

### 3. RAZVOJ NUMERIČKI UPRAVLJANIH MERNIH MAŠINA

#### 3.1 Uslovi nastanka NUMM

Mesto i uloga merenja i inspekcije se menjala saglasno razvoju i uvođenju novih tehnologija u tehnološke sisteme. Na početku industrijskog razvoja, zadatak proizvodnje, odnosno kontrole bio je da se obezbedi funkcija proizvoda, uz visoke tolerancije sastavnih delova. Nakon toga, uspostavljanjem koncepta serijske proizvodnje uveden je princip zamenjivosti delova, pri čemu je kontrola dobila novu ulogu (serijnost i povećanje tačnosti). Najzad, razvojem i uvođenjem novih obradnih sistema (transfer linije, NUMA), povećana je tačnost, kompleksnost i fleksibilnost obrađenih delova. Uloga kontrole je ovde bila ne samo da identifikuje geometrijsku tačnost obrađenog dela već i parametre za upravljanje obradnim procesom (podešavanje alata, parametri režima rezanja - hrapavost obrađene površine, i slično). Broj parametara obrade i kvaliteta koji ulazi u međusobnu korelaciju se povećava.

Razvoj NUMA, odnosno složenijih tehnoloških struktura na bazi ovih sistema je uspostavio i nove koncepte i pravila za merenje i inspekciju. Povećanje kompleksnosti i fleksibilnosti, uz sve oštrije zahteve u smislu tačnosti danas se ogledaju u razvoju i primeni koncepta upravljanja kvalitetom konformnosti u realnom vremenu [22].

Nove tendencije u tehnološkim sistemima u pogledu obradnih procesa, postavile su i nove zahteve pred mernu tehniku. Primena konvencionalnih metroloških sistema i procedura koje ih podržavaju, postala je ograničavajući faktor u smislu fleksibilnosti i tačnosti merenja. Poseban problem je bio metrološka identifikacija kompleksnih metroloških zadataka, kao što su, na primer, tolerancije oblika i položaja kod kutijastih delova ili delova sa površinama slobodnog oblika<sup>1)</sup>. Kod ovih primera, pored metrološke identifikacije oblika, problem je i povezivanje metroloških baza, što ima direktnog uticaja na tačnost dobijenih rezultata [39].

---

<sup>1)</sup> Ovde se misli na delove, koji imaju površine, koje se podvode pod engleski termin "free forms" [24].

Poseban doprinos istraživanju i razvoju NUMM su imala dva događaja<sup>2)</sup>. Prvi je, otpočinjanje industrijske proizvodnje krajem šezdesetih godina, mernih sistema na bazi elektronike za dužine i uglove, a drugi, razvoj računarske tehnologije<sup>3)</sup>. Na ovaj način su ostvareni tehnološki skokovi i u ovoj oblasti, otpočinjanjem razvoja NUMM<sup>4)</sup>.

Danas, dve i po decenije od njihovog nastanka, za NUMM možemo reći da je period njihove inkubacije u industriju završen, a otpočeo proces njihove intenzivne difuzije.

### 3.2 Etape razvoja NUMM

NUMM predstavlja kompleksne inženjerske proizvode, koji imaju složenu hardversku i softversku strukturu. Posmatrajući ih kao celinu, od njihovog nastanka do sada, mogu se definisati četiri tehnološka nivoa [56, 114].

Merne mašine sa digitalnim pokazivačem pozicije za svaku osu i ručnim manipulisanjem - kretanjem mernog senzora, predstavljaju prvi tehnološki nivo. Osnovna karakteristika primene ovog tehnološkog nivoa je merenje relativno kompleksnih delova u jednom koordinatnom sistemu merenja, uz ručnu manipulaciju celim procesom. Digitalnim pokazivačima pozicije određivane su linijske karakteristike kvaliteta (odstupanje dužina) [191].

Druga generacija MM predstavlja prvi tehnološki nivo proširen sa minimalnom hardverskom podrškom. Uvodi se merni procesor, pomoću koga se očitavaju položaji pokretnih elemenata MM i vrši osnovna obrada mernih rezultata. Na ovaj način je povećana tačnost i produktivnost dobijanja mernog protokola.

Sledeći, treći generacijski skok u ovoj tehnologiji je bio uvođenje pogonskih sistema za stepene slobode noseće strukture. Upravljačkom jedinicom je izvršeno upravljanje radom MM, na nivou automatizacije merenja i dobijanja mernog protokola. Na ovom tehnološkom nivou je korišćena autonomna softverska podrška koju su razvili svi proizvođači MM nezavisno, uglavnom na bazi hardverske logike. Osnovni princip ovog softvera je uspostavljanje veze između definisanih osnovnih geometrijskih oblika i različitih metroloških zadataka za iste te oblike. Pri tome, operatoru stoji na raspolaganju meni hardverskih i softverskih funkcija za rešavanje različitih metroloških operacija.

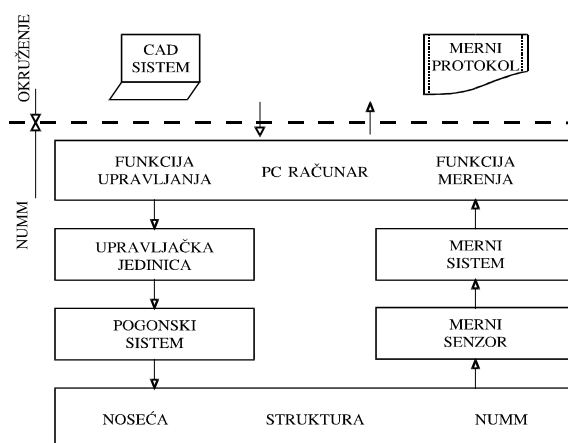
---

<sup>2)</sup> Već tada, krajem šezdesetih godina u oblasti obradnih sistema pojavljuje se prvi FTS, 1967. god. - Mollnis System ili Sistem 24, što znači da je bio rešen čitav niz pitanja koja su bila u direktnoj ili indirektnoj vezi i sa merenjem ili kvalitetom [26].

<sup>3)</sup> Razvijena je i primenjena tehnologija mini računara na bazi MSI integracije, što je predstavljalo osnovu za kasniji razvoj CNC upravljačkih jedinica [33].

<sup>4)</sup> Italijanska firma Ferranti je 1969. god., na međunarodnom sajmu merne tehnike u Cirihu prikazala MM prve generacije. Početkom sedamdesetih godina u tehnologiju razvoja i proizvodnje NUMM su ušli i: Ziess, DEA, Johansson, Leitz, Mauser, Olivetti, Bendix, Brown Sharpe, i drugi.

Najzad, najnoviju generaciju MM predstavljaju CNC merne mašine<sup>5)</sup> na bazi distribuiranog upravljanja. Svojom hardverskom i softverskom strukturom one predstavljaju fleksibilne metrološke module, koji omogućavaju formiranje složenih tehnoloških i/ili metroloških struktura. Ovaj pristup je detaljno izložen u poglavlju 7. Automatizacija merenja, manipulacija mernim sensorima, mernim predmetima, dobijanje različitih mernih protokola, povezivanje sa softverom po horizontali i vertikali (CAD-CAM-CAI), vrši se na bazi softverske podrške. Primer klasične strukture jedne CNC MM prikazan je na slici 3.1. Kod ovih sistema mogu se identifikovati sledeći sastavni elementi: (i) noseća struktura, (ii) pogonski sistemi, (iii) merni sistem, (iv) merni senzor, (v) računarski sistem, i (vi) softverska podrška [10, 36, 134].



