

Avtomatska končna kontrola elektromotorjev

Gregor Dolanc¹, Boštjan Pregelj¹, Janko Petrovčič¹

¹Institut Jožef Stefan, Odsek za sisteme in vodenje
E-pošta: gregor.dolanc@ijs.si

End-of-line quality inspection of electric motors

Abstract. Fully automated end-of-line quality inspection systems are one of the key components of Industry 4.0 concept. This paper reports the implementation of such system in company Domel, a renowned producer of electric motors. Key requirements are fully automatic operation, high reliability of inspection, high throughput, which follows the speed of production line and high flexibility to be able to process different product types and their variants. In the context of Industry 4.0, diagnostic system should be fully integrated into factory central information system. This means that all configuration settings should be performed via factory information system and diagnostic results should be appended to the product's unique data-file, which exists in the factory information system.

1 Uvod

Izdelava motorjev v podjetju Domel poteka na sodobnih in visoko avtomatiziranih ter informatiziranih linijah, ki so značilne za Industrio 4.0. Kupci motorjev (sistemski integratorji) zahtevajo, da se vsi pri vseh izdelkih, ki zapuščajo proizvodni tekoči trak, opravi končna kontrola kvalitete. Zaradi velikih proizvodnih kapacitet (proizvodnja preko 5000 kosov na dan samo na eni proizvodni liniji) in zahtevah po zanesljivi kontroli kvalitete je edino smiselno uvesti sistem oziroma napravo za popolnoma avtomatsko 100 % končno kontrolo kvalitete, ki preveri in diagnosticira vsak proizvedeni motor. Kupci pred vgradnjo v končne naprave in izdelke motorjev ne pregledujejo, pregledajo le nekaj naključno izbranih primerkov serije in če se med temi najdejo napake, sledijo negativne posledice, npr. zavrnitev celotne serije ter izguba zaupanja in ugleda. Iz tega razloga je zanesljivost delovanja diagnostične naprave za končno kontrolo kvalitete izredno pomembna. Naslednji izziv je raznolikost proizvodnje, posamezni tipi motorji se proizvajajo v različnih izvedbah, ki imajo lahko različne električne parametre ter nekoliko različno obliko ali dimenzije. Diagnostična naprava mora zato imeti zadostno stopnjo fleksibilnosti, ki omogoča obdelavo različnih tipov in izvedb motorjev. Fleksibilen mora biti programski del diagnostične naprave, še posebej izziv pa predstavlja fleksibilnost mehatronskega podsistema, ki mora biti sposoben prilagoditi se različnim oblikam in dimenzijam motorjev. V tem prispevku torej na kratko opisujemo zgradbo in princip delovanja diagnostične naprave.

2 Sestava in princip delovanja

Diagnostična naprava, ki smo jo izdelali in jo opisujemo v tem prispevku, je namenjena končni kontroli različnih tipov brezkrtačnih DC motorjev (BLDC), primer prikazuje Slika 1. Končna kontrola kvalitete poteka na neinvaziven način preko meritve in analize različnih parametrov kvalitete. V ta namen se diagnostična naprava sestoji iz treh zaporednih testnih celic T1, T2 in T3, v katerih se izvajajo meritve posameznih parametrov. V vsaki testni celici se motor začasno odstrani s proizvodnega traku, postavi se v testni položaj, se zažene, opravijo se meritve, motor se nato zaustavi in vrne na proizvodni trak. Celotno napravo prikazuje Slika 2.

