

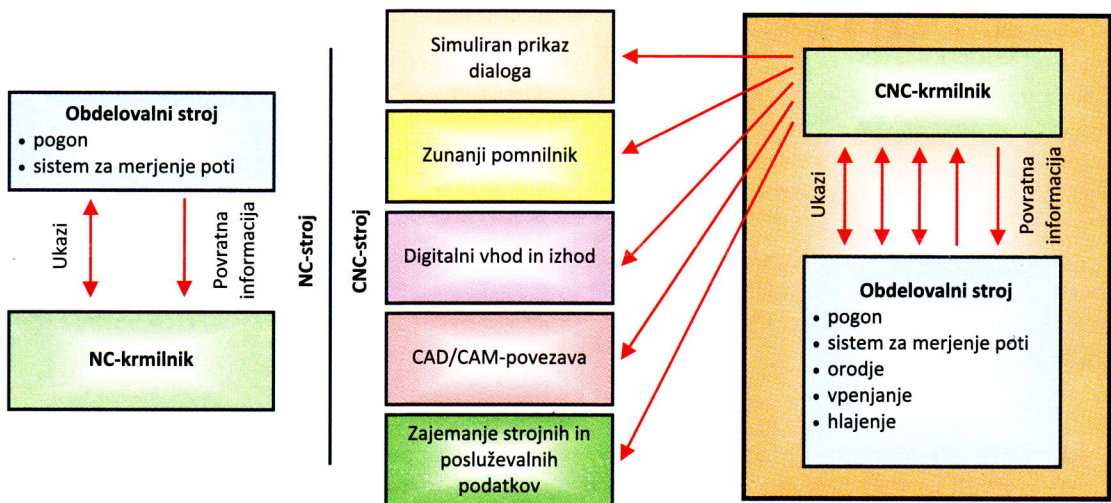
## 2 RAZVOJ NUMERIČNO KRMILJENIH STROJEV

Pomemben zgodovinski ukrep za zmanjševanje stroškov in povečanje proizvodnje je bilo uvajanje proizvodnje na tekočem traku v Ford Motor Company okrog leta 1914. Pri tem je bil proces proizvodnje razdeljen na manjše faze, vsak delavec je postal izvedenec in je izvajal samo nekaj delovnih gibov, avtomatiziran pa je bil pomik avtomobilov na enem tekočem traku. Tak način povečanja proizvodnje in zniževanja stroškov pa ni omogočal prilagodljivosti. Med 2. svetovno vojno in po njej je bila v ospredju industrijska proizvodnja na področju oboroževanja, hkrati pa se je zaradi vse večjega povpraševanja povečala tudi civilna proizvodnja, ki so jo načrtovali v velikih serijah.

Prvi NC-stroj (numerično krmiljenje, angl. Numerical Control) se je pojavil v začetku 50. let 20. stoletja v ZDA, in sicer za izdelavo delov za potrebe ameriške letalske vojne industrije. Razvili so ga znanstveniki Massachusetts Institute of Technology (MIT) v sodelovanju s strokovnjaki firme Parsons. Stroj je bil izdelan na osnovi klasičnega triosnega frezalnega stroja. Gibanje orodja so zagotavljali servomehanizmi, pri tem pa jih je nadzirala krmilna enota, ki je bila večja od samega stroja. Krmilna enota je sprotno odčitavala program z luknjanega traku, na podlagi odčitanih podatkov pa je upravljala gibanje orodja na stroju. Za program ni bilo nobenega pomnilnika in krmilje ni bilo sestavni del stroja. Z razvojem elektrotehnike, še posebej elektronike, so se krmilja in stroji zmanjševali, po drugi strani pa ponujali večje možnosti krmiljenja. Z uvajanjem visoko avtomatiziranih NC-strojev se krajša čas izdelave izdelkov in zmanjšujejo proizvodni stroški v maloserijski in sredneserijski proizvodnji ter tudi v posamični proizvodnji.

Velik razvojni preskok je bil narejen, ko so klasična NC-krmilja zamenjali s kompleksnejšimi CNC-krmilji (računalniško numerično krmiljenje, angl. Computer Numerical Control) z velikim naborom funkcij, ki vsebujejo tudi računalnik. CNC-krmilje v bistvu opravljata podobno nalogo kot NC-krmilje, vendar lahko vgrajeni računalnik prevzame vrsto posebnih nalog [13]:

- višje vrste interpolacije,
- programsko povezavo krmilja s strojem,
- korekcijo polmera rezalnega roba,
- tehnika dela s podprogrami ...



