

Adaptivna industrijska diagnostika proizvodnje kompresorjev

Primož POTOČNIK, Peter MUŽIČ, Vid DRAGOŠ, Edvard GOVEKAR

Izvleček: Opisan je adaptivni diagnostični sistem za zaznavanje napak kompresorjev na osnovi vibracij. Sistem je bil razvit v Laboratoriju za sinergetiko Fakultete za strojništvo v Ljubljani ter pilotno preizkušen v podjetju SECOP kompresorji, d. o. o. Sistem je sestavljen iz več mehatronskih sklopov za zagotavljanje predpisanih delovnih pogojev kompresorja (električni priklop, protitlačni sistem) ter iz merilne in programske opreme za upravljanje. Za razpoznavanje napak kompresorjev na osnovi vibracij smo razvili adaptivni algoritem, ki zaznava odstopanja značilnosti kompresorja od tekoče populacije kompresorjev. Za analizo signalov vibracij je uporabljena obdelava signalov na osnovi psihoakustične analize, ki omogoča zaznavanje tako stacionarnih karakteristik kompresorja (zven) kot tudi tranzientnih pojavov (trki sestavnih delov ob ohišje). Industrijsko testiranje je potrdilo zmogljivost sistema za zanesljivo zaznavanje napak kompresorjev, s čimer znatno prispevamo k zagotavljanju končne kakovosti na izhodu proizvodne linije.

Ključne besede: industrijska diagnostika, testiranje kakovosti, kompresorji, vibracije, mehatronski sistemi, psihoakustična analiza

■ 1 Uvod

V okviru sodelovanja med podjetjem SECOP kompresorji, d. o. o., in Laboratorijem za sinergetiko na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani smo v preteklih letih razvili kar nekaj uspešnih industrijskih diagnostičnih sistemov za nadzor različnih faz izdelave kompresorja. Razvili (in vpeljali v obratovanje) smo sistem za detekcijo pokanja ojníc kompresorjev [1], za detekcijo napak podpornih vzmeti kompresorjev [2], za diagnostiko vrtenja kolenčaste gredi kompresorja [3] ter za potrebe sistemov razvili različne mehatronske podporne sklope, kot sta priključni električni konektor [4] in protitlačni sistem [5]. V okviru metod analize

signalov in zaznavanja različnih vrst napak smo razvili metode adaptivnega zaznavanja [6] in izdelali metodo psihoakustične detekcije različnih akustičnih pojavov [7]. V tem prispevku je predstavljen krovni diagnostični sistem, ki na izhodu proizvodne linije na osnovi merjenja vibracij skrbi za končno kontrolo kompresorjev.

■ 2 Opis problema

Končna kontrola kompresorjev se izvaja tik pred pakiranjem in je namenjena zaznavanju nepravilnosti, ki niso bile odkrite v zgodnejših fazah proizvodnje oziroma so nastale v zadnjih fazah izdelave kompresorja. Ker je kompresor že izgotovljen, je potrebno izvajati končno kontrolo nedestruktivno, da se ne poškoduje funkcionalnost kompresorja. Obstoječi način končne kontrole se v tovarni izvaja ročno, kjer izurjena operaterka vklopi in tlačno obremeni kompresor ter medtem preko mikrofona in slušalk spremlja zvok delovanja kompresorja. Na osnovi zvočne karakteristike kompresorja se

operaterka odloči glede ustreznosti kompresorja. Zaradi zahteve po povečevanju zanesljivosti končne kontrole smo v Laboratoriju za sinergetiko Fakultete za strojništvo v Ljubljani v sodelovanju s podjetjem SECOP kompresorji, d. o. o., razvili adaptivni diagnostični sistem za avtomatizirano končno kontrolo kompresorjev. V nadaljevanju so podani opis diagnostičnega sistema ter rezultati industrijskega testiranja sistema.