Sl. 3.1 Struktura CNC MM

Paralelno sa razvojem NUMM-a, razvijen je i softver za njihovu podršku. Pri tome se uočavaju dva pristupa [15, 138, 149, 152]: (i) svi proizvođači NUMM razvijali su autonomnu softversku podršku na bazi osnovnih mernih principa. Osnovna karakteristika ovog pristupa su autonomni softver proizvodi orijentisani proizvođaču

<sup>5)</sup> Radi ilustracije razvoja tehnologije MM, ovde se navode neki karakteristični detalji: 1972. godine - firma C. Zeiss je napravila MM UMM 500, koja je i danas u upotrebi; 1973. godine - softverski rešen koncept određivanja koordinatnog sistema mernog predmeta (uravnavanje u prostoru, uravnavanje u ravni, tri nulte tačke, NC-pogon, programiranje obučavanjem, 3D-merni senzor; 1980. godine - merenje odstupanja oblika na bazi skeniranja uz CNC pogon; 1983. godine - razvijen je koncept magacina mernih senzora; 1984. godine - rešen je koncept hardverskog uključivanja MM u FTS, uveden je novi CNC model upravljanja (distribuirani računarski sistem), primenjen merni senzor za digitalnu obradu slike; 1990. godine - uvedena nova tehnologija za noseću strukturu Opton-ovih i Zeiss-ovih MM na bazi CARAT tehnologije, čime se višestruko smanjuje merna nesigurnost, za merne sisteme primenjena nova generacija materijala na osnovu INVAR tehnologije. Tačnost mernih sistema je drastično povećana a uticaj okoline (temperatura, vlažnost) smanjen, a pored toga povećan je opseg mernih elemenata [83].

MM, odnosno upravljačkoj jedinici koja je podržava<sup>6)</sup>, i (ii) softver opšte<sup>7)</sup> namene, za ručno ili mašinsko programiranje CNC MM. Daje se kratka analiza obe grupe softvera.

### 3.2.1 Softver za CNC merne mašine

Izvršena analiza softvera za CNC MM, omogućuje da se, prema stepenu složenosti metroloških zadataka, softveri mogu klasifikovati u sledeće grupe: (i) merenje i inspekcija tolerancija dužina, uglova, oblika i položaja, (ii) merenje i inspekcija parametara karakteristika kvaliteta zupčanika, i (iii) merenje i inspekcija krivih linija i površina.

Rezultati merenja ili inspekcija u zavisnosti od potrebe korisnika mogu biti dati u: Dekartovim (Kartezijevim -  $x, y, z$ ) koordinatama, polarnim ( $r, \theta$ ) koordinatama, cilindričnim ( $r, \theta, z$ ) koordinatama, i sfernim ( $r, \theta, y$ ) koordinatama, u koordinatnom sistemu merenja, koji se odnosi na merni predmet.

Osnovni geometrijski elementi koje definišu svi softveri za CNC MM, pomoću kojih se realizuju različiti metrološki zadaci su: tačka, prava, krug, ravan, cilindar, konus, sfera i torus. Svaki geometrijski element se definiše min i max brojem tačaka, pomoću koga se, primenom metode najmanjih kvadrata on određuje. Tako, na primer, za ravan imamo: min (3 tačke - UMESS 300) i max (neograničeno)<sup>8)</sup>. Pomoću ovih osnovnih geometrijskih oblika možemo realizovati i sledeće, netipične klase metroloških zadataka: (i) komponovanje složenih geometrijskih oblika na osnovu osnovnih, (ii) preseki geometrijskih oblika i/ili njihovih karakteristika, i (iii) rastojanje ili najkraće rastojanje između geometrijskih oblika i/ili njihovih karakteristika.

Tolerancije oblika i položaja<sup>9)</sup> se takođe definišu kao relacije osnovnih geometrijskih elemenata. Tako, na primer, tolerancija položaja - paralelnost se definiše kao: geometrijski element - geometrijski element, geometrijski element -

<sup>6)</sup> Do ovog zaključka se došlo nakon analize softvera CNC MM sledećih proizvođača: CORDIMET (C.H. Johansson - Švedska), ARGUS (Microtehnika - Italija), BOICE (Coordinate Measuring Systems - SAD) ZEISS (UMM - Oberkochen - SRN), VEB Carl Zeiss (Jena - DDR), OPTON (Feintechnik GmbH - SRN), BENDIX (Coordinate Measuring Machines - SAD), MITUTOYO (Micropak 21 - Japan), LETZ (3D CNC Measuring Machines - SRN), MULTIMETRICS (measuring Machines - SAD), HASFORD (RAPID CHECK - SAD), TRIMOS (Mini Vertical - Švajcarska), DEA (Italija), SIP (Švajcarska), TAYLOR HOBSON (Talycheck - Engleska), FAG (Metrology - SRN), KORDT (Cordition - SRN), PORTAGE (USA), FERANNTI Ltd. (Italija) i RENAULT (Francuska).

<sup>7)</sup> Razvijena su dva jezika kao softver opšte namene za ručno i/ili mašinsko programiranje NUMM, i to: (i) NCMES (Numerical Controlled Measuring and Evaluation System) softver je razvijen na bazi saradnje nekoliko istraživačkih institucija - Institut für Steuerungstechnik (Stuttgart University), RWTH Aachen, proizvođača i potencijalnih korisnika NUMM-a u SRN, i (ii) SCAI (Software Controllo Automatico Inspector) softver, koji razvija italijanski proizvođač NUMM-a, Olivetti [83, 101, 104].

<sup>8)</sup> UMESS 300 je osnovni metrološki softver Optonovih MM. Maksimalni broj tačaka je ograničen kapacitetom računara koji podržava MM [91, 97].

<sup>9)</sup> Ove tolerancije (oblik i položaj) su definisane međunarodnim standardima ISO 1101, prema kojima su razvijeni i ovi metrološki softveri [97].

karakteristika geometrijskog elementa (ili obrnuto) i karakteristika geometrijskog elementa - karakteristika geometrijskog elementa.

Kod zupčanika, pored osnovnih geometrijskih veličina (prečnici, širina), kontrolišu se i veličine koje su karakteristične samo za njih: radijalno bacanje, korak, bočna linija i oblik profila. Softverom za ovu klasu merenja takođe dobijamo različite izlazne izveštaje, kako determinisane vrednosti mernih veličina (štampanje), tako i grafičku prezentaciju tolerancija oblika (ploter).

Inspekcija i merenje krivih linija predstavlja posebnu klasu softver proizvoda za CNC MM<sup>10)</sup> koji se u poslednje vreme razvija. Postoji niz problema koje treba rešiti pri razvoju ovog softvera, a radi ilustracije ove situacije navodi se sledeći primer.

Pri inspekciji ili merenju turbinske lopatice, potrebno je koristeći osnovni metrološki softver za toleranciju dužina, uglova, oblika i položaja, odrediti koordinatni sistem merenja dela. Zbog toga je potrebno da ovaj softver bude na odgovarajućem nivou razvoja, tako da se pomoću njega generišući preseke lopatice, kroz njihova težišta provuče jedna osa koordinatnog sistema merenja. Proizvođači MM čiji osnovni metrološki softver nema rešen ovaj problem, ne može rešiti i problem inspekcije (merenja) ove klase delova.

