

Naprava za testiranje zavornih ploščic

Ivan VENĠUST, Martin PETRIČ

Izveček: V prispevku so predstavljeni razvoj naprave za avtomatično testiranje zavornih ploščic, zahteve trga za zavorni sistem z diskom za kolesa in razvoj zavornih materialov. Potreba po sledenju tržnim trendom je glavni povod za razvoj specializirane testne naprave, ki omogoča razvoj novih tornih materialov in optimizacijo obstoječih. Zavorne ploščice morajo dosegati ustrezno zavorno moč in življenjsko dobo. Pomembno je tudi, kakšna je zavorna moč pri prvih zaviranjih po menjavi ploščic in kakšne so karakteristike ploščic pri visokih temperaturah, ki se pojavijo pri ekstremnih zaviranjih. Vse to so zahteve za testno napravo, ki omogoča simulacijo realnih pogojev, programiranje merilnih sekvenc in merjenje signalov sensorike. Opisana je izbira krmilnega sistema, merilnih komponent in specifika izvedbe programskega dela projekta. Opis testov in analiza primerjave dveh tornih materialov sta predstavljena v končnem delu prispevka.

Ključne besede: testiranje zavornih sistemov, torni materiali, zavorne ploščice, obraba, simulacija realnih pogojev

1 Uvod

Proizvajalci zavornih ploščic se nenehno soočamo z različnimi izzivi, ki jih zahteva trg ali varovanje okolja. Eden bistvenih v zadnjih desetletjih je prav gotovo prepoved uporabe azbesta, ki je bil pred tem ena pomembnejših komponent zavornih



Slika 1. Zavorna čeljust in zavorne ploščice. Na dveh sta nameščena zavorna batka iz čeljusti [1]

Dr. Ivan Vengust, univ. dipl. inž., PS, d. o. o., Logatec; Martin Petrič, univ. dipl. inž., SINTER, d. o. o., Ljubljana

mas. Po drugi strani se poleg zahtev, ki vplivajo na celotno industrijo, srečujemo s specifičnimi, ki zadevajo določen tržni segment.

Pri vstopu na globalni trg zavornih ploščic smo se srečali z zahtevami, ki na naših dosedanjih trgih niso imele pomembne vloge in jih z obstoječo raziskovalno opremo nismo mogli testirati. To je bil glavni povod za razvoj naprave za testiranje zavornih ploščic za kolesa (slika 1).

2 Diskasti zavorni sistem

Zavorni sistem (slika 2) služi za zastavljanje vozila. Pri tem se kinetična energija vozila pretvarja v toplotno. Pri diskastih zavornih sistemih se toplotni tok ustvari ob pritisku zavornih ploščic na površino zavornega diska. Zaradi tega se predvsem zavorni disk in zavorne ploščice močno segrejejo, kar privede do vrste fizikalno-kemijskih reakcij, ki pomembno vplivajo tako na zavorno silo kakor tudi na življenjsko dobo tornega para.

Pri razvoju tornih materialov zavornih ploščic so bistvenega pomena receptura frikcijske mešanice ter procesni pogoji, s katerimi definiramo razvoj mikrostrukture materiala

in zagotovimo ponovljivost izdelave. Torni material zavornih ploščic je v osnovi sestavljen iz štirih različnih tipov komponent:

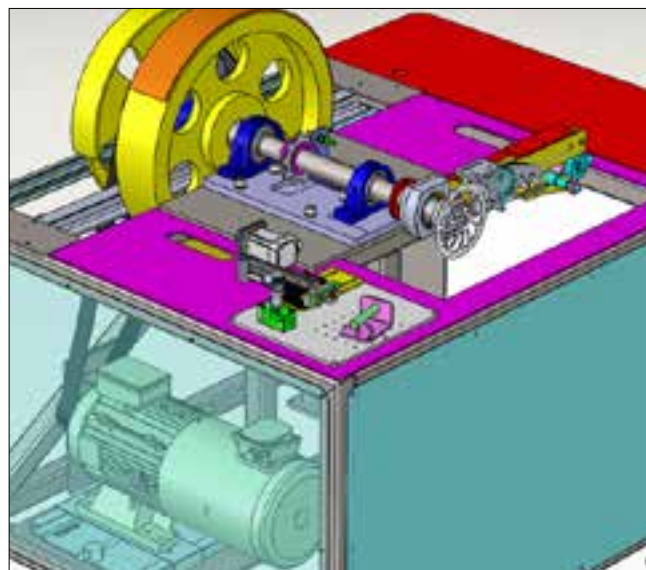
- armaturna vlakna zagotavljajo mehanske lastnosti frikcijskega materiala,
- s polnili izboljšamo izdelavnost frikcijske mešanice in znižamo ceno,
- modifikatorji frikcije določajo nivo tornega koeficienta in posledično zavorno moč,
- veziva povezujejo vse ostale komponente.