■ 3 Diagnostični sistem

Diagnostični sistem je sestavljen iz mehatronskih sklopov za manipulacijo kompresorja in zagotavljanje ustreznih delovnih pogojev, iz merilne opreme ter iz programske opreme za nadzor sistema, analizo signalov in posredovanje rezultatov. Kot osnovno diagnostično veličino smo izbrali vibracije kompresorja, ki jih zajemamo prek magnetno nameščenega pospeškometra na temenu kompresorja. Pri gradnji sistema smo upoštevali več dejavnikov: – Kompresor je treba med meritvijo

Doc. dr. Primož Potočnik, univ. dipl. inž., Peter Mužič, inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; Vid Dragoš, univ. dipl. inž., SECOP kompresorji, d. o. o., Črnomelj; prof. dr. Edvard Govekar, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



Slika 1. Diagnostični sistem za končno kontrolo kompresorja na proizvodni liniji

mehansko ločiti od industrijske okolice, sicer vibracije hrupnega industrijskega okolja preveč vplivajo na meritev in s tem zmanjšujejo možnost zaznavanja napak.

- Za testiranje kompresorja je bilo potrebno zagotoviti tudi ustrezne delovne pogoje, zato smo razvili tudi dodatna mehatronska sklopa za električni priklop kompresorja in za protitlačni sistem, ki omogoča nadzor nad tlačno karakteristiko kompresorja.

Celoten diagnostični sistem je prikazan na *sliki 1*. Kompresor je dvignjen na gumiranem podstavku, pospeškomer, električni sistem in

protitlačni sistem pa so plavajoče nameščeni na kompresorju (brez mehanske sklopitve z okolico). V takšnem položaju poteka meritev vibracij kompresorja. *Sliki 2 in 3* prikazujeta posamezne sklope diagnostičnega sistema, in sicer električni priključek ter protitlačni sistem.

Delovanje diagnostičnega sistema lahko opišemo z naslednjimi operacijami, ki se začnejo s pozicioniranjem kompresorja na merilno mesto:

1. priklop električnega konektorja in protitlačnega sistema. Po priklopu obeh sistemov se priključni mehanizmi umaknejo, tako da os-

taneta sistema plavajoče pritrjena na kompresor brez mehanske sklopitve z okolico;

2. dvig kompresorja z gumiranim podstavkom iz linijske palete v pozicijo za meritev vibracij. Pri tem se kompresor že vklopi in nasloni na prosto plavajoči magnetni pospeškomer;
3. meritev vibracij kompresorja v trajanju dveh sekund obratovanja. Hkrati poteka tudi odčitavanje črtnih kod s kodo in serijsko številko kompresorja;
4. sprostitve kompresorja, odklop električnega in protitlačnega sistema;
5. analiza izmerjenih signalov (vibracije, tlak, induktivni senzorji), po končani analizi diagnostični sistem sporoči industrijski informatiki posamezne diagnostične signale:
 - a) ustreznost električnega priklopa,
 - b) ustreznost protitlačnega priklopa,
 - c) kakovost tlačne karakteristike kompresorja,
 - č) ustreznost vibracijske karakteristike kompresorja,
 - d) prisotnost tranzientnih pojavov (trkanje, ropot);
6. shranjevanje zbranih informacij (izmerjeni signali, podatki kompresorja, diagnostični rezultati) v podatkovno bazo.