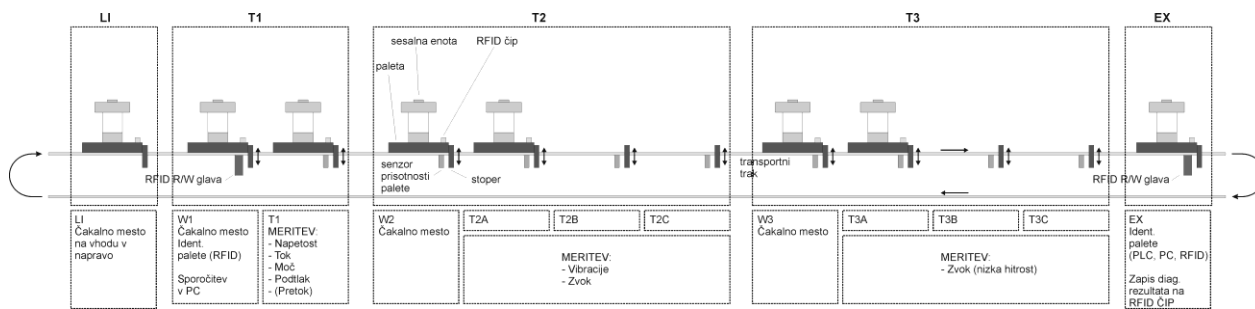


Slika 1. Primer BLDC motorja, ki je predmet testiranja



Slika 2. Pogled na diagnostično napravo (testne celice T1, T2, T3 od desne proti levi)

V testni celici T1 se analizirajo električni parametri (električni tok, moč, inducirana napetost v prostem teku, delovanje hallovih senzorjev kota zasuka) ter pri motorjih, opremljenih s sesalnimi turbinami še sesalni podtlak. V testni celici T2 se merijo in analizirajo vibracije v nekaj točkah ohišja motorja. Meritve se izvajajo s pomočjo brezkontaktnega laserskega merilnika vibracij. Iz analize vibracij je mogoče ugotoviti različne napake, kot je masna neuravnoteženost rotirajočih delov



Slika 3. Sekvenčni pomik palet in motorjev ter pripadajočih podatkovnih blokov

(rotor, turbina), razne nesimetrije v elektromagnetnem polju ter razne anomalije in nesimetrije v povezavi s turbino. Na celici T2 se poleg vibracij meri tudi zvok motorja, iz katerega je tudi možno zaznati razne mehanske napake motorja, npr. drgnjenje turbine ob tesnilni obroč zaradi neustreznih toleranc, ali podobno. V celici T3 se meri zvok motorja pri nizkih hitrosti vrtenja. Pri teh pogojih je šum sesalne turbine zanemarljiv, do izraza pa pride zvok ležajev, iz česar je nato možno zaznati napake vgrajenih ležajev oziroma nepravilnosti pri vgradnji ležajev.

Diagnostično napravo lahko obravnavamo kot skupek treh glavnih podsistemov: 1. mehatronski sistem za manipulacijo motorjev, 2. diagnostični sistem za izvedbo in analizo meritev ter 3. sistem za vodenje in koordinacijo celotne naprave.

2.1 Mehatronski podsistem

Mehatronski podsistem skrbi za mehansko manipulacijo motorjev za potrebe njihovega testiranja.

Mehanska manipulacija vključuje pomik motorjev vzdolž diagnostične naprave, ki je izveden s pomočjo permanentno tekočega transportnega traku. Motorji so nameščeni na paletah, ki jih pomika tekoči trak. Za zaustavitev palet na zelenih testnih in čakalnih mestih so v okviru transportnega traku nameščeni pnevmatski zaustavljalci ter induktivni ali optični senzori prisotnosti zaustavljenih palet. Princip transporta palet ponazarja Slika 3. Diagnostična naprava vsebuje 13 testnih in čakalnih mest, ki jih opisuje Tabela 1.