Pored ovih softver proizvoda koji su ovde klasifikovani u navedene tri grupe, sve više proizvođača MM nude i nove softver proizvode koji se odnose na: statističku kontrolu kvaliteta, povezivanje sa CAD sistemima, rad u lokalnim računarskim mrežama (interfejsi), i slično.

### 3.2.2 Softver opšte namene

Polazeći od analogije NUMA-NUMM, kao što su: (i) putanja alata - putanja mernog senzora (na primer za tolerancije oblika), i (ii) geometrijska informacija za CAM i merenje, prišlo se razvoju softvera - procesora opšte namene.

NCMES je prvi jezik razvijen za potrebe programiranja NUMM [105]. Pri njegovom razvoju pošlo se od inženjerskih analogija između NUMA i NUMM. Ovo je imalo za posledicu da je razvijeni jezik NCMES bio zasnovan na elementima APT-a. Strukturu ovog jezika sačinjavaju: znaci, slova, reči, brojevi, simboli i oznake instrukcija. Iz ove strukture formira se kompleksni jezik za merenje i kontrolu radnih predmeta koji obuhvata: (i) opšte instrukcije, (ii) instrukcije za geometrijski opis delova (geometrija), (iii) instrukcije kojima se definiše kretanje mernog senzora (kinematika), (iv) merne (izvršne) instrukcije, (v) instrukcije za ocenu (razlika između geometrijskog opisa i izmerene vrednosti), i (vi) instrukcije za štampanje izlaznih rezultata. Ova struktura sa nekim primerima kao i zastupljenošću APT/EXAPT-a u ovom jeziku je prikazana na slici 3.2 [84].

<sup>10)</sup> Radi se o kompleksnim inženjerskim proizvodima koje nisu razvili svi proizvođači MM, iz više razloga: (i) složenost problema, (ii) povezivanje sa drugim računarima i drugim softverima za CAD/CAM, (iii) razvijenost osnovnog softvera za tolerancije dužine, uglova, oblika i položaja [92, 98].

TIP INSTRUKCIJA	PRIMER	Zastupljenost instrukcije iz NCMES u APT/EXPT-u [%]
OPŠTE INSTRUKCIJE	PARTNO / PRIMER 1 REMARK / TESTN	
INSTRUKCIJE ZA GEOMETRIJSKI OPIS	P <sub>i</sub> = POINT / 100, 50, 75 L <sub>i</sub> = LINE / 10, 10, 15, 20	
INSTRUKCIJE ZA KRETANJE MERNOG SENZORA	GOTO / P1 GOLTA / - 10, 0, 0	
MERNE INSTRUKCIJE	PM = MEASP / S, IND PZ C1=MEASEL/C1,CYL.8, ZMIN,D,ZMAX,100	
INSTRUKCIJE ZA OCENU	PS=CONEL/PNT, INTOF, PL1,L2 A= EVALUE/LENGHT T, 50+0,2-0,2,PSA	
INSTRUKCIJE ZA ŠTAMPU	EPRINT/TYPE, 1, KART, ANGDES, 5	

Sl. 3.2 Struktura jezika (softvera) NCMES

Pomoću opštih konstrukcija definiše se naziv mernog zadatka i tip merne mašine. Za geometrijski opis se koriste sledeći osnovni geometrijski elementi: tačka, prava, ravan, krug, sfera, cilindar i konus. Ostali geometrijski elementi dobijaju se kombinacijom prethodnih kao, na primer, ivica (prava), kao presek dve ravni [102].

Opis osnovnih geometrijskih elemenata u ovom jeziku je prikazan na slici 3.3.

GEOMETRIJSKI ELEMENTI JEZIKA NCMES	
TAČKA	<p>P1 = POINT / X, Y, Z</p>
PRAVA	<p>L1 = LINE / P1, P2</p>
KRUG	<p>C1 = CIRCLE / X, Y, r</p>
RAVAN	<p>E1 = PLANE / P1, P2, P3</p>
VEKTOR	<p>V1 = VECTOR / P1,P2</p>
CILINDAR	<p>Z1 = CYLNDR / P1, V1,r</p>
KONUS	<p>K1 = CONE / P1, V1, alpha</p>
SFERA	<p>S1 = SPHERE / P1, r</p>

Sl. 3.3 Opis geometrijskih elemenata koje koristi NCMES

Na primer, ravan (površina) se definiše sa najmanje tri tačke, a maksimalno sa pedeset tačaka. Opšti oblik instrukcije za definisanje površine je:

SNAME = TIP POVRŠINE / NAČIN DEFINISANJA

gde je:

SNAME - simbol površine koja se opisuje, ili

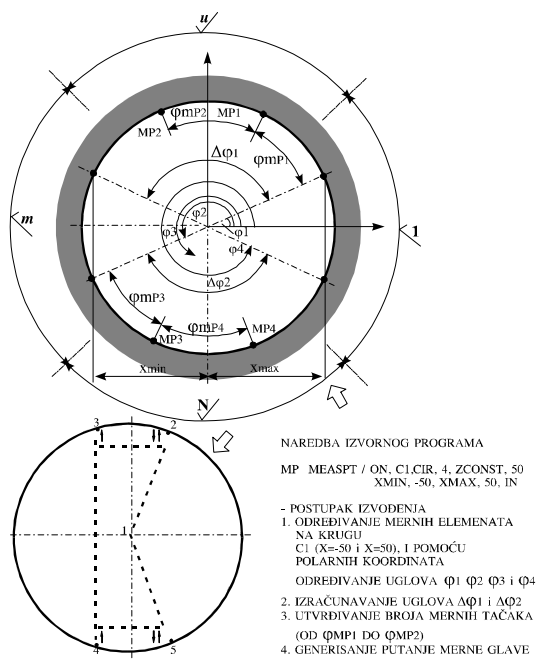
PL1 = PLANE / P1, P2, P3.

Za tačke P1, P2 i P3 kojima je definisana ravan, potrebno je definisati i koordinate (x, y, z) za svaku tačku.

Svaki geometrijski element može da se definiše na razne načine, što svakako usložnjava potrebne proračune u pojedinim slučajevima NCMES geometrijskog procesora. Prema tome, osnovnim geometrijskim elementima se pomoću crteža definiše "idealni" oblik radnog predmeta.

Kinematskim instrukcijama se definiše putanja mernog senzora, pri inspekciji ili merenju napred definisanog geometrijskog oblika.

