

Sprotno napovedovanje preostale življenjske dobe elektromehanskih pogonov

Boštjan Dolenc^{1,3}, Đani Juričić¹, Pavle Boškoski¹, Matej Gašperin¹, Jurij Pfajfar²

¹Odsek za sisteme in vodenje, Institut Jožef Stefan, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

²DOMEL d.o.o, Otoki 21, 4228 Železniki

³Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

bostjan.dolenc@ijs.si

On-line prediction of remaining lifetime of electromechanical drives

A state-of-the art in condition monitoring builds on detection, localisation of a fault, and, in rare cases, identification of fault intensity. However, in order to optimise maintenance strategy, a time-to-failure of the machine needs to be known prior to the machine breakage. With such information at hand, maintenance action can be done at optimal time and the machines life can be fully exploited. In this paper we will present a method for predicting remaining useful life (RUL) based on statistical models. The necessary data was obtained from life-long test on the batch of units. The data set contains vibrations obtained from bearing degradation experiments, hence the results are presented in this context. The concept of a system is presented for a family of electronically commutated motors.

Kratek pregled prispevka

Sodobni sistemi za nadzor procesne opreme omogočajo detekcijo, lokalizacijo in včasih tudi oceno velikosti poškodbe. Kljub temu pa je za potrebe optimalnega vzdrževanja potrebno poznati preostali čas v katerem bo naprava obratovala brez opaznih težav. S tovrstnimi informacijami je mogoče predčasno planiranje vzdrževalnih del in s tem opraviti vzdrževalna dela ob optimalnem času. V prispevku bomo predstavili metodo, ki omogoča napovedovanje preostale življenjske dobe z uporabo statističnih vzorcev. Potrebne meritve so bile pridobljene eksperimentalno med preizkusi življenjske dobe. Pridobljeni podatki se nanašajo na ležaje, zato bomo skladno s tem predstavili rezultate napovedi življenjske dobe. Poleg tega bomo predstavili implementacijo v okviru preizkuševališča družine motorjev z elektronsko komutacijo.

1 Uvod

Sodobne tehnologije vzdrževanja procesne opreme v grobem delimo na tri skupine: reaktivno, periodično in prediktivno oz. vzdrževanje z ozirom na stanje [1]. Žal je dandanes večina strojev še vedno vzdrževana reaktivno, torej ko se napaka že pojavi, v najboljšem primeru pa periodično, npr. vsakih nekaj mesecev. Preventivna strategija vzdrževanja predvideva zamenjavo komponent naprav po predpisih proizvajalca opreme, ne glede na to, ali je to zares potrebno. Ideja prediktivnega vzdrževanja (angl. condition based maintenance - CBM) je v tem, da je oprema ves čas pod nadzorom, pri čemer se vzdrževalne posege opravi pravočasno in le takrat, ko je to zares potrebno. S tem dosežemo polno izkoriščenost življenjske dobe opreme, hkrati pa se izognemo nepredvidljivim zaustavitvam delovanja. Oba dejavnika manjšata finančno breme podjetja, ki je posledica vzdrževanja.

Prediktivno vzdrževanje temelji na naprednih postopkih diagnostike, prognostike in ukrepanja (angl. prognostics and health management, PHM), ki vključujejo napovedovanje preostale življenjske dobe komponent ter odločanje o vzdrževalnih posegih za zagotavljanje nemotenega obratovanja naprav [2,3]. Ti sistemi so praviloma dragi [4], in načrtovani za specifično aplikacijo, zato jih je težko, včasih celo nemogoče, prenesti na druge, podobne sisteme [5,6]. Razvoj novih tehnologij na področju telekomunikacij, procesorskih enot in mikro-elektromehanskih sistemov (MEMS) je ustvaril idealne pogoje za razvoj in implementacijo naprednih in zmogljivih sistemov za spremljanje stanja in sprotno napoved preostale življenjske dobe strojev. Zaradi cenovne dostopnosti so takšni sistemi primerni za implementacijo v širšem naboru industrijskih pogonov in naprav.

