

# Eksperimentalna analiza pogojev za kontrolo kakovosti montaže statorja elektromotorja z uporabo strojnega vida \*

Niko HERAKOVIČ

**Izvleček:** Industrijska uporaba strojnega vida za izvajanje kontrole kakovosti v procesu montaže predstavlja kompleksno nalogo in zahteva obsežna strokovna (ekspertna) znanja, izkušnje in inovacijski pristop. Uvajanje strojnega vida za kontrolo kakovosti v procesu zahteva natančno opredelitev nalog, ciljev in procesa kontrole, izbiro komponent sistema strojnega vida in določitev delovnih pogojev izbranih komponent ter razvoj avtomatizirane naprave za manipulacijo s sestavnim delom oz. izdelkom, ki ga kontroliramo. Prispevek obravnava eksperimentalno določitev pogojev in njihovo analizo, ki so potrebni za uspešno uvedbo strojnega vida v praksi pri kontroli statorja elektromotorja ter izbiro in vpliv osvetlitve na razpoznavnost napak.

**Ključne besede:** strojni vid, osvetlitev, montaža, kontrola kakovosti, kontrola dimenzij, odkrivanje napak, industrijska uporaba,

## ■ 1 Uvod

V procesu montaže predstavlja kontrola kakovosti pomemben dejavnik. Namen kontrole kakovosti je odkrivanje in izločanje izdelkov, ki ne zadostijo kriterijem kakovosti v izdelovalnem procesu, katerega del je tudi montaža. Kontrola kakovosti v montaži se še dandanes največkrat

izvaja ročno. Ocena in presoja pravilnosti sestavnega dela ali izdelka, odkritje napake v obliki ali videzu ter hitrost izvajanja kontrole kakovosti so odvisni od delavčevih fizioloških sposobnosti, predvsem njegovega vida. Ker so naloge kontrole kakovosti pogosto kompleksne, sta hitrost in pravilnost kontrole odvisni še od njegove fizične in psihične sposobnosti. Posledice so pogosto nezanesljivi rezultati in spregledanje napak. Zanesljivost človeških odločitev pada tudi z monotonijo in utrujenostjo, obenem pa je ročna kontrola kakovosti tudi nefleksibilna in časovno potratna.

To so tudi glavni razlogi, ki onemogočajo uvajanje visoko avtomatiziranih izdelovalnih oz. montažnih sistemov v prakso. Zato so se v preteklih letih pojavili različni pristopi pri izvajanju kontrole kako-

vosti v izdelovalnem procesu, kot npr. računalniški in strojni vid, ki vključujejo napredne računalniško podprte senzorske tehnologije z izjemno razvito programsko opremo za avtomatsko izvajanje kontrole kakovosti in analize kontrolnih podatkov. Direktna prednost računalniško podprtih sistemov kontrole kakovosti je njihova zmožnost integracije v druge avtomatizirane sisteme in opremo, kar omogoča gradnjo resnično avtomatiziranih proizvodnih sistemov. Druge velike prednosti avtomatiziranih kontrolnih sistemov so visoka hitrost izvajanja kontrole, merilna fleksibilnost, možnost izvajanja sprotne (on-line) kontrole in zmožnost 100-odstotnega nadzora, ki omogoča 100-odstotno kakovost izdelkov.

Strojni vid predstavlja avtomatsko analizo slik. Sistem strojnega vida se-

Doc. dr. Niko Herakovič, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

\* Eksperimentalno delo, ki ga je v okviru svoje seminarske naloge izvajal študent Iztok Rutar, je bilo mogoče izvesti s podporo podjetja FDS Research iz Ljubljane, ki je zagotovilo prostor, praktično podporo, nasvete in opremo za izvedbo eksperimentov.

stavlja ena ali več kamer, ustrezna strojna oprema in računalnik. Razvoj inteligentnega sistema kontrole kakovosti z vgrajenim strojnimi vidom se uspešno zaključuje s končno uporabo v industrijskem okolju. Kljub številnim raziskavam v preteklosti pa se še vedno znova pri vsakem novem primeru uporabe strojnega vida v industrijskem okolju srečamo z zahtevnim problemom, ki za realizacijo zahteva specialna znanja s področij strojnega vida, izkušnje ter seveda inovativnost [5, 6].