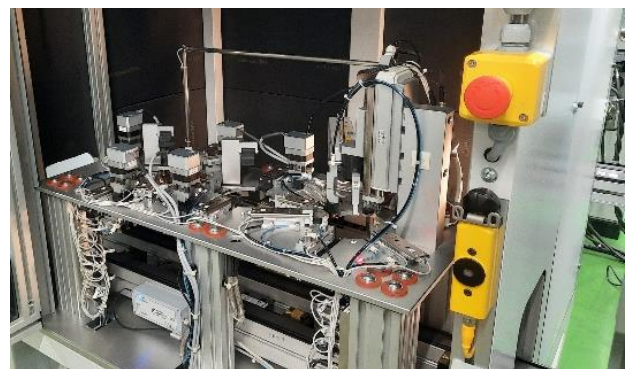
Po končanih pomikih posameznih palet sledi dvig motorjev s proizvodnega traku, izolacija od vibracijskih in zvočnih motenj iz okolice ter vzpostavitev električnega napajanja motorjev preko pomočnih kontaktov. Za postavitev motorja v testni položaj na določeni testni celici je potrebnih 5-10 aktuatorjev. Mehatronski sistem skrbi tudi za 3D nastavitev položaja laserskega merilnika vibracij, s čemer je možno meriti vibracije na različnih točkah na ohišju motorja.

Mehatronski sistem se skupno sestoji iz množice pnevmatskih aktuatorjev, opremljenih s senzori končnih položajev. Poleg tega se v sistemu nahaja še 17 linearnih električnih pogonov in sicer za pomik laserskega merilnika vibracij, za prilagoditev položaja (višine) kontaktov različnim izvedbam motorjev ter za prilagoditev višine dviga palete ter položaja merilne podtladne komore v testni celici T1.

Tabela 1. Testna in čakalna mesta ter pripadajoči končni avtomati

Mesto / avtomat	Opis	Štev. stanj
LI	Detekcija nove palete na vhodu	/
W1	Branje podatkov z RFID čipa na vhodu v napravo in zapis v podatkovne bloke	4
T1	Testna celica T1 manipulacija motorja in proženje meritev	14
W2	- čakalno mesto -	/
T2A	Testna celica T2 manipulacija motorja in proženje meritev (tip motorja A, B, C)	25
T2B		25
T2C		25
W3	- čakalno mesto -	/
T3A	Testna celica T3 manipulacija motorja in proženje meritev (tip motorja A, B, C)	20
T3B		20
T3C		20
EX	Kontrola pomika palet, kontrola izvedbe diagnostičnih akcij ter zapis rezultatov diagnostike na RFID čip in v podatkovno bazo	7
LO	Detekcija praznega mesta izza naprave	/

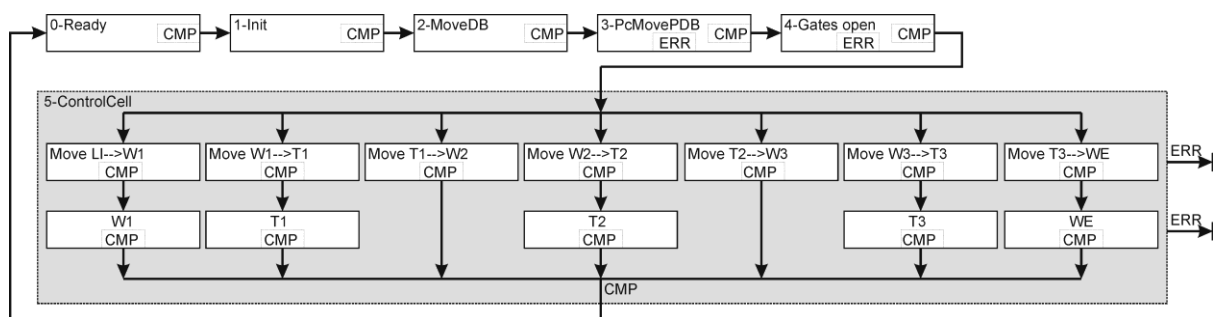
Del mehatronskega sistema, ki pripada testni celici T2 (T2A, T2B in T3C), prikazuje Slika 4.