Razmerja med temi štirimi tipi in vhodne surovine se med seboj bistveno razlikujejo glede na tržni segment in pričakovano aplikacijo zavor.

Z vidika procesnih pogojev moramo v prvi fazi izdelave zavornih ploščic nujno regulirati zaporedje in način mešanja vhodnih surovin, da zagotovimo homogenost frikcijske mešanice in s tem ponovljivost posameznih šarž. Predpisi o masi briketa frikcijskega materiala, temperaturi, tlaku in času definirajo operacijo stiskanja, med katero material zavzame končno obliko. S temperaturnim profilom naknadne toplotne obdelave razvijemo



Slika 2. Zavorni sistem kolesa z diskom [1]



Slika 3. Pogon zavornega diska

mikrostrukturo tornega materiala, ki pomembno vpliva na stisljivost in obrabo zavorne mase.

Testiranje zavornih ploščic poteka na dinamometru, na katerega vpne zavorni disk in zavorno čeljust, kamor vstavimo zavorni ploščici. Testni program je sestavljen iz določenega števila zaporednih zaviranj pri določenih pogojih in je lahko definiran na različne načine. Pogosto poteka regulacija v odvisnosti od časa zaviranja ali izmerjene temperature zavornega diska ali zavornih ploščic. Običajno pri tem merimo količine, ki omogočajo izračun tornega koeficienta in obrabo zavornih ploščic.

Trg zavornih ploščic za kolesa ima poleg zgoraj omenjenih splošnih zahtev še dodatne, ki jih do sedaj ni bilo možno testirati:

- popuščanje zavorne moči pri prvih zaviranjih na povišani temperaturi,
- zavorna moč v mokrem,
- utekanje zavornih ploščic,
- zaviranje z definirano vztrajnostjo.

Naprava za testiranje mora poleg zgoraj navedenih splošnih zahtev zagotoviti vpetje celotnega zavornega sistema za kolo, pri čemer elektromotor služi za pogon osi, na katero je vpet vztrajnik, ki simulira voznika. Naprava bo omogočila kontrolo parametrov tornih materi-

alov med razvojem in možnost takojšnjih ustreznih sprememb.

■ 3 Razvoj naprave

Pri razvoju naprave smo sledili dvema pomembnima funkcijama, ki ju mora zagotavljati. To sta vrtenje zavornega diska in kontrola zaviranja.

Os zavornega diska z vztrajnikom poganja elektromotor preko jermenskega prenosa (slika 3). Pogon mora zagotoviti visoko dinamiko delovanja, predvsem hitro pospeševanje. Dodatna zahteva je možnost izbire dodajanja energije med zaviranjem oz. simulacije zaviranja med vožnjo po klancu navzdol. Zaradi razmeroma velikih vztrajnostnih mas in kratkih pospeševalnih ciklov sta bila za pogon izbrana 11-kilovattni asinhronski elektromotor in vektorski frekvenčni regulator, ki lahko obratuje v momentnem načinu. V elektromotor je vgrajen inkrementalni merilnik pozicije za natančno merjenje hitrosti vrtenja. Merilnik pozicije motorja je tudi pogoj za momentni način delovanja.

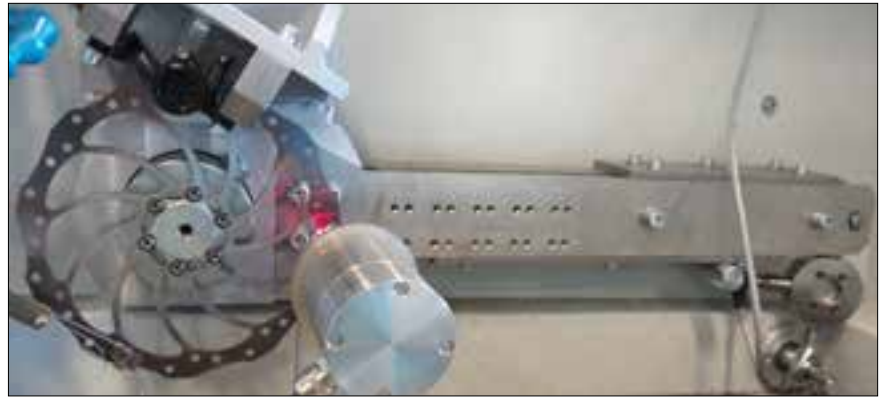
Kontrola zaviranja je izvedena z linearnim aktuatorjem, ki ga upravlja servopogon. Cilinder pritiska na zavorno ročico in simulira različne zaviralne sekvence (slika 4). Specifični zahtevi sta zaviranje s konstantno zaviralno silo in zaviranje v določenem času od začetne do končne hitrosti.