V praksi zahteva uvajanje strojnega vida v kontrolo kakovosti v procesu montaže najprej natančno definicijo namena uporabe, ki običajno ni samo merjenje enega ali več parametrov izdelka v zelo kratkem času, temveč tudi odkrivanje napak, ki jih v ročni montaži ugotovi delavec na osnovi primerjave z ustreznim sestavnim delom. Sistem strojnega vida mora delovati v industrijskem okolju, za katero je značilno, da so čas kontrole posameznega parametra izdelka in finančna sredstva, namenjeni uvajanju avtomatske kontrole kakovosti v proces montaže, običajno omejeni.

Končna kontrola kakovosti izdelka je dejansko pregled sestavnih delov in izdelka v tehničnem in vizualnem pogledu. Problem je še večji, če je izdelek sestavljen iz veliko sestavnih delov in izdelan z nestabilnim procesom. Stator elektromotorja je sestavljen iz tankih plošč v stiskalnici. Zahteva se visoka kakovost, zato je potrebna 100-odstotna kontrola, ki jo je možno zagotoviti z uporabo strojnega vida.

Sistemi strojnega vida so danes vedno bolj zanesljivi in robustni in tako primerni za uporabo v industrijskem okolju. V procesu montaže so ključni in nepogrešljivi [1]. Sistemi kontrole, ki vključujejo strojni vid, so sposobni izvajati proces kontrole bolj učinkovito kot človek, če so zagotovljeni pogoji za ustrezno uporabo ter izkoriščene njihove tehnične prednosti. V industrijskem okolju se sistemi strojnega vida uporabljajo za preverjanje parametrov izdelkov, merjenje in odkrivanje

napak, zato morajo biti robustni in zelo zanesljivi. Pri razvoju procesa in naprave za nadzor in meritve je treba slediti določenemu poteku dela [5, 6]. Običajno je ta razdeljen v natančno opredelitev nalog sistema in ciljev (merjenje, odkrivanje napak) ter izbire komponent strojnega vida in pogojev delovanja (optika, leče, osvetlitev, kamera), v končni fazi pa v razvoj avtomatizirane naprave za dodajanje in pozicioniranje – strego opazovanega objekta.

V tem prispevku bosta prikazana določitev nalog strojnega vida in vpliv osvetlitve na nadzorovanje in merjenje statorja elektromotorja. Rezultati bodo osnova za razvoj avtomatizirane kontrolne naprave.

## ■ 2 Cilji kontrole kakovosti

Stator elektromotorja (SEM) je sestavljen iz tanke kovinske pločevine (slika 1) v preoblikovalnem stroju, končni izdelek pa mora biti izdelan zelo natančno in brez vidnih napak ter poškodb.

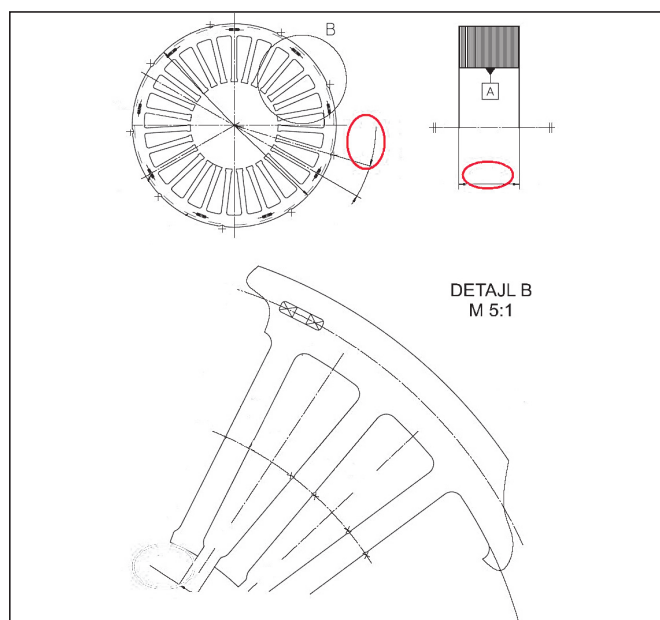
V procesih sestavljanja, barvanja in sušenja nastanejo napake, ki jih je mogoče zaznati s prostim očesom ali z meritvami. Proces kontrole kakovosti zato vključuje merjenje višine statorja EM, širine utora, sferičnosti ali t. i. klobučavosti, položaja in zasuka čeveljčka, kakovosti barvanja,