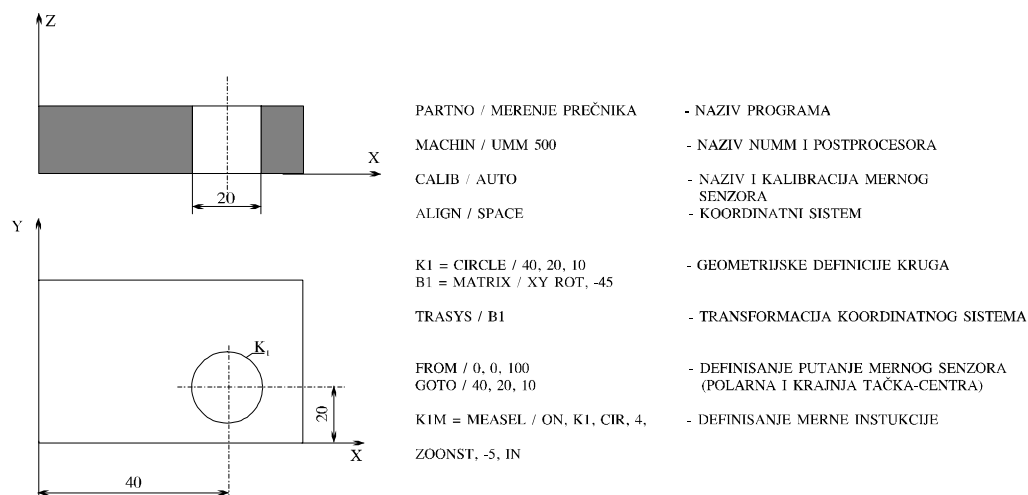
Sledeći segment NCMES procesora je softver za merne (izvršne) instrukcije. Primer merne instrukcije za krug i postupak njene realizacije na NUMM je dat na slici 3.4.



Sl. 3.4 Procedura automatskog određivanja prečnika otvora

Merenje se izvodi na geometrijskom obliku sa oznakom C1 (krug CIR) i to je otvor (ON). Merenje se izvodi u četiri tačke pri konstantnoj koordinati Z koja iznosi 50 mm. Merne tačke se određuju automatski i nalaze se van intervala (Xmin-Xmax), koji iznosi (-50mm, +50mm). Pomoću NCMES aritmetike određuje se u ovom slučaju stvarni prečnik otvora, pomoću jednačine kruga.

U narednom bloku NCMES procesora instrukcijama za ocenu vrši se upoređenje geometrijski zadatih veličina i stvarno izmerenih vrednosti za iste geometrijske oblike. U poslednjem bloku ovog procesora, instrukcijama za štampu vrši se štampanje stvarnih mernih vrednosti sa oznakom odstupanja ako ona postoje, što predstavlja merni protokol. Jedan segment NCMES programa za konkretni radni predmet je prikazan na slici 3.5.



Sl. 3.5 Primer NCMES programa

Može se konstatovati da je NCMES jezik višeg nivoa<sup>11)</sup>, problemski orijentisan za NUMM, za 2 i 3D merenja tolerancija dužina, uglova, oblika i položaja. Osnovni koraci u postupku dobijanja upravljačkih informacija na bušenoj traci, za upravljačku jedinicu MM, dati su na slici 3.6. Može se konstatovati da postoji potpuna analogija sa procesom programiranja NUMA, koje može biti: (i) ručno, ili (ii) mašinsko (automatizovano).

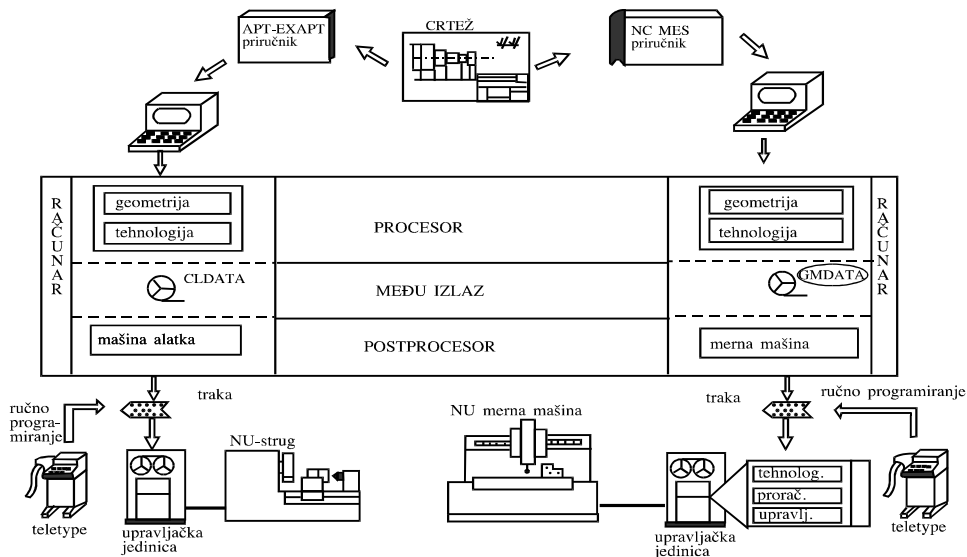
Na osnovu crteža dela i priručnika, vrši se popunjavanje programskog lista koji predstavlja ulazni nosač informacija za NCMES geometrijski i tehnološki procesor. Izlaz iz procesora je on- ili off-line datoteka GMDATA. Njenim propuštanjem kroz postprocesor za konkretnu MM, dobija se bušena traka. Kompajler za NCMES je sada razvijen u FORTRAN- u, i to za CDC i IBM računare. On identifikuje formalne i sintaksne greške, kao i koliziju između definisanih geometrijskih oblika i putanje mernog senzora. Detaljni segmenti tehnološkog procesora dati su na slici 3.7. i on obuhvata sve elemente softvera NCMES, osim geometrijskog.

Pre nego što se otpočne sa automatskim procesom merenja, potrebno je uspostaviti vezu između koordinatsnih sistema MM i radnog predmeta sa nekoliko probnih merenja. Posle ovoga, proces merenja se izvodi automatizovano u nekoliko

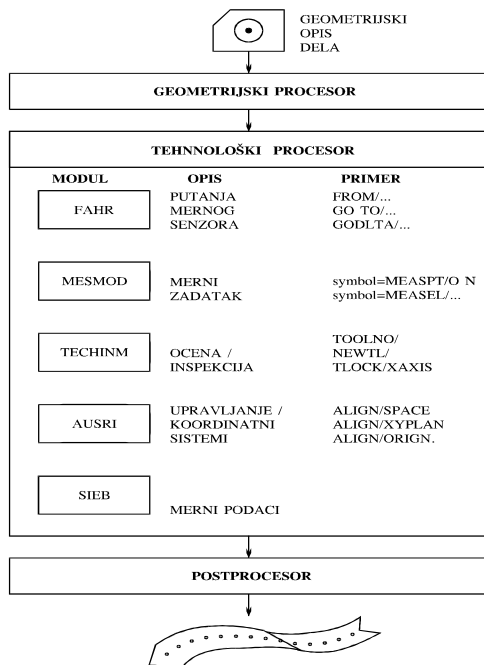
<sup>11)</sup> Ovde se misli u odnosu na softver orijentisane namene.



koraka: (i) učitavanje i dekodiranje instrukcija sa trake, (ii) izvođenje procesa merenja na bazi definisanih mernih zadataka, (iii) poređenje (ocenjivanje) izmerenih i zadatih (geometrijski definisanih) vrednosti, i (iv) štampanje izlaznih rezultata.