■ 4 Analiza signalov

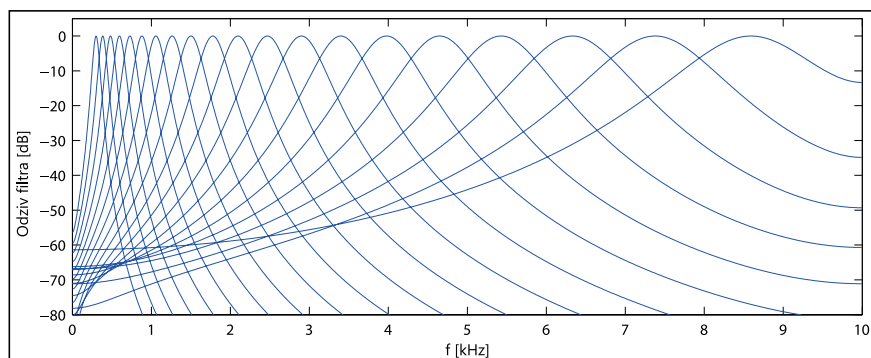
Analiza signalov obsega preverjanje tlačne karakteristike kompresorja in



Slika 2. Električni priključni sistem brez drsnega trenja



Slika 3. Protitlačni sistem za zagotavljanje ustrezne tlačne obremenitve kompresorja



Slika 4. Psihoakustični filtri

analizo signalov vibracij. Medtem ko mora tlačna karakteristika kompresorja le dosegati predpisane pogoje, je analiza signalov vibracij usmerjena v iskanje neobičajnih vzorcev, ki lahko nakazujejo na različne napake kompresorja. Zato je analiza signalov vibracij zasnovana na psihoakustični analizi [7], ki poleg stacionarne analize omogoča tudi zaznavanje tranzientnih pojavov (npr. trki sestavnih delov kompresorja ob ohišje). Osnova psihoakustične analize je niz psihoakustičnih filtrov (slika 4), katerih izhode nato polvalovno usmerimo in nizkopasovno filtriramo, da dobimo ovojnice signalov različnih frekvenčnih območij. Iz ovojnic signalov lahko izpeljemo različne značilke za detekcijo posameznih neželenih pojavov.

Za zaznavanje stacionarnih pojavov, kot je npr. karakteristični zven kompresorja, se izračuna stacionarni prispevek moči posameznih psihoakustičnih ovojnic, vrednotenje pa poteka adaptivno na naslednji način:

1. Adaptivno vrednotenje upošteva zadnjih $N = 10$ dobrih kompresorjev, ki služijo za izračun medianskega povprečja moči psihoakustičnih filtrov.
2. Stacionarni prispevek moči psihoakustičnih filtrov nove meritve se nato primerja z izračunanim medianskim profilom tekoče populacije.
3. Razlika med profiloma, izražena kot evklidska razdalja, predstavlja diagnostično značilko. Če vrednost značilke presega odločitveni prag, to pomeni, da kompresor znatno odstopa iz tekoče populacije in zato sistem diagnosticira napako.

Poleg stacionarne analize je za zaznavanje napak pomembna tudi tranzientna analiza, s katero lahko detektiramo neželene prehodne pojave (npr. trki sestavnih delov ob ohišje kompresorja) in jo sestavljajo naslednji koraki:

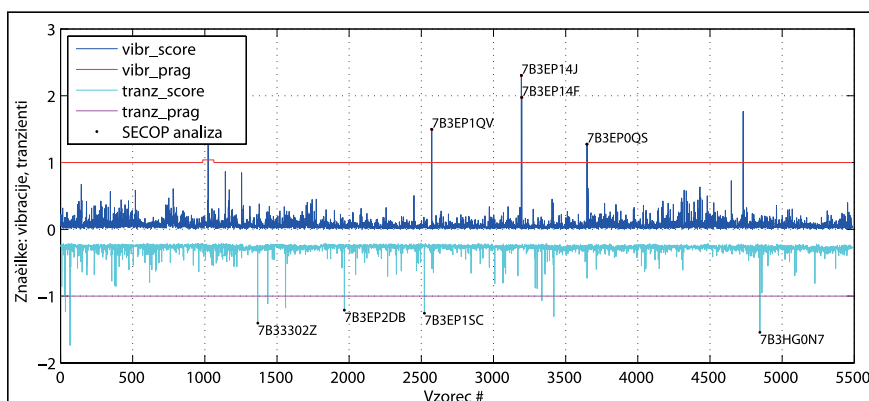
1. izračun ovojnic psihoakustičnih filtrov,
2. dodatno glajenje izračunanih ovojnic s pomočjo gladilnih filtrov,
3. detekcija in izolacija posameznih trkov, ki so razvidni predvsem iz zadnje (visokofrekvenčne) ovojnice,
4. izločanje enojnih trkov, ki običajno predstavljajo merilno motnjo oz. so posledica manipulacije kompresorja,
5. zaznavanje dodatnih trkov in primerjava moči trkov glede na mediano ovojnice,
6. če razmerje med signalom dodatnih trkov proti mediani ovojnice presega nastavljeni prag, je diagnosticirana tranzientna napaka kompresorja.