Za zaviranje s konstantno silo mora motor omogočiti pozicijsko kontrolo z omejevanjem momenta, za zaviranje v določenem času pa momentni način delovanja motorja in ciklično spreminjanje trenutnega momenta. Med testi je potrebno meriti spreminjanje sile na zavorno ročico. To izvedemo posredno z meritvijo obremenitve motorja med zaviranjem. Izbran je bil servopogon, ki lahko deluje v pozicijskem in momentnem načinu in ima ciklični dostop do internih podatkov (regulator B & R ACOPOS micro in ustrezen servomotor).



Slika 4. Linearni aktuator lahko pritiska na zavorno ročico s konstantno ali spremenljivo silo [1]

Med izvajanjem testov naprava meri, računa in shranjuje številne parametre. Na napravi so senzori za merjenje zaviralne sile, tlaka v zavornem sistemu, temperature diska in zavorne čeljusti. Zaviralno silo oz. zaviralni moment merimo na ročici, na katero je nameščena zavorna čeljust (*slika 5*). Levi del ročice je uležan na os gredi z zavornim diskom, na drugi del je nameščena natezna merilna celica z merilnimi lističi in ojačevalnikom izhodnega signala. Senzor tlaka v zavornem sistemu je nameščen med zavorno ročico in zavorno čeljust. Plak olja lahko med močnim zaviranjem doseže vrednosti do 60 barov. Za merjenje temperature vrtečega se diska sta uporabljena dva senzori. Brezdotični infrardeči senzor meri energijo sevanja diska v območju od 100 do 600 °C. Drsní senzor drsi po površini diska. Nameščen ima termočlen tipa K, ki lahko meri temperaturo v še večjem območju (-200 do 1350 °C). Temperatura diska lahko med intenzivnimi testi preseže 500 °C.



Slika 5. Merjenje zaviralne sile in temperature diska [1]

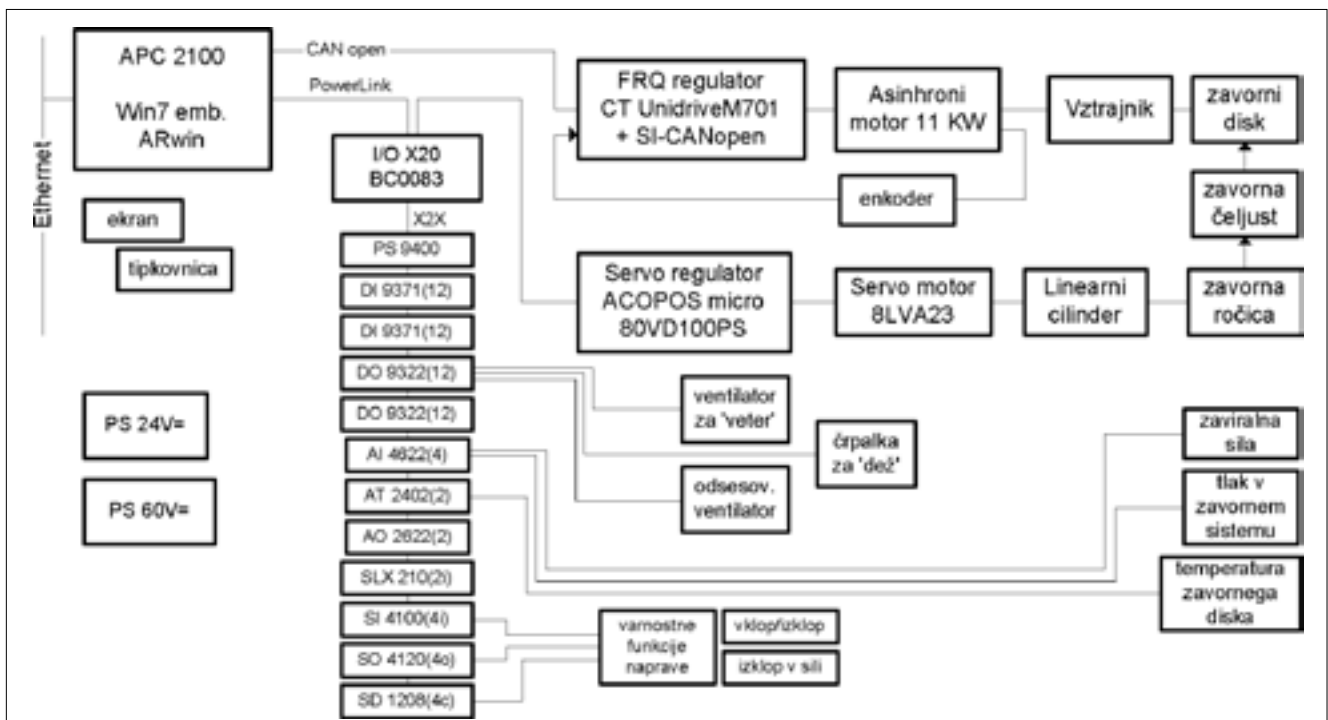
Krmilni sistem naprave je prikazan na *sliki 6*. Osrednji element krmiljenja je kompakten industrijski računalnik B & R APC2100 [2]. Ohišje je majhno (200 x 115 x 40 mm), podobne velikosti kot npr. zunanja