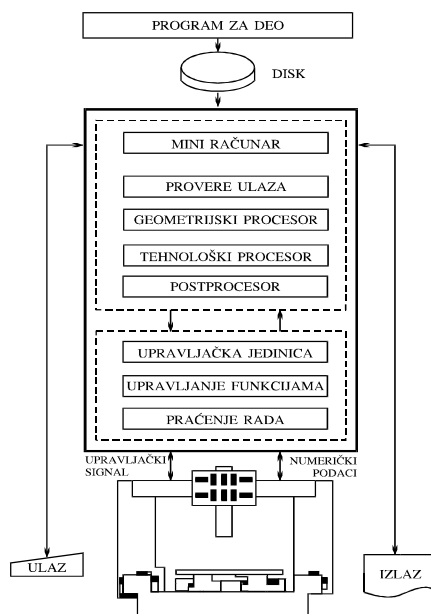


Sl. 3.6 Opšta šema procesa pripreme NUMA/NUMM



Sl. 3.7 Struktura NC-MES tehnološkog procesora

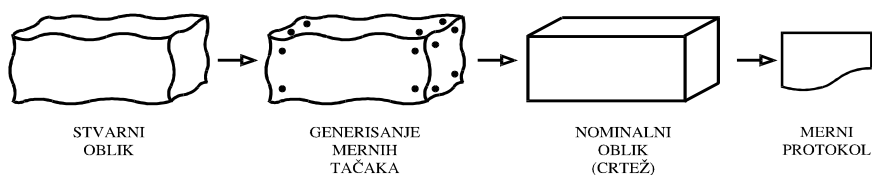
Drugi softver opšte namene, SCAI, ima strukturu, kako je to prikazano na slici 3.8 [83]. Mogu se identifikovati tri celine: (i) program za deo, (ii) geometrijski i tehnološki procesor, i (iii) post-procesor za upravljačku jedinicu konkretne MM. Iz ovoga se vidi da postoji potpuna analogija između NCMES i SCAI softvera.



Sl. 3.8 Struktura softverskog sistema SCAI-CNC

### 3.3 Osnovni principi rada MM

Metrološka identifikacija kompleksnih mernih predmeta na NUMM-a se zasniva na sledećoj paradigmi: stvarni oblik dela - generisanje mernih tačaka - nominalni oblik dela prema crtežu (merni protokol), slika 3.9. Detaljno objasnimo sadržaj ove paradigme.



Sl. 3.9 Osnovna paradigma NUMM-a

Stvarni oblik dela. Nakon obrade a prema definisanom tehnološkom postupku, merni predmet ima oblik "približan" crtežu. Njegov oblik, tehnološke i metrološke baze, način kotiranja crteža, predstavljaju parametre za izbor: položaja mernog predmeta na mernom stolu i koordinatnog sistema merenja. Osnovno pravilo izbora

koordinatnog početka: tehnološka baza ili metrološka baza ili početak kotiranja. Osnovno pravilo određivanja koordinatnog sistema merenja: referentne geometrijske elemente uravnimo u prostoru i ravni (tri nulte tačke).

Generisanje mernih tačaka. U radnom prostoru MM, a na bazi hardverske i softverske podrške, vrši se generisanje mernih tačaka (pojedinačno ili kontinualno). Izbor mernih tačaka zavisi od: (i) strategije merenja, (ii) pravila za izbor mernih tačaka, i (iii) osnovnih elemenata za izvođenje merenja na NUMM-a.

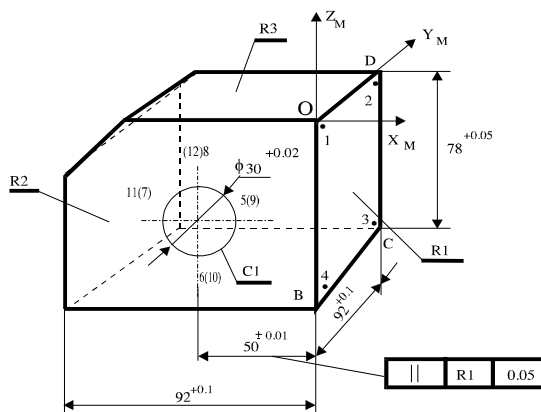
Strategija merenja predstavlja redosled izvođenja postupka inspekcija. On se izvodi prema: definisanom koordinatnom sistemu merenja, obliku kotiranja i kompleksnosti mernog predmeta.

Pravila za izbor mernih tačaka se odnose na: definisanje minimalnog broja tačaka (koji zavisi od vrste geometrijskog elementa) i mesta (položaja) generisanja ovih tačaka.

Osnovne elemente pomoću kojih se izvodi merenje na NUMM- a čine: (i) noseća struktura MM - posebno precizne vođice po kojima se kreću pokretni elementi noseće strukture, (ii) merni sistem i merni senzor - tačnost, osetljivost i ponovljivost, (iii) računari i softver, (iv) automatizacija opsluživanja MM kao i periferna automatizacija.

Nominalne vrednosti sa crteža (merni protokol). Idealni metrološki oblik dela definisan je crtežom. Poređenjem nominalnih vrednosti, definisanih crtežom i obrađenim<sup>12)</sup> mernim tačkama, utvrđuje se stvarna vrednost tolerancijskog polja. Na ovaj način MM vrši inspekciju (obeležava) procenat popunjenosti tolerancijskog polja ili determinisana vrednost, ako izmerena vrednost izlazi van tolerancijskog polja.

Radi pojašnjenja navedenih teorijskih postavki, daje se jedan primer. Na slici 3.10 je dat crtež dela na kome je potrebno, na NUMM-a izvršiti inspekciju - proveriti paralelnost ose cilindra (C1) i ravni R1.



Sl. 3.10 Demo merni predmet

<sup>12)</sup> Za određivanje karakterističnih parametara geometrijskih elemenata koriste se: metod najmanjih kvadrata ili polinoma višeg reda.

1. Položaj mernog predmeta na mernom stolu. Prema obliku mernog predmeta, kao i postavljenom metrološkom zadatku, deo treba postaviti u položaj kako je on prikazan i na crtežu.

2. Pravilo izbora koordinatnog početka. Geometrijski elementi koji se u datom metrološkom zadatku koriste su: cilindar (C1) i ravan (R1). Referentni geometrijski element je ravan (R1). Prema tome, koordinatni početak treba postaviti u tačke: O ili B ili C ili D. U odnosu na izabrani položaj mernog predmeta na mernom stolu, najpogodnije je za koordinatni početak uzeti tačku O.

3. Pravilo određivanja koordinatnog sistema merenja. Referentni geometrijski element, ravan R1-uravnavanje u porstoru, nulta tačka za osu x. Ravan R2-uravnavanje u ravni, nulta tačka za osu y, i ravan R3, nulta tačka za osu Z.

4. Strategija merenja. Već su navedeni geometrijski elementi koji se koriste za proveru paralelnosti. Znači, potrebno je prvo izmeriti referentni geometrijski element, ravan R1, pa zatim cilindar C1.

5. Pravilo za izbor mernih tačaka. Ovde treba voditi računa o dve stvari. Minimalni broj i položaj mernih tačaka. Za ravan R1, minimalni broj je četiri (1-40), koje treba generisati u blizini preseka ivica ravni. Radi pravilne geometrijske identifikacije ove ravni, preporučuje se generisanje još nekoliko mernih tačaka na osama (uzdužnoj i poprečnoj) ove ravni. Za cilindar, merne tačke se generišu u dva preseka, sa po tri tačke u svakom preseku, što ukupno iznosi šest. U ovom primeru je uzeto četiri po preseku, iz već napred navedenih razloga, pri čemu je prvi presek na  $Y_{M1}=1$  mm, a druga na  $Y_{M2}=91$  mm, pod pretpostavkom da je prečnik sfere mernog pipka 2 mm. Radi dobijanja što tačnijeg oblika cilindra koji se meri, ovi preseki treba da budu na što većem rastojanju.

