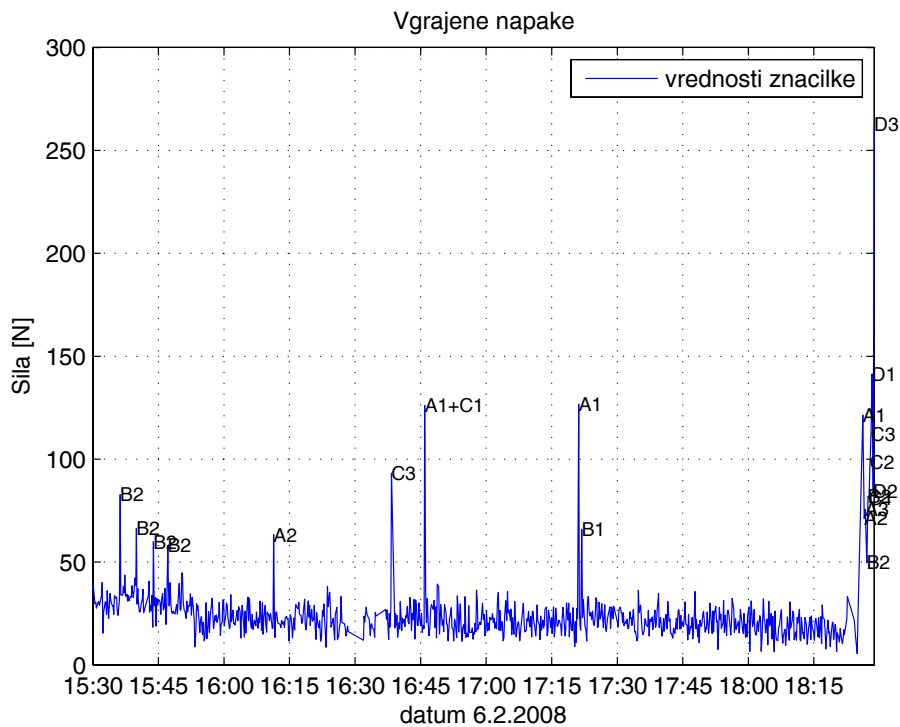
Slika 23: Prikaz napak iztaknjenih vzmeti vgrajenih v kompresorje

Slika 24 prikazuje dva seta napak iztaknjenih vzmeti, ki smo jih vnesli na proizvodno linijo. Vse napake iztaknjenih vzmeti smo prepoznali z ročno nastavljenim pragom, ki je imel vrednost 50 N.



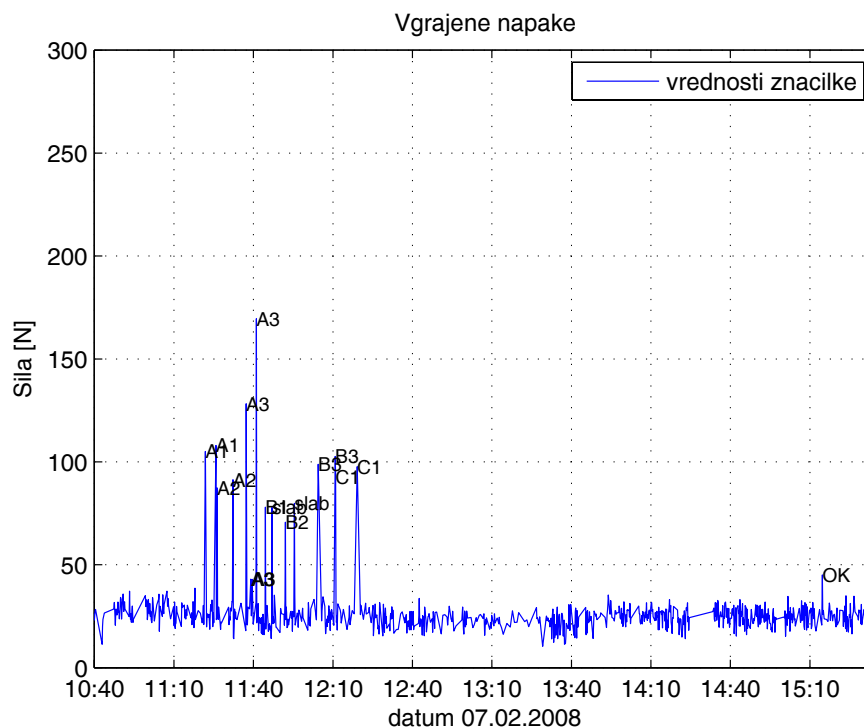
Slika 24: Prikaz napak iztaknjenih vzmeti vgrajenih v kompresorje

Slika 25 prikazuje primer testiranja, ko smo vgrajevali samo napake, za katere smo skozi testiranje ugotovili, da jih najtežje razpoznavamo. Napake smo vgrajevali naključno. Opazili smo, da če isto napako na istem kompresorju ponovimo večkrat, se vrednost niža. Sklepamo, da je imela vzmet vedno bolj stabilno lego. Na sliki 25 vidimo, da je imela napaka B2 zelo nizke vrednosti značilke, ki pa se vednarle razlikujejo od značilk kompresorjev brez napak. Na koncu, ko smo testirali cel set napak, se je zgodilo, da napake B2 nismo več prepoznali z odločitvenim pragom, ki smo ga ročno nastavili na testiranju v podjetju.



**Slika 25: Prikaz napak iztaknjenih vzmeti vgrajenih v kompresorje**

Slika 26 prikazuje vgrajen set napak iztaknjenih vzmeti 7. 2. 2008. Iz diagrama vidimo, da smo dobili zelo nizko vrednost značilke, ko smo imeli vgrajeno napako A3. Zaradi nizke vrednosti značilke smo imeli veliko težavo pravilno razpoznati napako v tem primeru. Ostale napake razpoznavamo pravilno.



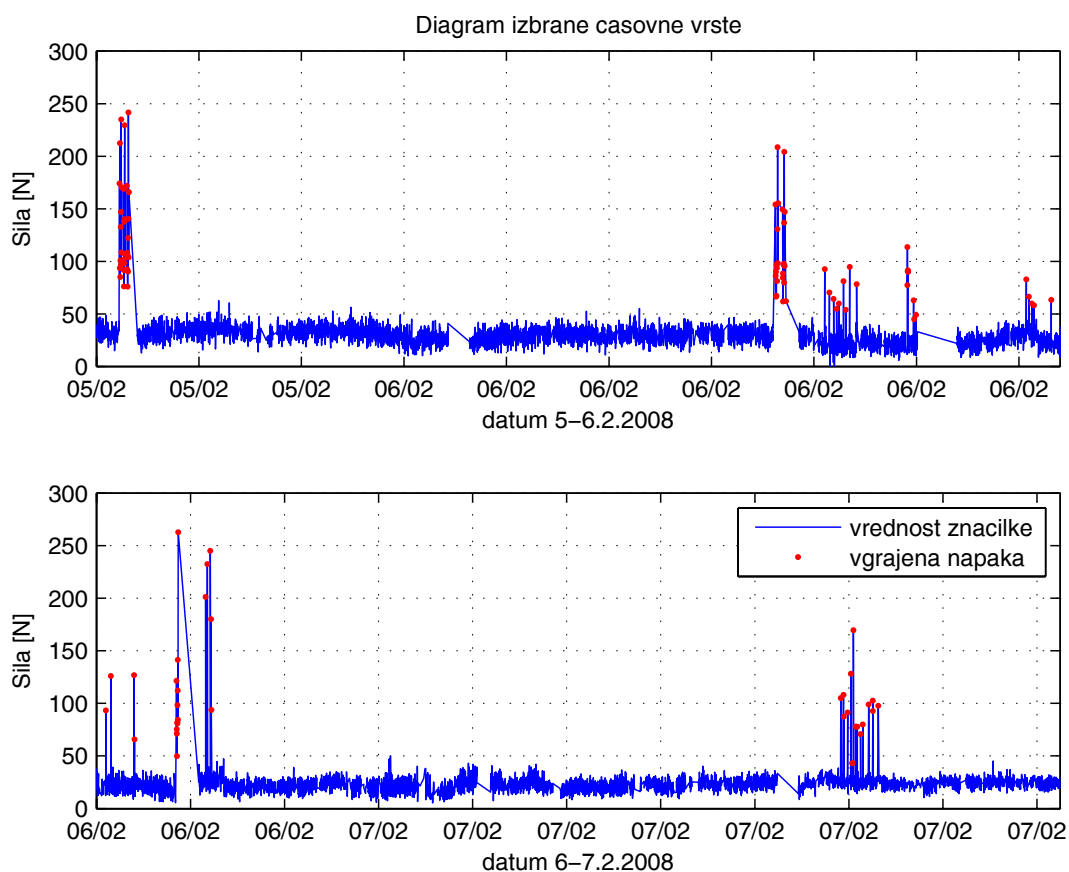
**Slika 26: Prikaz napak iztaknjenih vzmeti vgrajenih v kompresorje**

Slika 27 predstavlja časovno vrsto vrednosti značilke, ki smo jo izbrali za določanje različnih vrst odločitvenih pragov. Časovna vrsta vsebuje 10379 vrednosti značilke testiranih kompresorjev. Podatke smo pridobili pri testiranju sistema v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o. Časovna vrsta vrednosti značilke je potekala od 5. 2. 2008 do 7. 2. 2008. V tem času smo v kompresorje vgradili 115 različnih napak vzmeti in jih testirali s sistemom za avtomatsko razpoznavanje napak iztaknjenih vzmeti na kompresorjih. Vse vgrajene napake iztaknjenih vzmeti smo označili na sliki 24, kjer so prikazane kot rdeče pike. Za vse rdeče pike imamo podatke o vrsti napake, vendar jih zaradi strnjenosti podatkov ne moremo prikazati na diagramu.