CD-enota. Procesor je dvojedrni Intel Atom E3827, sistem ima 4 GB RAM-a in 24-voltno napajanje. Namesto diska uporablja kartico 64 GB CFAST, ki je podobna karticam CompactFlash, le da namesto vmesnika PATA uporablja hitrejši vmesnik SATA. Vse to omogoča, da lahko PC obratuje brez hladilnih ventilatorjev. Na enoti sta dva vmesnika Ethernet in dodatni vmesnik za PowerLink, CAN in RS232 komunikacije. Operacijski sistem PC-ja je Windows Embedded 7, paralelno z njim pa teče še sistem ARwin za delo v realnem času, ki zagotavlja deterministične odzive krmilnega sistema. Win7 in ARwin si podatke izmenjujeta preko virtualnega vmesnika TCP/IP preko RAM-a z dvojnim dostopom. Oba

sistema sta med seboj neodvisna. Program za upravljanje naprave teče znotraj sistema ARwin in lahko obratuje, čeprav bi se operacijski sistem Win7 zaradi napake ustavil.

Večino enot krmilnega sistema povezuje hitra Ethernet povezava s protokolom PowerLink [3]. PowerLink je standardiziran protokol z lastnostmi trdega realnega časa. Zagotavlja deterministične prenose podatkov v časovnih intervalih od 400 µs navzgor. PowerLink povezuje APC2100, I/O-enote (X20 BC0083) in servoregulator ACOPOS micro.

Enota X20 BC0083 je vmesnik do X2X-vočila, na katerem so I/O-moduli sistema, digitalni vhodi in izhodi,



Slika 6. Blokovni diagram krmilnega sistema naprave

analogni vhodi in izhodi in analogni temperaturni vmesnik za termočlene. Na X2X-vodilu je tudi varnostni krmilnik SLX 210 z varnostnimi I/O-moduli.

Servoregulator ACOPOS micro sprejema ukaze in ciklične reference preko povezave PowerLink, preko iste vrača PC-ju stanje in trenutne podatke o poziciji in obremenitvi.

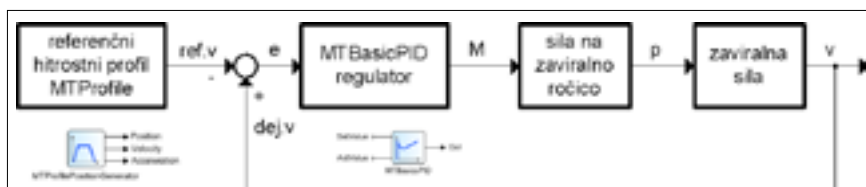
Regulator CT UnidriveM 701 je z APC2100 povezan s CAN-vmesnikom. Uporabljen je protokol CANopen. Prav tako kot PowerLink omogoča ciklične prenose ukazov, referenc in statusov, konfiguracijo podatkovnih blokov, prenos podatkov, je pa nekoliko počasnejši.