V prispevku bomo predstavili postopek sprotne napovedovanja preostale življenjske dobe ležajev iz podatkov pridobljenih iz merjenih vibracij. Postopek je prirejen družini elektromehanskih pogonov, ki se proizvajajo v

večjih serijah. To nam omogoča izvedbo vrste preizkusov življenjske dobe. Med temi testi pridobimo vse podatke, ki so potrebni za razvoj modela. Pri velikih in dragih pogonih tak pristop seveda ne pride v poštev.

2 Ideja pristopa

Ležaji, ki prihajajo iz iste serije, so si po obliki in specifikacijah popolnoma enaki. Kljub temu pa se lahko dobe normalnega obratovanja posamezne enote precej razlikujejo, saj je degradacija tekalnih površin ležaja naključen proces. Naprave seveda obratujejo pod različnimi pogoji, ki močno vplivajo na degradacijo materialov iz katerih je ležaj narejen. Za pričakovano življenjsko dobo ležaja zato proizvajalci navadno podajajo parameter L_{10} . Parameter pomeni število ur obratovanja v katerem »preživi« 90% testiranih enot pod določenimi pogoji, npr. obremenitvami in hitrostmi vrtenja. Podatek je sila uporaben pri načrtovanju naprav in planiranju periodičnih vzdrževalnih del, manj pa nam pove o trenutnem stanju specifične enote.

Glavna ideja pristopa predstavljenega v tem prispevku je ocenjevanje preostale življenjske dobe dinamično na podlagi informacije pridobljene z merjenjem vibracij. Merjene vibracijske signale primerno obdelamo ter iz njih izluščimo informacijo, ki jo imenujemo značilka. Pri tem se opiramo na domnevo, da se stanje ležaja odraža na vrednosti značilk. Pri samemu napovedovanju preostale življenjske dobe se opiramo na poteke značilk, ki smo jih pridobili predhodno med preizkusi življenjske dobe N enot v ne-sprotnem delu (angl. off line). Iz potekov zgradimo statistični model, nato ga pa uporabimo za napovedovanje preostale življenjske dobe specifične enote, ki jo spremljamo, v sprotnem delu (angl. on-line).

V celotnem postopku je izbira primernih značilk ključnega pomena. Klasične značilke temeljijo na karakterističnih frekvencah ležaja. Le-te so pogojene z lokacijo poškodbe in lastnostmi ležaja in jih uspešno uporabljamo pri diagnostiki, za napovedovanje preostale življenjske dobe pa so praktično neuporabne. Eden izmed razlogov je ta, da je njihova

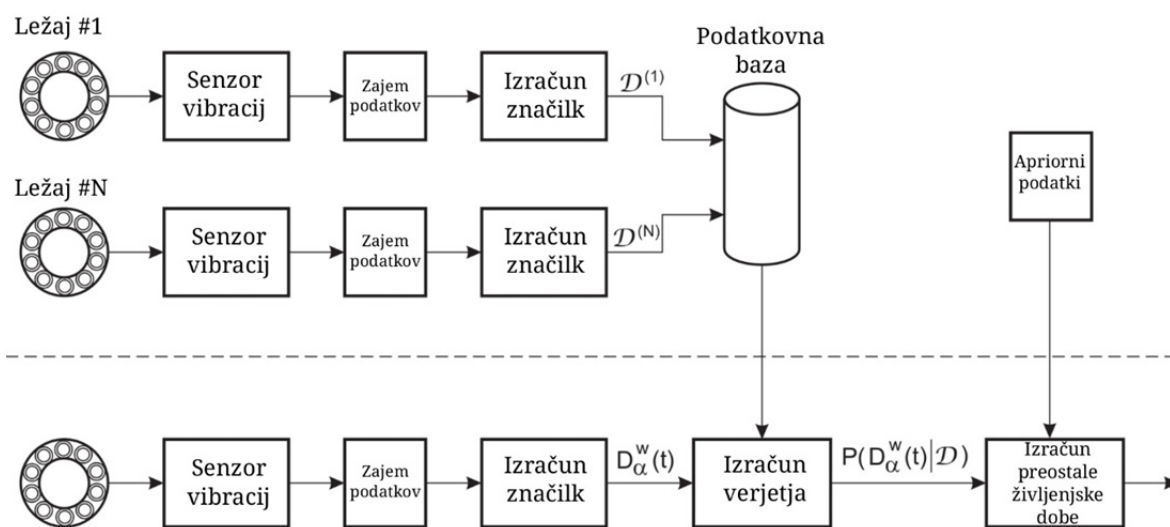
vrednost dolgo zelo majhna in se močno poveča šele kratek čas pred iztekom življenjske dobe [7]. S tem problemom se je spopadala vrsta raziskovalcev, ki so se s problemom ukvarjali v različnih kontekstih. Večina avtorjev si prizadeva poiskati povezavo med velikostjo poškodbe in potekom klasičnih značilk v obliki karakterističnih spektralnih komponent signala vibracij [8].