Iz časovne vrste smo izločili vrednosti značilke, ki smo jih zajeli dne 6. 2. 2008 od 13:20 do 14:00. V tem času smo spremenili kalibracijsko silo in posledica je bila dvig srednje vrednosti značilke in nestabilna populacija značilke na tem območju. Zaradi lažje analize in določanja odločitvenih pragov te vrednosti smo izločili iz časovne vrste. Prav tako izbrišemo posamezne povišane vrednosti značilke, za katere nimamo natančnih podatkov o stanju, v katerem se je takrat nahajal kompresor.

Z izbrano časovno vrsto smo izračunali odločitvene pragove in jih s pomočjo kriterija za vrednotenje primerjali. Iz izkušenj testiranja smo predvidevali, da so problematične predvsem nekatere napake, kot je napaka B2. Večkrat se je zgodilo, da je vzmet pri napaki B2 nekje vmes med napako B1 in B2. V primeru, da smo pravilno razpoznavali najneugodnejše lege iztaknjenih vzmeti, smo sklepali, da bomo v prihodnje tudi ostale napake iztaknjenih vzmeti lahko razpoznavali.

To časovno vrsto smo si izbrali, ker vsebuje nihanje srednje vrednosti in je na njej vgrajenih veliko kritičnih napak, ki jih na testiranju z ročno nastavljenim odločitvenim pragom nismo razpoznavali.



**Slika 27: Diagram časovne vrste, na osnovi katere bomo primerjali odločitvene strategije**

Slika 27 prikazuje diagram časovne vrste, s pomočjo katere smo določevali in primerjali odločitvene pragove različnih strategij. Diagram je sestavljen iz dveh delov. Zgornji del prikazuje začetek časovne vrste, drugi diagram je nadaljevanje zgornje časovne vrste. Zaradi velikega števila podatkov smo zaradi ugodnejšega prikaza eno časovno vrsto prikazali v dveh ločenih diagramih. Prav tako smo zaradi ugodnejšega prikaza označili napake z rdečimi pikami, čeprav imamo za vsako napako zapisano, katera izmed napak iztaknjenih vzmeti je napaka.



## Poglavje 4

### Analiza signalov sil

V tem poglavju smo za izbrano časovno vrsto določili odločitvene pragove. Določili smo tri odločitvene pragove in jih med seboj primerjali. Izbrali smo najprimernejši odločitveni prag in izbiro utemeljili.

#### 4.1 Načrtovanje odločitvene strategije

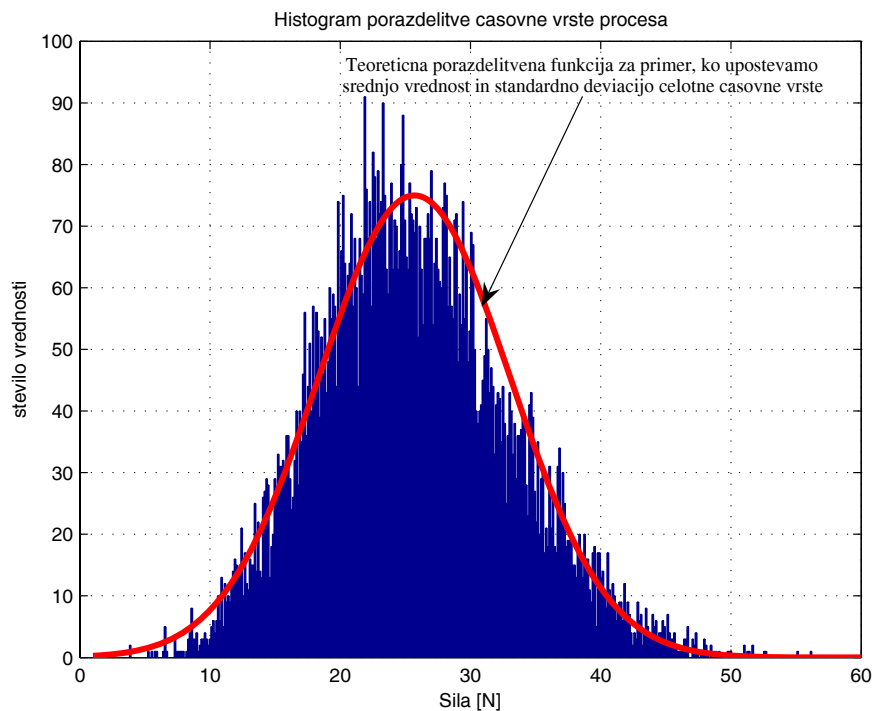
Odločitveni strategiji smo načrtovali s pomočjo izbrane časovne vrste. Izbrana časovna vrsta vsebuje različne napake iztaknjenih vzmeti. Tem vrednostim smo pripisali vrsto napake iztaknjene vzmeti. Zelo povišane vrednosti značilnik, kjer nismo poznali vzroka za povišanje vrednosti, smo odstranili iz časovne vrste. Časovna vrsta ni smela vsebovati sprememb v kalibracijski sili. Večja sprememba kalibracijske sile nam je spremenila srednjo vrednost, ki jo s nespremenljivim odločitvenim pragom nismo mogli zaznati. Za vsako odločitveno strategijo smo izračunali odločitvene pragove. Te pragove smo med seboj primerjali, za primerjavo pragov pa smo si izbrali kriterijsko funkcijo  $J$ , ki jo izračunamo po enačbi (1).

Za podjetje je veliko bolj pomembno, da se pravilno razpoznajo kompresorji z napakami iztaknjenih vzmeti, kot da se pravilno razpoznajo kompresorji brez napak. To smo upoštevali v kriterijski funkciji  $J$  za primerjavo pragov s pomočjo utežnega faktorja  $\varepsilon=10$ . Odločitvene strategije smo primerjali glede na vrednost kriterijske funkcije  $J$ . Cilj je bil z izračunom različnih odločitvenih pragov dobiti najmanjšo vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$ . Za prag, ki je imel najmanjšo vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$ , smo sklepali, da je optimalni odločitveni prag.

#### 4.2 Izdelava nespremenljivega odločitvenega pragu

Za izdelavo nespremenljivega odločitvenega pragu uporabimo 3-sigma odločitveno strategijo. Pogoj za določitev odločitvenih pragov po 3-sigma strategiji je normalno porazdeljena populacija vrednosti značilnik v časovni vrsti. V primeru normalno porazdeljene populacije vzorcev in uporabe 3-sigma strategije nam 99,73% vseh vrednosti vzorcev pade znotraj odločitvenega pragu. V primeru, da nimamo normalno porazdeljene populacije vzorcev, ne vemo kakšen delež vseh vrednosti značilnik bo znotraj odločitvenega pragu. V takšnem primeru moramo izbrati drugačno odločitveno strategijo, s katero določimo odločitvene pragove. Normalnost populacije vzorcev lahko preverimo z različnimi statističnimi hipotezami. V našem primeru smo naredili test normalnosti procesa s pomočjo statističnega Lillieforjevega testa [17]. To je Kolmogorov-Smirnov test za testiranje normalnosti procesa, kadar srednja vrednost in

standardna deviacija predpostavljene normalne porazdelitve nista poznani. Pri našem delu smo v ta namen uporabljali orodja programskega paketa Matlab [14]. Slika 28 nam prikazuje histogram, ki prikazuje število in vrednosti značilk izbrane časovne vrste.



**Slika 28: Prikaz porazdelitve vrednosti značilk iz časovne vrste procesa testiranja kompresorjev z iztaknjenimi vzmetmi**

Slika 28 prikazuje histogram, na katerem imamo vrednosti značilk iz časovne vrste, ki smo jo dobili pri testiranju na liniji od 5-7. 2. 2008. To časovno vrsto smo izbrali za izdelavo odločitvenih pragov. Iz časovne vrste smo za potrebe izračuna histograma izločili vrednosti značilk vgrajenih napak. Histogram ima približno obliko teoretične normalne porazdelitve. Z rdečo črto je ponazorjena teoretična normalna porazdelitev, če upoštevamo srednjo vrednost in standardno deviacijo celotne časovne vrste. S pomočjo programskega paketa Matlab in orodja lillietest smo preverili hipotezo normalnosti pojava s 95% intervalom zaupanja. Ugotovili smo, da na celotni časovni vrsti lahko zavrnemo ničelno hipotezo, zato smo predpostavljali, da proces nima lastnosti normalne porazdelitve verjetnosti.

Preskusili smo normalnost porazdelitve posameznih odsekov časovne vrste značilk. Celotno časovno vrsto smo razdelili na dva dela, prvi del je obsegal prvo polovico podatkov o vrednosti značilk izbrane časovne vrste, drugi del pa je zajemal drugo polovico podatkov o vrednosti značilk izbrane časovne vrste. Nad vsakim delom časovne vrste smo ločeno izvedli Lilliefors-jev test normalne porazdelitve procesa. V obeh primerih s testoma nismo zavrnili ničelne hipoteze, zato smo predpostavljali, da ima proces na obeh odsekih normalno porazdelitev verjetnosti. Iz tega smo sklepali, da ima proces odsekoma normalno porazdelitev.

