

Koordinaatmõõtemasinate rakendamine tööstuses

Kokkuvõte

Maailmamajanduse globaliseerumise tagajärjel on tekkinud olukord, kus üle maailma asuvad ettevõtted konkureerivad kõik ühisel suurel rahvusvahelisel turul. Masinaehituse ja tehnika valdkonna ettevõtete jaoks tähendab see ennekõike seda, et neilt nõutakse järjest suuremat efektiivsust olukorras, kus valmistatavate toodete täpsusnõuded muutuvad üha rangemaks. Konkurentsipüsimine eeldab moodsate tootmisseadmete ning –tarkvara kasutamist kõikides tootmise etappides ja vastavate süsteemide omavahelist integreerimist. Kaasaegse tootmise viimases etapis, kus kontrollitakse valmistatud toodete vastavust geomeetrilistele nõutele, omavad kandvat rolli koordinaatmõõtemasinate (ingl *coordinate measurement machine*, lühend CMM). Eesti tööstuses, kus küll CNC-töötluskeskused ja tootmisrobotid on muutunud tavapäraseks, on CMM-id kasutusel vähestes ettevõtetes ja seda hoolimata faktist, et esimesed CMM-id jõudsid läänes turule juba viiekümnendatel.

Käesolev artikkel uurib, millised tehnoloogilisi võimalusi kaasaegsed koordinaatmõõtemasinate pakuvad ja kuidas on neid võimalik rakendada tootmisprotsessis. Lisaks annab artikkel lühiülevaate valdkonna koolituse hetkeseisust ning tulevikuplaanidest Tallinna Tehnikakõrgkoolis.

Koordinaatmõõtemasinate – millega on tegu?

Koordinaatmõõtemasinate on seadmed (pilt 1), millega on võimalik mõõta sisuliselt kõiki geomeetrilisi elemente (punktid, sirged, ringid, tasapinnad, silindrid jne), mis moodustavad tervikliku detaili. Välimuselt sarnanevad CMM-id vertikaalsete freespinkidega, kus tööriista asemel on mõõtepea (pilt 2). Mõõtepea küljes on mõõtesond ning selle küljes omakorda mõõteotsak. Mõõtepead saab reeglina liigutada vähemalt kolmel teljel (X,Y,Z). Telgede võimalikult sujuva ja stabiilse liikumise saavutamiseks on kasutusel õhklaagrid; tüüpiline õhupilu laagri ja juhtpinna vahel on 6..8 μm (tava- mõõtmega CMM-id) [1, p. 317]. Mõõtemasinate töölauad peavad olema kõrgsiledad ning tasapinnalised, et tagada mõõdetava detaili võimalikult stabiilne ning korratav paigaldus. Töölauad valmistatakse mustast graniidist, mis on kõva, struktuurselt stabiilne ning mitte-magneetuv.



Pilt 1. DCC CMM [2]

Käitamise põhjal jagunevad CMM-id kahte suurde gruppi: manuaalsed, mille puhul mõõtepead liigutab operaator käte abil, ning DCC (ingl *direct computer control*) ehk arvjuhtimisega CMM-id. Tuues jällegi paralleeli freespinkidega, siis DCC CMM on analoogne CNC-freespingiga, mida juhib CAM-is (ingl *computer aided machining*) koostatud programm. Kui üldjuhul on CMM telgede tööulatused suurusjärgus ca 400..1000 mm, siis suurimate seadmete puhul võivad need olla 20 000+ mm (suuregabariidiliste toodete mõõtmiseks). Lisaks sellele, et CMM võimaldab mõõta äärmiselt keeruka geomeetriaga detaile, iseloomustab seda ka suur mõõtetäpsus. Mõõtemasinate pikkuse mõõtmise täpsuse kvantitatiivseks hindamiseks kasutatakse põhiliselt parameetrit $E_{0, MPE}$ (ingl *maximum permissible error*) [3], mis antakse kujul $\pm(A+BL)$. Nii võib tootja poolne CCM-i täpsuse deklaratsioon olla nt:

$$E_{0, MPE} = \pm(3,8 + 3L/1000)\mu\text{m} ,$$

kus L on mõõdevate punktide vaheline kaugus (mõõtetulemus). Mõõtes antud CMM-iga võlli pikkuse (kahe punkti kaugus) ja saades tulemuseks näiteks 200,023 mm, tuleb antud mõõtetulemuse mõõtemääramatuseks:

$$E_{0, MPE} = \pm(3,8 + 3 * 200,023/1000) = \pm 4,4 \mu\text{m} .$$

Valemist on näha, et mida suurem on mõõdetavate punktide vaheline kaugus, seda suuremaks muutub paratamatult ka mõõtemääramatus. Saadud tulemus iseloomustab tegelikult kitsalt mõõtemasina enda kinemaatilisest ahelast ja elektroonikast (signaali konverteerimine, tulemuse ümaradamine jne) põhjustatud määramatust. Lõpliku nn liitmääramatuse saamiseks tuleb arvesse võtta ka teised tegurid nagu keskkonna temperatuur, detaili geomeetria hälbed, mõõtepunktide tihedus jne. Seega sarnaselt kõigi teiste mõõteriistadega, peab kvaliteediinsener lähtudes

mõõdetava detaili nõuetest, CMM-i täpsusest ja keskkonnatingimustest alati hindama, kas saadud mõõtetulemused on piisavalt usaldusväärsed vastavuse või mittevastavuse tõendamiseks.

Detaili mõne elemendi mõõtmisel viiakse mõõtesondi otsak kontakti mõõdetava elemendi pinnaga, mille peale masin salvestab antud punkti asukoha kolmemõõtmelises ruumis. Kõige täpsema mõõtetulemuse saamiseks peab mõõteotsaku telg olema mõõdetava pinnaga võimalikult paralleelne ning otsak liikuma pinnaga kontakti pinnanormaali sihis (pinnaga võimalikult risti oleval trajektoorigil). Seetõttu on kallimatel seadmetel lisaks peatelgedele (X,Y,Z) kasutusel mõõtepea motoriseeritud indekseerimine kahes teljes (nt $7,5^\circ$ sammuga). See tähendab, et mõõteotsakut on võimalik keerata optimaalsesse asendisse mõõdetava detaili pinna suhtes. Kõige keerukamatel seadmetel (nn viie-teljelised CMM-id) toimub mõõtepea lisatelgede liikumine sujuvalt, ehk siis sisuliselt on mõõteotsakul võimalik kasutada lõpmatu arv positsioone.

Mõõtesonidid võivad erineda nii mõõtmete kui ka tööpõhimõtte poolest. Seni on olnud kõige laialdasemalt kasutusel füüsilised nn *touch-trigger* sonidid, mis saavad info masina kontrollerrisse peale seda, kui sondi mõõteotsak on läinud kontakti detaili pinnaga. Seda tüüpi sondide suurimaks puuduseks on see, et tulenevalt ajalikest piirangutest võetakse mõõdetavatel pindadel reeglina liiga väike arv punkte, mis ei taga tegelikust geometriast piisavat ülevaadet. Parema katvuse saamiseks, eriti just keeruliste kujupindade täpsel mõõtmisel, on välja töötatud nn analoogsonidid. Analoogsonidid liiguvad üle pinna, olles pinnaga pidevas kontaktis ja genereerides seeläbi tihedad punktipilved (ca mõnituhat punkti sekundis). Sondi nimetus tuleneb sellest, et mõõteotsaku ja detaili pinna puutel tekitatakse analoog signaal, mis on võrdeline mõõteotsaku ärapainde nurgaga (lihtsamate *touch-trigger* sondide puhul on kasutusel digitaalne signaal – kas puude toimus või mitte).



Pilt 2. CMM-i mõõtepead. [4]

