

# Avtomatizacija sistema za kalibracijo momentnih ključev

**\*Miha Hiti, \*\*Rok Mokorel, \*Vid Primožič, \*\*Gaber Begeš**

*\*Zavod za gradbeništvo, Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana*

*\*\*Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana*

*E-pošta: miha.hiti@zag.si*

## Automatisation of torque wrench calibration system

*Slovenian standard for calibration of torque tools has been updated to SIST EN ISO 6789:2017. Thus, it became necessary to update the torque tools calibration system. We proposed and implemented an update of the system. An update focuses on automatization of manual drive that is responsible for application of torque on the tool being calibrated. As part of the system control we also designed user interface for easier handling with the calibration system.*

### 1 Uvod

V tem delu je predstavljen postopek nadgradnje sistema za kalibracijo momentnih ključev. Sistem se nahaja na Zavodu za gradbeništvo in se uporablja za kalibracijo skladno s standardom SIST EN ISO 6789:2004 [1]. Obstoječi standard iz leta 2004 je leta 2017 nadomestil novi, SIST EN ISO 6789 [2, 3]. Z novim standardom se spreminja postopek kalibracije, pri čemer je najbolj opazna sprememba v številu obremenitvenih ciklov. Za pravilno in učinkovito kalibracijo skladno s posodobljenim standardom je potrebno obstoječi kalibracijski sistem nadgraditi.

Obstoječi kalibracijski sistem za obremenitev momentnega ključa zahteva delo operaterja. Operater na kalibracijskem sistemu vreteno poganja ročno, sočasno pa spremlja naraščanje izmerjenega momenta na zaslonu. Naloga operaterja je postopno obremenjevanje momentnega ključa in prekinitev obremenjevanja, ko zaznamo nagel padec izmerjene vrednosti momenta.

Zaradi nekajkrat večjega števila obremenitvenih ciklov v posodobljeni različici standarda postane delo operaterja zahtevnejše. Obstoječi kalibracijski sistem želimo opremiti s krmiljenim pogonom in nalogo operaterja nadomestiti z avtomatiziranim pogonom.

### 2 Obstoječi kalibracijski sistem

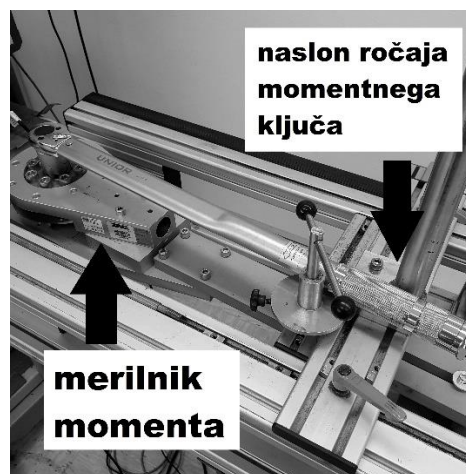
Obstoječi kalibracijski sistem na Zavodu za gradbeništvo (slika 1) proizvajalca HBM tip TWC\_A 1000 Nm je sestavni del akreditiranega sistema kakovosti za kalibracijo momentnih ključev skladno s standardom SIST EN ISO 6789:2004.

Kalibracijski sistem lahko razdelimo na tri osnovne elemente, - sistem za obremenjevanje momentnega ključa skupaj z merilnikom momenta 1000 Nm tip HBM

TB1A, merilni ojačevalnik HBM DMCplus ter računalnik s programom HBM Catman.

Mehanski del sistema sestavljajo aluminijasti profili, standardni v industrijskih aplikacijah. Postavljen je na pultu, ki zagotavlja horizontalno lego momentnega ključa na optimalni višini. Za kalibracijo ključa vstavimo glavo momentnega ključa v merilnik momenta. Ročaj momentnega ključa namestimo ob naslon. Naslon ročaja določa ročico sile momenta, zato ga prilagodimo tako, da ta potiska na sredino držala momentnega ključa.

Merilnik momenta ima ležišče, ki ustreza obliki glave momentnega ključa, zato se merilnik momenta in glava momentnega ključa premikata skupaj. Moment v sistem dodajamo z rotacijo merilnika momenta okoli navpične osi. Rotacijo merilnika momenta nadzorujemo z vretenom.



Slika 1: Sistem za kalibracijo momentnih ključev. Vidimo merilnik momenta ter naslon ročaja momentnega ključa.