Rezultat Lillieforsovega testa je posledica velikega nihanja srednje vrednosti vzorcev. Nihanje je bilo posledica različnih tipov vzmeti in kompresorjev, ki se odražajo v različni kalibracijski sili. Nihanje srednje vrednosti značilk je bilo lahko tudi posledica

nihanja kakovosti izdelave kompresorjev na proizvodni liniji. V poročilu smo ohranili celotno časovno vrsto, ker to ustreza praktičnemu dogajanju na liniji v podjetju. Iz navedenega smo sklepali, da bomo s uporabo spremenljivega odločitvenega pragu bolje razpoznavali kompresorje z napakami iztaknjenih vzmeti.

Nespremenljivi odločitveni prag določimo za celotno časovno vrsto po naslednjih korakih:

- Iz izbrane časovne vrste izločimo vse označene vrednosti značilk, ki imajo vgrajeno eno izmed napak iztaknjenih vzmeti.
- Iz časovne vrste brez vgrajenih napak vzmeti izračunamo srednjo vrednost  $m$  po enačbi (2).
- Iz časovne vrste brez vgrajenih napak vzmeti izračunamo standardno deviacijo  $\sigma$  po enačbi (3).
- Iz srednje vrednosti  $m$  in standardne deviacije  $\sigma$  Izračunamo odločitveni prag po enačbi (4).
- S pomočjo odločitvenega pragu določimo število nepravilno prepoznanih slabih vzorcev  $N_{es}$  in nepravilno prepoznanih dobrih vzorcev  $N_{ed}$  in izračunamo vrednost kriterijske funkcije  $J$  po enačbi (1).

Izračunani sta bili srednja vrednost  $m$  in standardna deviacija  $\sigma$ , ki za celotno časovno vrsto brez vgrajenih napak znašata:

$$m = 25,7 \text{ N},$$
$$\sigma = 7,4 \text{ N}.$$

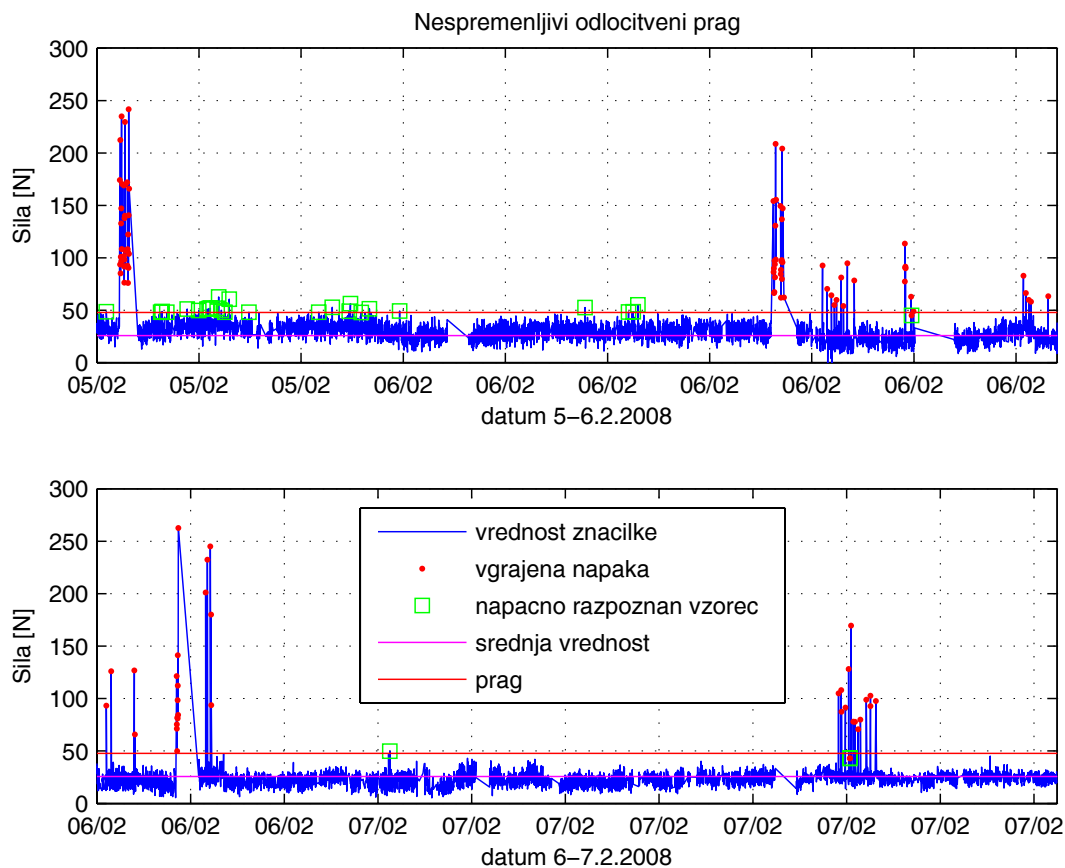
S pomočjo 3-sigma strategije smo določili odločitveni prag  $ZP$  po enačbi (4), ki ima vrednost:

$$ZP = 47,8 \text{ N}.$$

Parameter  $k$  ima vrednost  $k = 3$ . Slika 29 prikazuje izbrano časovno vrsto z vgrajenimi napakami iztaknjenih vzmeti. Z odločitvenim pragom  $ZP = 47,8 \text{ N}$  smo napačno razpoznali 30 vzorcev. Od tega smo razpoznali napačno 3 napake iztaknjenih vzmeti. Ostale napake so kompresorji, ki imajo pravilno postavljene vzmeti, vendar so vrednosti teh značilk tako visoke, da smo jih razpoznali kot kompresorje z napako. Vrednost kriterijske funkcije za primer, ko odločitveni prag izračunamo po 3-sigma strategiji:

$$J = 5,49$$

Iz slike 29 vidimo, da se večina napak nahaja na zgornjem diagramu. Prav tako vidimo, da je dejanska srednja vrednost v začetku zgornjega diagrama na sliki 29 postavljena višje, kot izračunana na celotni časovni vrsti.



Slika 29: Prikaz nespremenljivega odločitvenega pragu po metodi 3-sigma

Iz dobljenih rezultatov sledi, da z nespremenljivim odločitvenim pragom, ki smo ga izračunali po 3-sigma strategiji, zadovoljivo razpoznavamo napake iztaknjenih vzmeti na izbrani časovni vrsti. Veliko dobrih vzorcev smo napačno razpoznali zaradi nihanja srednje vrednosti vzorcev. Nihanje srednje vrednosti nam je povzročila sprememba kalibracijske sile zaradi različnih tipov kompresorjev in vzmeti ter zaradi nihanja kakovosti izdelave in montaže kompresorjev.

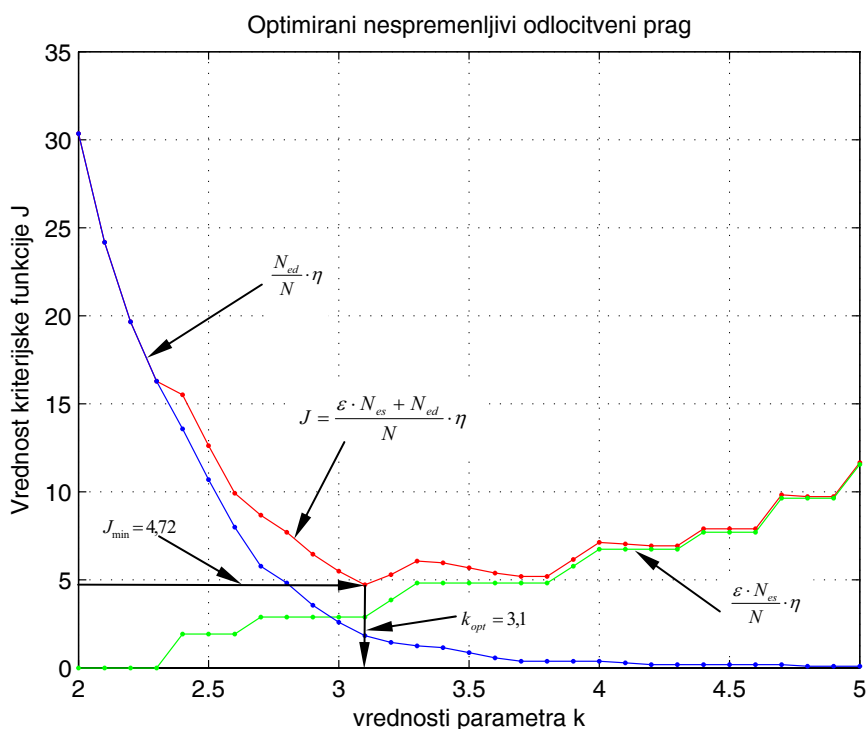
Za boljše rezultate bi morali časovno vrsto razdeliti na več delov, kjer je srednja vrednost bolj konstantna. Vendar to ni primerno za praktično uporabo v podjetju, kjer bi operater nastavljal to mejo, ker bi za to potreboval preveč časa in znanja.