Na osnovu ovako definisane procedure, prilazi se pisanju programa za MM, odnosno inspekciji navedenog metrološkog zadatka.

### 3.4 Podela i osnovne karakteristike MM

Dosadašnji tehnološki razvoj MM predstavlja osnovu za suptilnije analize po raznim osnovama. Polazni elementi za ovu analizu su: hardverska i softverska podrška. Prema hardverskoj podršci MM se mogu analizirati po sledećim kriterijumima: (i) noseća struktura (oblik, broj stepeni slobode, veličina radnog prostora), (ii) pogonski sistem (osetljivost, korak interpolacije, pogonska snaga, osa pogona), (iii) merni sistem (metod merenja, rezolucija, tačnost, način generisanja mernog signala), (iv) merni senzor (princip generisanja mernog signala, broj stepeni slobode, osetljivost, tačnost), (v) računarska podrška (tip i karakteristike upravljačke jedinice, karakteristike i mogućnosti računara, karakteristike periferije, povezivanje sa višim nivoima).

Druga celina MM, softverska podrška, može se analizirati prema sledećim karakteristikama: (i) softver za tolerancije dužina, uglova, oblika i položaja (merne

mogućnosti, princip generisanja koordinatnog sistema merenja, fleksibilnost izlaznih izveštaja), (ii) softver za merenje i inspekciju zupčanika (princip generisanja mernih tačaka, merne mogućnosti), (iii) softver za merenje i inspekciju krivih linija i površina (merne mogućnosti, princip generisanja nominalne konture, fleksibilnost izlaznih izveštaja), (iv) softver za statističke analize i sinteze (mogućnosti analize), (v) softver za komunikaciju i integraciju (principi i mogućnosti povezivanja).

Detaljnije analize ovih celina biće date u poglavljima broj 4 i 5.

### 3.4.1 Koficijent kompetentnosti<sup>13)</sup> MM

Pri izboru MM, za korisnika je posebno važno da se njene karakteristike kvantifikuje. Ovde se definiše koeficijent kompetentnosti ( $K_k$ ) kao [188]:

$$K_k = \frac{V \cdot T}{P \cdot A}$$

gde su:

V - indeks merne zapremine,

T - indeks automatizacije,

P - indeks cene koštanja i

A - indeks tačnosti MM.

Korisnik je, po pravilu, zainteresovan za: veću mernu zapreminu, veći nivo automatizacije, nižu cenu koštanja i veću tačnost.

Ovaj koeficijent predstavlja referentnu tačku za izbor ili soluciju rešenja za odgovarajući model MM.

#### 3.4.1.1. Analiza nekih karakteristika MM

Novi pristup analizi karakteristika MM se odnosi na tri parametra: fleksibilnost, tačnost i nivo automatizacije. Daje se njihova kratka analiza [2, 4, 40, 43, 100, 113, 125].

<sup>13)</sup> Proizvođači i korisnici MM primenjuju različite ili iste metodologije za izbor odgovarajuće MM. Ti modeli polaze od costing (troškovne) analize ili povezivanja: karakteristika MM - metrološki zadaci ili kombinovano. Ovaj parametar, predstavlja neimenovan broj, pri čemu se navedeni indeksi određuju na sledeći način. Na primer, indeks cene koštanja određuje se na sledeći način. Interval maksimalne ili minimalne cene koštanja se podeli na 10, pa se na osnovu prirasta odredi ovaj indeks. Uzmimo da za MM čija je cena 780.000 DM odredimo ovaj indeks. Minimalna cena MM kada se one prodaju kao merni modul je 400.000 DM a maksimalna, za istu kategoriju, je 1.400.000 DM. Inkrement prirasta je 100.000 DM, pa je indeks cene koštanja za ovu MM -3,8. Po istom principu se određuju i ostali indeksi. Procedura je:  $(X_{max}-X_{min})/10 \rightarrow X_{ik}$ ; poređenje  $X_{ik}$  i  $X_i \rightarrow X_k$  (odgovarajući indeks kompetentnosti). Ovde se posebno navodi da je u okviru istraživačkih programa Laboratorije za proizvodnu metrologiju i kvalitet, razvijena metodologija za izbor NUMM-a prema klasama mernih predmeta [153].

Fleksibilnost je inherentni parametar, koji se odnosi na: (i) merne delove. Različiti geometrijski oblici mernih delova kao i klase metroloških zadataka su u direktnoj korelaciji sa: nosećom strukturom i veličinom mernog prostora, (ii) merni senzor. Za ovaj element MM fleksibilnost se ogleda u: mogućem broju konfiguracija mernih pipaka, magacinu mernih senzora, mogućnošću korekcije greške usled dužine mernih pipaka, (iii) korisnički interfejs. Ovde se misli na softver i njegove karakteristike. On treba da bude orijentisan korisniku (user friendly), sa fleksibilnom arhitekturom i programabilan po različitim nivoima. Današnja dva pristupa razvoja i primene softvera za MM, mogu se programirati u dva moda: u interaktivnom radu, obučavanjem, na bazi definisanog menija koji je jednostavan za korišćenje i off-line postupkom programiranja, posebnim softverom koji ima maksimalnu fleksibilnost i dodatne mogućnosti. Posebne karakteristike fleksibilnosti ovog softvera odnose se i na grafičko programiranje dodatnim CAD sistemom<sup>14)</sup>, i (iv) sistem integracije. Ovde se misli na softver za CAD/CAM i njegovu fleksibilnost, kao i softver za MAP, za realizaciju CIM koncepta.

Tačnost je drugi, bitni parametar MM-a. On je relevantan za MM kao sistem, ali na njegovu vrednost utiču: (i) stabilnost noseće strukture. Izborom odgovarajućeg tipa, prema dimenzijama i obliku mernog predmeta, kao i materijala, postiže se odgovarajuća statička krutost i dinamička stabilnost noseće strukture. Posebni važni elementi strukture koji imaju dominantan uticaj na ovaj parametar su: čvorovi i veze strukture, klizni spojevi i linearnost sistema, (ii) ponovljivost. Ovo je posebno važan parametar za MM, a on se odnosi na: noseću strukturu, pogonski sistem, merni sistem i merni senzor. Partikularna ponovljivost ovih elemenata daje ukupnu ponovljivost MM.

Na MM se može javiti dvadeset i jedna geometrijska greška, koje se odnose na: po tri komponente greške translacije i rotacije po osi, kao i tri komponente greške normalnosti osa, slika 3.11. Detaljna analiza ovih grešaka izložena je u poglavlju 10.