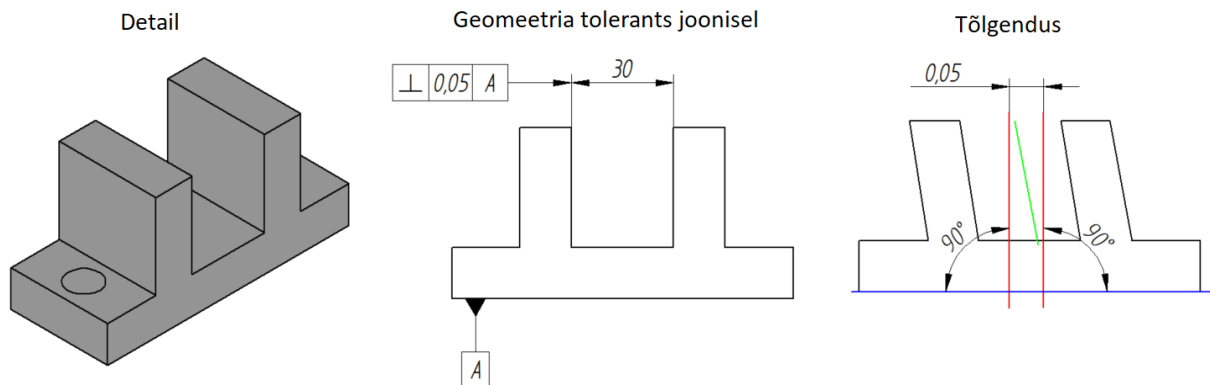
Viimasel kümnendil on aina suuremal määral võetud kasutusse nn puutevabad sonidid, eriti just lasersonidid. Lihtsustatult võttes saadab lasersond välja laserimplusi ja mõõdab ära aja, mis kulub selle tagasipeegeldumiseks detaili pinnalt, võimaldades nii välja arvutada läbitud teekonna pikkuse. Lasersondide suureks eeliseks on asjaolu, et laserskanneerimisega saab ära mõõta detaili kogu pinna ja seejuures teha seda väga kiiresti. Teisalt on lasersondi kasutamine problemaatiline

siis, kui mõõdetav pind juhtub olema läikiv, sest läikivad pinnad võivad tekitada optilisi hälbeid. Ühe lahendusena kasutatakse siin pindade katmist spetsiaalsete pulbrite või spreidega, mis muudavad pinna matiks, kuid samal ajal moodustavad sellele ka kihi, mille paksus tuleb arvesse võtta ja seega suureneb tulemuse mõõtemääramatus. Lisaks räägib füüsiliste sondide kasuks hetkel veel ka nende ligi suurusjärgu võrra suurem täpsus (sama tüüpi CMM-il kasutades). Parima tulemuse saamiseks kasutatakse väga vastutusrikaste detailide puhul füüsilist ja lasersondi paralleelselt, seejuures mõõdetakse füüsilise sondiga detaili kõige kriitilisemad ja kõige väiksema tolerantsiga elemendid.

Koordinaatmõõtemasina eelised

Keeruliste nõuete kontrollimine

Eesti ettevõtted, kes allhanke korras erinevaid detaile valmistavad, puutuvad aina rohkem kokku joonistega, millel on kasutusel geometria tolerantsid (kirjelatud standardis ISO 1101) – tolerantsid, millega ohjatakse elementide (näiteks pindade, telgede, avade jne) kuju ja asendi hälbeid. Geomeetriliste tolerantsidega tolereeritakse tihtipeale detaili elemente, mis on mõttelised, ehk teisisõnu neid reaalselt füüsilisel kujul ei eksisteeri (teljed, sümmeetriatasapinnad). Antud asjaolu muudab vastvate nõuete kontrollimise tavaliste käsimõõteriistadega väga keeruliseks (või kohati isegi võimatuks). Näitena on joonisel 1 toodud detail, mille tööjoonisel olev geometria tolerants nõuab, et detaili 30 mm laiuse soone sümmeetriatasapinna ristseisu hälve alumise baaspinna suhtes ei tohi ületada 0,05 mm. Ehk teisisõnu 30 mm laiuse soone sümmeetriatasapind (roheline) peab ära mahtuma kahe mõttelise ideaalselt paralleelse tasapinna vahele (punased), mis on omakorda ideaalse täisnurga all baaspinna (sinine) suhtes. Kuna soone sümmeetriatasapind on mõtteline tasapind, mis on ekvidistantne soone siseseintest, siis selle asendi mõõtmine baaspinna suhtes on komplitseeritud. Koordinaatmõõtemasinas on antud nõude kontrollimine aga suhteliselt lihtne. Esimese sammuna mõõdetakse üles alumine baaspind, seejärel mõlemad soone siseseinad, kokku kolm tasapinda. Viimase kahe tasapinna asendi alusel konstrueerib CMM-i tarkvara soone sümmeetriatasapinna ja seejärel näitab ära selle asendi baaspinna suhtes.