### 4.3 Izdelava optimiranega nespremenljivega odločitvenega pragu

Pri optimiranem nespremenljivem odločitvenem pragu optimiramo parameter  $k$ , za katerega si izbrali različne vrednosti okrog števila 3. Te vrednosti si izberemo iz izkušenj določanja pragu po 3-sigma strategiji, s katerim dobimo zadovoljiv odločitveni prag. Parameter  $k$  ima pri 3-sigma odločitvenem pragu vrednost 3. Poiskati moramo vrednost parametra  $k$  pri katerem imamo najmanjšo kriterijsko funkcijo  $J$ . Izračun optimalnega nespremenljivega odločitvenega pragu poteka po naslednjih korakih:

- Iz izbrane časovne vrste izločimo vse označene vrednosti značilnk, ki imajo vgrajeno eno izmed napak iztaknjenih vzmeti.
- Iz časovne vrste brez vgrajenih napak vzmeti izračunamo srednjo vrednost  $m$  po enačbi (2).
- Iz časovne vrste brez vgrajenih napak vzmeti izračunamo standardno deviacijo  $\sigma$  po enačbi (3).
- Izberemo si 31 vrednosti za parameter  $k$ , začnemo z vrednostjo 2 in po korakih 0,1 do vrednosti 5.
- Iz srednje vrednosti  $m$  in standardne deviacije  $\sigma$  izračunamo odločitvene pragove po enačbi (4) za vsako od vrednosti parametra  $k$ .
- S pomočjo odločitvenih pragov določimo števila nepravilno prepoznanih slabih vzorcev  $N_{es}$  in nepravilno prepoznanih dobrih vzorcev  $N_{ed}$  za vsako vrednost parametra  $k$  in izračunamo vrednost kriterijske funkcije  $J$  po enačbi (1).
- Izmed vseh izračunanih vrednosti kriterijske funkcije poiščemo najnižjo vrednost  $J_{min}$ , in poiščemo pripadajočo vrednost parametra  $k$ , ki jo imenujemo optimalna vrednost parametra  $k_{opt}$ .

Slika 30 prikazuje diagram vrednosti kriterijske funkcije v odvisnosti od vrednosti parametra  $k$ . Na x osi so prikazane vrednosti parametra  $k$  in na y osi imamo prikazano vrednost kriterijske funkcije  $J$ , ki jo dobimo pri določeni vrednosti parametra  $k$ .



Slika 30: Diagram napačno razpoznanih vzorcev z različnimi odločitvenimi pragovi

Diagram na sliki 30 prikazuje tri krivulje. Pike na krivuljah označujejo izračunane vrednosti, ki so vmes povezane s črtami. Modra krivulja prikazuje del vrednosti kriterijske funkcije  $J$ , ki ga prispevajo napačno razpoznani vzorci, ko je bil kompresor brez napak iztaknjenih vzmeti. Zelena krivulja prikazuje del vrednosti kriterijske funkcije  $J$ , ki ga prispevajo napačno razpoznani vzorci, ko je imel kompresor vgrajeno

eno izmed napak iztaknjenih vzmeti. Tej vrednosti dodamo utežni faktor  $\varepsilon$ , s katerim upoštevamo, da je pomembnejše pravilno razpoznavati vzorce, ki so imeli vgrajene napake iztaknjenih vzmeti kot pravilno razpoznavati vzorce, ko je bil kompresor brez napak. Rdeča krivulja nam prikaže vrednost izračunane celotne kriterijske funkcije  $J$ , na kateri poiščemo najmanjšo vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$  in na x osi izberemo optimalni parameter  $k_{opt}$ .

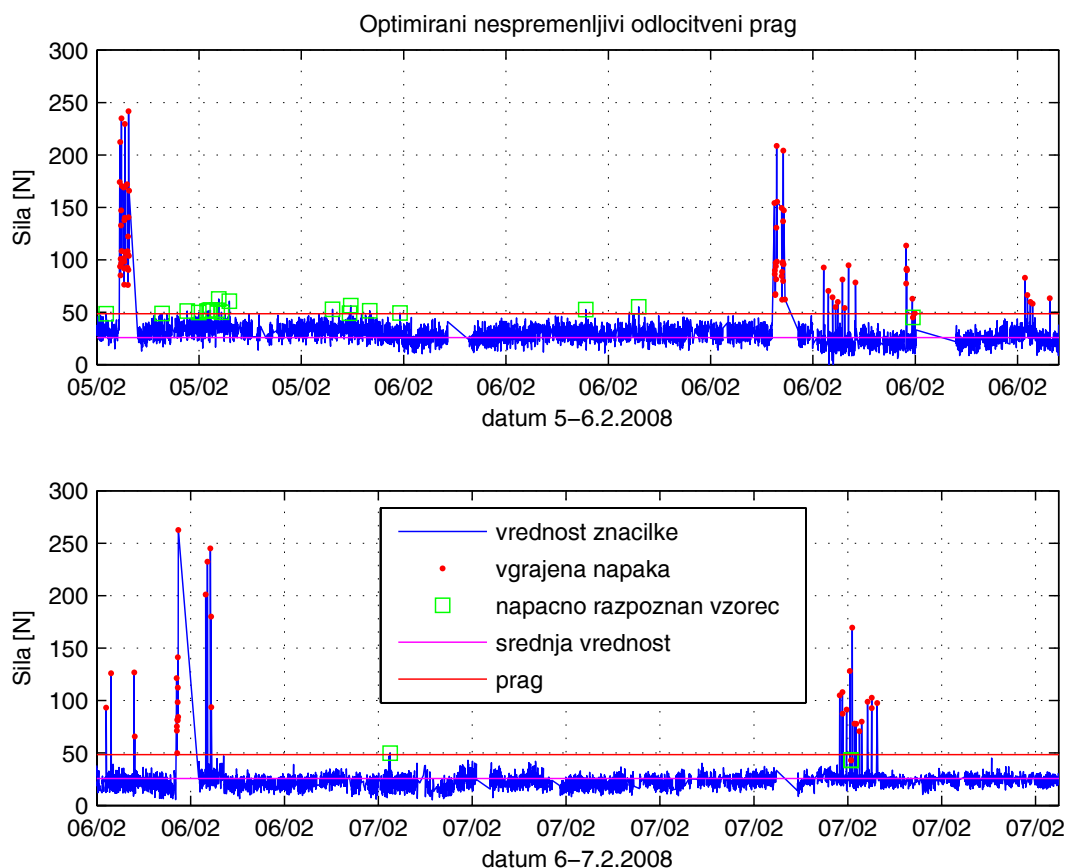
Tabela 4 prikazuje vrednosti parametra  $k$ , vrednosti pripadajočega odločitvenega pragu, števila napačno razpoznanih slabih vzorcev  $N_{es}$ , števila napačno razpoznanih dobrih vzorcev  $N_{ed}$ , skupnega števila napak  $N_e$  in vrednosti kriterijske funkcije  $J$ .

$k$	2,7	2,8	2,9	3	<b>3,1</b>	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9
vred. odl. pragu	45,6	46,3	47	47,8	<b>48,5</b>	49,2	50	50,7	51,4	52,2	52,9	53,6	54,4
$N_{ed}$	60	50	37	27	<b>19</b>	15	13	12	9	6	4	4	4
$N_{es}$	3	3	3	3	<b>3</b>	4	5	5	5	5	5	5	6
$N_e$	63	53	40	30	<b>22</b>	19	18	17	14	11	9	9	10
$J$	8,67	7,71	6,46	5,49	<b>4,72</b>	5,30	6,07	5,97	5,68	5,40	5,20	5,20	6,17

**Tabela 4: Prikaz vrednosti parametra  $k$ , vrednosti odločitvenega pragu, števila napačno razpoznanih slabih vzorcev  $N_{es}$ , števila napačno razpoznanih dobrih vzorcev  $N_{ed}$ , skupnega števila napak  $N_e$  in vrednosti kriterijske funkcije  $J$**

Za določitev optimalnega nespremenljivega odločitvenega pragu je pomembno, s katerim območjem razpoznamo več napak iztaknjenih vzmeti. Prav tako je pomembno, kakšne vrste so te napake. To upoštevamo s kriterijsko funkcijo  $J$ , ki jo izračunamo za vsak parameter  $k$  po enačbi (1). Utežna vrednost  $\varepsilon$  daje številu napačno prepoznanih slabih vzorcev  $N_{es}$  večjo težo kot napačno razpoznanih dobrih vzorcev  $N_{ed}$ . Iščemo najmanjšo vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$ . Če primerjamo kriterijske funkcije v tabeli 4, ugotovimo, da ima kriterijska funkcija najnižjo vrednost  $J_{min} = 4,72$  pri vrednosti parametra  $k_{opt} = 3,1$ . Opazimo, da optimalni nespremenljivi odločitveni prag nima najmanjšega skupnega števila napak, saj večjo utež namenja pravilnemu razpoznavanju slabih vzorcev.

Na sliki 31 sta prikazana diagrama z napakami in napačno razpoznanimi vzorci za optimalni nespremenljivi odločitveni prag, ko je vrednost parametra  $k_{opt}=3,1$ .



**Slika 31: Prikaz optimalnega nespremenljivega odločitvenega pragu pri vrednosti parametra  $k=3,1$**

V primeru, ko ima parameter  $k_{opt}$  vrednost 3,1, imamo skupaj 22 napačno razpoznanih vzorcev. Od tega 3 napačno razpoznamo, ko je imel kompresor eno izmed vgrajenih napak iztaknjenih vzmeti. Pri ostalih 19 napakah napačno razpoznamo kompresorje, ki so imeli pravilno postavitev vzmeti. Napačno razpoznanji kompresorji z napakami so imeli dva tipa napak iztaknjenih vzmeti: 1-krat ne razpoznamo napake B2 in 2-krat ne razpoznamo napake A3. V podjetju imajo največ problemov z odkrivanjem napak na mestu B, zato je to najbolj kritična napaka.