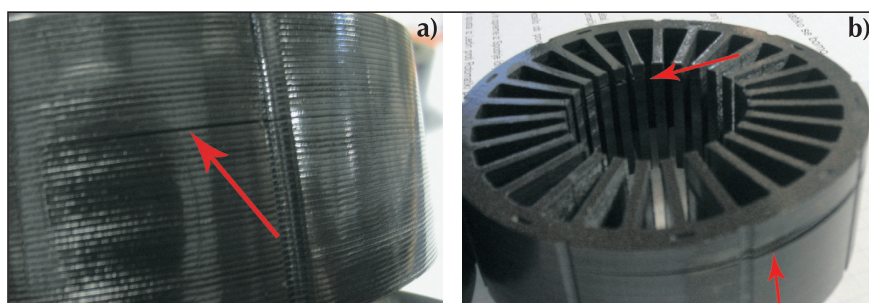
Slika 1. Stator elektromotorja

okroglosti, odmika pločevine kakor tudi vzorčno merjenje premera statorja. Merilna mesta so prikazana na sliki 2.

Sedanji proces kontrole vključuje vizualni pregled statorja EM, uporabo kalibrov za dimenzijsko kontrolo in vzorčno merjenje  $n$  statorjev na dan. Uporaba kalibra za dimenzijsko kontrolo lahko dodatno poškoduje stator EM in povzroči napaki, kot sta odmik pločevine in zasuk krepplja. To je tudi dodaten razlog za uvajanje



Slika 2. Mesta, kjer je potrebna 100-odstotna kontrola kakovosti

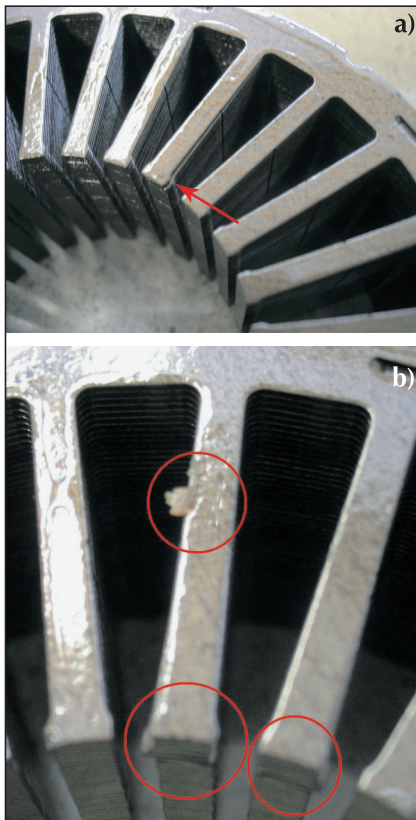


Slika 3. Utor med platinami (a, b) in zlomljen stator EM (b)

brezdottične metode kontrole s strojnim vidom.

Mehanske poškodbe in napake na notranji in zunanji strani statorja kot posledica neustreznega procesa sestavljanja so vidne na *sliki 3a* in *b*. Napake so premik med pločevinami (znotraj in zunaj) in zlomljen stator.

*Slika 4a* prikazuje mehanske poškodbe, kot so odmaknjena in premaknjena platina (lahko nastane v procesu ročne kontrole z mehanskih kalibrom). Premik platin znotraj statorja EM je običajno posledica sestavljanja pri izdelavi statorja (*slika 4b*), ostanki barve na statorju EM pa prav tako predstavljajo napako (*slika 4b*).



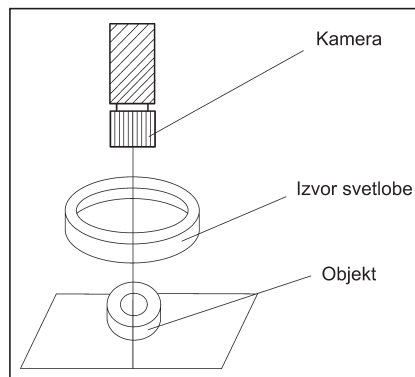
**Slika 4.** Premaknjena in odmaknjena platina (*a* in *b*) ter ostanki barve (*b*)

Opisana kritična mesta na statorju elektromotorja so sedaj kontrolirana in merjena ročno. Ugotovljeno je bilo, da taka kontrola ni zanesljiva in je tudi vzrok za nove napake in poškodbe izdelka. Kontrola je tudi ozko grlo montaže. Optimalna rešitev za zagotovitev kakovostne in zanesljive kvalitete izdelkov bi bila avtomatizacija kontrole.