V pričujočem delu se opiramo na značilke, ki namesto amplitud komponent v spektru ovojnice vibracijskega signala, opisujejo statistično porazdelitev trenutnih amplitud ovojnice [10]. Vibracijski signal seveda opazujemo le v frekvenčnem področju, ki je lastno dinamiki ležaja. Porazdelitev ne opisujemo z natančnimi funkcijami temveč jih zgolj karakteriziramo s pomočjo entropijskih mer. Entropija je kvantitativna mera, ki v grobem nakazuje raztros amplitud signala. V našem primeru računamo raztros energije

ovojnice vibracijskega signala na določenem frekvenčnem področju. Bolj kot je energija strnjena, manjša je entropija in obratno. V sled degradacije ležaja in nastajajoče poškodbe, se prične oblika porazdelitve rahlo spreminjati. Te spremembe zaznamo najprej v repih porazdelitvenih funkcij. Z namenom lažje karakterizacije spremembe v obliki porazdelitvene funkcije se poslužujemo divergence, ki je mera neenakosti porazdelitvenih funkcij. V delu smo uporabili posebno entropijsko mero, ki ji rečemo Renyi-jeva entropija in njej ustrezno Jensen-Renyi-jevo (JR) divergenco [9,13].

3 Konceptualna predstavitev postopka napovedovanja preostale življenjske dobe

Slika 1 ponazarja postopek gradnje modela in napovedovanja življenjske dobe. Postopek je sestavljen iz sprotnega in ne-sprotne del.



Slika 1: Ideja pristopa sprotnega napovedovanja življenjske dobe ležajev na podlagi statističnega modela.

Ne-sprotni del

V ne-sprotnem delu sistema za napovedovanje življenjske dobe najprej zgradimo statistični model, ki opisuje evolucijo oziroma razvoj značilk skozi celotno dobo obratovanja stroja. V ta namen najprej vzamemo N ležajev ter jih izpostavimo trajnostnemu teku. Obratovalnih pogojev med izvajanjem posameznih preizkusov ne spreminjamo.

Med samim preizkusom na vsakem ležaju z oznako k v periodičnih razmakh, ki jih označimo z i , posnamemo signal vibracij in izračunamo JR divergenco \mathcal{F}_i^k ter zabeležimo čas do odpovedi \mathcal{T}_i^k . Tako dobljeno zaporedje dvojic za celotni potek preizkusa življenjske dobe označimo z

$$\mathcal{D}^k = \{ \{ \mathcal{F}_i^k, \mathcal{T}_i^k \}, i = 1, \dots, n_k \},$$

kjer je n_k število merilnih sekcij enote z oznako k .

Po izteklih preizkusih imamo na voljo N zaporedij, ki opisujejo življenje vsake posamezne enote:

$$\mathcal{D} = \{\mathcal{D}^k, k = 1, \dots, N\}.$$

Med preizkusi vse pridobljene podatke shranjujemo v podatkovno bazo za nadaljnjo obdelavo.

V naslednji fazi iz zbranih podatkov načrtamo statistični model, ki povezuje vrednost normalizirane značilke \mathcal{F} z odstotkom preostale življenjske dobe \mathcal{T} . Model zapišemo v obliki funkcije porazdelitve pogojne verjetnosti:

$$p(F_j|T_j, \mathcal{D})$$

V prispevku se ne bomo spuščali v matematične podrobnosti, natančnejši opis modeliranja pa je dostopen v [11].