Slika 4. Pogled na testno celico T2

2.2 Diagnostični podsistem

Diagnostični podsistem je izveden na industrijskem osebem računalniku, na katerem se izvaja diagnostična aplikacija, ki smo jo v programskem jeziku C++ razvili za namen te naprave. Glavne funkcije aplikacije so zagon motorjev, izvedba meritev signalov (električni parametri, podtlak, vibracije, zvok) ter procesiranje zajetih signalov. Vmesi rezultat procesiranja je serija značilk (nivoji



Slika 5. Avtomat LT podsistema za vodenje

napetosti, tokov, podtlaka ter jakosti vibracij in zvoka v izbranih frekvenčnih pasovih). Na podlagi značilnik sistem zazna različne napake motorja in v večini primerov tudi prepozna vzrok oziroma okvarjeno komponento motorja. Zaradi omejenega obsega prispevka se v podrobnosti obdelave signalov ne bomo spuščali, v literaturi pa najdemo različne pristope k diagnostiki motorjev in sorodnih rotacijskih strojev na podlagi meritve vibracij in zvoka ter procesiranja izmerjenih signalov [1, 2, 3].

Diagnostični sistem je izveden v okviru več vzporednih in neodvisno tekočih programskih niti (threads), ki sočasno in asinhrono izvajajo naslednje operacije:

- upravljanje motorjev na testnih celicah T1-T3
- meritve na tesnih celicah T1, T2 in T3
- pomik podatkovnih blokov vzporedno s fizičnim pomikom palet
- izmenjava podatkov s sistemom za vodenje
- generiranje končnega diagnostičnega rezultata
- zapis diagnostičnega rezultata in značilnik v centralni informacijski sistem podjetja

Diagnostični podsistem z ostalimi podsistemi komunicira na različne načine. Merjene signale (tlak, tokovi in napetosti navitij, ter zvok in vibracije) vzorči s pomočjo kartic za zajem signalov (National Instruments), ki so na računalnik povezane preko USB vodila. S podsistemom za vodenje izmenjuje podatkovni poteka preko TCP komunikacije. Testirane motorje krmili (zagon, nastavitve in odčitavanje parametrov) s pomočjo univerzalnih motorskih krmilnikov proizvajalca Nanotec preko TCP komunikacije. Električne parametre motorjev meri in dodatno analizira preko analizatorja moči (Rohde HMC), tudi preko TCP komunikacije. Za vsakega od instrumentov je bilo treba pripraviti ustrezen programski komunikacijski vmesnik oz. gonilnik.

Eden od ključnih problemov pri diagnostiki tehničnih sistemov je nastavitve pragovnih vrednosti, na podlagi katerih se odloči, ali je posamezna značilka v področju normale. V našem primeru se vrednosti pragov določijo iz statistične porazdelitve značilnik v okviru učne serije [4-5] motorjev določenega tipa ali pa se uporabijo vrednosti, določene v razvojnem laboratoriju podjetja Domel.

2.3 Podsistem za vodenje

Podsistem za vodenje upravlja delovanje diagnostične naprave ter koordinira mehatronski in diagnostični podsistem. Realiziran je v okviru programirljivega