### 3 Eksperimentalna določitev parametrov strojnega vida

Analiza potrebnih pogojev za uporabo računalniškega vida v avtomatizirani kontroli statorskega paketa je usmerjena v eksperimentalno določitev tehnike in tipa osvetlitve, ki lahko zagotovita zanesljivo kontrolo s strojnim vidom. S posebno pozornostjo in zelo natančno so bili raziskani pogoji za vsako kritično mesto na statorju EM, ki bi lahko vplivali na uspešno uporabo strojnega vida pri odkrivanju napak oz. kontroli kakovosti. Pri tem so bile analizirane spremembe vplivnih parametrov, kot so položaj kamere in vira svetlobe [2], tip leče na kameri, položaj izvora svetlobe [4] in statorja glede na kamero in vir svetlobe. V raziskavi je bila uporabljena kamera Sony XC-ST50-CE.

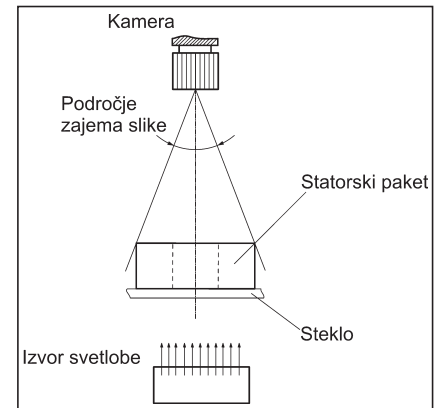
Vsaka zahtevana meritev ugotovljenih možnih napak in s tem kritično mesto zahteva postavitev preskuševališča, ki omogoča analizo vseh sprememb različnih parametrov in njihov vpliv na kakovost kontrole statorja z računalniškim vidom. *Slika 5* kaže postavitev preskuševališča za analizo vpliva direktne osvetlitve z različno barvo svetlobe in vpliv različne barve ozadja na globinsko kontrolo (zaradi odboja svetlobe), kontrasta in zaznave vidnih napak na statorju elektromotorja. Predpostavlja se, da sta različno okolje in barva svetlobe primernejša za vidnost površinskih napak, kot so ostanki barve in mehanske poškodbe.



**Slika 5.** Splošna osvetlitev z različnimi barvami osvetlitve in ozadja

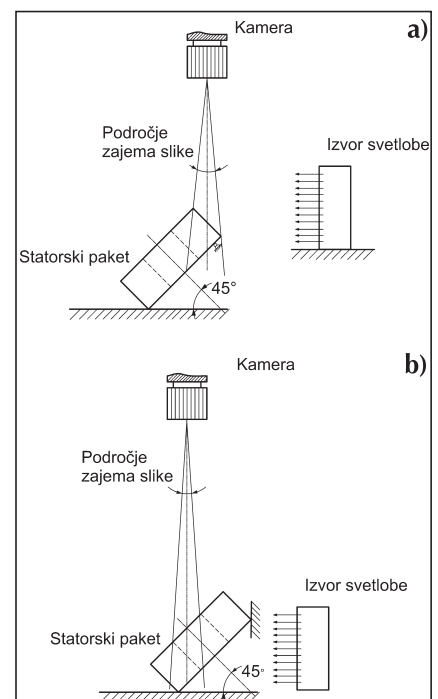
Preskuševališče (*slika 6*) z osvetlitvijo od spodaj omogoča analizo parametrov, kot so odkrivanje napak na zunanji površini, *b* – notranji površini statorja,

dimenzije utorov, splošne dimenzije statorja itd. Prikazano preskuševališče je primerno za zanesljivo odkrivanje več omenjenih parametrov samo z uporabo ustreznih leč (konvencionalna, telecentrična itd.). V tem primeru vrsta osvetlitve ne vpliva odločilno na kakovost meritev.



