

Diagnostični sistem za končno kontrolo elektromotornih pogonov za kolesa tipa Pedelec

Boštjan Pregelj¹, Andrej Debenjak¹, Gregor Dolanc¹, Janko Petrovčič¹ in Boris Benedičič²

¹Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1000 Ljubljana

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

bostjan.pregelj@ijs.si, andrej.debenjak@ijs.si, gregor.dolanc@ijs.si, janko.petrovcic@ijs.si,
boris.benedicic@domel.com

Diagnostic system for end-of-line quality control of Pedelec electric bike drives

The Domel company together with its partners developed and started production of an electric bicycle drive (pedelec - Pedal Electric Cycle). In order to achieve customer satisfaction and fulfill the security requirements, the operation of each product at the end of the production line should be thoroughly checked. The paper presents the design and construction of a semi-automatic diagnostic system for performing this tests. The mechanical part of the system consists of a driving and braking assembly, each composed of a vector-controlled motor, reductor and torque meter, and a clamping system of the test piece. For safe operation, security logic and optical curtains are taken care of, for the execution of manipulation procedures Simatic control system, and for the diagnostic procedure and algorithms an industrial PC computer. The computer program adjusts the drive and brake torque of the actuator and its electric motor support, and measures speeds, electrical parameters and vibrations. The diagnostic procedure involves the verification of electrical and communication circuits, calibration of the drive, and functional check of operation and safety functions.

Kratek pregled prispevka

Podjetje Domel iz Železnikov je skupaj s partnerji razvilo elektromotorni pogon za kolesa tipa Pedelec (Pedal Electric Cycle). Za doseganje zadovoljstva kupcev in izpolnjevanje varnostnih zahtev je potrebno delovanje vsakega izdelka na koncu proizvodne linije temeljito preveriti. V prispevku je predstavljeno načrtovanje in zgradba pol-avtomatskega diagnostičnega sistema za izvajanje omenjenega preizkusa. Mehanski del sistema tvori pogonski in zaviralni sklop, vsak z vektorsko krmiljenim motorjem, reduktorjem in merilnikom navora, ter sistem vpetja preizkušanca. Za varno obratovanje skrbita varnostna logika in optična zavesa, za izvajanje manipulacijskih postopkov krmilniški sistem Simatic, za diagnostični postopek in algoritme pa industrijski PC računalnik. Računalniški program nastavlja pogonski in zaviralni navor Pedelec pogona ter njegovo elektromotorno pomoč, meri pa hitrosti, napore električne parametre in vibracije. Diagnostični postopek zajema preverjanje električnih in komunikacijskih tokokrogov, kalibracijo pogona, ter funkcionalno preverjanje delovanja in varnostnih funkcij.

1 Uvod

Kolesa z električnim pogonom v zadnjem času vse številčnejše vstopajo na trg. Število različnih izpeljank, modelov in proizvajalcev se vztrajno povečuje. V zadnjem času se med proizvajalce pogonskih sklopov vključuje tudi podjetje Domel z izdelkom BCM-925, s katerim namerava preseči najboljše na svetovnem trgu. Za doseganje in zagotavljanje najvišjih standardov kvalitete mora vsak proizvedeni pogon skozi obsežno serijo funkcionalnih in varnostnih testov, ki vključujejo celotni potencialni razpon delovanja.

Na odseku za Sisteme in vodenje Instituta Jožef Stefan imamo dolgoletne izkušnje z razvojem diagnostičnih sistemov za končno kontrolo proizvodnje elektromotorjev [1, 2], zato Pedelec pogon, kot integrirani kos elektronike, elektromotorja in zobniških prenosov [3,4], predstavlja pot na novo, kompleksnejše področje in s tem zanimiv izziv za izvedbo.

Testna celica, merilna oprema in procedura morajo zagotavljati najvišji nivo ponovljivosti meritev. Robustna in natančno izdelana mehanska konstrukcija ter obsežni diagnostični algoritmi morajo zagotoviti ponovljivo diagnostiko in izločiti kar največ vplivov okolice.