V primeru optimiranega nespremenljivega odločitvenega pragu dobimo rezultat za najoptimalnejši odločitveni prag, ko je parameter  $k_{opt} = 3,1$ . Razpoznavanje vzorcev izboljšamo glede na odločitveni prag po 3-sigma strategiji. Število nepravilno razpoznanih vzorcev pade iz 30 na 22. Z nespremenljivimi pragovi ne moremo razpoznati vseh napak vzmeti, ki se pojavijo. Na daljših časovnih vrstah, kjer je nihanje srednje vrednosti veliko, imamo z nespremenljivimi pragovi težavo razpoznavati kritične napake iztaknjenih vzmeti. Za podjetje je najpomembnejše, da slabega izdelka ne dostavijo kupcu. Z višjimi pragovi razpoznavamo kompresorje z manj napakami, vendar ostanejo napačno razpoznanji kompresorji z vgrajeno napako, ki imajo nizko vrednost značilke. Primer take napake sta bili napaki B2 in A3, ki sta bili najbolj kritični napaki. V primeru, da bi tak izdelek dobil kupec, bi povzročil veliko več škode v obliki stroškov, kot če bi imeli nižji odločitveni prag in bi napako odkrili. Z nižjim odločitvenim pragom bi morali operaterji pregledati več kompresorjev, ki smo jih napačno razpoznali in so brez napak.

## 4.4 Izdelava adaptivnih odločitvenih pragov

Za uporabo adaptivne odločitvene strategije se odločimo, ker z nespremenljivimi odločitvenimi pragovi ne moremo razpoznati vseh vgrajenih napak iztaknjenih vzmeti na časovni vrsti, ki smo jo dobili na meritvah, opravljenih na proizvodni liniji kompresorjev v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o. Z uporabo adaptivne odločitvene strategije upamo, da bomo z manj napakami pravilno razpoznavali napake iztaknjenih vzmeti na kompresorjih. Izdelave adaptivne odločitvene strategije se lotimo na dva načina. Preverimo adaptivno odločitveno strategijo, ko imamo spremenljivo srednjo vrednost in konstantno deviacijo, ter adaptivno strategijo, ki ima spremenljivo srednjo vrednost in spremenljivo deviacijo.

### 4.4.1 Adaptivi prag s konstantno deviacijo

Adaptivna strategija s konstantno deviacijo je strategija, pri kateri imamo spremenljivo srednjo vrednost  $m(t)$  in konstantno deviacijo. Adaptivni odločitveni prag  $PN(t)$  se spreminja. Spreminjanje je izključno posledica spremenljive srednje vrednosti  $m(t)$ . Določitev adaptivne strategije s konstantno deviacijo je potekala po naslednjih korakih:

- Iz izbrane časovne vrste izločimo vse označene vrednosti značilnk, ki imajo vgrajeno eno izmed napak iztaknjenih vzmeti.
- Iz časovne vrste brez vgrajenih napak vzmeti izračunamo standardno deviacijo  $\sigma$  po enačbi (3).
- Izberemo si več vrednosti za utežni faktor  $\alpha$ .
- Izračunamo adaptivne srednje vrednosti  $m(t)$  po enačbi (7) za vsak utežni faktor  $\alpha$ .
- Izberemo si več vrednosti za parameter  $k$ .
- Iz adaptivnih srednjih vrednosti  $m(t)$  in standardne deviacije  $\sigma$  izračunamo adaptivne odločitvene pragove  $PN(t)$  po enačbi (6) za vsako od vrednosti parametra  $k$  in vsako od vrednosti utežnega faktorja  $\alpha$ .
- S pomočjo spremenljivih odločitvenih pragov  $PN(t)$  določimo števila nepravilno prepoznanih slabih vzorcev  $N_{es}$  in nepravilno prepoznanih dobrih vzorcev  $N_{ed}$  za vsako vrednost parametra  $k$  in utežnega faktorja  $\alpha$  izračunamo vrednosti kriterijske funkcije  $J$  po enačbi (1).
- Izmed vseh izračunanih vrednosti kriterijske funkcije poiščemo najnižjo vrednost  $J_{min}$ , in poiščemo pripadajočo vrednost parametra  $k$ , ki jo imenujemo optimalna vrednost parametra  $k_{opt}$ . Poiščemo tudi pripadajočo vrednost utežnega faktorja  $\alpha$ , ki jo imenujemo optimalna vrednost parametra  $\alpha_{opt}$ .

Pri adaptivni strategiji s konstantno deviacijo moramo določiti dva prosta parametra:  $k$  in  $\alpha$ , ki določata odstopanje praga od srednje vrednosti in utežni faktor eksponentnega glajenja. Oba parametra smo določili prek izračuna kriterijske funkcije znotraj izbranega intervala obeh parametrov, kot podaja tabela 5.

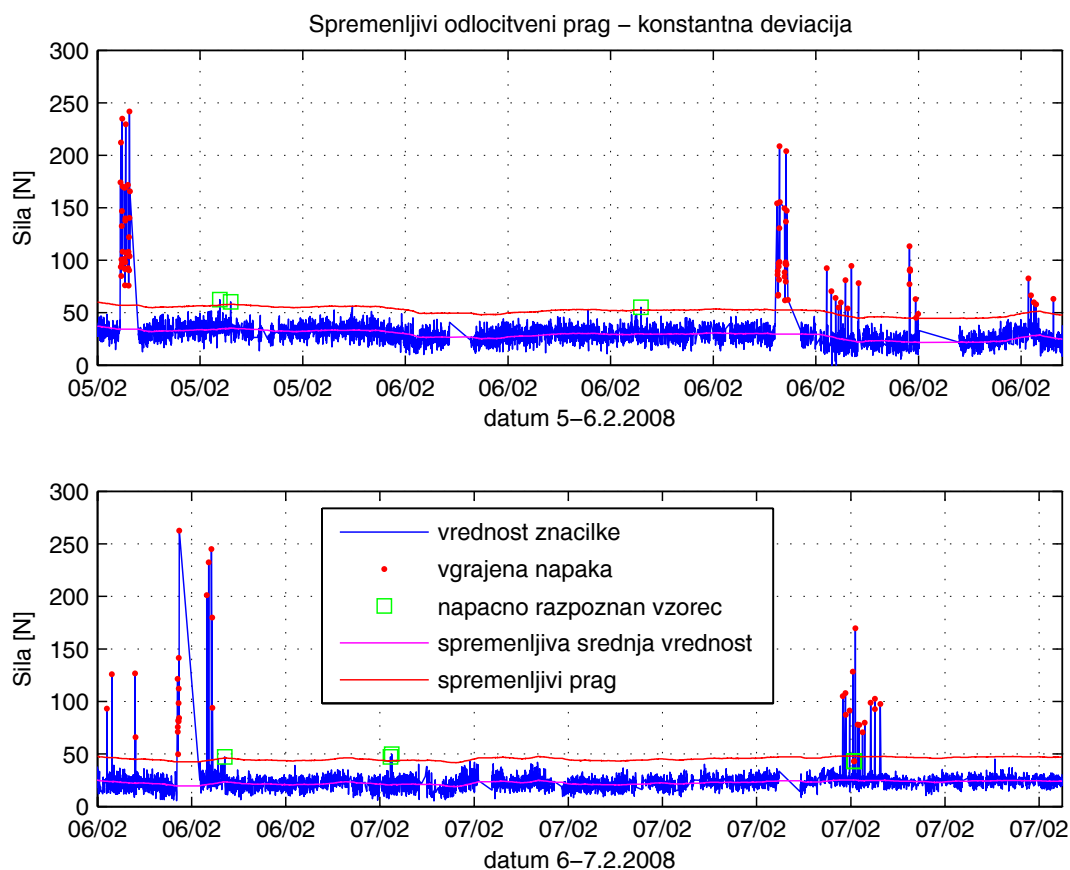


$k \backslash \alpha$	0,001	0,005	<b>0,01</b>	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05	0,055
2,7	4,0	3,3	<b>3,2</b>	3,3	3,1	3,1	3,2	3,1	3,2	3,2	3,2	4,7
2,8	4,0	3,1	<b>3,1</b>	2,9	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	4,0
2,9	3,8	3,0	<b>3,0</b>	2,9	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,9	4,5
3,0	3,6	2,8	<b>2,8</b>	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,7	4,3
<b>3,1</b>	<b>4,4</b>	<b>3,6</b>	<b>2,5</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>4,2</b>
3,2	4,3	3,5	<b>3,4</b>	3,4	3,5	3,6	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,6
3,3	4,3	3,4	<b>3,4</b>	3,3	3,3	3,3	3,3	3,4	3,4	3,4	3,4	3,5
3,4	4,1	3,4	<b>3,3</b>	3,3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,4	3,4	3,3
3,5	5,0	3,2	<b>3,2</b>	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,1	3,1	3,3
3,6	6,9	3,1	<b>3,2</b>	3,2	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	4,1

**Tabela 5: Prikaz vrednosti kriterijske funkcije  $J$  v odvisnosti od parametra  $k$  in parametra  $\alpha$**

Iz tabele 5 vidimo, da se nam je vrednost kriterijske funkcije  $J$  spreminjala tako s parametrom  $\alpha$ , kot s parametrom  $k$ . Za določitev optimalnih parametrov  $\alpha_{opt}$  in  $k_{opt}$  smo morali izračunati za vsako vrednost parametrov kriterijsko funkcijo  $J$ . Tabela 5 nam prikazuje vrednosti kriterijske funkcije  $J$  za vsako kombinacijo parametrov  $\alpha$  in  $k$ . Iz tabele razberemo, da imamo najmanjšo vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$  pri vrednosti parametra  $k_{opt} = 3,1$  in vrednosti parametra  $\alpha_{opt} = 0,01$ . Na tem območju nimamo najmanjšega skupnega števila napak. Najmanjše skupno število napak smo dobili v primeru, ko imamo vrednost parametra  $k = 4,0$  in vrednost parametra  $\alpha = 0,006$ . Vendar imamo v tem primeru 4 napačno razpoznane kompresorje, ki so imeli vgrajeno eno izmed napak iztaknjenih vzmeti. Zato je vrednost kriterijske funkcije visoka in to ni optimalna vrednost parametrov.