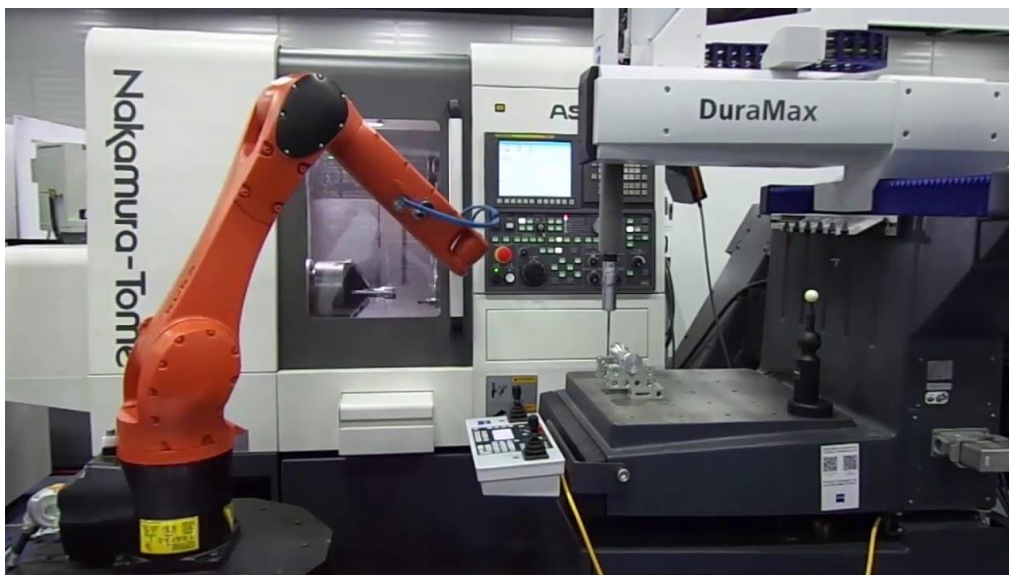
Joonis 1. Geomeetria tolerants ristseis, autori joonis

Toodud näide on üks lihtsamatest juhtudest, kuid annab edasi CMM-i selge eelise klassikaliste mõõtemetodite ees. Praktikas võivad joonisel antud nõuded olla tunduvalt keerukamad ja kompleksamad ning seega on CMM-i kasutamine usaldusväärse tulemuse saamiseks kohati sisuliselt möödapääsmatu.

Mõõtmisprotsessi automatiseerimine

Arvjuhtimisega koordinaatmõõtemasinad (DCC CMM) võimaldavad mõõteprotsessi automatiseerimist. Automaatse mõõteprotsessi loomise eelduseks on mõõterakis, mis tagab detaili korratava paigalduse ning vastav mõõteprogramm. Sõltuvalt mõõdetava detaili ja selle täpsusenõuete keerukusest peab rakise ja programmi koostama kas CMM insener või CMM tehnik. Kui rakis ja mõõteprogramm on olemas, saab mõõtmist läbi viia juba ka minimaalse ettevalmistusega kvaliteeditehnik. Tema ülesandeks jääb vaid detailide vahetamine, programmi käivitamine ning tulemuste protokollimine.

Veel suurema automatiseerimistaseme saavutamiseks on võimalik kasutada robotit. Näitena võib tuua tootmismooduli (pilt 3), mis koosneb CNC-treipingist, CMM-ist ning robotist. Robot võtab töödeldud detaili CNC-treipingi padrunist ja asetab selle CMM-i töölaual olevale rakisele. Kui detaili mõõtmisel CMM tuvastab kõrvalekaldeid lubatud tolerantsidest, saadab see info otse treipinki, kus tehakse vastavad korrektuurid tööriistade *offset* väärtustes, või annab häire (nt treiteriku purunemise tõttu on detaili mingi mõõde suuresti tolerantsist väljas ja treiterik tuleb vahetada). Selliselt on võimalik tootmismoodulit hoida töös sisuliselt ilma tehniku sekkumiseta. Tehniku roll on olla protsessi ülevaataja ja ta jõuab nii hallata mitut tootmismoodulit korraga.



Pilt 3. Tootmismoodulisse integreeritud CMM. [5]

Turul on olemas ka spetsiaalsed CMM-id, mis on mõeldud töötama tootmisliini osana. Need on oma ehituselt kompaktsemad kui tava CMM-id ning asuvad kas ühes või mitmes tootmisliini kriitilisemas positsioonis. Ei ole harvad olukorrad, kus terved partiid detaile arvatakse praaki, kuna