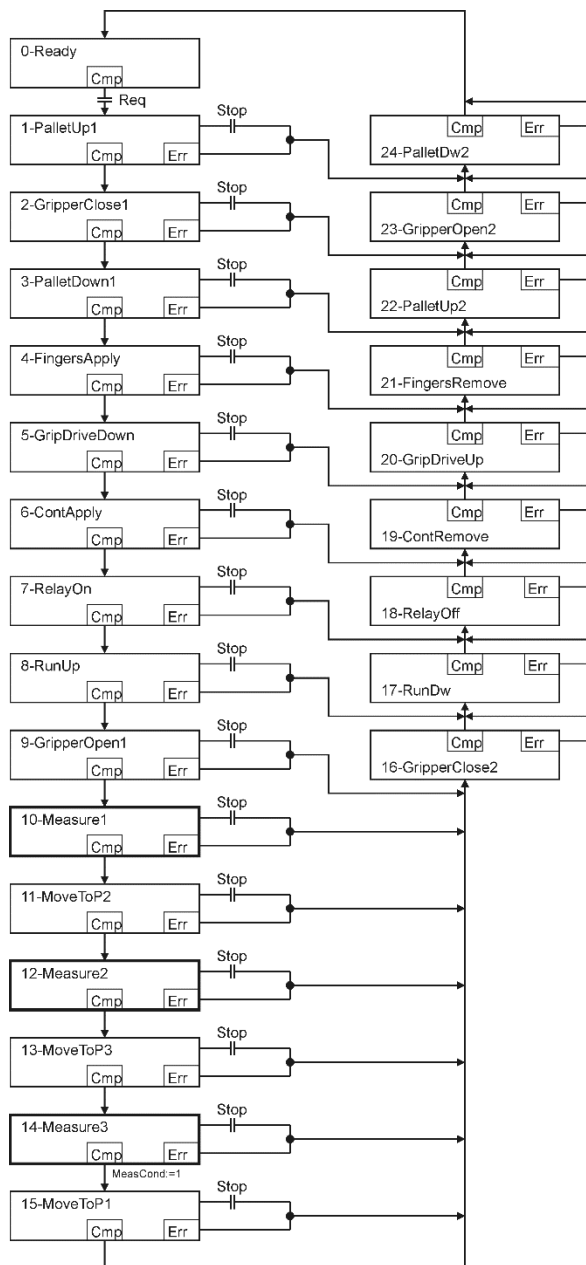
logičnega krmilnika (PLK) Siemens Simatic S1500, z okolico pa komunicira preko obsežnega seta digitalnih signalov (180 vhodnih in 110 izhodnih signalov), ter preko treh različnih komunikacijskih protokolov (Profinet, ISO-TCP ter RS-232). Programska oprema je implementirana v obliki dvonivojske strukture končnih avtomatov. Na zgornjem nivoju se nahaja avtomat transporta palet skozi diagnostično napravo (LT – Line Transport), ki skrbi za krmiljenje in nadzor pomika palet znotraj naprave, vstop novih palet, za pomik podatkovnih blokov vzporedno s paletami ter za proženje in nadzor podrejenih avtomatov testnih celic. Sestavo avtomata LT kaže Slika 5. Sočasno s pomikom palet vzdolž čakalnih in testnih mest se pomikajo tudi podatkovni bloki, ki nosijo podatke o paletah in testiranih motorjih. Podatkovni bloki se nahajajo v programirljivem logičnem krmilniku in v diagnostičnem računalniku. Podatkovni bloki v krmilniku vsebujejo informacijo o številki palete, serijski številki izdelka, statusu zaključenosti operacij na predhodnih delovnih postajah, status izvedbe meritev na posameznih testnih celicah diagnostične naprave. Podatkovni bloki v diagnostičnem računalniku poleg številke palete in serijske številke izdelka vsebujejo vse diagnostične rezultate (značilke), pridobljene v meritvah v testnih celicah.

Na spodnjem nivoju se nahaja 9 podrejenih končnih avtomatov (W1, T1, T2A, T2B, T2C, T3A, T3B, T3C in EX), katerih oznake in funkcije definira Tabela 1. Za ilustracijo je prikazan primer enega od avtomatov (T3A) kaže Slika 6. Ti avtomati izvajajo mehanske manipulacije motorjev in prožijo meritve, ki jih izvaja diagnostični sistem.

Na zadnjem mestu v napravi (EX) programirljivi logični krmilnik preveri skladnost številke palete in serijske številke motorja na podlagi treh virov podatkov: RFID čip palete, podatkovni blok v programirljivem logičnem krmilniku in podatkovni blok v diagnostičnem računalniku. Skladnost podatkov iz treh virov pomeni, da je bil pomik palet in podatkovnih blokov izveden pravilno, kar je eden od potrebnih pogojev za zapis diagnostičnega rezultata v bazo podatkov in na RFID čip na paleti.

Pri pomiku motorjev vzdolž proizvodne linije in znotraj diagnostične naprave je potrebno poskrbeti za sledljivost motorjev, kar je izvedeno s pomočjo radio-frekvenčnega identifikacijskega sistema (RFID), ki se sestoji iz podatkovnih čipov, nameščenih na paletah ter bralno-pisalnih vmesnikov, nameščenih na posameznih

postajah celotne proizvodne linije ter na vходу in izhodu diagnostične naprave. Na podatkovnih čipih se nahajajo osnovni podatki o motorju (serijska številka, status opravil na predhodnih delovnih postajah, ipd.).