Slika 1: Primerjava NC-stroja nekoč in CNC-stroja danes

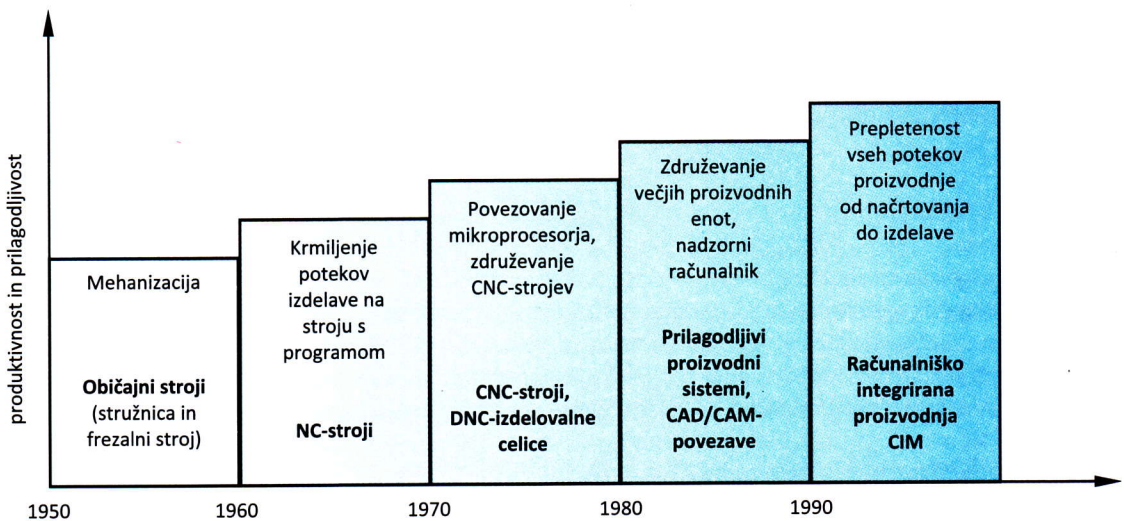
Osnovne prednosti obdelovalnih CNC-strojev pred klasičnimi:

- večja produktivnost in izkoriščenost stroja,
- kakovost in natančnost izdelave izdelka,
- prilagodljivost pri obdelavi,
- nespremenljiva kakovost obdelave,
- manjši stroški izmeta in nadzora,
- krajši obdelovalni časi,
- možnost nadgradnje v smislu večje avtomatizacije,
- izdelava zahtevnih, sestavljenih oblik,
- velika ponovljivost,
- možnost arhiviranja in ponovne uporabe NC-programov.

## 2.1 POGlavITNE STOPNJE RAZVOJA NC-STROJEV

Razvoj storilnosti in prilagodljivosti industrijske proizvodnje po 2. svetovni vojni bi lahko v grobem razdelili v pet stopenj, ki so prikazane na sliki 2.

V prvih dveh stopnjah je bil cilj sprememb povečanje storilnosti, kar se je doseglo s pomočjo vretenske in rezalne storilnosti, hkrati pa se je proizvodnja racionalizirala z avtomatsko menjavo obdelovancev in orodja. Tako se je znižal pomožni čas proizvodnega postopka (čas za pripravo in prekinitve), podaljšal pa se je čas načrtno uporabe. Kljub temu je bil pomožni čas še vedno relativno velik. V tretji in četrti fazi se je tudi pomožni čas izrazilo skrajšal s premikom časa priprave v načrtno uporabo, z menjavo programov brez prekinitve, z avtomatskim upravljanjem z orodji, s samodejnim dodajanjem obdelovancev in orodja. S takšnimi ukrepi se je čas mirovanja dragih strojev zmanjšal na najnižjo možno mero, kar je omogočilo tudi nočne izmene in ob koncu tedna proizvodnjo skoraj brez osebja. Računalniška prepletenost v proizvodnji se je začela v peti fazi s tako imenovano računalniško integrirano proizvodnjo (CIM, angl. Computer Integrated Manufacturing). Proizvodnja je skrajno hitra, temu ustrezen je tudi velik pretok blaga in podatkov oziroma informacij. Vse dosedanje ročne dejavnosti se poskuša doseči s pomočjo prenosa informacij.



Slika 2: Razvoj storilnosti in prilagodljivosti [7]

Ves ta razvoj je bil mogoč, ker so vzporedno obstajali proizvodi, ki so pozitivno vplivali na posamezne razvojne poti. Izdelovalni stroji so postajali boljši, bolj točni. Hkrati z razvojem izdelovalnih strojev je prišlo tudi do razvoja na področju računalniške tehnologije, kar je vplivalo na krmilno tehniko.

Takoj po 2. svetovni vojni in vse do 70. let je bila industrijska proizvodnja načrtovana v velikih serijah, danes pa se zahteva proizvodnja, ki lahko vedno hitreje izdeluje manjše količine ob visoki kakovosti. Proizvajalci se morajo hitro odzvati na spremembe na tržišču, poleg tega pa mora cena izdelka konkurirati proizvajalcem celega sveta. Razvojni cikel izdelka in njegova doba trajanja naj bi bila vedno krajša.