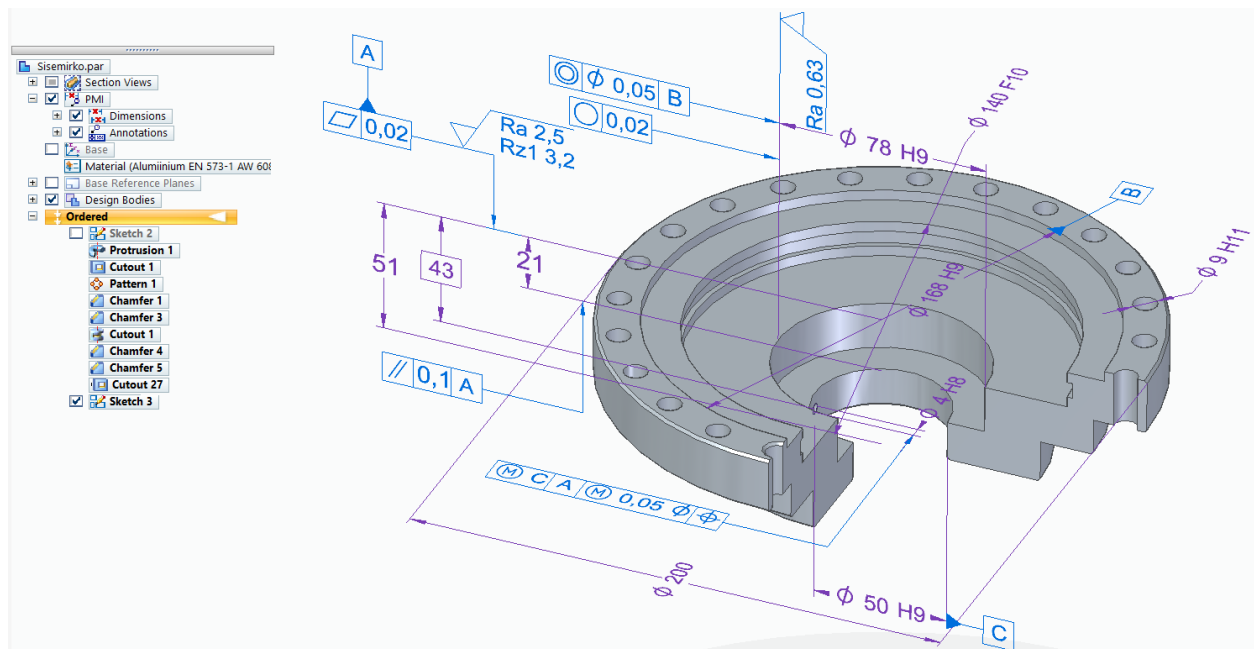
mittevastavused avastatakse liiga hilja. Ka siin võib toomisprotsessi integreeritud mõõtemasin anda märgatava efekti, kuna mittevastavused tuvastatakse jooksvalt ja sellele reageeritakse kohe. Ettevõtte jaoks tähendab see raha ja aja kokkuhoidu ning ettevõtte klientidele sisestab see kindlustunnet, et toodete kvaliteedikontroll on järjepidev ning usaldusväärne.

Mõõtetulemuste korduvus ja korratavus

DCC CMM-i kolmandaks eeliseks tuleb lugeda asjaolu, et mõõtetulemused on korduvad ja korratavad. Väga lähedased tulemused saadakse ühe ja sama elemendi korduval mõõtmisel (samades tingimustes) ning ka siis, kui mõõdavad erinevad operaatorid. Kuigi see võib tunda esmapilgul triviaalse ja loomulikuna, siis mõõtetehnika seisukohalt on korduvus ja korratavus usaldusväärse mõõteprotsessi aluseks. Madal korratavus võib ilmuda iseäranis just käsimõõteriistade puhul, kus iga tehnik käsitleb mõõteriista pisut erinevalt ja seega saadakse sama detaili mõõtmisel küllatki erinevad tulemused. Paratamatult tekib küsimus – milline tulemus on õige? Loomulikult võib ka CMM-i puhul tekkida korduvuse ja korratavusega probleeme, kui kasutatakse valesti töövõtteid (näiteks mõõteotsaku kalibreerimata jätmise või valesti kalibreerimine), kuid see risk on pädevate tehnikute puhul pigem madal.