Za varnost delovanja naprave je uporabljen varnostni krmilnik B&R SLX 210. Ta krmilnik je neodvisen od ostalih enot krmilnika. Preko svojih vhodov in izhodov omogoča vklop in izklop moči naprave, izvaja logiko izklopa v sili, prepreči delovanje naprave, če so vrata odprta, ne dovoli odpiranja vrat, če se disk vrti ipd.

Razvoj aplikacije za napravo poteka v programskem okolju B & R Automation Studio z vsemi jeziki PLCopen ter jeziki C, C++, BASIC. Programske jezike je mogoče kombinirati. Izberemo lahko najprimernejšega za določeno funkcijo. Aplikacija je napisana v ANSI C in PLCopen jeziku ST (Structure Text). Sestavljena je iz treh delov: iz programske in sekvenčne logike, logike za varnostni krmilnik in grafičnega vmesnika HMI.

Osrednji del sekvenčne logike je zadolžen za izvajanje testne sekvence naprave. Način izvajanja testne sekvence določa program, ki ga sestavljajo nastavitveni parametri in variabilno število parametriziranih blokov. Parametri bloka določajo, kako se kontrolira glavni motor za pogon zavornega diska, na kakšen način zaviramo ter kako vklapljamo ali izklaplamo dodatne enote naprave. Kot primer je naveden program, ki izvede naslednje:

blok 0: 90 s ponovitev zaviralnih ciklov s pospeševanjem diska do 25 km/h v 2 s in



Slika 7. PID-regulacija zaviranja

zaviranji do 5 km/h v 7 s, med zaviranji motor poganja disk z 800 W moči, vključena sta odsesovalni ventilator in ventilator za veter s fiksno hitrostjo 25 %

- blok 1:** 10 s premor, v katerem se disk vrti s hitrostjo 3,0 km/h
- blok 2:** 60 s ponovitev zaviralnih ciklov, ostalo enako kot blok 0
- blok 3:** ohlajanje diska na temperaturo 50 °C, medtem se disk vrti s hitrostjo 5,0 km/h, vključen je ventilator za veter s hitrostjo 100 %
- blok 4:** izklop enot ter ustavitev izvajanja programa

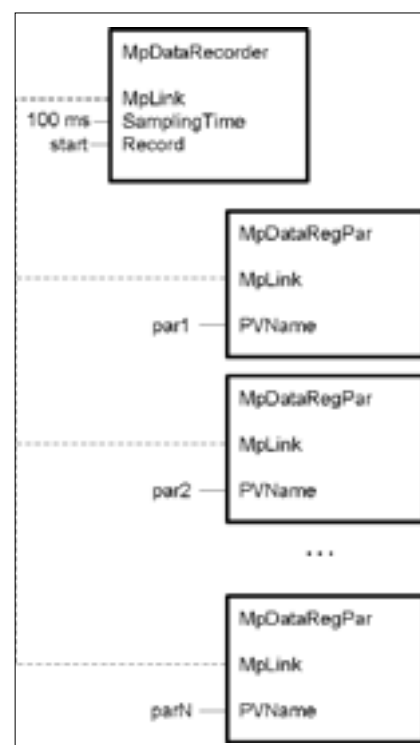
Blok 0 vsebuje ukaz za zaviranje od hitrosti 25 km/h na 5 km/h v 7 s. Med takšnim zaviranjem je potrebno regulirati silo pritiska na zavorno ročico. Cilj je, da bo želeni čas zaviranja dosežen čim bolj točno. Uporabljen je PID-regulator (MTBasicPID), ki primerja referenčni hitrostni profil z dejanskim in glede na trenutno napako povečuje ali zmanjšuje silo zaviranja (slika 7). Z optimizacijo PID-parametrov je doseženo natančno sledenje referenci (slika 9).

Številne kompleksne funkcije naprave so realizirane z uporabo mapp komponent. Mapp tehnologija [4] [5], ki jo uporablja razvojno okolje B & R Automation Studio, je zasnovana na objektnih principih gradnje programov. Mapp komponente predstavljajo preizkušene modularne gradnike, ki jih dodajamo v program, povezujemo med seboj in jih nato v programu upravljamo preko pripravljenega uporabniškega vmesnika. Mapp komponente so nadgradnja tehnologije funkcijskih blokov, ki jo je uvedla standardizacija PLCopen [6]. Združujejo večje število funkcijskih blokov v bolj kompleksne enote.