V prispevku je predstavljeno načrtovanje in zgradba pol-avtomatskega diagnostičnega sistema, ki služi za izvajanje popolnega preizkusa proizvedenih pogonov za kolesa.

2 Mehanska zgradba sistema

Naloga sistema končne kontrole je zaznati in prepoznati potencialne napake proizvedenega izdelka in morebitna odstopanja od nazivnih karakteristik, ki izvirajo bodisi iz njegovih elektronskih, električnih ali mehanskih sestavnih delov. Zato mora mehanska konstrukcija diagnostičnega sistema zagotavljati visoko stopnjo izločanja motenj iz okolice. V tem primeru gre predvsem za vibracije, ki jih povzročajo tako zunanji dejavniki, kot tudi pogonski sklopi samega sistema. Za zmanjšanje

vpliva zunanjih vibracij služi masiven delovni pult z maso preko 500kg, ki je pritrjen na robustno jekleno ogrodje. Nanj je pritrjen testni sklop z maso 120 kg. Med njima so nameščeni vložki iz gumirane plute, katerih površina je optimirana s ciljem doseganja čim nižje mejne frekvence prenosa vibracij. Z vibracijsko izolacijo so opremljene tudi vijačne zveze med delovnim pultom in testnim sklopom. Poskrbeti je bilo potrebno tudi za dušenje vibracij, ki bi jih sicer v meritev vnašali mehanski sklopi diagnostičnega sistema (pogonski in zaviralni sklop z reduktorjema, pnevmatski manipulatorji itd.). Temu namenu je prirejena izvedba vpetij vseh elementov, vključno z gonilno in zaviralno gredjo. Izvedba s pomočjo vložkov iz gumirane plute in tulcev iz silikonske gume omogoča, da je testiranec na testno mesto vpet le preko dušenih sklopov, nikjer pa preko stikov kovina-kovina. Na ta način je bilo mogoče izločiti vibracijske motnje zunanjega izvora do mere, da so njihovi vplivi zanemarljivi in so meritve vibracij za diagnostične namene zadovoljive.

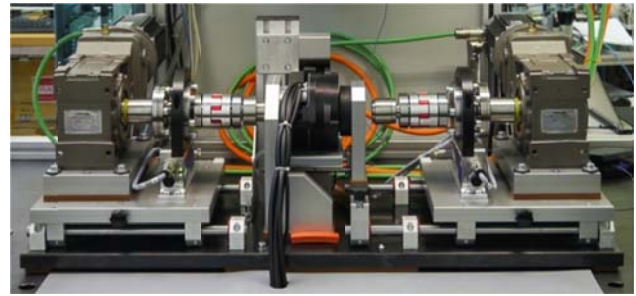
Za zagotavljanje varnosti operaterja je testno mesto z vseh strani razen sprednje zaprto, na sprednji strani pa je vgrajena svetlobna zavesa. Operater po vstavitvi pogona na testno mesto in po pritisku na tipko »Start« do konca testnega postopka ne sme več posegati v nevarno območje diagnostične naprave. Če poseže, prekine svetlobno zaveso, varnostni sistem pa nato zaustavi vektorska krmilnika pogonskega in zaviralnega sklopa (STO – safe torque off), izklopi napajanje pogona v testiranju in napajanje za ventile pnevmatskih manipulatorjev.



Slika 1: Diagnostični sistem za končno kontrolo Pedelec pogonov.