MBE

Seoses tootmisprotsessi automatiseerimise ja digitaliseerimisega on tekkinud uus tootmisparadigma, mida tähistatakse inglisekeelse akronüümiga MBE – *model based engineering* (või MBD – *model based design*). Sisuliselt tähendab see tootmisprotsessi kujundamist selliseks, et kogu toote (nt üksikdetaili) valmistamise info liigub ühest tööfaasist teise 3D mudeli ja sellega kaasas oleva info kujul. Puudub vajadus paberjooniste ja dokumentatsiooni tekitamiseks ning haldamiseks, mis omakorda aitab muuta tootmisprotsessi sujuvamaks, efektiivsemaks ning seeläbi kiiremaks. Detaili 3D mudelis on olemas ka kogu detaili valmistamistolerantse puudutav informatsioon (pilt 4). Seda arengut silmas pidades, on enimkasutatud CMM tarkvarades arendamisel (ja osaliselt juba kasutuses) moodulid, mis automaatselt konverteerivad detaili 3D mudelis olevad täpsusnõuded mõõteprogrammiks. Kuigi üldjuhul eeldavad ka sellised automaatselt koostatud programmid teatud määral inimese sekkumist ja käsitööd, muudab see sellegipoolest programmi koostamise kordades kiiremaks. Seejuures väheneb võimalus, et tehnik on detaili täpsusnõudeid valesti mõistnud ja koostanud puuduliku või väärade mõõteprogrammi. Praegusel hetkel on MBE kasutuselevõtt tööstuses alles algusfaasis, peamise pidurdava tegurina puudub ühtne kõikide tarkvara tootjate poolt aktsepteeritav faili formaat, mis suudaks lisaks 3D mudelile ka kogu toote valmistamise infot edasi kanda.



Pilt 4. Tolerantsid 3D mudelis (SolidEdge ST10). Autori pilt

CMM-ide kasutuselevõttu piiravad tegurid

Hind

Peamine tegur, mis pärsib mõõtemasinate laialdast soetamist ja kasutamist (Eesti) tööstuses, on esialgne investeeringu suurus. Jättes konkreetsed numbrid kõrvale, saab öelda, et maksumuselt on CMM-ide võrreldavad CNC-tööstluskeskustega. Riistvarale (mõõtemasin, mõõtepea ja -sond) lisandub tarkvara, mis võib moodustata *ca* veerandi kuni kolmandiku koguhinnast. Kuigi turul liigub ka mõningaid vabavaralisi programme, on kõik enamlevinud programmid tasulised.

Kasutamise keerukus

Kui võrrelda mõõtemasinaid CNC-tööstluskeskustega, siis kasutamise seisukohalt on viimased mõnevõrra lihtsamad, seda eriti õppimisprotsessi algetapis. Üheks põhjuseks on siin asjaolu, et CMM programmi koostamine nõuab üsna häid teoreetilisi teadmisi mõõtmise ja tolereerimise valdkonnas. Et mõõtemasinaga mõõta, peab esmalt aru saama, mida joonisel nõutakse ja mis on nõude praktiline väljendus. Ettevõtetal tekib siinkohal kohe probleem - kuigi olemas võib olla reaalne vajadus CMM-i järele ja soetamiseks rahaline ressurss, siis on vaja leida inimene (või inimesed), kes suudaks seadet kasutada.

Ettevõtte profiil

Sarnaselt kõikide teiste automatiseerimislahendustega (CNC-tööstluskeskused, robotid jne) ei ole koordinaatmõõtemasina kasutamine tingimata mõttekas sellistes ettevõtetes, kus toodetakse kas üksikuid detaile või väikeseeriaid ning toodete sortiment tihti muutub. Sellises olukorras kulub

ebaproportsionaalselt palju aega rakiste ja programmide koostamisele, kuigi mõõta on vaja ainult mõni üksik detail. Ühe suure erandina saab välja tuua valuvorme tootvad ettevõtted, kus küll iga vorm võib olla erinev, kuid samas on vaja mõõta vormide puhul tavapäraseid keerukaid kujupindu. Sellisel juhul võib CMM olla ainukeseks võimaluseks jälgitava mõõtmistulemuse saamiseks.

CMM-ide koolitus

Hetkel ei ole eraldi CMM-ide kasutamise ja programmeerimise kursus ühegi Eesti haridusasutuse õppekavas ja see on tingitud olukorra, kus CMM-i omavad ettevõtted peavad koolitama oma tehnikuid majasiseselt. Tulenevalt Eesti ettevõtete arengust on selge, et CMM-ide kasutamine ajapikku suureneb ja sellega koos ka koolituse vajadus.