V našem programu so mapp komponente uporabljene za kontrolo osi

za zaviranje in osi za vrtenje glavnega motorja (MpAxisBasic), za zapisovanje izmerjenih in izračunanih podatkov (MpDataRecorder in MpDataRegPar) ter za nalaganje in shranjevanje ali nalaganje programov poteka testiranja (MpRecipeXml in MpRecipeRegPar). Osnovni komponenti lahko dodamo dopolnilne in tako razširimo funkcionalnost. Kot primer: pri kontroli osi za zaviranje komponenta MpAxisCyclicSet funkcijam pozicioniranja osi doda še možnost cikličnega spreminjanja momenta motorja.

Na sliki 8 so prikazane mapp komponente za zapisovanje podatkov v izhodno datoteko. Z vhodnimi parametri komponente MpDataRecorder (RecordMode, SamplingTime) določimo način zapisovanja podatkov in čas vzorčenja (npr.: vzorčenje v enakomernih časovnih intervalih, interval 10 ms). Parametri



Slika 8. Realizacija funkcije zapisovanja podatkov z mapp komponentami

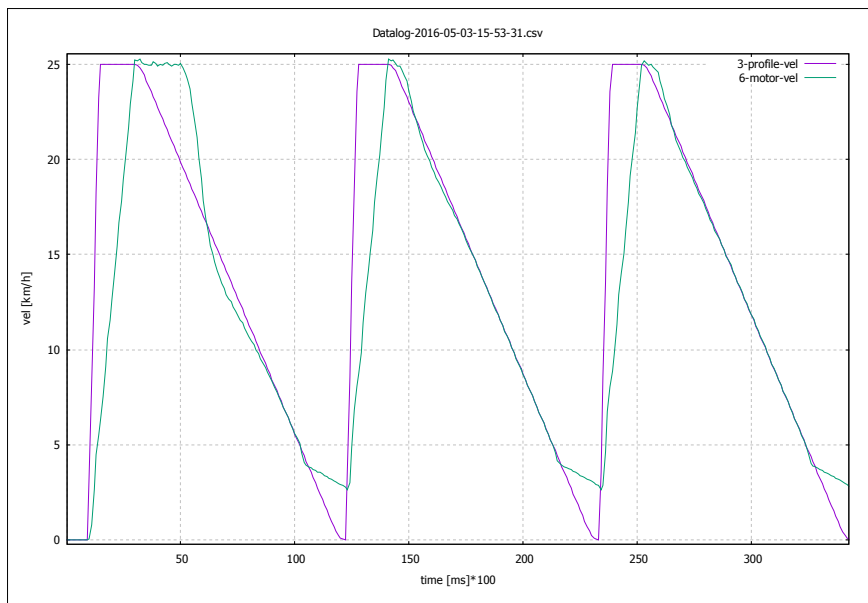
komponent MpDataRegPar (PVName) določijo spremenljivke, ki jih zapisujemo.

Poleg omenjenih obstaja še obširen nabor drugih mapp komponent za funkcije, kot so: realizacija alarmov, vizualizacija podatkov, HMI-vmesniki, povezana gibanja osi, kot je leteče žaganje [5], večosni CNC-krmilniki, kontrola različnih robotskih mehanizmov ipd.

4 Testi in analiza podatkov

Na napravi se lahko izvajajo avtomatizirani testi zavornih ploščic in komponent zavornih sistemov z diskom. S programom in parametri programskih blokov lahko vplivamo na izvedbo testa. Med izvajanjem testa se snema 14 parametrov, podatki so zapisani v ASCII 'csv' datoteko, ki jo lahko kasneje analiziramo s preglednico ali drugimi programi. Prikazanih je nekaj posnetih podatkov iz opravljenih testov. Diagrami so pripravljani s programom gnu-plot [7], ki je odlično orodje za hitre analize podatkov in vizualizacijo.