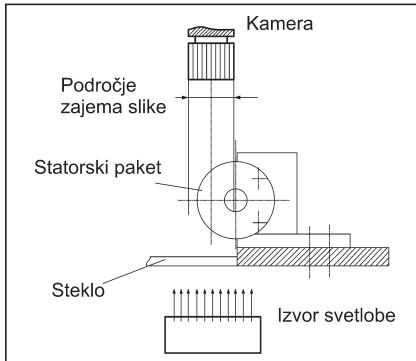
**Slika 6.** Preskuševališče s presvetlitvijo – svetloba od zadaj

Za odkrivanje parametrov, kot so mehanske poškodbe na zunanji površini statorja in natančnost utora kakor tudi premik in odkrivanje napak na notranjem obodu, je prikazana primerna postavitev na *sliki 7*. V tem primeru je zanesljivost odkrivanja omenjenih napak in določitev parametrov odvisna od uporabe ustreznih leč kamere oziroma tipa osvetlitve.



**Slika 7.** Odkrivanje napak na *a* – zunanji površini, *b* – notranji površini statorja

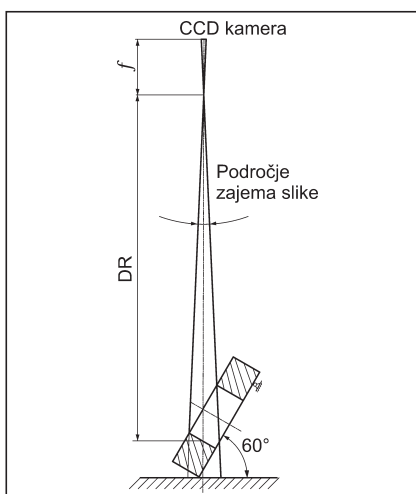
Preskuševališče na *sliki 8* je namenjeno natančni določitvi sferičnosti, vzporednosti čelnih ploskev in pravokotnosti statorskega paketa. Kakovost odkrivanja napak je odvisna v glavnem od uporabljenega tipa leče in v manjši meri od tipa in barve svetlobe.



**Slika 8.** Kontrola sferičnosti in dimenzij

Namen postavitve vseh omenjenih preskuševališč je omogočiti zadovoljivo kakovost odkrivanja čim več napak z minimalnim številom strežnih operacij statorja in čim manjšim številom tipa in vrste osvetlitve ter leč kamere.

Kot je razvidno s *slike 7*, sta ključna parametra za kakovost odkrivanja napak poleg leče kamere in osvetlitve še kot položaja statorja in razdalja kamere od opazovanega mesta. Potrebno je doseči ostro zaslonsko sliko. Globinska ostrina objekta je teoretično boljša, čim večji je nagibni kot objekta. Pri statorju EM je nagib omejen z njegovo geometrijo. Največji kot postavitve je  $60^\circ$ , kot kaže *slika 9*. Če je kot postavitve večji, zgornji rob statorja pokrije spodnjega na notranji strani, tako da vidno polje kamere ne more pokriti



**Slika 9.** Največji kot postavitve statorja

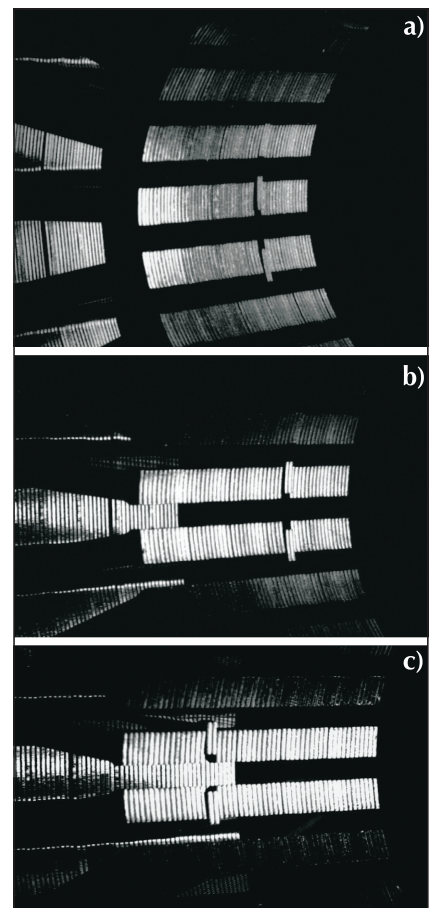
spodnjega dela notranje površine statorja. Prav zaradi tega je bila izvedena podrobna analiza z upoštevanjem optimalne razdalje kamere od opazovanega objekta v želji, da se dobi čim večje možno polje naenkrat.