Glavni mehanski del testnega sistema tvorita pogonski in zaviralni elektromotorni sklop z reduktorjema ter sistem vpetja preizkušanca, kot je to prikazano na Sliki 2. Oba sklopa sta nameščena na pomičnih vozičkih, ki se premikata na dveh vodilih, opremljenih z linearnimi ležaji. Premikanje vozičkov zagotavljajo pnevmatski valji, omejevanje gibanja pa je izvedeno z oljnimi dušilnimi elementi in

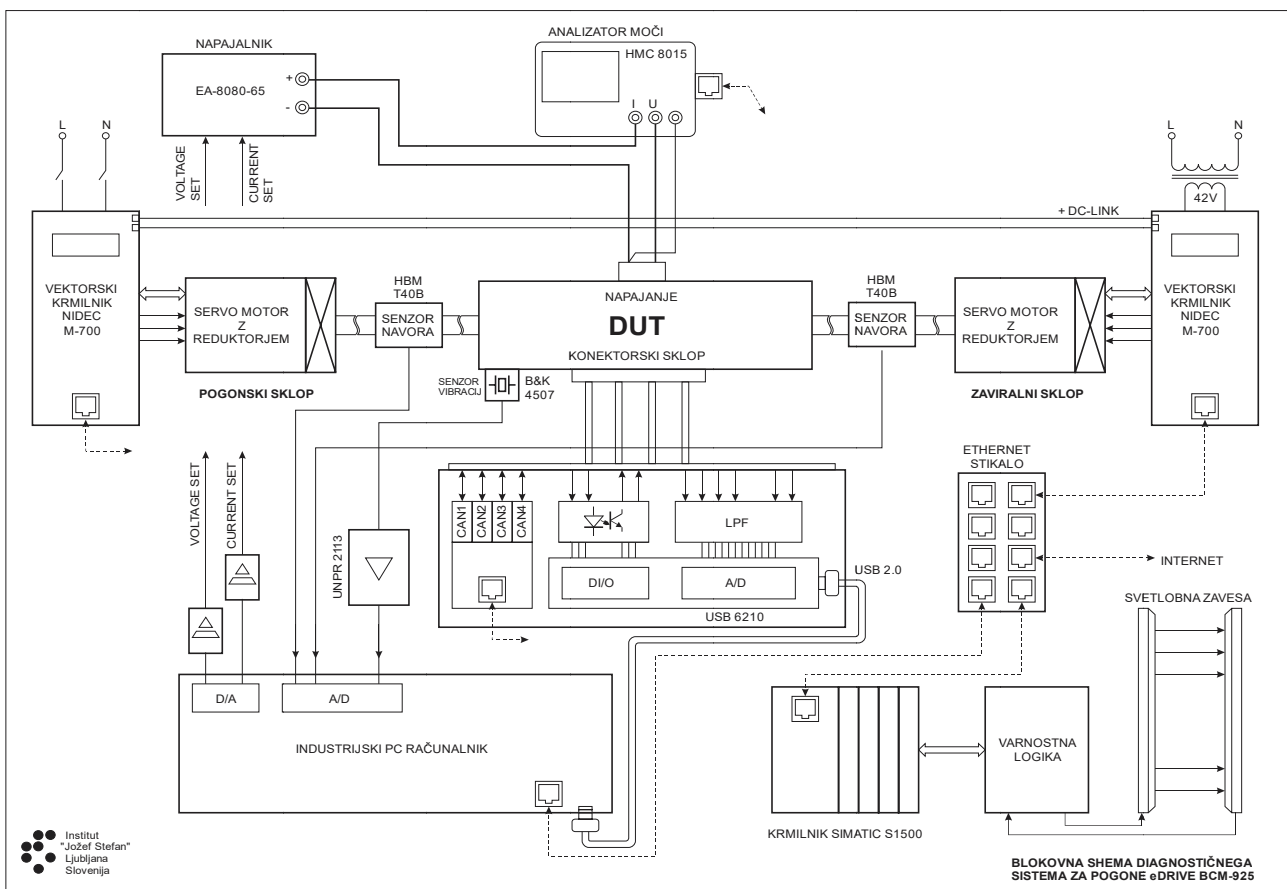
obroči iz silikonske gume. Za vpetje testiranca skrbi polavtomatski pnevmatski zaklep.



Slika 2: Fotografija elektro-mehanskega dela sistema: levi pogonski, desni zaviralni sklop, ter testirani Pedelec pogon na sredini.