Slika 32 prikazuje časovno vrsto s spremenljivo odločitveno mejo, določeno po adaptivni strategiji s konstantno deviacijo. Parametra  $k$  in  $\alpha$  sta nastavljena na optimalni vrednosti  $k_{opt} = 3,1$  in  $\alpha_{opt} = 0,01$ . Pri teh vrednostih parametrov dobimo zelo dobro razpoznavanje napak ter gladko odločitveno mejo, kar pomeni stabilno in robustno razpoznavanje.



**Slika 32: Adaptivna strategija z optimalno spremenljivo odločitveno mejo, ki je izračunana s spremenljivo srednjo vrednostjo in konstantno deviacijo. Vrednosti parametrov sta  $k_{opt} = 3,1$  in  $\alpha_{opt} = 0,01$**

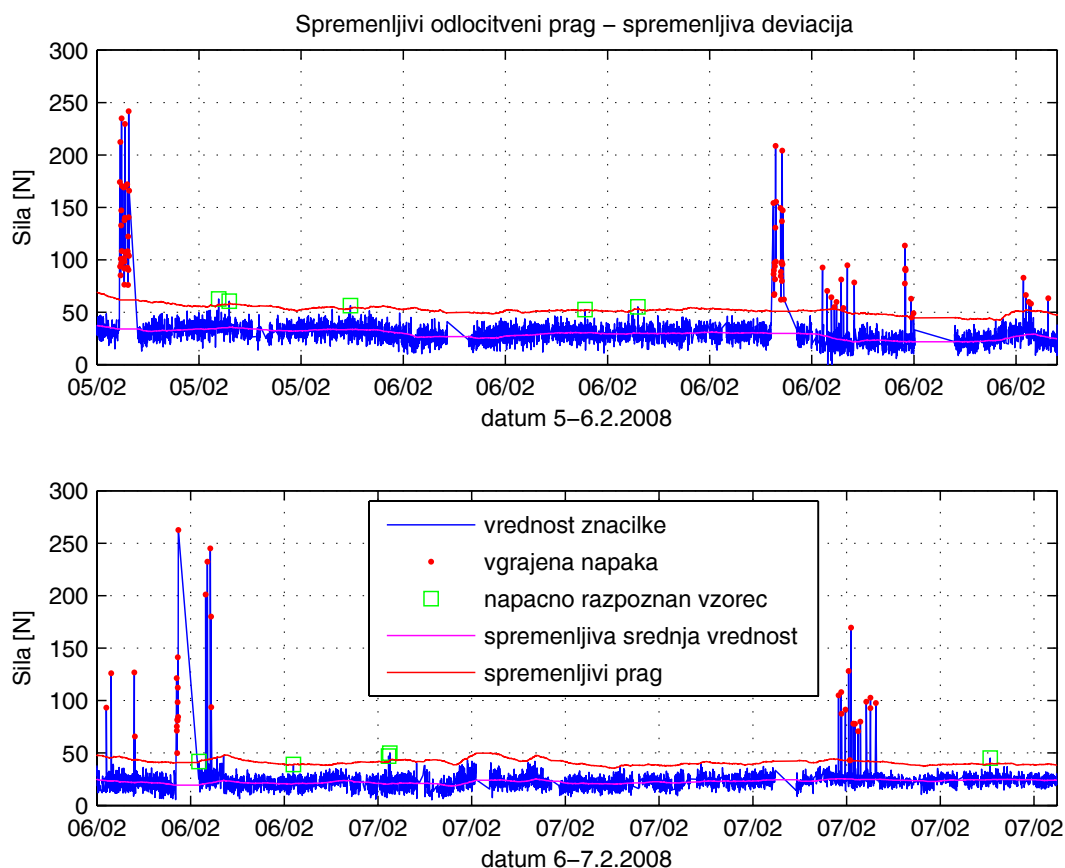
Vrednost optimalnega parametra  $k_{opt}$  je enaka kot v primeru optimalnega nespremenljivega odločitvenega praga. S tako nastavljenim spremenljivim odločitvenim pragom smo napačno razpoznali 8 vzorcev. Od tega nismo razpoznali 2 napak iztaknjenih vzmeti: obe napaki A3. Ostalih 6 napak je bilo napačno razpoznanih kompresorjev brez napak. S spremenljivim odločitvenim pragom smo pričakovano izboljšali število pravilno razpoznanih napak iztaknjenih vzmeti in pravilno razpoznanih vzorcev kompresorjev brez napak.

#### 4.4.2 Adaptivni prag s spremenljivo deviacijo

Adaptivna strategija s spremenljivo deviacijo je strategija, pri kateri imamo spremenljivo srednjo vrednost  $m(t)$  in spremenljivo deviacijo  $s(t)$ . Adaptivni odločitveni prag  $PS(t)$  se spreminja. Spreminjanje je posledica spremenljive srednje vrednosti  $m(t)$  in posledica spremenljive deviacije  $s(t)$ . Adaptivni odločitveni prag s spremenljivo deviacijo smo izračunali, ker z odločitvenim pragom s konstantno deviacijo nismo razpoznali vseh vgrajenih napak vzmeti. S spremenljivo deviacijo pričakujemo, da bomo dobili ožji spremenljivi odločitveni prag, s katerim bomo lahko razpoznali vse napake iztaknjenih vzmeti. Določitev adaptivne strategije s spremenljivo konstantno deviacijo je potekala po naslednjih korakih:

- Izberemo si več vrednosti za utežni faktor  $\alpha$ .
- Izračunamo adaptivne srednje vrednosti  $m(t)$  po enačbi (7) za vsak utežni faktor  $\alpha$ .
- Izberemo si več vrednosti za utežni faktor  $\beta$ , ki so enaki utežnemu faktorju  $\alpha$ .
- Izračunamo adaptivne srednje vrednosti  $s(t)$  po enačbi (9) za vsak utežni faktor  $\beta$ .
- Izberemo si več vrednosti za parameter  $k$ .
- Iz adaptivnih srednjih vrednosti  $m(t)$  in adaptivnih srednjih vrednosti  $s(t)$  izračunamo adaptivne odločitvene pragove  $PS(t)$  po enačbi (8) za vsako od vrednosti parametra  $k$  in vsako od vrednosti utežnega faktorja  $\alpha$  in vrednosti utežnega faktorja  $\beta$ . Utežna faktorja  $\alpha$  in  $\beta$  imata enake vrednosti.
- S pomočjo spremenljivih odločitvenih pragov  $PS(t)$  določimo števila nepravilno prepoznanih slabih vzorcev  $N_{es}$  in nepravilno prepoznanih dobrih vzorcev  $N_{ed}$  za vsako vrednost parametra  $k$  in utežnih faktorjev  $\alpha$  in  $\beta$  izračunamo vrednosti kriterijske funkcije  $J$  po enačbi (1).
- Poskušamo izboljšati razpoznavanje z vstavljanjem različnih vrednosti za utežni faktor  $\alpha$  in za  $\beta$  utežni faktor, vendar ne izboljšamo vrednosti kriterijske funkcije  $J$ .
- Izmed vseh izračunanih vrednosti kriterijske funkcije poiščemo najnižjo vrednost  $J_{min}$ , in poiščemo pripadajočo vrednost parametra  $k$ , ki jo imenujemo optimalna vrednost parametra  $k_{opt}$ . Poiščemo tudi pripadajoče vrednosti utežnih faktorjev  $\alpha$  in  $\beta$ , ki ju imenujemo optimalni vrednosti parametrov  $\alpha_{opt}$  in  $\beta_{opt}$ .

Slika 33 prikazuje časovno vrsto s spremenljivo odločitveno mejo, ki je posledica spremenljive srednje vrednosti in spremenljive deviacije. Za diagram na sliki 33 je parameter  $k_{opt} = 4,3$  vrednost parametrov  $[\alpha_{opt}, \beta_{opt}] = 0,008$ . Pri tej vrednosti parametrov  $\alpha_{opt}$  in  $\beta_{opt}$  razpoznamo pravilno vse vgrajene napake iztaknjenih vzmeti na izbrani časovni vrsti.



**Slika 33: Adaptivna strategija z optimalno spremenljivo odločitveno mejo, ki je bila izračunana s spremenljivo srednjo vrednostjo in spremenljivo deviacijo. Parameter  $k_{opt}$  ima vrednost 4,3 in parameter  $\alpha_{opt}$  in  $\beta_{opt}$  vrednost 0,008**

Iz tabele 6 vidimo, da se kriterijska funkcija  $J$  spreminja tako s parametroma  $\alpha$  in  $\beta$ , kot s parametrom  $k$ . Za določitev optimalnih parametrov  $\alpha$  in  $\beta$  ter  $k$  moramo izračunati za vsako vrednost parametrov kriterijsko funkcijo  $J$ . Tabela 6 prikazuje vrednosti kriterijske funkcije  $J$  za vsako kombinacijo parametrov  $\alpha$  in  $\beta$  ter  $k$ . Iz tabele 6 razberemo, da imamo najmanjšo vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$  pri vrednosti parametra  $k_{opt} = 4,3$  in vrednosti parametrov  $[\alpha_{opt}, \beta_{opt}] = 0,008$ . Na tem območju nimamo najmanjšega skupnega števila napak. Najmanjše skupno število napak dobimo v primeru, ko imamo vrednost parametra  $k = 5,0$  in vrednosti parametrov  $[\alpha, \beta] = 0,013$ . Vendar smo v tem primeru napačno razpoznali 3 kompresorje, ki so imeli vgrajeno napako vzmeti ter 4 napačno razpoznane dobre vzorce. Zato je vrednost kriterijske funkcije visoka in to ni optimalna vrednost spremenljivega odločitvenega pragu s spremenljivo deviacijo.