Današnji razvoj zahteva takšno proizvodnjo in stremi tudi k temu, da naj bi se izdelki izdelovali na enem stroju, obdelovalnem centru, ki obvladuje več izdelovalnih postopkov. Poleg povečanja storilnosti je v vedno večji meri pomembna tudi prilagodljivost takšnih obdelovalnih centrov.

### 2.1.1 AVTOMATIZACIJA PROIZVODNJE

Avtomatizacija izdelovalnega postopka vključuje naslednja področja [7]:

- avtomatizirano obdelavo,
- avtomatiziran pomik obdelovanca od stroja do stroja,
- avtomatiziran pretok informacij.

V prvi fazi razvoja avtomatizacije izdelave je bil avtomatiziran samo obdelovalni postopek oziroma je bila izvedena mehanizacija. V sredini 20. stoletja se je začel razvoj CNC-strojev za namenske proizvodne postopke, kot sta struženje in frezanje. Potek gibanja orodja glede na želeno geometrijo obdelovanca se krmili s pomočjo programa. Kasneje se CNC-delovanje preusmeri tudi na druge izdelovalne postopke (štancanje, rezanje z laserjem, plamensko rezanje). Pri klasičnem CNC-stroju gre za samostojen stroj, na katerem se ročno izvaja zamenjava orodja, obdelovanca in programa.

O obdelovalnem centru govorimo, kadar je zamenjava orodja, obdelovanca in programa popolnoma avtomatizirana. Takšni stroji omogočajo 4D- in 5D-krmiljenje ter 4- oziroma 5-stransko obdelavo. Orodja so nameščena v posebnem zbiralniku orodja in se na delovnem vretenu avtomatsko zamenjajo z ustreznim programskim ukazom. Z obdelovalnimi centri lahko večinoma izvajamo vsa odrezovalna dela na obdelovancu (struženje, frezanje, vrtanje ...).

O izdelovalni celici govorimo, kadar obdelovalni center razširimo, npr. s paletnimi zbiralniki, tako da ima stroj za obdelavo na razpolago dovolj delov za določeno časovno omejeno delovanje brez posluževanja osebja. Večinoma sta vključeni tudi kontrola mer obdelovanca ter avtomatska zamenjava orodja, ki se izvaja z nadzorom rezalne sile.

Prilagodljivi proizvodni sistemi (POS) omogočajo nenehno menjanje obdelovalnih postopkov, velikost serije izdelkov ter obdelavo različnih obdelovancev v poljubnem vrstnem redu. V osnovi so sestavljeni iz:

- več CNC-strojev z avtomatskimi menjalci orodja in zalogovniki orodja,
- avtomatskega dodajanja in odstranjevanja obdelovancev,
- avtomatskega pomika obdelovancev,
- nadrejenega nadzornega sistema.

### 2.1.2 KRMILJENJE NC-STROJEV

Podatke o gibanju orodja in režimih dela pri takem stroju predpišemo s programom, ki ga pripravimo izven stroja. Operater lahko program vnese, starta in prekine, ne more pa ga popravljati na samem stroju. Vse informacije stroj sproti odčitava z magnetnega traku ali luknjanega traku. Krmilnik takega NC-stroja prevaja vhodne podatke in ustrezno upravlja motorje za glavna in podajalna gibanja, istočasno pa sprejema povratne informacije s stroja o dejanski poziciji orodja oziroma obdelovanca in podatke, ki so pomembni za pravilno delovanje stroja. Podatke, ki jih potrebuje krmilnik, nam pri NC-stroju prevaja elektronsko vezje. Mere orodij in vpenjalnih priprav so upoštewane v predhodno napisanem programu izven stroja, zato mora operater stroj in orodje pripraviti po spremljajoči dokumentaciji.

Glavna naloga, ki jo ima krmilnik NC-stroja, je prevajanje vhodnih podatkov o gibanju in hitrostih ter na osnovi tega ustrezno upravljanje motorja glavnega in podajalnega gibanja. Rotacijsko gibanje se pretvarja v translatorsko gibanje s pomočjo krogličnih vreten in matic. Merilni sistem vseskozi sporoča podatke o dejanski poziciji sani primerjalniku, ta pa odšteva dobljene pozicije od želenih vrednosti, vse dokler ni razlika enaka nič. Ko je razlika enaka nič, izklopi motor in prečita naslednji ukaz. Točnost stroja je odvisna predvsem od hitrosti zaustavitve in zagona podajalnih motorjev, zato morajo imeti posamezni deli NC-stroja veliko stabilnost, majhne zračnosti med motorjem, vretenom in sanmi ter majhno maso le-teh. Takšnih strojev v proizvodnji več ne najdemo.