Sprotni del

Sprotni del je dejansko tisti del celotnega postopka, kjer sproti napovedujemo preostalo življenjsko dobo določene enote. Med normalnim obratovanjem enote, ko je le-ta nameščena in opravlja svojo nalogo, na napravi zajemamo vibracije ter ob času j izluščimo značilko \mathcal{F}_j . Zvezo s preostalo življenjsko dobo dobimo po Bayesovem pravilu:

$$p(T_j|F_j, \mathcal{D}) \propto p(F_j|T_j, \mathcal{D}) \cdot p(T_j)$$

Prvi faktor na desni strani enačbe opisuje porazdelitveno funkcijo ocene preostale življenjske dobe ležaja. To je pogojna verjetnost, ki opisuje porazdelitveno funkcijo preostale življenjske dobe ob pogoju, da smo ob času j izmerili vibracije in izluščili značilko \mathcal{F}_j . Drugi člen predstavlja dodatno »a priori« znanje o procesu degradacije ležaja. V [11] je predstavljena ideja o oblikovanju $p(T_j)$ na podlagi poznavanja procesa. Možno je prav tako uporabiti znane podatke o ležaju, npr. parameter L_{10} .

4 Laboratorijski preizkus

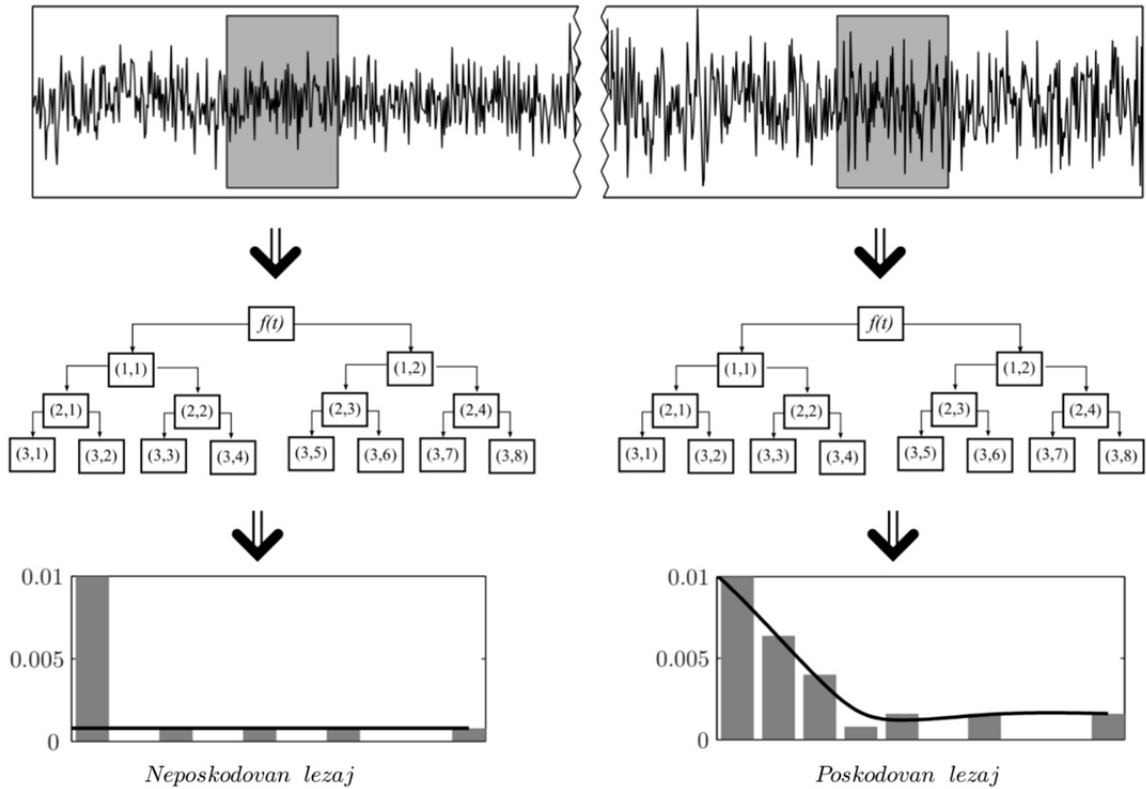
Postopek smo preizkusili na podatkih pridobljenih s pospešeno degradacijo ležajev [11]. Opravili smo tri sklope preizkusov, in sicer pod različnimi obratovalnimi pogoji. Poudariti velja, da kljub temu, da so podatki o obratovalnih pogojih znani, le-teh ne potrebujemo za izračun značilke in gradnjo modela.