S tranzientno analizo je mogoče zaznati napake, kot so: dotik tlačne cevke ob ohišje ali napačno po-

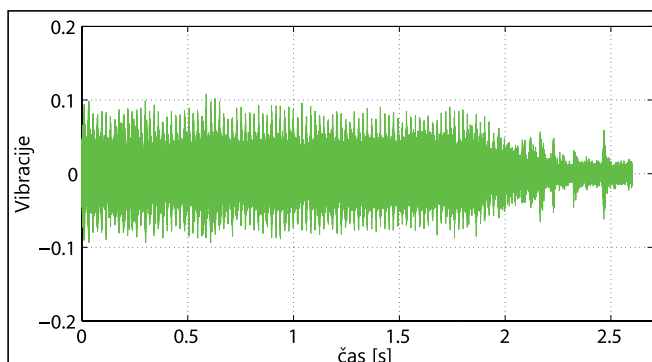
zicioniranje podpornih vzmeti kompresorja. Kompresor je diagnosticiran kot slab, če stacionarna ali tranzientna analiza odkrije večja odstopanja oziroma napako. V tem primeru se kompresor izloči iz linije in pošlje v podrobnejšo analizo.

5 Rezultati industrijskega testiranja

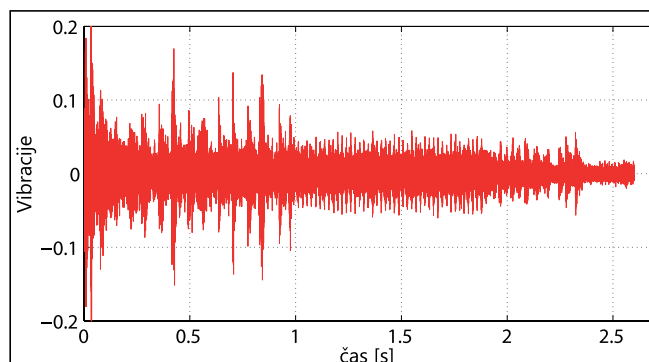
Diagnostični sistem smo namestili na proizvodni liniji podjetja in izvedli meritve na obsežni populaciji kompresorjev. Slika 5 prikazuje poteke stacionarne in tranzientne značilke vibracij med testiranjem 5485 kompresorjev. Prikazana sta tudi diagnostična pragova za obe značilki. Pri kompresorjih, ki so prekoračili mejne vrednosti diagnostičnih pragov in je napake potrdil ekspert (specialist) za analizo vzrokov napak (vzrokov za odstopanja), so označene tudi serijske številke kompresorjev. Iz obravnavane populacije kompresorjev, med katerimi je bilo tudi nekaj načrtno pripravljenih napak, je diagnostični sistem izločil 2,9 % kompresorjev, od tega 1,1 % zaradi stacionarne analize vibracij in 1,8 % zaradi tranzientne analize. Ekspert je potrdil 1,1 % napak, del predlaganih napak pa je ostal nepotrjen, čeprav je na osnovi zajetih signalov mogoče sklepati na nepravilnosti v delovanju kompresorja. V redni proizvodnji bi bil brez dodatno pripravljenih napak delež izločenih kompresorjev še občutno manjši. Za ponazoritev signalov vibracij so na slikah 6–8 prikazani primeri dobrega kompresorja (slika 6), primer diagnosticirane nepravilnosti, ki jo je direktno ugotovil