3 Električna in merilna oprema

Električna in merilna oprema omogočata simulacijo zahtevanih mehanskih in električnih delovnih pogojev ter izvedbo pripadajočih meritev. Shema vgrajenih komponent ter povezav med njimi je prikazana na blokovni shemi na Sliki 3.



Slika 3: Blokovna shema diagnostičnega sistema za končno kontrolo Pedelec pogonov.

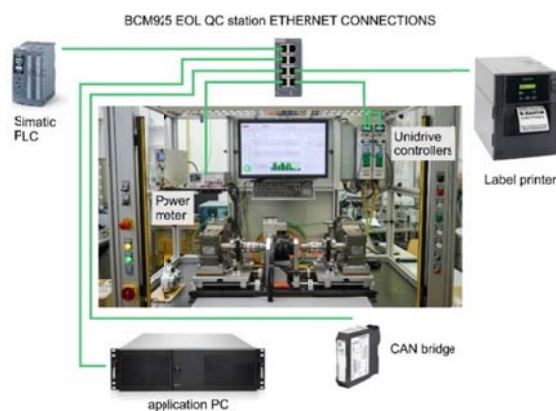
Električna oprema diagnostičnega sistema obsega 8 komponent:

- dva vektorska krmilnika za nastavljanje navora in hitrosti pogonskega in zaviralnega motorja,
- CAN vmesnik za komunikacijo s preizkušancem, preko katerega nastavljamo ali izbiramo režim njegovega delovanja, navor, hitrosti, faktor elektromotorne pomoči,
- enosmerni napajalnik za pedelec pogon v postopku testiranja, ki nadomešča baterijo kolesa,
- PLC krmilniški sistem Simatic 1500 za izvajanje manipulacijskih postopkov,
- Varnostna logika in optična zavesa za varno obratovanje (preprečitev poškodb operaterja, preizkušanca in diagnostične naprave),
- Industrijski PC računalnik s programskim okoljem za diagnostični postopek in diagnostične algoritme,
- Tiskalnik za deklaracijske nalepke.

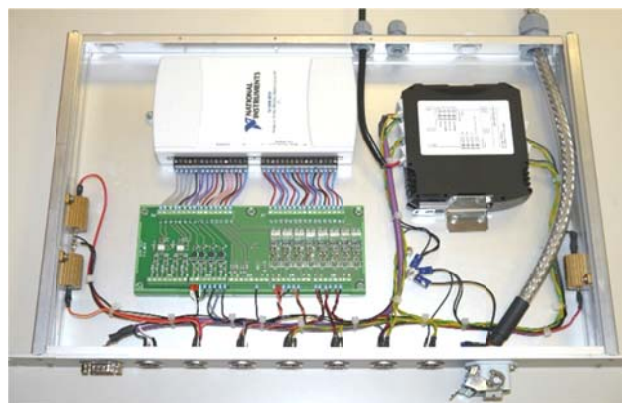
Merilna oprema služi zajemu električnih meritev pogona kot celote in njegovih izhodov za napajanje periferije, ter meritev pospeškov (vibracij), in navorov (pogonskega in zaviralnega sklopa). Merilna oprema obsega 7 komponent:

- 2 industrijska merilnika navora z obsegoma ± 100 oz. ± 200 Nm na pogonski in zaviralni strani,
- Senzor vibracij,
- Merilnik električnih veličin – analizator moči Rohde&Schwarz HMC8015,
- 2 vmesniški kartici tipa PCI (National instruments) za zajem meritev vibracij in navorov,
- 1 vmesniški USB modul (National instruments) za zajem izhodnih napetosti pogona in simulacijo nekaterih funkcij (signal hitrosti, stisk zavore, oz. pretrganje žice). Modul je integriran v sklopu z filtrskim in relejnim vezjem, ki omogoča

doseganje zahtevanih obremenitev napajalnih izhodov in izvedbo meritev (Slika 5).



Slika 4: Shema električne in merilne opreme, povezane v ethernet omrežje



Slika 5: Vmesniški sklop za simulacijo električnih obremenitev in izvedbo meritev s filtrskim in relejnim vezjem, ter CAN vmesnikom za komunikacijo s Pedelec pogonom.