Vibracije smo zajeli vsakih 5 minut. Posamezna meritev je trajala 100ms pri frekvenci vzorčenja 22kHz. Posamezen preizkus smo zaustavili, ko je efektivna vrednost vibracij preseгла $20m/s^2$.

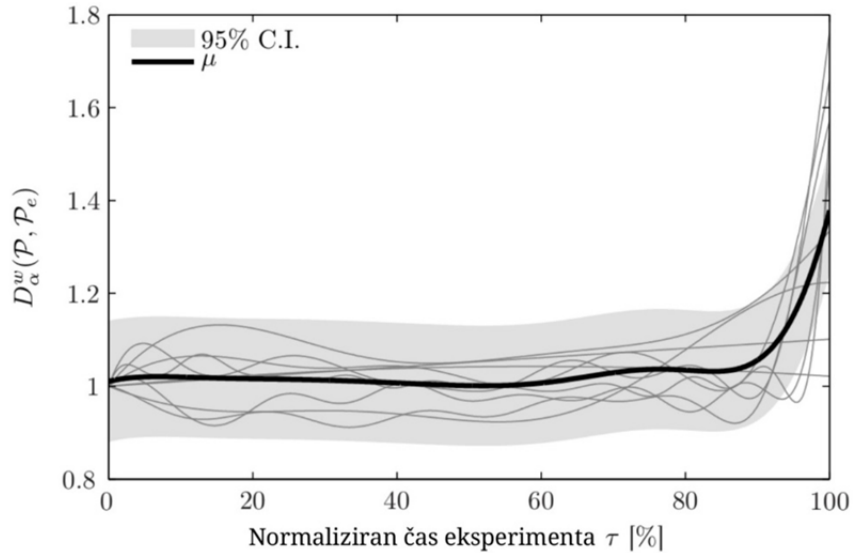
Slika 2 ilustrira metodo sinteze značilke iz vibracijskih signalov. Signal najprej transformiramo z uporabo valčne transformacije. V splošnem nam ta transformacija omogoča analizo signalov v časovno-frekvenčni domeni z visoko ločljivostjo. Rezultat transformacije je nabor koeficientov oz. časovno odvisnih uteži, ki opisujejo vsebnost energije signalov v določenem frekvenčnem pasu. Rezultirajoče signale valčne transformacije in njihove povezave s prvotnim signalom najlažje predstavimo z drevesom, kot je nakazano na sliki 2.

Posamezno vozlišče predstavlja koeficiente transformacije v ustreznem frekvenčnem pasu. Nato opazujemo koeficiente v določenem vozlišču, in sicer njihovo porazdelitveno funkcijo. Ob zagonu preizkusa shranimo porazdelitveno funkcijo ležaja v nominalnem stanju, ter jo primerjamo s trenutno. Spremembe porazdelitvene funkcije karakteriziramo z uporabo JR divergence.

Slika 3 prikazuje značilke iz vseh preizkusov. Iz slike je razvidno, da se značilke ne obnašajo enako, saj vsebujejo neko naključno komponento. Kljub temu jih povezuje neka podobnost, ki jo lahko opišemo z intervalom zaupanja, ki je na sliki označen s sivim pasom. Pas nakazuje konsistenco v načinu odpovedovanja ležaja.



Slika 2: Vibracijske signale najprej ustrezno obdelamo, nato pa opazujemo spremembe v njihovem statističnem vzorcu.



Slika 3: Potek značilk v odvisnosti od odstotka življenjske dobe ležaja.