$\alpha$ in $\beta$ k	0,001	0,002	0,004	0,006	<b>0,008</b>	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	0,02	0,022
3,5	2,6	3,6	2,8	2,9	<b>3,0</b>	3,3	3,4	3,3	3,2	3,1	3,5	3,6
4	2,7	2,1	2,4	1,7	<b>1,7</b>	1,5	1,4	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6
4,1	2,3	3,0	2,2	1,4	<b>1,4</b>	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
4,2	2,3	3,0	2,1	1,2	<b>1,3</b>	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
<b>4,3</b>	<b>3,3</b>	<b>3,0</b>	<b>1,9</b>	<b>2,1</b>	<b>1,0</b>	<b>1,1</b>	<b>1,1</b>	<b>1,2</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>
4,4	4,2	3,6	3,9	3,7	<b>2,9</b>	2,9	2,9	2,0	2,1	1,3	1,3	1,3
4,5	7,0	3,4	4,5	3,7	<b>3,7</b>	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	2,1	2,1
4,6	7,0	6,3	5,5	4,5	<b>4,5</b>	3,6	3,5	3,5	2,5	2,7	2,8	2,9
5	6,9	6,1	6,2	6,2	<b>5,2</b>	4,2	4,2	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3

**Tabela 6: Prikaz vrednosti kriterijske funkcije  $J$  v odvisnosti od parametra  $k$  in parametra  $\alpha$  in  $\beta$**

Najugodnejše vrednosti parametrov so  $k_{opt} = 4,3$  in utežnih faktorjev  $[\alpha_{opt}, \beta_{opt}] = 0,008$ . Vrednost optimalnega parametra  $k_{opt}$  se razlikuje od vrednosti parametra  $k_{opt}$  v primeru optimalnega nespremenljivega in optimalnega spremenljivega s konstantno deviacijo odločitvenega pragu. To je posledica enačbe (9), kjer ne računamo s standardno deviacijo ampak z razliko značilke od srednje vrednosti. Deviacija je izračunana kot absolutna vrednost razlike med značilko in srednjo vrednostjo predhodnega vzorca. Za utežnih faktorjev  $\alpha$  in  $\beta$  vzamemo enako vrednost. S spreminjanjem utežnega faktorja  $\beta$  ne zmanjšamo vrednosti kriterijske funkcije. S tem spremenljivim odločitvenim pragom smo napačno razpoznali 10 vzorcev. Vsi nepravilno razpoznani vzorci so bili vzorci, ko so bili kompresorji brez napak. Vse napake vgrajenih iztaknjenih vzmeti smo razpoznali pravilno.

S spremenljivim odločitvenim pragom s spremenljivo deviacijo pričakovano izboljšamo število pravilno razpoznanih napak iztaknjenih vzmeti in pravilno razpoznanih vzorcev kompresorjev brez napak glede na spremenljivi prag s konstantno deviacijo.

#### **4.5 Primerjava odločitvenih pragov**

V splošnem smo izračunali dva tipa odločitvenih pragov: nespremenljivi in spremenljivi odločitveni pragovi. Cilj raziskovanja različnih tipov pragov je bil poiskati najprimernejši odločitveni prag za iskanje napak iztaknjenih vzmeti na kompresorjih. Za podjetje je najpomembnejše odkrivanje vseh napak iztaknjenih vzmeti, ob tem lahko napačno razpoznamo manjše število dobrih kompresorjev. V podjetju Danfoss Compressors, d.o.o. proizvajajo več različnih tipov kompresorjev. Kompresorji se ločijo po višini kompresorske grupe in tipu vzmeti. Pri meritvah se to odraža v nihaju srednje vrednosti značilke kompresorjev, ki smo jih zajeli z merilnim sistemom za avtomatsko zaznavanje napak iztaknjenih vzmeti pri kompresorjih. Zaradi nihanja vrednosti težko uporabljamo nespremenljive odločitvene pragove na daljših časovnih vrstah, saj smo napačno razpoznali veliko dobrih vzorcev. Največji problem se pojavi, ker nismo mogli razpoznati vseh vgrajenih napak iztaknjenih vzmeti. Nihanje srednje vrednosti ni posledica samo različnih tipov kompresorjev in vzmeti, ampak tudi kakovosti uporabljenih sestavnih delov kompresorja in proizvodnega procesa kompresorja. Za primerjavo odločitvenih pragov smo si izbrali uteženo kriterijsko funkcijo  $J$ . Vrednost

te funkcije smo izračunali po enačbi (1). Utežni faktor smo si izbrali tako, da enačba 10-krat bolj upošteva število napačno razpoznanih vzorcev, ko ima kompresor vgrajeno napako vzmeti. S kriterijsko funkcijo  $J$  smo iskali optimalni odločitveni prag, pri katerem je imela kriterijska funkcija  $J$  najmanjšo vrednost. Rezultate različnih odločitvenih strategij primerjamo v tabeli 7.

	Vrsta odločitvenega pragu:	$N_e$	$N_{ed}$	$N_{es}$	$k$	$\alpha$ in $\beta$	$J$
1.	Nespremenljivi odločitveni prag po 3-sigma strategiji	30	27	3	3	/	<b>5,49</b>
2.	Optimalni nespremenljivi odločitveni prag	22	19	3	3,1	/	<b>4,72</b>
3.	Spremenljivi odločitveni prag s konstantno deviacijo	8	6	2	3,1	0,001	<b>2,51</b>
4.	Spremenljivi odločitveni prag s spremenljivo deviacijo	10	10	0	4,3	0,008	<b>0,96</b>

**Tabela 7: Primerjava različnih odločitvenih pragov ter prikaz skupnega števila napak  $N_e$ , števila napačno razpoznanih dobrih vzorcev  $N_{ed}$ , števila napačno razpoznanih slabih vzorcev  $N_{es}$ , vrednosti parametra  $k$ , vrednosti parametrov  $\alpha$  in  $\beta$  in vrednosti kriterijske funkcije  $J$**

Tabela 7 prikazuje različne vrste odločitvenih pragov, ki jih izračunamo v sklopu diplomske naloge. Najosnovnejši odločitveni prag je nespremenljivi odločitveni prag, izračunan po 3-sigma strategiji. Čeprav na celotni časovni vrsti vzorcev ne moremo potrditi normalne porazdelitve, smo dobili s 3-sigma odločitvenim pragom že zadovoljivo razpoznavanje vzorcev. Z optimiranim nespremenljivim odločitvenim pragom smo zmanjšali število napačno razpoznanih dobrih vzorcev za 8. Parameter  $k_{opt}$  se spremeni iz vrednosti  $k = 3$  na vrednost  $k_{opt} = 3,1$ . Z optimiranim nespremenljivim odločitvenim pragom zmanjšamo minimalno vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$ .

Naslednji izračunani prag je bil spremenljivi odločitveni prag s konstantno deviacijo. S to vrsto odločitvenega pragu smo že bistveno izboljšali razpoznavanje vzorcev. Napačno smo razpoznali samo še 8 vzorcev. Vrednost parametra  $k_{opt}$  se ni spremenila in je ostala 3.1. Izboljšali smo tako razpoznavnost slabih, kot tudi dobrih vzorcev. S spremenljivim odločitvenim pragom s konstantno deviacijo smo zelo zmanjšali minimalno vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$ .

S spremenljivim odločitvenim pragom s spremenljivo deviacijo smo razpoznali vse vgrajene napake iztaknjenih vzmeti. Povečalo se je število napačno razpoznanih dobrih vzorcev glede na spremenljivi odločitveni prag s konstantno deviacijo. Spremenil se je parameter  $k$ , in sicer se je povišal na vrednost  $k_{opt} = 4,3$ . Prav tako se je zaradi spremenljive deviacije odločitveni prag bolj prilagodil in se približal srednji vrednosti bolj kot spremenljivi odločitveni prag s konstantno deviacijo. S spremenljivim odločitvenim pragom s spremenljivo deviacijo smo najbolj zmanjšali minimalno vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$ .

## 4.6 Končna priporočila za izvedbo strategije na liniji

Cilj podjetja je razpoznavati napake iztaknjenih vzmeti. Osnovna odločitvena 3-sigma odločitvena strategija je najenostavnejša in z njo smo zadovoljivo razpoznavali napake iztaknjenih vzmeti na kompresorjih. Izboljšanje razpoznavnosti napak z uporabo nespremenljivega odločitvenega pragu bi dosegli z vsakokratnimi nastavitvami

odločitvenega pragu pri spremembah tipov kompresorjev in tipov vzmeti. Tako bi lahko razpoznali tudi najkritičnejše napake iztaknjenih vzmeti.

S spremenljivim odločitvenim pragom in s spremenljivo deviacijo smo dobili najmanjšo vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$ , vendar je ta metoda tudi najzahtevnejša za uporabo na liniji v podjetju. Iz izvedenih meritev in pripadajoče časovne vrste je bilo razvidno, da proizvodni proces kompresorjev niha, in sicer zaradi spreminjanja tipov kompresorjev in spreminjanja tipov vzmeti. Prav tako niha zaradi kakovosti proizvodnega procesa in kakovosti sestavnih delov kompresorja. To nihanje se odraža na nihanju srednje vrednosti značilk, ki smo jih zajeli z eksperimentalnim sistemom na liniji. Z nespremenljivimi pragovi nismo mogli izničiti učinka nihanja srednje vrednosti, kar se je odražalo na slabši razpoznavnosti napak iztaknjenih vzmeti. S spremenljivimi pragovi upoštevamo nihanje srednje vrednosti in se ji prilagajamo. S temi pragovi bolje popišemo daljše časovne vrste, ki vsebujejo nihanje srednjih vrednosti.