Tallinna Tehnikakõrgkooli mõõtetehnika laboris on kaks koordinaatmõõtemasinat (pilt 5), üks manuaalne ning teine arvjuhtimisega. Õppetöös on kasutusel manuaalne CMM, kuid seni minimaalsel määral. Põhjuseid on siin peamiselt kaks – juba eelnevalt mainitud seadmete suhteline keerukus ning hea teoreetilise baasi vajadus. Küll on kõrgkooli tehnikainstituudis võetud sihiks CMM-i osakaalu suurendamine õppetöös. Eesmärgiks on eraldi kursuse loomine, mis keskenduks ainult CMM-iga mõõtmisele ja programmide loomisele. Selle eelduseks on CMM-i tarkvara õppekohtade hankimine ning töö selles suunas käib. Teoreetilise põhja tugevdamiseks on tolereerimise ja mõõtetehnika kursuses järk-järgult suurendatud geomeetria tolerantside osatähtsust.



Pilt 5. CMM-id Tehnikakõrgkooli mõõtetehnika laboris. Foto: autor

CMM-i simulatsiooni tarkvaraks on kõrgkool hetkel planeerinud Hexagoni pakutava PC-DMIS-e. PC-DMIS-e tugevusteks on kasutajasõbralikkus ning suur kasutajate arv. Paljude kasutajate

hinnangul on PC-DMIS üks lihtsamini omandatavaid CMM-i programme ja kahtlemata on see väga oluline just tudengite koolituse seisukohalt. Suure (ülemaailmse) kasutajate arvu tõestuseks on laia kasutajate baasiga interneti foorum. Foorumist leiab asjatundlikku infot enamuse CMM-e ja PC-DMIS-ist puudutavate küsimuste osas, sest foorumi aktiivseteks liikmeteks on teiste seas ka metroloogia valdkonna tippspetsialistid.

CMM-ide toomine õppekavasse on oluline ka kõrgkooli tehnikainstituudi õppekavade terviklikkuse jaoks. Tänapäevane masinaehituslik tootmistsükkel koosneb kolmest suurest etapist - tootearendus (CAD, CAE), tootmine (CAM) ja kvaliteedikontroll. Hetkel on kõrgkoolis kaks esimest selgelt esindatud, kuid just viimane jäänud tahaplaanile. CMM-ide toomine õppekavasse kahtlemata tõstaks oluliselt ka selle viimase ja väga olulise etapi esindatust ja annaks seega tudengitele terviklikuma ülevaate tootmisprotsessist. Soodustavaks teguriks CMM-idega seonduva õpetamiseks TTK-s on asjaolu, et peamiselt masinaehituse tudengid puutuvad õppetöös laialdaselt kokku CAD ja CAM programmidega ning peavad ka praktiliselt töötama CNC-seadmetega. CAD, CAM ja CMM tarkvarad omavad mitmeid ühiseid jooni (näiteks kasutavad kõik Descartes`i koordinaatsüsteemi, analoogseid failitüüpe jne) ja olles omandanud juba ühe programmi, on teiste omandamine tudengitel märgatavalt lihtsam. Juba eelnevalt väljatoodud sarnasused CNC-töötluskeskuste ning CMM-ide riistvara ja tööpõhimõtete vahel aitavad tudengitel lihtsamini õppida ka mõõtemasinate käsitlemist.

Kõrgkooli eesmärgiks ei ole kindlasti pakkuda ettevõtetele nõ valmis mõõtetehnika insenere, vaid tekitada tugev baas, mille põhjal oleks ettevõtetel oluliselt lihtsam juba vastavalt ettevõtte profiilile ja vajadustele koolitust jätkata.

Viidatud allikad:

- [1] N. Suga, Metrology Handbook. The Science of Measurement., Tokyo: Lamport Gilbert Limited, 2016.
- [2] HexagonMI, „HexagonMI,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hexagonmi.com/products/coordinate-measuring-machines/bridge-cmms>. [Kasutatud 12. november, 2018].
- [3] ISO 10360-2:2009 GPS-Acceptance and verification tests of coordinate measuring machines (CMM)-Part2. CMMs used for measuring linear dimensions, Geneva: International Organization for Standardization, 2009.
- [4] Renishaw plc, „Renishaw,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.renishaw.com/en/hardware--31248>. [Kasutatud 15. november, 2018].
- [5] Carl Zeiss AG, „Zeiss,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines.html>. [Kasutatud 6. november, 2018].