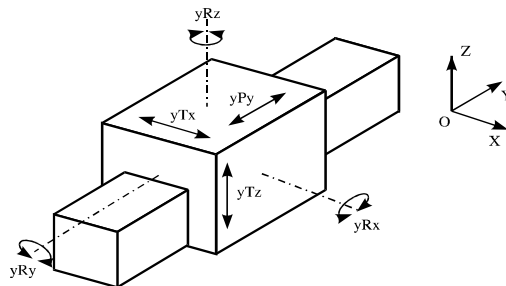
Nove generacije MM imaju ugrađenu softversku korekciju nekih od komponenti ovih grešaka, (iii) merni sistem. Stepene slobode MM kao i mernog senzora imaju ugrađene merne sisteme koji imaju svoju tačnost i osetljivost, (iv) uslovi okoline. Temperatura, vibracije, vlažnost su parametri koji utiču na tačnost MM, i kojima se upravlja u određenim granicama, da bi se postigla propisana tačnost i (v) merni predmet. Temperaturska stabilizacija i upravljanje temperaturom mernog predmeta je takođe uticajni parametar tačnosti MM.

Nivo automatizacije je treća karakteristika današnjih MM, ali ne u širem<sup>15)</sup>, već u užem smislu te reči. Polazeći od toga ovo se odnosi na: (i) pogonske sisteme, tj. osu (motor, tahometar, reduktor) pogonskog sistema i njegove dinamičke

<sup>14)</sup> Kao primer softvera visoke fleksibilnosti za off-line programiranje MM, pomoću CAD sistema, ovde se navodi softver DMIS, koji predstavlja i predlog američkog standarda za ovu oblast [19].

<sup>15)</sup> Ne misli se na nivoe uključivanja MM u šire tehnološke strukture, pri čemu imamo: fleksibilne metrološke ćelije i fleksibilne metrološke sisteme, koji se detaljno izlažu u poglavlju 7.

karakteristike, malo trenje i inerciju, kao i buku, (ii) karakteristike odziva mernog senzora, što zavisi od elektronsko-mehaničkih komponenti, i (iii) mogućnosti računara, kako računara upravljačke jedinice tako i eksterne računarske podrške MM.



a) PARAMETRI GREŠKE TRANSLACIJE (PRAVOSTI) OSA:

X-OSA	Y-OSA	Z-OSA
xTy	yTx	zTx
xTz	yTz	zTy

b) PARAMETRI GREŠKE ROTACIJE (UGLA) OSA:

UGAO VALJANJA	UGAO UVIJANJA	UGAO SAVIJANJA
xRx	xRy	xRz
yRy	yRx	yRz
zRz	zRx	zRy

c) PARAMETRI GREŠKE POZICIJE OSA:

xPx  
yPy  
zPz

d) PARAMETRI GREŠKE UPRAVNOSTI (NORMALNOSTI) OSA:

xNy  
yNz  
xNz

Sl. 3.11 Komponente geometrijskih grešaka MM

Navedene karakteristike predstavljaju nove prilaze dodatnih analiza novih generacija MM i njihove komparacije prema njima, ali se mogu uključiti i neki dodatni parametri: povezivanje MM u tehnološke strukture, nivoi automatizacije opsluživanja, princip programiranja, brzina rada (hardvera/softvera).

### 3.5 Osnovne karakteristike primene MM

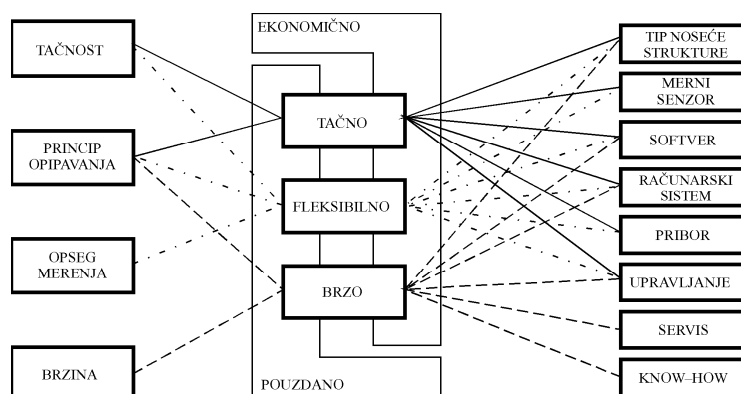
Pre nego što se izvrši analiza nekih karakteristika upotrebe MM, daju se karakteristične oblasti primene ovih metroloških sistema [62, 77, 128, 154, 155].

To su: (i) specijalna merenja - MM smanjuju potrebe za specijalnim mernim priborima, čime se eliminišu troškovi proizvodnje ovih pribora, održavanja, popravki i lagerovanja; troškovi projektovanja i izmene tehničko- tehnološke dokumentacije su takođe eliminisani; pomoću MM se smanjuje vreme pripreme i merenja u odnosu na specijalne merne pribore; greške mernog pribora i operatora se značajno smanjuju; (ii) ulazna inspekcija - MM se smanjuje potrebno vreme inspekcije, posebno kod 100% inspekcije, kada je potreban visok i ujednačen nivo tačnosti; veličina uzorka se može

povećati kao i pouzdanost inspekcije; pomoću MM se dobijaju različiti izlazni izveštaji, (iii) procesna inspekcija - delovi se mogu meriti brzo i tačno; frekvencija (delova i uzorka) se može povećati, a da to ne utiče na tačnost i pouzdanost merenja; vreme prelaska sa jedne na drugu inspekciju se značajno smanjuje; uticaji i greške čoveka su smanjeni, (iv) inspekcija prvog komada na NUMA - pomoću MM se vreme inspekcije smanjuje u odnosu na konvencionalne metode i za 95%; vreme čekanja NUMA na inspekciju prvog komada se takođe drastično smanjuje: rezultati merenja, posebno kompleksnih delova su tačniji i pouzdaniji, na osnovu čega se može izvršiti pravilna korekcija alata<sup>16)</sup>, što je pri inspekciji konvencionalnih metroloških sistema nemoguće, (v) inspekcija alata i pribora - prethodna komplikovana merenja su sada mnogo jednostavnija pomoću MM; smanjuje se vreme merenja a povećava tačnost rezultata inspekcije, (vi) inspekcija sklopova i komponenti od limova - MM se koriste za brzu i tačnu inspekciju, i u pogonu različitih sklopova i delova od limova, (vii) inspekcija "samo jednom"<sup>17)</sup> - nepotrebni su pomoćni kompleksni pribori za stezanje mernog predmeta: ne treba posebna obuka kontrolora; brza i tačna inspekcija prototipa i nulte serije, (viii) analiza trenda - inspekcija se može koristiti i za istraživanje uticaja promene režima rezanja na tačnost dimenzija i oblika; inspekcijom uzorka se može verifikovati završna kontrola serije; analizom izlaznih izveštaja možemo utvrditi odgovarajuće trendove, i (ix) obuka - MM ne zahtevaju dugotrajnu i skupu obuku; rad i iskustvo na NUMM-a omogućuje povećanje produktivnosti merenja i dobijanje tačnijih rezultata.

### 3.5.1 Uticajni parametri i efekti primene MM

Merne mašine treba da ekonomično i pouzdano, na osnovu visoke tačnosti, brzine i fleksibilnosti, metrološki identifikuju merni predmet, slika 3.12.



Sl. 3.12 Uticajni faktori primene MM

<sup>16)</sup> Tako, na primer, pomoću softvera KUM, koji podržava Opton-ove i Mauser-ove MM, može se pri inspekciji krivih linija i površina izvršiti razdvajanje grešaka obrade i položaja alata, čime se sa suprotnim predznakom vrši korekcija alata.