Slika 5. Potek stacionarnih in tranzientnih značilk vibracij za detekcijo napak



Slika 6. Primer signala vibracij dobrega kompresorja



Slika 7. Primer zaznane nepravilnosti kompresorja (nepotrjeno)

ekspert (slika 7), ter primer zaznane napake, ki jo je potrdila tudi analiza podjetja (slika 8).

6 Zaključek

Z opisanim diagnostičnim sistemom za končno kontrolo kakovosti v proizvodnji kompresorjev rešujemo problem zanesljivosti in natančnosti izločanja kompresorjev z okvarami iz proizvodne linije. Diagnostični sistem je sestavljen iz več mehatronskih sklopov za zagotavljanje merilnih pogojev (električni priklop, protitlačni sistem) ter iz merilne in namensko izdelane programske opreme. Za zaznavanje različnih vrst napak kompresorjev iz merjenih signalov vibracij smo razvili adaptivne algoritme na osnovi psihoakustične analize signalov. S pilotnim industrijskim obratovanjem sistema smo potrdili zmogljivost sistema za natančno zaznavanje napak kompresorjev, s čimer znatno prispevamo k zagotavljanju končne kakovosti na izhodu proizvodne linije.

Med testnimi meritvami se je predlagani diagnostični sistem izkazal kot

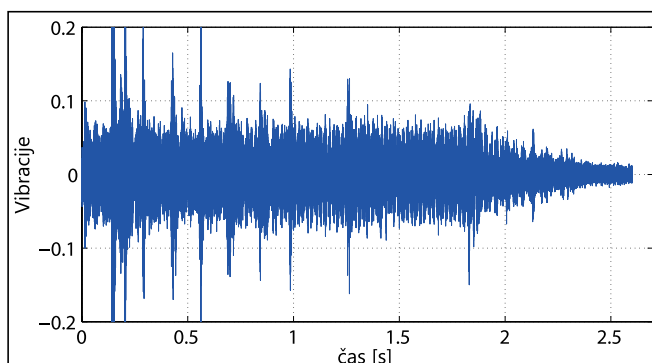
zelo zanesljivo orodje za zaznavanje napak kompresorjev, občutljivost sistema pa je mogoče sproti naravnati na ustrezno vrednost, ki zagotavlja kakovostno diagnostiko ob čim manjšem številu lažnih alarmov. Prav slednje je zelo pomembno za ekonomično poslovanje, saj izločanje sicer dobrih kompresorjev pomeni neželene dodatne stroške. Razviti adaptivni diagnostični sistem se je med testiranjem izkazal z zelo nizko stopnjo lažnih alarmov, s čimer uspešno prispeva k zagotavljanju kakovosti kompresorjev. Dodatne analize bodo potrebne predvsem na področju mejnih napak, ki jih diagnostični sistem zaznava, za katere pa še ni potrjeno, ali je potrebno takšne kompresorje izločiti iz proizvodnje. Predstavljeni diagnostični sistem za končno kontrolo kompresorjev v povezavi z ostalimi že razvitimi diagnostičnimi postajami [1–3] tvori celovit informacijski sistem kontrole kakovosti proizvodnega procesa.

Viri

- [1] P. Potočnik, P. Mužič, E. Govekar, V. Dragoš, T. Strmec: Avtomatski sistem za zaznavanje napak vtiskovanja ojníc kompresorjev. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za sinergetiko, 2007.
- [2] P. Potočnik, P. Mužič, E. Govekar, M. Absec, T. Strmec: Av-

tomatski sistem za zaznavanje iztaknjenih vzmeti pri montaži kompresorjev. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za sinergetiko, 2008.