Merilni ojačevalnik je naslednji člen v verigi merilnega sistema. Na kanal merilnega ojačevalnika priklopimo signal merilnika momenta. Signal dobimo iz prej opisanega sistema za obremenjevanje momentnega ključa. Na merilnem ojačevalniku spremljamo naraščanje apliciranega momenta.

Dopolnitev merilnega ojačevalnika je osebni računalnik. Na računalniku imamo naložen program Catman. Program Catman je namenjen enostavnemu dostopu do meritev in pa nastavitve merilnega ojačevalnika. Omogoča nam spremljanje in izrisovanje grafov iz izmerjenih vrednosti.

Najboljša kalibracijska zmogljivost obstoječega sistema (razširjena merilna negotovost) znaša 0,3 % do 0,6 % izmerjene vrednosti.

### 3 Standard SIST EN ISO 6789:2017

Nadgradnja kalibracijskega sistema mora ustrezati posodobljenemu standardu SIST EN ISO 6789. Gre za standard Slovenskega inštituta za standardizacijo in predstavlja prevzem mednarodnega standarda krovne organizacije ISO. ISO 6789 ureja področje kolibracije momentnih orodij. V to skupino štejemo momentne izvijače in ključe. Glede na tip orodja so ta razvrščena v tip I in pa orodja tipa II. Orodja tipa I vrednost momenta prikazujejo na merilni skali, medtem ko imajo orodja tipa II možnost nastavljanja pritegovalnega momenta. Skupina orodij tipa I in II se nadalje deli na razrede A, B, C, D, E, F in pa G.

Na našem kalibracijskem sistemu kalibriramo orodja tipa II in sicer razreda A in B. Prav tako na kalibracijskem sistemu lahko kalibriramo orodja tipa I iz razreda A, B in C.

Glavna novost standarda je povečano število obremenitvenih ciklov in pa nove zahteve pri vrednotenju dodatnih prispevkov negotovosti. Pri dodatnih prispevkih negotovosti so nove meritve vpliva adapterja med ključem in merilnikom, vpliv položaja glave ključa in vpliv dolžine prijemališča ročice momentnega ključa.

Meritev vpliva adapterja med ključem in merilnikom opravimo pri štirih rotacijskih položajih, za vsak položaj izvedemo 10 meritev. Prav tako oceno vpliva prijemališča položaja glave izvedemo pri štirih zasukih glave, deset meritev za vsak zasuk. Vpliv dolžine prijemališča ročice opravimo pri dveh dolžinah, deset meritev za vsako dolžino. Skupaj moramo torej opraviti 100 meritev samo za vrednotenje dodatnih prispevkov negotovosti.

Poenostavljeno je proces kalibracije vedno sestavljen iz predobremenitve, ponovnega vstavljanja orodja v kalibracijski sistem, in nazadnje obremenjevanja do vrednosti momenta določenih glede na tip in razred momentnega ključa. Vrednosti momenta med postopkom kalibracije spremljamo in nato shranimo za kasnejšo določitev vrednosti kalibracije. Pri razvoju krmilnega programa kalibracije se sklicujemo na vsebino standarda.

### 4 Nadgradnja kalibracijskega sistema

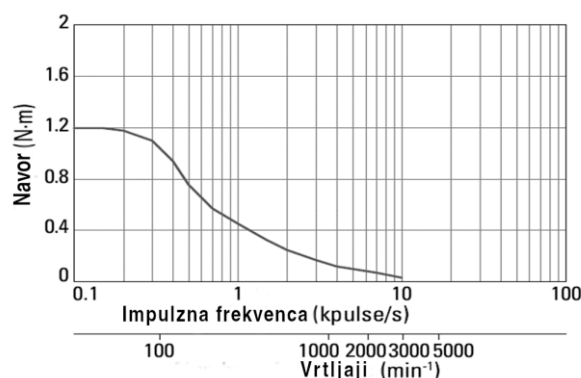
#### 4.1 Izbira stojnih elementov

Vreteno nadgrajenega sistema poganja koračni motor. Koračni motor smo izbrali najprej, saj ta vpliva na izbor ostalih komponent. Pri izboru motorja je najpomembnejši podatek o zadržnem momentu. Potreben zadržni moment na osi vretena smo določili eksperimentalno. Med ročnim poganjanjem vretena smo izmerili silo 10 N. Iz izmerjene sile lahko izračunamo moment vretena. Pri ročici sile 0,25 m izračunamo moment vretena 2.5 Nm. Z izbranim varnostnim faktorjem 1,6 določimo zahtevo, da motor na osi vretena zagotavlja vsaj 4 Nm momenta.

$$M_{vreteno} \geq 0,25 \text{ m} \cdot 10 \text{ N} \cdot 1,6 = 4 \text{ Nm}$$

Hkrati smo med poganjanjem vretena z roko izmerili vrtilno frekvenco vretena  $1 \text{ s}^{-1}$ .