Preostalo življenjsko dobo smo napovedovali za enoto ležaja, ki je bil prav tako izpostavljen trajnemu teku. Podatke smo pridobili na identičen način, kot smo to storili za gradnjo modela. Slika 4 prikazuje napovedi preostale življenjske dobe v vsakem trenutku. Iz slik je

razvidno, da je kakovost napovedi v prvi polovici dokaj slaba, saj na ležaju še ni nobene poškodbe, ki bi povzročila spremembe v vibracijskih signalih, in s tem porazdelitvenih funkcij. Odstopanja postanejo opaznejša, v zadnji četrtini življenjske dobe, s tem pa se

povečuje tudi zanesljivost napovedi. Potrebno je poudariti, da teh 10-20% življenjske dobe predstavlja 200-400 obratovalnih ur, kar nam omogoča pravočasno planiranje vzdrževalnih del.

5 Implementacija

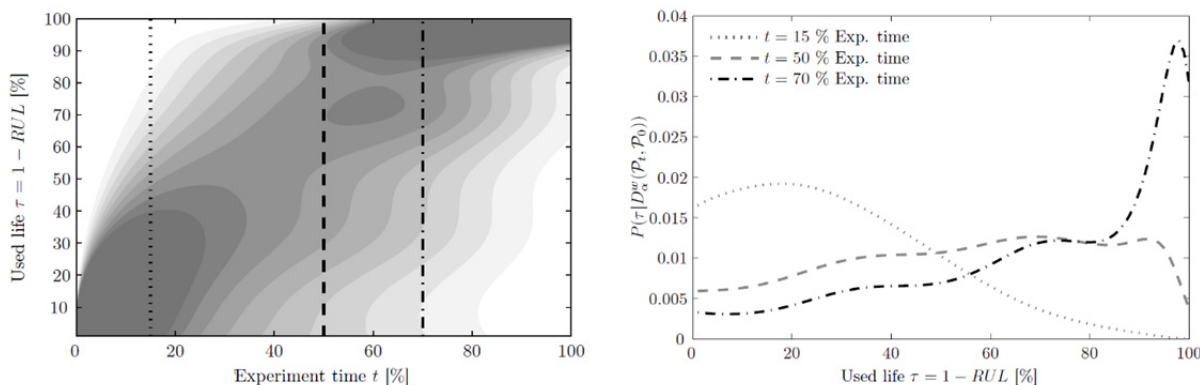
Implementacijo sistema za napovedovanje preostale življenjske dobe elektromehanskih pogonov delimo v dve fazi.

V prvi fazi moramo najprej zbrati podatke za gradnjo statističnega modela degradacije ležajev. V ta namen smo zasnovali preizkuševališče. Preizkuševališče za eno enoto prikazuje slika 4. Ključna komponenta sistema je pametno vozlišče, na katerega lahko priključimo različne senzorje, npr. senzorje vibracij in temperature. Gre za samostojno napravo, ki je sestavljena iz mikrokrmilnika, analogno-digitalnega pretvornika, komunikacijskega vmesnika ter napajalnega modula. Naprava je zmožna tudi lokalne obdelave podatkov, oziroma luščenja značilka za sprotno diagnostiko in napovedovanje življenjske dobe. Poleg tega je pametno vozlišče moč konfigurirati na daljavo.