<sup>17)</sup> Engleski termin je - one time.



Ovde su sistematizovani faktori koji utiču na ekonomičnu i pouzdanu primenu MM. Tako se, na primer, brzina odnosi na: pokretne elemente noseće strukture (ovo je posebno važno kod inspekcije velikih mernih predmeta), softver (obrada generisanih mernih tačaka kod inspekcije 3D krivih površina), računarski sistem (komunikacija i odziv - rad u realnom vremenu), upravljanje (povratna sprega), servis (naknadno održavanje) i know-how (brzo osvajanje novih znanja).

Ako se izvrši analiza uticajnih faktora na vreme merenja na NUMM-a, dolazi se do sledećih glavnih parametara: (i) merna mašina, (ii) softver, (iii) računar i periferija, i (iv) rukovaoc, slika 3.13. Treba posebno naglasiti da se ova analiza odnosi na CNC MM.

<b>MERNA MAŠINA</b> - VRSTA UPRAVLJANJA (TAČKA PO TAČKA, VEKTOR) - BRZINA KRETANJA - BRZINA OPIPAVANJA
<b>SOFTVER</b> - OBRADA MERNIH REZULTATA (POSTUPAK PRORAČUNA) - ORGANIZACIJA - MODUS: UPRAVLJANJE (PODACI O MERENJU, POZICIONIRANJE PRE MERENJA, MERNI PROTOKOL)
<b>RAČUNAR I PERIFERIJA</b> - BRZINA OBRADE PODATAKA, VREME PRISTUPA - KAPACITET MEMORIJE - ŠTAMPAČ, PLOTER
<b>RUKOVAOC</b> - STRATEGIJA MERENJA - OPTIMIZACIJA PUTANJE

*Sl. 3.13 Uticajni faktori na vreme merenja*

Navedena analiza je posebno važna jer se odnosi na parametar produktivnosti MM, pri čemu navedena struktura ukazuje na uticajne veličine i produktivnost. Kao praktičnu ilustraciju ovog problema ovde se navode tri primera. Prvi primer, slika 3.14, se odnosi na analizu vremena merenja po delu kao i sumarne godišnje pokazatelje po seriji i ukupno za CNC MM i konvencionalnu metrologiju. Efekti vremenskih ušteda, smanjenje broja izvršilaca i troškova su višestruki.

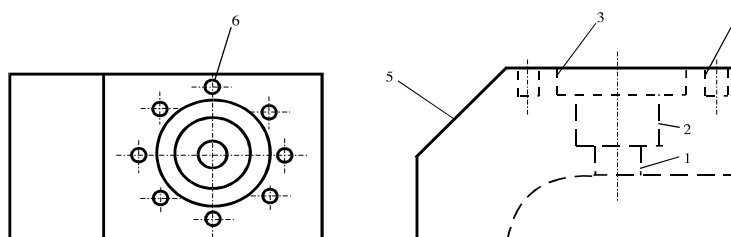
Komparativna analiza, koja je data u drugom primeru, slika 3.15, se odnosi na pet klasa metroloških sistema, između kojih su i napred analizovani tehnološki nivoi MM. Ova analiza se odnosi na: tolerancije dužine i položaja i pokazuje sledeće: (i) najveće uštede vremena se postižu kod kompleksnijih metroloških zadataka (pozicija, rastojanje između centara otvora, koncentričnost) i (ii) takođe se značajne uštede postižu i u pripremno-završnom vremenu.

Proizvođači MM su razvili i posebne modele costing analize<sup>18)</sup>, koji kompleksno sagledavaju efekte uvođenja i primene MM. Pri ovoj analizi posmatraju

<sup>18)</sup> Jedan takav model su razvili i proizvođači MM KOMEK, Opton i Mauser i oni svojim potencijalnim kupcima vrše tu analizu.

se i analiziraju dve grupe parametara: (i) parametri troškova (cena, amortizacije, krediti, prostor, izvršiooci, energija, itd.) i (ii) parametri produktivnosti (priprema vreme, priprema- završno vreme i vreme merenja). Na osnovu ovakve postavke pravi se tzv. grubi model analize a u drugom koraku se vrši tzv. fina analiza koja sada uključuje i tehničko-tehnološke parametre: noseće strukture, mernog senzora, softvera, hardvera, dodatne opreme, servisa i know-how.

Na ovaj način se u prvom koraku bira tip MM, a u drugom koraku konkretan model sa pratećom opremom.



METROLOŠKA OPERACIJA	PRIMENJENI METROLOŠKI SISTEM	KONVENCIONALNA METROLOGIJA	CNC MM
PREČNIK OTVORA 2		3 min/deo	0.5 min/deo
PREČNIK OTVORA 1		3 min/deo	0.5 min/deo
PREČNIK OTVORA 3		3 min/deo	0.5 min/deo
KONCENTRIČNOST 1 PREMA 2		30 min/deo	2 min/deo
KONCENTRIČNOST 3 PREMA 2		2 min/deo	2 min/deo
PREČNIK NAVOJA 6		12 min/deo	2 min/deo
LOKACIJA OTVORA NAVOJA PREMA 4		18 min/deo	UKLJUČUJE PRET. OPER.
UGAO IZMEĐU 5 I 3		15 min/deo	2 min/deo
DUŽINA OTVORA 2		2 min/deo	0.25 min/deo
DUŽINA OTVORA 3		2 min/deo	0.25 min/deo
UKUPNO:		90 min/deo	12 min/deo

SUMARNI POKAZATELJI - GODIŠNJE

	VELIČINA SERIJE	BR. SERIJA/GOD	BR. IZVR./GOD	\$/GOD
1. MANUELNO	50	150	7.2	149.760
2. CNC MM	50	150	0.9	18.096
3. UŠTEDA			6.3	131.644

Sl. 3.14 Detaljna analiza primene konvencionalne CNC

METROLOŠKI ZADATAK	KONVENCIONAL. METROLOGIJA	RUČNE MM	MM SA PROCESOROM	NC MM	CNC MM
TOLERANCIJE DUŽINA:					
PREČNIK	3	1.5	0.5	0.5	0.3
ŠIRINA	2	1.5	0.5	0.5	0.3
DUŽINA	6	0.5	0.3	0.3	0.15
VISINA	6	0.5	0.25	0.25	0.15
MEĐUSOBNO RASTOJANJE	6	0.5	0.25	0.25	0.15
PREČNIK NAVOJNOG OTVORA	12	0.6	2.0	2.0	1.5
RASTOJANJE CENTARA OTVORA	6	1.0	0.5	0.5	0.3
TOLERANCIJA POLOŽAJA:					
UGAO IZMEĐU RAVNI	15	8	5	5	0.8
UGAO IZMEĐU OSA RUPA	24	12	6	6	1.5
KRUŽNOST	-	-	2	2	1.2
NORMALNOST	15	10	6	6	1.5
RAVNOST	4	4	2	2	1
KONCENTRIČNOST	30	6	2	2	1
POZICIJA	15	3	0.5	0.5	0.3
OBLIK PROFILA (30 TAČAKA)	-	12	12	12	1.5
PRIPREMNO VREME	6.0	6.0	3.0	3.0	1.0

Sl. 3.15 Analiza potrebnog vremena merenja za različite metrološke sisteme