Zadržni moment izbranega motorja je lahko manjši, saj imamo med motorjem in vretenom, prenos z reduktorskim prestavnim razmerjem. Ob predpostavki reduktorskega razmerja 1:3,33 je vrtilna frekvenca motorja  $3,33 \text{ s}^{-1}$  oziroma  $200 \text{ min}^{-1}$ . Glede na znano karakteristiko motorja je moment pri tej frekvenci enak 1,15 Nm. Ob multipliciranju momenta zaradi raduktorja pa zagotovimo moment na osi vretena 4 Nm. Opisanim zahtevam ustreza koračni motor Sanyo Denki 103H7126-0140, slika 2.



Slika 2: Momentna karakteristika koračnega motorja

Pri izboru jermenice ter jermena smo si pomagali s priročnikom proizvajalca Optibelt [4]. Odločili smo se za uporabo zobatega gumijastega jermena, saj ta dovoljuje večja prestavna razmerja in hkrati preprečuje zdrs. Izhodšče za izbor primernega jermena sta vrtilna hitrost in pa moč, ki jo z jermenom prenašamo. Vrtilna hitrost manjše jermenice je  $200 \text{ min}^{-1}$ , prenašana moč pa 60 W. Glede na tabelo proizvajalca lahko izberemo jermen s korakom zoba 2 mm. Naziv izbranega jermena je Optibelt OMEGA 2M.

Razmerja velikost jermenic morata ustrezati zelenemu prestavnemu razmerju, ki je enak 3,5.

$$n = \frac{w_2}{w_1} = \frac{z_1}{z_2} = 3,5$$

Želeli bi, da je hitrost gnanega vretena manjša od hitrosti osi motorja, zato je na osi motorja nameščena manjša, na osi vretena pa večja jermenica. Kritična vrednost za izbor velikosti manjše jermenice je premer osi koračnega motorja, ta je premera 6,35 mm. Izberemo jermenico s številom zob 22. Večja jermnica ima skladno s prestavnim razmerjem 86 zob.

Izvedba motorja sledi NEMA 17 standardni obliki koračnih motorjev za uporabo v industriji. Oblika NEMA 17 se nanaša na zunanje dimenzije motorja ter mesta za pritrdjevanje. Za pritrditev motorja na obstoječi sistem izdelamo nosilec.

## 4.2 Komunikacija merilnega ojačevalnika z računalnikom

Merilni ojačevalnik lahko upravljamo s programskim jezikom za merilno instrumentalno opremo SCPI. Gre za visokonivojski programski jezik, ki nam olajša upravljanje merilnega ojačevalnika. Komunikajo z merilnim ojačevalnikom začnemo z izbiro komunikacijskega vhoda na računalniku – COM porta, inicializacijo komunikacije na merilnem ojačevalniku, sledi izbor kanala, nato pa pričnemo z zajemom vrednosti z merilnega ojačevalnika.

Merilnik navora je povezan z merilnim ojačevalnikom, katerega pri nadgradnji sistema ohranimo. Merilni signal z merilnim ojačevalnikom pretvorimo v digitalno vrednost ter pošljemo po vodilu na računalnik. Za uporabo vrednosti merilnega ojačevalnika v programu, moramo signal dekodirati. Podatke na računalniku prejemo v obliki paketov, kjer so vrednosti paketa predstavljene z znaki v osmiškem zapisu.

## 4.3 Vodenje koračnega motorja

Za pogon vretena smo si izbrali koračni motor. Za vretenje koračnega motorja potrebujemo pravokotni signal, ki zaporedoma spreminja polarizacijo navitja. Pravokotni signal nam zagotavlja krmilnik koračnega motorja. Izbrali smo krmilnik Emis SMC1000i [5].

Krmilnik motorja komunicira z računalnikom po protokolu UART komunikacije. Pred povezavo z računalnikom na računalnik namestimo ustrezen gonilnik. Krmilnik uporablja nabor krmilnih ukazov. Seznam določenih ukazov krmilnika pridobimo iz priročnika krmilnika in jih uporabimo v programu krmiljenja.