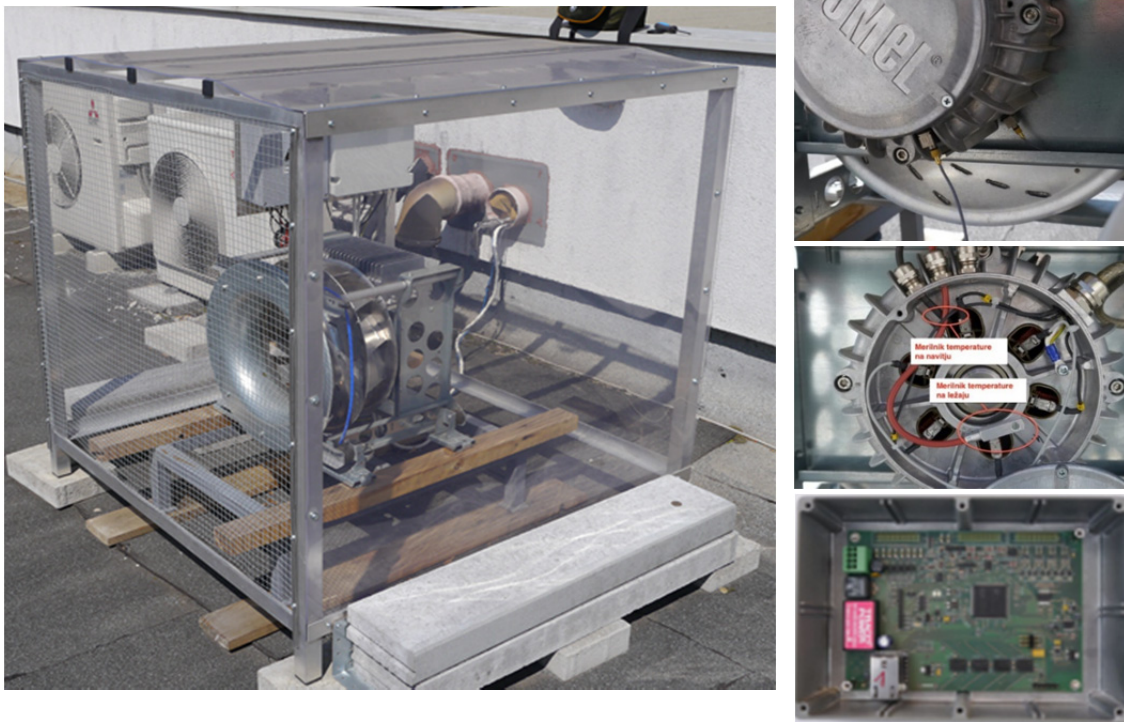
Glavna naloga pametnega vozlišča je zajem podatkov ter posredovanje le-teh v MIMOSA

podatkovno bazo. V bazo shranjujemo vse meritve vibracij, temperatur ter ostalih merjenih količin. Modularna izvedba sistema sicer omogoča uporabo različnih komunikacijskih kanalov, v konkretnem primeru pa smo izkoristili razpoložljivo Ethernet povezavo.

Pri shranjevanju podatkov igra pomembno vlogo MIMOSA podatkovna baza [12]. Gre za relacijsko bazo podatkov, prirejeno v namene vzdrževalnih sistemov, ki določa format podatkov vseh komponent takšnega sistema. Poleg tega MIMOSA definira še način komuniciranja med posameznimi procesi [12]. Baza vsebuje osnovne podatke, potrebne za normalno delovanje nadzornega sistema ter vse vmesne rezultate posameznih obdelovalnih modulov. Baza se odlikuje z natančno definicijo entitet ter njihovih relacij. Glavna entiteta v strukturi je stroj (Asset) s katerim imajo vsi ostali podatki v sistemu direktno ali indirektno povezavo. Dostop do podatkovne baze je odvisen od tehnologije oz. implementacije baze in je definiran s knjižnico ukazov. Za ta namen so bili narejeni posebni vmesniški moduli ter moduli za prikaz rezultatov in generiranje poročil.



Slika 4: Potek porazdelitvene funkcije napovedi življenjske dobe tekom obratovalne dobe (levo) in prikaz porazdelitvenih funkcij pri 15%, 50% in 70% življenjske dobe. Proti koncu "življenja" ležaja se kakovost napovedi bistveno izboljša.



Slika 5: Del preizkuševališča: preizkusni elektromotor, priključitev senzorjev, pametno vozlišče.

V drugi fazi je potrebno načrtati nizkocenovni modul, ki bo vgrajen v krmilnik motorja. Modul predvideno temelji na mikrokrmilniku ali celo na »sistemu na čipu«. Modul mora biti sposoben visokofrekvenčnega vzorčenja signalov, ter posredovanje le-teh podatkovni bazi MIMOSA. Ta bo skrbel za neprekinjeno spremljanje, obdelavo signalov, računanje napovedi ter proženje alarmov oz. navodil za ukrepanje. Podatkovna baza lahko sprejema podatke iz večih enot in omogoča sprotno izvajanje diagnostičnih in prognostičnih modulov, s tem pa sprotni nadzor pogonov nameščenih praktično kjerkoli.