Slika 9 prikazuje začetna zaviranja testa, ko zaviramo od hitrosti 25 na 5 km/h v 7 s, glavni motor med zaviranjem dodatno poganja disk z 800 W moči. Vidimo lahko, da PID-regulator po začetnem prenehanju hitro ujame referenčno hitrostno



Slika 9. Diagram PID-zaviranja s spremenljivo silo; prikazani sta hitrostna referenca (3) in dejanska hitrost diska (6)

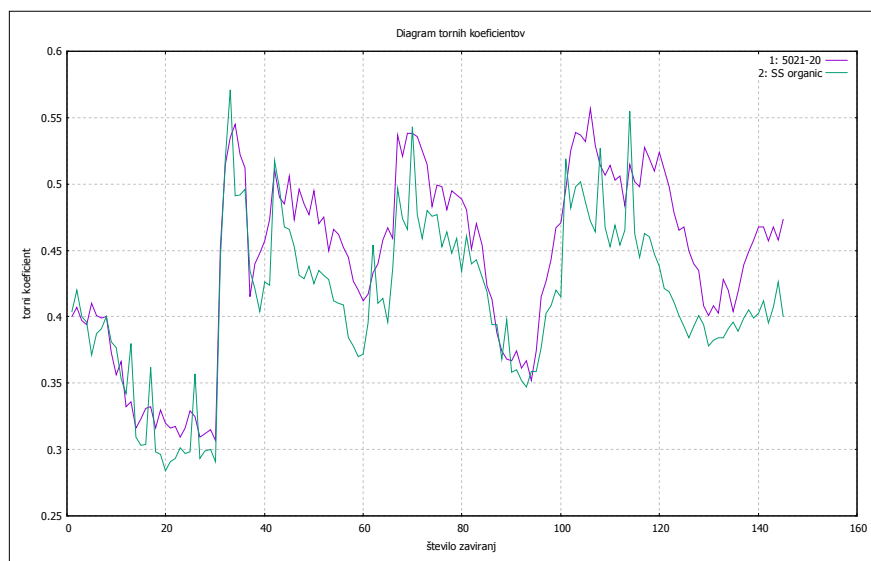
rampo. Test služi za primerjavo utekanja frikcijskih materialov, saj se sila na ročici spreminja glede na utečenost zavorne ploščice in glede na temperaturo na disku. Obenem je dober pokazatelj za študij naknadne toplotne obdelave, s katero lahko zavorne ploščice pripravimo na obratovalne pogoje.

V nadaljevanju je predstavljena analiza karakteristik dveh tornih materialov. Za primerjavo sta bila izbrana material '5032' proizvajalca Sinter in material 'SS organic' konkurenčnega evropskega proizvajalca.

Zavorne ploščice so med testom postavljene spreminjajočim se obremenitvenim pogojem. V testu se ponavljajo ostra zaviranja od hitrosti 25 km/h na 2 km/h. Med zaviranjem je sila na zavorno ročico konstantna in znaša 70 N. Test je sestavljen iz petih ciklov. Prvi služi utekanju zavornega sistema, preostali pa meritvam v suhih in mokrih pogojih. Analiza rezultatov poteka na podlagi drugega, tretjega, četrtega in petega cikla. Med posameznimi cikli se zavorni disk ohladi na sobno temperaturo. Po prvem ciklu so vsi nadaljnji sestavljeni iz zaporednih zaviranj v suhih pogojih, ki jim sledi 5 zaviranj v mokrem. Zaviranje v mokrem se od zaviranja v suhem loči po tem, da med zaviranjem pršimo vodo na površino zavornega diska. To je simulacija vožnje v deževnih razmerah. Kot primerjalni parameter je izbran torni koeficient materiala. Torni koeficient 'μ' se izračunava med zaviranjem po enačbi (1).

$$\mu = \frac{F \cdot l}{2 \cdot A \cdot r_e \cdot p \cdot l_f} \quad (1)$$

- μ – torni koeficient
- F – zavorna sila
- l – ročica merilne celice sile
- p – zavorni tlak
- A – površina zavornega batka
- r_e – efektivni polmer zavornega diska
- l_f – faktor zavorne učinkovitosti



Slika 10. Diagram povprečnih tornih koeficientov frikcijskih materialov '5032-20' in 'SS organic' za 145 ponovitev zaviranj pri različnih pogojih

Med testi neposredno merimo zavorno silo F in zavorni tlak p. Ostali parametri enačbe (1) so določeni s tipom zavornega diska, zavorne čeljusti in geometrijo testne naprave. Torni koeficient se uporablja kot parameter, s katerim primerjamo moč zaviranja posameznega frikcijskega materiala.