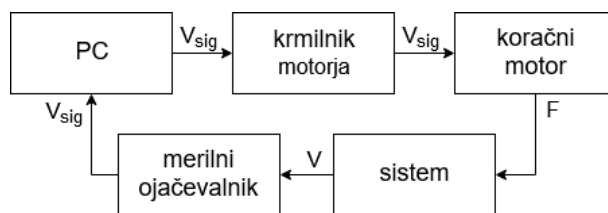
## 4.4 Rutine vodenja motorja

Za izvajanje kalibracije pripravimo nabor programskih rutin. Osnovne programske rutine povzemajo vgrajene ukaze krmilnika koračnega motorja. Med osnovne programske rutine koračnega motorja štejemo odprtje komunikacije s krmilnikom, preizkus komunikacije, obnovitev privzetih nastavitvev na krmilniku, nastavitvev hitrost koračnega motorja, poizvedba po legi koračnega motorja, pošiljanje motorja v lego ter zasilna ustavitvev motorja.

Višjenivojske programske rutine se navezujejo na procese povezane s kalibracijo momentnega ključa. Tako smo napisali programske rutine za predobremenitev momentnega ključa, obremenjevanje momentnega ključa ter zaznavanje špice momenta. Celoten program vodenja smo napisali v programskem jeziku Python. Blokovna shema krmiljenja sistema je prikazana na sliki 3.

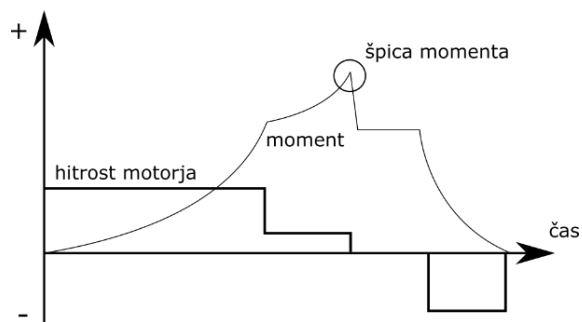
Pri razvoju programskih rutin smo signal merilnega ojačevalnika simulirali z razvojno ploščico Arduino. Napisali smo program, ki je odprl vhod serijske komunikacije na razvojni ploščici ter na ta vhod zapisoval vrednosti. Ta del programa nam omogoča komunikacijo razvojne ploščice z računalnikom preko vodila USB. Vrednosti, katere smo pošiljali po vodilu

USB smo spreminjali s potenciometrom priključenim na analogni vhod razvojne ploščice.



Slika 3: Blokovna shema nadgrajenega sistema

Rutina obremenjevanje ključa z nastavljenim momentom je prikazana na sliki 4. Začnemo s pomikom koračnega motorja. Blizu nazivne vrednosti momenta ključa, moment strmo narašča. Za lažje zaznavanje špice momenta, v izbrani točki zmanjšamo hitrost koračnega motorja. Na neki točki bomo izmerili padeč momenta, takrat smo prešli skozi špico momenta. Za popolno razbremenitev momentnega ključa začnemo s pomikom v nasprotno smer.



Slika 4: odvisnost momenta od hitrost koračnega motorja

## 4.5 Zaznavanje špice momenta

Zaznavanje špice momenta je, poleg programske niti uporabniškega vmesnika, dodatna paralelna programska nit. Pomen tega je, da moramo brati vrednosti serijske komunikacije v času »while« zanke uporabniškega vmesnika. Branje vrednosti merilnika momenta umestimo v dodatno while zanko.

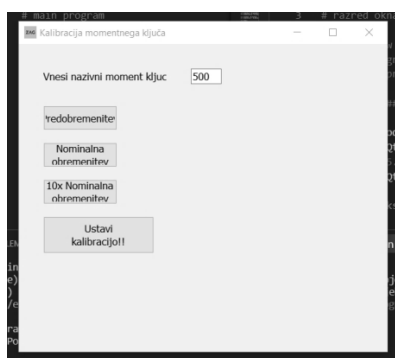
Špica vrednosti momenta se pojavi na mestu preklopa momentnega ključa. Vrednosti momenta tedaj hipno padejo. Zaznavanje špice momenta izvedemo z izračunavanjem spremembe meritev. Povprečje zadnjih 5 meritev predstavlja trenutno vrednost. Povprečje zadnjih 20 meritev predstavlja prejšnjo vrednost. Prehod skozi špico merjenega momenta zaznamo, ko pade trenutna vrednost momenta, pod prejšnjo vrednost momenta. Špica zaznanega momenta je znak za zaustavitev nadaljnega obremenjevanja momentnega ključa.