#### ■ 4 Eksperimentalni rezultati

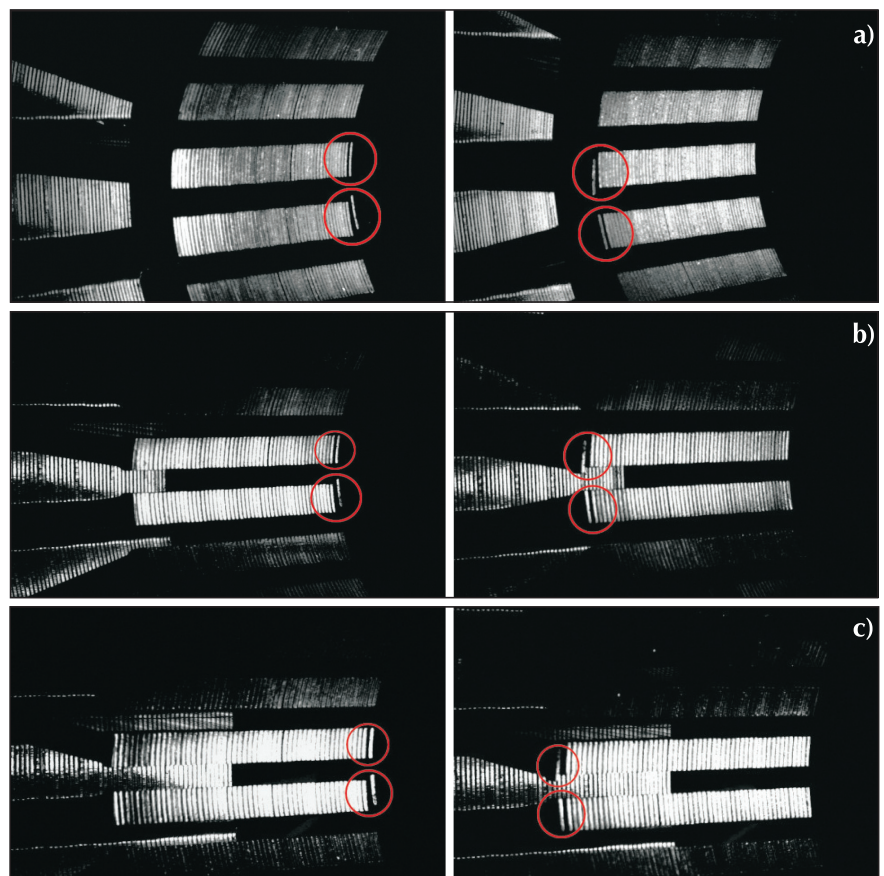
Rezultati raziskave omogočajo določitev potrebnih pogojev za razvoj sistema strojnega vida za kontrolo kakovosti statorja elektromotorja, ki so povezani s tehniko in vrsto osvetlitve, postavitvijo opazovanega objekta oz. statorja EM nasproti kamere za že izbrano kamero in leče. To omogoča kakovostno kontrolo dimenzij, mehanskih napak in vidne napake na površini.

*Slika 10* kaže vpliv kota statorja na kakovost odkrivanja napak. Večanje kota izboljša kakovost določitve obeh robov na notranjem obodu statorja.

Ugotoviti je mogoče, da večanje kota povzroči razlike v razdalji med virom svetlobe na eni strani oziroma med zgornjim in spodnjim robom na drugi strani. Posledica je nehomogena osvetlitev in tako nerealna ocena napake, kot je to prikazano na *sliki 11*.