Slika 6. Eden od devetih končnih avtomatov spodnjega nivoja (testna celica T2A)

Eden od izjemno pomembnih elementov podsistema za vodenje je zaznavanje in alarmiranje nepravilnosti v delovanju same diagnostične naprave. Za vsako izvedeno akcijo sistem preveri pravilnost izvedbe, kar je izvedeno preko senzorjev končnih položajev aktuatorjev oziroma preko povratnih komunikacijskih telegramov naprav, s katerimi sistem za vodenje komunicira. Sistem za vodenje je sposoben prepoznati preko 450 različnih napak v delovanju diagnostične naprave. V primeru

pojava okvare na diagnostični napravi sistem javi naziv končnega avtomata in številko stanja, v katerem je prišlo do napake delovanja. Cena za to funkcionalnost je povečanje obsega programske opreme sistema za vodenje za cca. 50%. Vendar pa je prepoznavanje napak ključno za hitro in učinkovito odpravljanje možnih okvar in zastojev na napravi, ki lahko poteka tudi daljinsko. S stališča doseganja proizvodnih zahtev so namreč daljši zastoji v delovanju diagnostične naprave nesprejemljivi.

3 Zaključek

Predstavljena naprava je zadnja od skupno preko 15 različnih diagnostičnih naprav, ki smo jih za podjetje Domel razvili in izdelali od leta 2004 dalje. V času priprave tega prispevka (julij 2021) se izvedba bliža zaključku, naprava se nahaja v poizkusnem obratovanju. Dodana vrednost te naprave v primerjavi s prejšnjimi podobnimi je neprimerno višja stopnja avtomatizirane fleksibilnosti. Naprava omogoča diagnostiko treh različnih tipov motorjev ter vrste izvedenk vsakega tipa.

Tipičen rok od naročila do dokončanja izvedbe traja cca. 6 mesecev, dotična naprava pa je morala biti izvedena še v krajšem roku. Poleg načrtovanja in izvedbe je kritična in časovno zahtevna predvsem nabava materiala ter opreme, kar pomeni, da morajo biti ključne načrtovalske odločitve ter izbor opreme in materiala, opravljene zelo zgodaj v fazi načrtovanja.

Izvedba naprave predstavlja izjemno zanimiv in multidisciplinaren praktikum iz avtomatike, procesiranja signalov, strojnega učenja, elektronike, programskega inženirstva, mehatronike in sorodnih disciplin.

Razvoj in izvedbo konkretne diagnostične naprave je v letu 2021 izpeljala 5-6 članska ekipa, ki je pokrila zgoraj navedena področja. Poudariti je potrebno, da je razvoj temeljil na številnih izhodiščih, pristopih in metodah, ki jih je v preteklih 15 letih postopno razvila številčnejša ekipa sodelavcev Odseka za sisteme in vodenje na Institutu Jožef Stefan.

Literatura

- [1] W. Q. Lim, D. H. Zhang, J. H. Zhou, P. H. Belgi and H. L. Chan, "Vibration-based fault diagnostic platform for rotary machines," IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010, pp. 1404-1409.
- [2] Edwards, S. et al. (1998). Fault Diagnosis of Rotating Machinery. The Shock and Vibration Digest. 30. pp. 4-13.
- [3] C. Cristalli et al, Mechanical fault detection of electric motors by laser vibrometer and accelerometer measurements, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 20, Issue 6, 2006, pp. 1350-1361.
- [4] P. Boškosi, J. Petrovič, B. Musizza, Đ. Juričić. An end-quality assessment system for electronically commutated motors based 3 on evidential reasoning. Expert systems with applications, 2011, vol. 38, no. 11, pp. 13816-13826.
- [5] Đ. Juričić, J. Petrovič et al, End-Quality Control in the Manufacturing of Electrical Motors, in book: Case Studies in Control, Springer, 2013, pp. 221-256.