## 5 Uporabniški vmesnik

Uporabniški vmesnik smo, tako kot ostali del programa, napisali v programskem jeziku Python. Ob tem smo uporabili knjižnico PyQt5. Knjižnica PyQt5 zajema funkcije, ki so zgrajene okoli programskega okvirja – »frameworka« Qt za programiranje

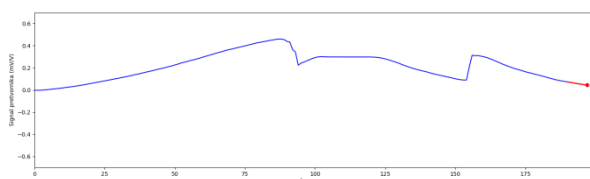
uporabniških vmesnikov na vseh napravah »cross-platform«.

Uporabnika pozdravimo z vstopnim oknom. Naslednje okno nudi možnost preizkusa povezave s krmilnikom koračnega motorja ter preizkusa povezave z merilnim ojačevalnikom. Z izborom tipa momentnega ključa nadaljujemo na naslednje programske okno.



Slika 5: Okno za izbiro programskih rutin kalibracije

Ko smo izbrali tip momentnega ključa, se nam prikažejo programske rutine, ki so za izbrani momentni ključ na voljo, slika 5. Prvo vnosno polje od uporabnika zahteva vnos nazivnega momenta momentnega ključa, saj kalibracijski sistem omogoča kalibracijo različnih velikosti ključev. Na voljo imamo predobremenitev, enkratno obremenitev s spremljanjem naraščanja momenta in pa desetkratno obremenitev. Dodatno imamo na voljo še ukaz »Ustavi«. Ukaz »Ustavi« nam omogoča prekinitvev trenutne programske rutine in ustavitvev koračnega motorja v vsakem trenutku. Program med obremenjevanjem izpisuje graf momenta (slika 6) in zabeleži maksimalno vrednost momenta.



Slika 6: Izpis krivulje avtomatiziranega obremenjevanja in razbremenjevanja momentnega ključa

Uporabnik mora med kalibracijo nekajkrat spremeniti lego momentnega ključa, zato po izvedbi funkcije ne zapuščamo trenutnega programskega okna. Na uporabniku je, da spremlja pri katerih zasukih momentnega ključa je bila kalibracija že opravljena in ročno zaključiti kalibracijo, ko je to opravil za predpisano število zasukov momentnega orodja. Avtomatiziran sistem je prikazan na sliki 7.



Slika 7: Avtomatiziran sistem za kalibracijo momentnih ključev

## 6 Zaključek

V nadgradnji sistema za kalibracijo smo obravnavali več vidikov sistema. Z motorjem in prenosom smo nadgradili mehanski sklop sistema. Pripraviti smo morali program, ki skrbi za krmiljenje motorja, zajemanje vrednosti z merilnega ojačevalnika in izvajanje programskih rutin obremenjevanja momentnega ključa. Predstavili smo vsebino nadgradnje standarda na področjih, ki določajo programske rutine obremenjevanja.

Za delovanje programa krmiljenja moramo na računalniku zadostiti sistemskim zahtevam. Delovanje programa smo preizkusili z različico Python 3.6. Za prenos in združljivost programskih knjižnic s PyQt5 je priporočljiva uporaba platforme Anaconda.

Za kalibracijo momentnih ključev skladno s posodobljenim standardom je potrebno sistem podati na akreditacijsko presojo. Presojevalec preveri skladnost sistema z zahtevami standarda. Vsebina nadgrajenega standarda je bila osnova razvoja našega krmilnega programa in nadgrajeni sistem bo v prihodnosti moral opraviti akreditacijsko presojo.

## Literatura

- [1] International standard ISO 6789, International Organization for Standardization - ISO, 2003.
- [2] Slovenski standard SIST EN ISO 6789-1:2017, Slovenski inštitut za standardizacijo - SIST, 2017.
- [3] Slovenski standard SIST EN ISO 6789-2:2017, Slovenski inštitut za standardizacijo - SIST, 2017.
- [4] Tehnični priročnik: Optibelt Rubber Timing Belt Drives, Arntz Optibelt Group, 2020. (Dostopno na: <https://www.optibelt.com/fileadmin/pdf/produkte/zahnrie-men-gummi/Optibelt-TM-Rubber-Timing-Drives.pdf>)
- [5] Die Schrittmotorsteuerung SMC1000i, EMIS GmbH, 2018.