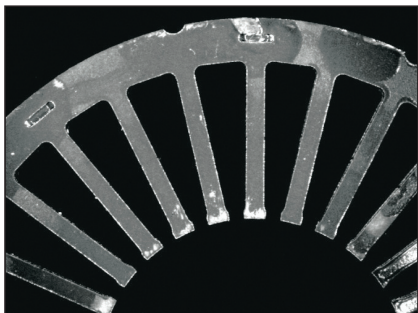


**Slika 10.** Vpliv kota postavitve statorja a)  $30^\circ$ , b)  $45^\circ$  in c)  $55^\circ$



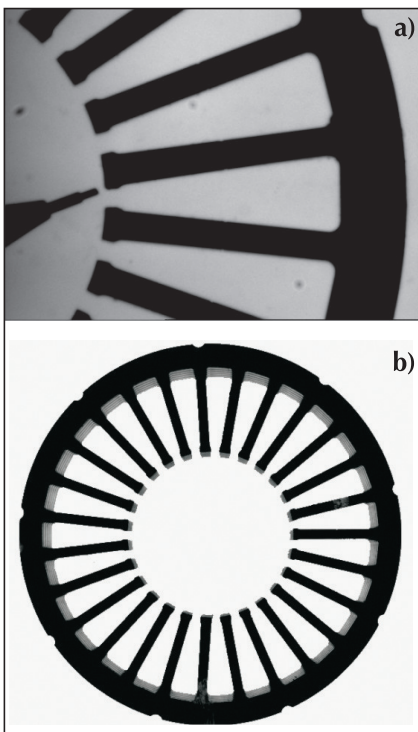
**Slika 11.** Vpliv nehomogenosti osvetlitve a)  $30^\circ$ , b)  $45^\circ$  in c)  $55^\circ$

Rezultat preskusa, kjer je uporabljena nizkokotna obročasta osvetlitev (slika 5) z različnimi barvami osvetlitve in različnimi barvami ozadja, je prikazan na *sliki 12*. V tem primeru je uporabljeno črno ozadje – podloga. Svetla območja na statorju predstavljajo napake na površini, ki so posledica nabiranja laka ali neenakomernosti laka na površini. Metoda je primerna za kontrolo površine v smislu odkrivanja enakomernosti nanosa laka.



**Slika 12.** Napake na čelni strani – skupki laka

Najboljše rezultate kontrole enega izmed najpomembnejših parametrov na statorju, to je merjenje širine utora, je mogoče doseči z osvetlitvijo od spodaj oz. s presvetlitvijo (slika 6) in z uporabo telecentričnih leč. *Slika 13* kaže rezultate eksperimenta, kjer je vidno, da takšne leče

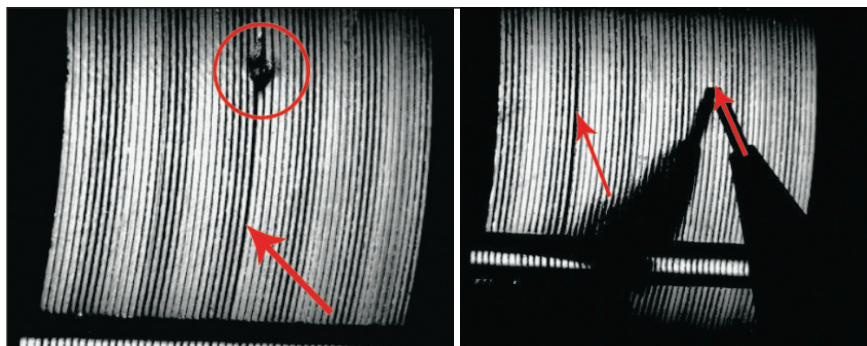


**Slika 13.** Merjenje širine utora z a) telecentrično in b) konvencionalno lečo

(slika 13a) odpravijo negativni vpliv globine oziroma paralakse, ki nastane pri uporabi konvencionalnih leč (slika 13 b).

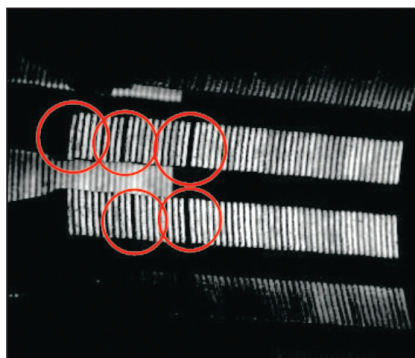
Stator se prikaže na zaslonu kot dvodimenzionalna slika v tlorisu z jasnimi in ostrimi robovi. To zagotovi 100-odstotno kontrolo širine utora po celotni višini statorskega paketa. Na ta način je mogoča kontrola notranjega in zunanjšega premera statorskega paketa.

Rezultati eksperimentalnega odkrivanja mehanskih napak na zunanji in notranji strani, pridobljeni na preskuševališču, kot je zasnovano in prikazano na *sliki 7*, so prikazani na *slikah 14* in *15*, kjer se lepo vidita mehanska napaka (slika 14a) in razmik med platinami na zunanji strani statorskega paketa (slika 14b).



**Slika 14.** Mehanske poškodbe in vrzeli na zunanjem obodu statorja

Razmiki in presledki med platinami so lepo vidni na *sliki 15*.