6 Zaključek

Prispevek obravnava koncept sistema za sproti nadzor stanja in napovedovanja življenjske dobe ležajev v elektromehanskih pogonih. Metoda temelji na empiričnih podatkih iz katerih najprej zgradimo statistični model, ki povezuje izluščene značilke in čas, ki je še ostal do končen odpovedi enote. V sprotnem delu nato na specifični enoti opravimo določene meritve iz katerih nato izluščimo značilke, ki opisujejo njeno stanje. Za napoved potem

uporabimo zgrajeni empirični model in poiščemo porazdelitveno funkcijo preostale življenjske dobe ob pogoju, da je naša naprava v stanju, ki ga opisuje značilka.

Trenutno je v teku več trajnostnih testov motorjev serijske proizvodnje. Iz podatkov si obetamo vnovično potrditev koncepta. S tem bi si ustvarili podlago za izvedbo vgrajenega modula, ki bo sposoben opravljanja avtonomne samo diagnostike in napovedovanja življenjske dobe na elektromehanskih pogonih, ki jih bo proizvajalec namestil pri končnih uporabnikih. Na ta način bo kupcu motorja ponujena dodatna funkcionalnost, ki ga bo razbremenila odvečnih stroškov vzdrževanja.

Zahvala. Delo je bilo podprto s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije skozi projekt L2-4160.

7 Literatura

- [1] R. B. Randall. Vibration-based Condition Monitoring. WILEY, 2011.
- [2] Sethiya, S. K. (2005). Condition Based Maintenance (CBM). Retrieved from <http://irsme.nic.in/files/cbm-sethiya.pdf>.

- [3] Banks, J., Reichard, K., Crow, E., & Nickell, K. (2005, 5-12 March 2005). How engineers can conduct cost-benefit analysis for PHM systems. Paper presented at the Aerospace Conference, 2005 IEEE.
- [4] Komonen, K. (2002). A cost model of industrial maintenance for profitability analysis and benchmarking. *International Journal of Production Economics*, 79(1), 15-31.
- [5] Lybeck, S. Marble, B. Morton, Validating Prognostic Algorithms: A Case Study Using Comprehensive Bearing Fault Data, in: *Aerospace Conference, 2007 IEEE*, 1–9, 2007.
- [6] Y. Li, T. Kurfess, S. Liang, Stochastic Prognostics for Rolling Element Bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing* 14 (5) (2000) 747–762.
- [7] F. Camci, K. Medjaher, N. Zerhouni, P. Nectoux, Feature Evaluation for Effective Bearing Prognostics, *Quality and Reliability Engineering International* ISSN 1099-1638.
- [8] M. N. Kotzalas, T. A. Harris, Fatigue Failure Progression in Ball Bearings, *Transactions of ASME* 123 (2001) 238–242.
- [9] P. Boškoski, Đ. Juricic, Fault detection of mechanical drives under variable operating conditions based on wavelet packet Rényi entropy signatures, *Mechanical Systems and Signal Processing* 31 (2012) 369—381, ISSN 0888-3270.
- [10] Bearing fault prognostics using Rényi entropy based features and Gaussian process models Original Research Article *Mechanical Systems and Signal Processing*, In Press, Corrected Proof, Available online 1 August 2014 Pavle Boškoski, Matej Gašperin, Dejan Petelin, Đani Juričić.
- [11] P. Nectoux, P. Gouriveau, K. Medjaher, E. Ramasso, B. Morello, N. Zerhouni, C. Varnier, PRONOSTIA: An Experimental Platform for Bearings Accelerated Life Test, in: *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA, 2012.
- [12] MIMOSA OSA-EAT v3.2.2, www.mimosa.org, 2013.
- [13] B. Dolenc, P. Boškoski, Đ. Juričić: Robust information indices for diagnosing mechanical drives under non-stationary operating conditions, *Proceedings of CMMNO 2014*, Lyon, France.