Za izvedbo strategije na liniji priporočamo spremenljiv odločitveni prag s spremenljivo deviacijo. Ta odločitvena meja je sicer najzahtevnejša za izvedbo na liniji, vendar smo z njo najboljše razpoznavali napake iztaknjenih vzmeti. Trud, vložen v izdelavo tega odločitvenega pragu se povrne z najboljšim pravilnim razpoznavanjem vzorcev. Najmanjša kriterijska funkcija  $J_{min}$  pri spremenljivem odločitvenem pragu s spremenljivo deviacijo je bila večkratno izboljšana glede na najmanjše kriterijske funkcije  $J_{min}$  vseh ostalih izračunanih pragov. Predvidevamo, da izboljšana pravilna razpoznavnost napak iztaknjenih vzmeti pri montaži kompresorjev odtehta vloženo delo, ki je potrebno za določitev najzahtevnejšega spremenljivega odločitvenega pragu s spremenljivo deviacijo.

Za podjetje je najpomembnejše, da bi čim boljše razpoznavali napake iztaknjenih vzmeti. Za določitev spremenljivega odločitvenega pragu s spremenljivo deviacijo bi bilo potrebno optimirati dva ali tri parametre. Parametre je potrebno prilagoditi proizvodni kompresorjev v podjetju. Ko imamo izbrane dovolj dobre vrednosti parametrov, sistem deluje neodvisno in samostojno tudi, ko se pogoji na proizvodni liniji spreminjajo.





## Poglavje 5

### Zaključek

Namen naloge je bil predstaviti in raziskati možnosti avtomatskega zaznavanja iztaknjenih vzmeti pri montaži kompresorjev. V ta namen je bil postavljen eksperimentalni sistem za zajem signalov sil, analizo signalov in diagnostiko procesa. Poizkusi so pokazali, da se napake iztaknjenih vzmeti izražajo v povišani sili na senzorju. Za ločevanje kompresorjev je bila iz signala izpeljana značilka, ki je podana kot povprečna vrednost signala sile v stacionarnem intervalu, ko je že dosežena maksimalna sila. Na osnovi vrednosti značilke med izvajanjem proizvodnega procesa smo skušali ločiti kompresorje brez napak od kompresorjev z napakami iztaknjenih vzmeti.

Sistem za avtomatsko razpoznavanje napak iztaknjenih vzmeti smo testirali v podjetju Danfoss Compressors, d.o.o., v Črnomlju. Med testiranjem so bile v kompresorje vgrajene različne napake iztaknjenih vzmeti in postavljene na linijo. Časovna vrsta vrednosti značilke, pridobljena na testiranju, se je uporabila za izračun odločitvenih pragov. V diplomski nalogi smo izračunali štiri različne tipe odločitvenih pragov in smo jih med seboj primerjali s pomočjo kriterijske funkcije  $J$ . Kriterijsko funkcijo  $J$  definiramo kot uteženo mero napačno razpoznanih kompresorjev, ki daje večjo težo nepravilno prepoznanim vzorcem z vgrajeno napako iztaknjene vzmeti.

Primerjali smo naslednje odločitvene strategije:

1. Nespremenljiva odločitvena strategija.
2. Optimirana nespremenljiva odločitvena strategija.
3. Spremenljiva odločitvena strategija s konstantno deviacijo.
4. Spremenljiva odločitvena strategija s spremenljivo deviacijo.

Po primerjavi odločitvenih pragov smo ugotovili, da z nespremenljivim odločitvenim pragom, ki smo ga izračunali s pomočjo 3-sigma strategije, dobimo zadovoljivo razpoznavanje vzorcev. Z izračunom zahtevnejših odločitvenih pragov smo dobili boljše rezultate razpoznavanja vzorcev. Najbolje smo razpoznavali vzorce s spremenljivim odločitvenim pragom s spremenljivo deviacijo, ki je tudi najzahtevnejši. Pri uporabi tega pragu smo morali optimirati 2 do 3 parametre. Spremenljiva deviacija nam je odločitveno mejo približala srednji vrednosti, tako da smo lahko v našem primeru s tem pragom razpoznali vse napake vgrajenih iztaknjenih vzmeti na kompresorjih. Z ostalimi izračunanimi pragovi nismo zmogli razpoznati vseh vgrajenih napak iztaknjenih vzmeti.

Za končno priporočilo na proizvodni liniji priporočamo uporabo spremenljivega odločitvenega pragu s spremenljivo deviacijo, ker smo dobili najmanjšo vrednost kriterijske funkcije  $J_{min}$ . Menimo, da uporaba najzahtevnejšega odločitvenega pragu opraviči veliko manjša vrednost izračunane minimalne vrednosti kriterijske funkcije  $J_{min}$ , kar pomeni večkratno izboljšanje razpoznavanja vzorcev glede na ostale

odločitvene pragove. Z uporabo spremenljivega odločitvenega pragu s spremenljivo deviacijo smo dosegli cilj, ki je zanesljivo razpoznavanje napak iztaknjenih vzmeti pri montaži kompresorjev. S tem pragom nismo razpoznali vseh testiranih kompresorjev pravilno. Nepravilno smo razpoznali kompresorje brez napak, kar je dopustno. Najpomembnejše za podjetje Danfoss Compressors, d.o.o. je, da smo razpoznali vse napake vgrajenih iztaknjenih vzmeti pri montaži kompresorjev.

Povzamemo lahko, da s primerjavo značilk na osnovi signala sile, ki ga zajamemo s pomočjo eksperimentalnega sistema in s pravilno nastavitvijo odločitvenih pragov, lahko zanesljivo razpoznavamo napake iztaknjenih vzmeti pri montaži kompresorjev.

## Literatura

1. P. Potočnik, E. Govekar, I. Grabec, P. Mužič. Psychoacoustic approach to machine fault diagnosis. *International journal of acoustics and vibration*, 10:131-136, 2005.
2. A. Sturm, R. Forster. Maschinen- und Anlagen- diagnostic fur die zustandsbezogene Instandhaltung. B. G. Teubner, Stuttgart, 1990.
3. P. Potočnik, E. Govekar, I. Grabec, A. Strmec. Neural network based characterization of compressors. European symposium on intelligent techniques, hybrid systems and their implementation of smart adaptive systems EUNITE 2002, 19-21. sept. 2002, Albufeira, Portugalska. 641-645.
4. U. Benko, J. Petrovčič, W. Juričič, J. Tavčar., J. Rejec, A. Stefanovska. Fault diagnosis of a vacuum cleaner motor by means of sound analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 276:781-806, 2004.
5. A. Widodo, B.-S. Yang, T. Han. Combination of independent component analysis and support vector machines for intelligent faults diagnosis of induction motors. *Expert Systems with Applications*, 32:299–312, 2007.
6. H.X. Chen, S.K. Patrick, Chua, G.H. Lim. Vibration analysis with lifting scheme and generalized cross validation in fault diagnosis of water hydraulic system. *Journal of Sound and Vibration*, 301:458–480, 2007.
7. E. Dimla, Snr. Dimla. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40:1073–1098, 2000.
8. I. Grabec, J. Gradišek. Opis naključnih pojavov. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2000.
9. D. Tinta, J. Petrovčič, U. Benko, W. Juričič, A. Rakar, M. Zele, J. Tavčar, J. Rejec, A. Stefanovska. Fault diagnosis of vacuum cleaner motors. *Control Engineering Practice*, 13:177-187, 2005.
10. P. Potočnik, E. Govekar, I. Grabec, J. Gradišek, P. Mužič, A. Strmec. Acoustic based fault detection system for the industrial production of compressors. Proceedings of the 10th International Congress on Sound and Vibration ICSV10, 7-10. jul. 2003, Stockholm, Švedska. 1371-1378.
11. D. Breitgand, E. Henis, O. Shehory. Automated and Adaptive Threshold Setting: Enabling Technology for Autonomy and Self-Management. Proceedings of the Second International Conference on Autonomic Computing (ICAC'05), 2005, Haifa, Izrael.
12. K. L. Z. Huang, C. W. Moon. Adaptive Thresholding - A Robust Fault Detection Approach. Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control, dec. 1997, San Diego, ZDA.

13. Z. Shi, F. Gu, B. Lennox, A. D. Ball. The development of an adaptive threshold for model-based fault detection of a nonlinear electro-hydraulic system. *Control Engineering Practice* 13:1357–1367, 2005.
14. MathWorks, 2008, Matlab, <http://www.mathworks.com/matlab>.
15. G. G. Vinning. Statistical methods for engineers. University of Florida, Kalifornija, 1997.
16. Wikipedia, 2008, Wikimedia Foundation inc., [http://en.wikipedia.org/wiki/Standard\\_deviation](http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_deviation).
17. W. J. Conover. Practical Nonparametric Statistics. New York, Wiley, 1980.
18. S. Makridakis, S. C. Whellwright, R. J. Hyndman. Forecasting methods and applications, thrid edition. John Wiley & Sons, New York, 1998.

## **Izjava**

Podpisani Dejan Soklič, roj. 28.9.1983, sem diplomsko delo samostojno izdelal pod vodstvom izr. prof. dr. Edvarda Govekarja, univ. dipl. inž. in doc. dr. Primoža Potočnika, univ. dipl. inž.

Dejan Soklič

Dne 15.3. 2008