**Slika 15.** Vrzeli in odmik platin na notranji strani oboda statorja

### ■ 5 Zaključki

V prispevku je predstavljeno raziskovalno delo, pri katerem smo se osredotočili na analizo pogojev za uspešno zamenjavo ročne kontrole

kakovosti statorja elekromotorja z avtomatizirano na osnovi strojnega vida. To bo zagotovilo boljšo učinkovitost in natančnost procesa kontrole kakovosti statorjev EM v daljšem časovnem obdobju, neodvisno od objektivnih in subjektivnih vplivov. Hkrati bo uporaba strojnega vida v procesu kontrole kakovosti vplivala na humanizacijo dela ob zagotavljeni kapaciteti sistema.

Glavni namen prispevka je raziskava vpliva osvetlitve na točnost in kakovost kontrole v procesu sestavljanja statorja EM. Raziskava je pokazala, kako posamezni pogoji meritev, tehnike osvetlitve in izbira komponent strojnega vida odločujoče vplivajo na praktično uporabo strojnega vida in zanesljivost meritev v realni proizvodnji.

Zaključimo lahko, da je kljub kompleksnosti oblike statorja EM mogoča 100-odstotna avtomatična kontrola dimenzij, mehanskih in vidnih napak itd. Za uspešno uporabo prikazanih rešitev v praksi je treba določiti še proces strege in zasnovati ter uporabiti ustrezno strežno napravo z najmanjšim možnim številom gibov. Posebno pozornost bo treba nameniti pozicioniranju merjenega objekta.

### Literatura

- [1] Braggins, D. (2006). Vision today for assembly automation. *Assembly Automation* 26/2 (2006), str. 181–183.
- [2] Burns, R. Allen (1999). *Machine vision lighting, Techniques for electronics assembly*. RSVI Northeast Robotics.

- [4] Jenny, R. (2000). Fundamentals of optics – An Introduction for Beginners. <http://www.cs.ucsb.edu/~imaging/Papers-old/Optics%20Tutorial.pdf>.
- [5] Trdič, F. (2006). Problematika realnih industrijskih okolij (in Slovene). <http://www.fdsresearch.si>
- [6] West, P. (2006). A Roadmap for Building a Machine Vision System. <http://www.imagenation.com/pdf/roadmap.pdf>.

## An experimental analysis of the conditions for machine-vision quality control for EM stator assembly

**Abstract:** The industrial application of machine vision for quality control (QC) in the EM stator-assembly process is a multilayer problem that demands a great deal of expert knowledge, experience and innovation. Usually, the procedure for machine vision QC is split into a precise determination of the tasks and goals, machine-vision component selection and working conditions, component selection for the machine vision, and, finally, the development of an automatic part-handling system. This paper is focused on the determination of the machine-vision tasks and the influence of lighting on the inspection and measurement of the EM stator.

**Keywords:** machine vision, illumination, assembly, quality control, dimension control, fault detection, industrial application,



# Hypex

## FLUIDNA TEHNIKA - AVTOMATIZACIJA - INDUSTRIJSKA OPREMA

### INDUSTRIJSKA PNEVMATIKA



cilindri, enote za vodenje, prijemala, ventili, priprava zraka, fitingi, spojke, cevi in pribor

### MERILNA TEHNIKA IN SENZORIKA



senzorji in merilci sile, temperature, tlaka, magnetnega polja ter indukcijski senzorji

### PROCESNA TEHNIKA



krogelni in loputasti ventili, ploščati zasuni, pnevmatski in električni pogoni, varnostni ventili

### LINEARNA TEHNIKA



### PROFILNA TEHNIKA IN STROJEGRADNJA



### STORITVE



- TRADICIJA
- KVALITETA
- SVETOVANJE
- PARTNERSTVO
- FLEKSIBILNOST
- VELIKE ZALOGE
- POSEBNE IZVEDBE
- KONKURENČNE CENE
- KRATKI DOBAVNI ROKI

**Hypex, Lesce, d.o.o.**  
 Alpska 43, 4248 Lesce  
 Tel.: +386(0)4 53-18-700 Internet: [www.hypex.si](http://www.hypex.si)  
 Fax.: +386(0)4 53-18-740 E-Mail: [info@hypex.si](mailto:info@hypex.si)