4 Programsko okolje in postopek testiranja

Programsko del diagnostičnega sistema vključuje gonilnike za merilne naprave, za upravljanje kartic za zajem podatkov, za krmiljenje vektorskih krmilnikov za motorje in za delovanje CAN vmesnika, ter programe za vodenje pogonov, komunikacijo in izvajanje meritev, avtomat stanj z glavno diagnostično proceduro, ter grafični vmesnik.

Grafični vmesnik, prikazan na Sliki 6, sestavlja več panelov: glavni panel, panele za upravljanje pogonskega in zaviralnega sklopa, za komunikacijo in upravljanje testiranca, za kalibracijo merilne opreme, ter za dodatne

nastavitve. Na glavnem panelu so prikazane vse ključne informacije za aktualni testirani pogon. Panel se deli na tri dele: levo je informacija o testirancu, ter opravljenih korakih procedure, na sredini sta numerični in grafični prikaz merjenih vrednosti, na desni pa rezultati aktualnih meritev.

Osnovna manipulacijska procedura vključuje avtomatsko sklapljanje in odklapljanje pogonskega in zaviralnega sklopa na ISIS gredi pogona v postopku testiranja, kar zahteva vrtenje pogonov v posebnem režimu s spremenljivo hitrostjo in omogoča, da vpetje pogonov optimalno sede na ISIS priključke gredi testiranca.

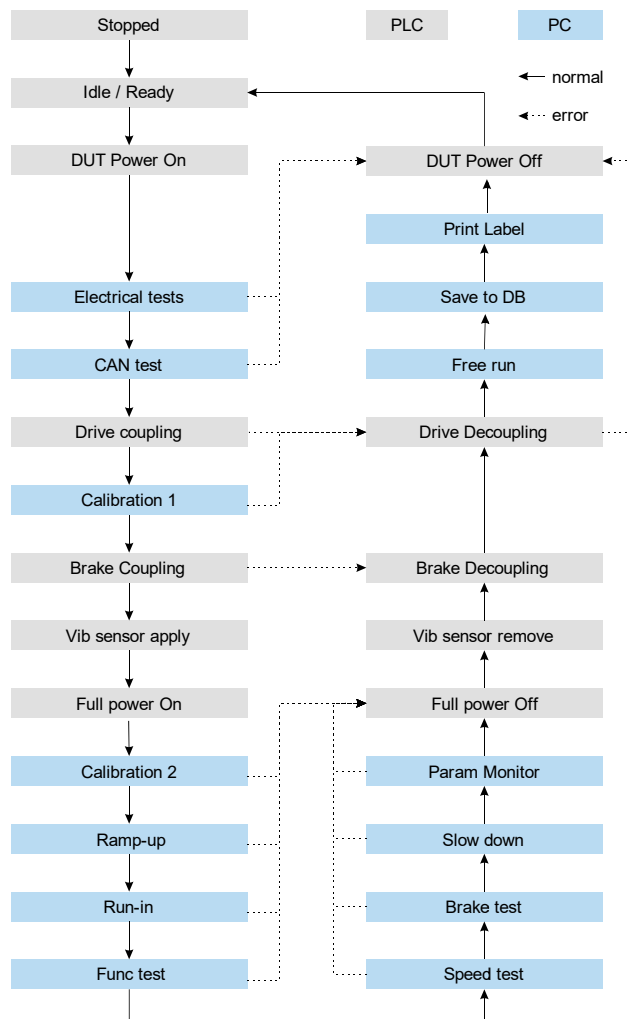


Slika 6: Grafični vmesnik z glavnim diagnostičnim panelom med delovanjem.

Postopek testiranja je v osnovi sestavljen iz testa komunikacije s pogonom, meritve njegovih napajalnih izhodov, kalibracije, obremenilnega testa ter preizkusa varnostnih funkcij. Diagram prehajanja stanj celotnega postopka je prikazan na sliki 7.