- [3] P. Potočnik, P. Mužič, V. Dragoš, E. Govekar: Sistem za diagnostiko vrtenja kolenčaste gredi kompresorjev: poročilo o rezultatih raziskovalno razvojnega dela na projektu. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za sinergetiko, 2010.
- [4] P. Mužič, P. Potočnik, V. Dragoš, E. Govekar: Razvoj priključnega konektorja za avtomatizirani zagon kompresorjev: zaključno poročilo o rezultatih raziskovalnorazvojnega dela na projektu. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za sinergetiko, 2010.
- [5] P. Mužič, P. Potočnik, E. Govekar: Razvoj protitlačnega sistema za testiranje kompresorjev: zaključno poročilo o rezultatih raziskovalnorazvojnega dela na projektu. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za sinergetiko, 2011.
- [6] P. Potočnik, D. Soklič, P. Mužič, M. Absec, T. Strmec, E. Govekar: Automatic detection of spring faults during assembly of reciprocating compressors. *Stroj. vestn.*, 55(2009), 444–454.
- [7] P. Potočnik, E. Govekar, I. Grabec, P. Mužič: Psychoacoustic approach to machine fault diagnosis. *International journal of acoustics and vibration*, 10(2005), 131–136.



Slika 8. Primer zaznane in potrjene napake

Adaptive industrial diagnostics for the manufacturing of compressors

Abstract: Adaptive diagnostic system for detection of compressor faults based on vibration is described. The system was developed in the Laboratory of Synergetics, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, and pilot tested in the company SECOP compressors, d.o.o.. The system consists of several mechatronic assemblies for the provision of prescribed operating conditions of the compressor (electrical connection, backpressure system), and of measurement components and control software. For fault diagnosis based on vibrations of compressors, an adaptive algorithm was developed that detects deviations of the compressor characteristics from the current compressors population. For the analysis of vibration signals, psychoacoustic based signal processing is applied to detect both stationary characteristics of the compressor (sound), as well as transient events (collisions of components into the housing). Industrial testing confirmed the ability of the system to reliably detect compressors faults, thus significantly contributing to the final quality at the output of the production line.

Keywords: industrial diagnostics, quality testing, compressors, vibration, mechatronic systems, psychoacoustic analysis

NATEČAJ ZA ZLATO DIPLOMO FLUIDNE TEHNIKE

Slovensko društvo za fluidno tehniko (SDFT) razpisuje natečaj za izbor najboljših diplomskih del s področja fluidne tehnike. Zlato diplomu bomo podelili diplomantom z najboljšimi diplomskimi nalogami s sledečih področij fluidne tehnike:

- konstrukcija komponent in sistemov,
- koncepti vodenja sistemov,
- vzdrževanje in nadzor.



Namen natečaja je vzpodbuditi študente, ki so opravljali diplomsko delo s področja fluidne tehnike, da slovenski strokovni javnosti s tega področja predstavijo svoja diplomska dela, nove ideje oz. dosežke in na ta način pripomorejo k povečanju zanimanja za študij vsebin predmetov, ki se navezujejo na področje fluidne tehnike kot tudi tehnike nasploh.

Razglasitev in podelitev zlatih diplom bosta potekali na mednarodni konferenci Fluidna tehnika FT2011 v Mariboru.

Pogoji, pravila in navodila razpisa za priznanje "zlata diploma" so objavljeni na spletni strani slovenskega društva za fluidno tehniko – SDFT, www.sdft.si.

IRT³⁰⁰⁰
inovacijarazvojtehnologije

**NEPOGREŠLJIV VIR
INFORMACIJ ZA STROKO**

**VSAKA DVA MESECA
NA VEČ KOT 140 STRANEH**

Vodnik skozi množico informacij

- kovinsko-predelovalna industrija
- proizvodnja in logistika
- obdelava nekovin
- napredne tehnologije