Slika 10 prikazuje primerjavo tornega koeficienta dveh izbranih materialov zavornih ploščic. Na torni koeficient močno vplivajo temperatura zavornega diska in zavornih ploščic in prisotnost vode. Zato lahko v diagramu opazimo precejšnja nihanja tornega koeficienta med potekom testa. Na torni koeficient vpliva tudi torni material. Prav ta razlika je cilj naše analize. Analiza rezultatov testa pokaže 5 % višjo zavorno moč za material 5032 pri stacionarnih pogojih. V mokrem je razlika še bolj očitna, saj znaša skoraj 9 %. Tovrstna analiza daje možnost primerjave tornih materialov in izboljševanja materialov za doseganje zelenih zavornih karakteristik.

■ 5 Sklep

Naprava za avtomatizirano testiranje zavornih ploščic je bila razvita in izdelana v podjetju PS, d. o. o., Logatec za podjetje Sinter, d. o. o., Ljubljana. Oba partnerja sta združila znanja in izkušnje s svojih področij pri zasnovi, specifikaciji in razvoju

tehnološko zahtevne preizkuševalne naprave. Aplikativno najpomembnejša lastnost naprave je možnost sočasnih meritev različnih fizikalnih parametrov, ki jih pri načrtovanju frikcijskih mešanic ni mogoče popolnoma predvideti. Naprava omogoča podjetju Sinter razvoj novih zavornih materialov, kontrolo parametrov materiala med razvojem in takojšnje spremembe, če so potrebne, torej hitrejši in bolj kvaliteten razvojni cikel.

Viri

- [1] Fotografije: PS, d. o. o., Logatec, slike 1, 2, 5: Ivan Vengust, slika 4: Anže Vrabl.
- [2] B & R_APC2100: (<https://www.br-automation.com/en-in/products/industrial-pcs/automation-pc-2100>).
- [3] Ethernet PowerLink Standardization Group: Industrial Ethernet facts 2nd Edition, sep. 2013.
- [4] B & R mapp technology.
- [5] LIAM Lab: White Paper, mapp technology Benchmark – flying saw (www.brautomation.com/smc/d8fa16e36ce14990f40a77fcb7c42bbf2ae1f6cf.pdf).
- [6] PLCopen.org: (<http://www.plcopen.org>).
- [7] Gnuplot: (<http://www.gnuplot.info/gnuplot/homepage>).

Brake pad testing machine

Abstract: The development of a bicycle brake pad testing machine is presented in the paper. The market of disc brake systems for bicycle application redefines the braking parameter's priority and scope. Testing machines for braking systems are common, however only few are applicable for this market segment and none of them offer the combination of developing custom tests in addition to measure parameters for evaluating the fade effect.

This machine offers the possibility of designing custom tests, measurement of different friction and wear related parameters, real-life conditions simulation and online monitoring. The result of this development is a brake pad testing machine with custom designed software and a regulation system which provides new possibilities of bicycle braking system testing and an advantage in the new friction formulation development.

The testing procedures and the result analysis are presented in the final part of the paper.

Keywords: Brake testing machine, friction materials, braking pads, wear, real-life simulation

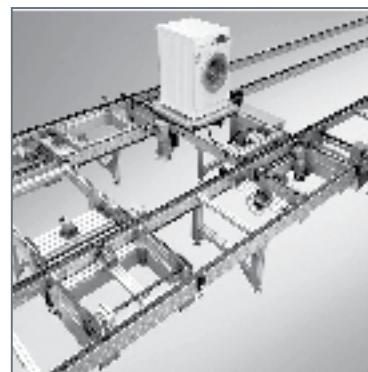
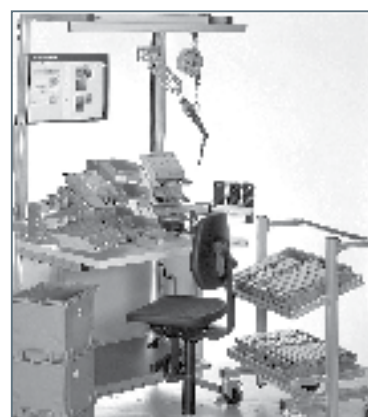
Rexroth

ORGATEX®

LEANPRODUCTS®



BOSCH



OPL

automation

OPL avtomatizacija, d.o.o.
Dobrave 2
SI-1236 Trzin, Slovenija

Tel. +386 (0) 1 560 22 40
Tel. +386 (0) 1 560 22 41
Mobil. +386 (0) 41 667 999
E-mail: opl.trzin@siol.net
www.opl.si