4.1 Postopek testiranja

Ob startu preizkusa se najprej izvede preverjanje komunikacijske povezave na 4 CAN kanalih, ter napajanja za sprednje in zaviralne luči, kontrolno HMI enoto, senzorske naprave in pomožnih naprav. PC aplikacija nato na osnovi specifikacij, pridobljenih iz podatkovne baze, na testiranca naloži potrebne parametre in kalibrira senzor zasuka osi rotorja motorja ter senzor navora. Sledi obremenilni preizkus, kjer se preveri delovanje v širokem območju navorov, hitrosti vrtenja osi ter faktorjev elektro-pomoči.



Slika 7: Blokovna shema glavnih stanj diagnostičnega postopka – sestavljajo jih operacije krmilnika in diagnostične aplikacije.

Obremenilni preizkus sestavljajo štiri faze: a) zagon s postopnim dviganjem navora in hitrosti, b) krajše utekanje, c) funkcionalni preizkus z različnimi vhodnimi navori in stopnjami pomoči ob konstantni hitrosti vrtenja osi, ter d) zaustavljanje. Ob tem sistem preverja, ali so navori, električni parametri in vibracije v predpisanih mejah. Po obremenilnem preizkusu sledijo še: preverjanje varnostnih funkcij izklopa pomoči ob preseženi hitrostni omejitvi kolesa ali ob pritisnjeni zavori, ter preizkus prostega teka. Sledi varni izklop napajanje in sprostitvev testiranca. V kolikor je pogon uspešno prestal test, tiskalnik izpiše nalepko s končno deklaracijo, sicer pa izpiše kode zaznanih napak. Prav tako se zapis o izvedenem testu z vsemi merilnimi rezultati doda v

podatkovno bazo, ki omogoča arhiviranje podatkov in sprotno analitiko [2].

Med postopkom diagnostike pogonski elektromotor, ki simulira poganjanje pedal, deluje v navornem režimu s predpisanim navorom. Zaviralni elektromotor, ki simulira breme (upor, vzpon), pa deluje v hitrostnem režimu s konstantno hitrostjo. Testirani Pedelec pogon glede na izbrani faktor elektro-pomoči dodaja x-kratnik vhodnega navora (pedala).

Pedelec pogon ima vgrajen varnostni procesor, ki za delovanje zahteva periodično pošiljanje posebnih CAN sporočil, ki jih sicer generira nadzorni sistem napajalne baterije. Ker v okviru diagnostičnega sistema baterijo nadomešča enosmerni napajalnik, je potrebno simulirati celotni varnostni protokol sporočil.

5 Zaključek

Predstavljeni diagnostični sistem, ki je že uspešno izvedel diagnostiko poskusne serije 300 kosov pogonov BCM-925, se trenutno namešča v proizvodno linijo za serijsko proizvodnjo pogonov. Tako se pridružuje 10 obratujočim

sistemom za končno kontrolo različnih elektromotorjev, proizvedenih v podjetju Domel. Po zahtevnosti izvajanja testnih postopkov, meritev in diagnostičnih algoritmov spada med kompleksnejše in nakazuje smer razvoja izdelkov z višjo dodano vrednostjo.

6 Literatura

- [1] P. Boškosi, J. Petrovčič, B. Musizza, Đ. Juričić. An end-quality assessment system for electronically commutated motors based 3 on evidential reasoning. *Expert systems with applications*, ISSN 0957-4174. [Print ed.], 2011, vol. 38, no. 11, str. 13816-13826.
- [2] A. Debenjak, P. Boškosi, B. Musizza, M. Kern, A. Biček, Informacijska arhitektura za proizvodno analitiko – primer Domel, AIG zbornik – Industrijski forum 2015.
- [3] C. K. Mechefske, *Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis, Vibration and Shock Handbook*, (Edited by de Silva et al.), CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, Chapter 25, pp 25-1 to 25-35, 2005.
- [4] N. Tandon, A. Parey. *Condition monitoring of rotary machines*. Springer Series in Advanced Manufacturing: Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing, 109–136, 2006.