### 2.1.3 KRMILJENJE CNC-STROJEV

Z razvojem elektronike so NC-krmilja zamenjala CNC-krmilja, ki vsebujejo tudi računalnik, podatki o gibanju orodja in režim dela pa se shranjujejo v njegov spomin. Pri sodobnih CNC-strojih imamo v regulacijsko zanko vgrajene hitre mikroprocesorje, zato lahko dosegamo velike podajalne hitrosti in natančno pozicioniranje.

Podatke, ki jih potrebuje krmilnik, prevaja računalnik s pomočjo systemskega programa – pri NC-krmilju prevaja program elektronsko vezje. Hkrati ob prevajanju lahko računalnik odkriva napake, nas nanje tudi opozori in zahteva njihove popravke. Ker je program shranjen v spomin računalnika, ga lahko vedno znova zaganjamo, ne da bi ga ponovno vnašali. Poenostavljeno je tudi njegovo spreminjanje in popravljanje, ki ga operater lahko izvede na samem stroju. Mere orodij in vpenjalnih priprav se vnesejo v CNC-krmilnik med pripravo stroja, med obdelavo pa se potem avtomatsko upoštevajo. Operater lahko po potrebi orodje zamenja ali ga nadomesti z drugačnim. Podatke o zamenjanem vnese v krmilnik stroja, ne da bi bilo potrebno spreminjati program.

Sam procesor nam omogoča tudi testiranje in optimiranje programa, ne da bi zaganjali stroj. Razviti so tudi računalniški programi za programiranje CNC-strojov v grafični obliki, kjer izdelek narišemo z enim izmed programov za risanje ali modeliranje, nato pa to risbo uporabimo za programiranje obdelave na CNC-stroju. Izvršimo lahko tudi simulacijo izdelave izdelka (2D ali 3D), kjer so razvidni potovanje orodja, odzemanje materiala ter morebitne kolizije orodja.

Za današnje CNC-stroje je značilno naslednje:

- Izdelava izdelka poteka s pomočjo programa, ki je shranjen v pomnilniku. V tem programu so vsi potrebni podatki za obdelavo, kot so geometrija obdelovanca, hitrosti, podajanje, orodje in menjava orodja, vklop/izklop hladilne tekočine. Program se v stroj lahko vnese preko komandne plošče, osebnega računalnika, računalniškega omrežja (LAN, angl. Local Area Network) ali zunanjih pomnilnih nosilcev.
- Vse enote za gibanje imajo lasten pogon.
- Glavno vreteno je gnano z brezstopenjskim pogonskim motorjem, s čimer je zagotovljeno spreminjanje števila vrtljajev glede na geometrijo obdelovanca (konstantna rezalna hitrost).
- Vsaka os ima svoj regulacijski krog za položaj in število vrtljajev.
- Za pogon podajalnega gibanja se uporabljajo brezračna krogelna vretena in matice, s katerimi se izniči napaka pri spremembi smeri gibanja.
- S pomočjo sistema za avtomatsko menjavo orodja so možne menjave orodja s pomočjo ukazov znotraj programa. Tako lahko posamezen stroj deluje dalj časa brez posega upravljavca stroja.

#### 2.1.4 KRMILJENJE DNC-SISTEMOV

Kratice DNC izhaja iz angleških besed Direct Numerical Control – direktno numerično krmiljenje. Pri tem načinu lahko en računalnik upravlja več NC- ali CNC-strojov ter drugih naprav hkrati. Tak računalnik je običajno zmogljivejši in ima večji pomnilnik (notranji in zunanji) za shranjevanje podatkov in programov. Posamezni NC-stroj pa je opremljen z okrnjenim krmilnikom, ki nima več vseh funkcij. Ker so bili zgodnji krmilniki brez svojega pomnilnika za program, se mora program od DNC-računalnika do NC-stroja prenašati po stavkih. Tak koncept je ob hitrem padanju cen in ob istočasni rasti zmoglosti računalniške opreme zastarel. Danes z DNC razumemo Distributed Numerical Control (razporejeno numerično krmiljenje), kar pomeni, da so stroji z računalnikom povezani preko kabla ali brezžično (LAN), izmenjava podatkov pa poteka neprekinjeno (on-line).

Bistvene funkcije, ki jih mora zagotoviti DNC-sistem, so [2]:

- upravljanje, shranjevanje in distribucija programov, podatkov o orodju, korekturnih vrednostih,
- nadzor izdelovalnega postopka, sposobnost prepoznavanja nepravilnosti,
- zagotavljanje neprekinjene obdelave,
- optimiranje obdelave zaradi povratnega prenosa korigiranih programov in podatkov preko centralnega upravljanja,
- krmiljenje materialnih tokov,
- zajemanje strojnih podatkov posameznega stroja (čas vzdrževanja, življenjska doba, natančnost obdelave),
- zajemanje posluževalnih podatkov proizvodnega procesa.

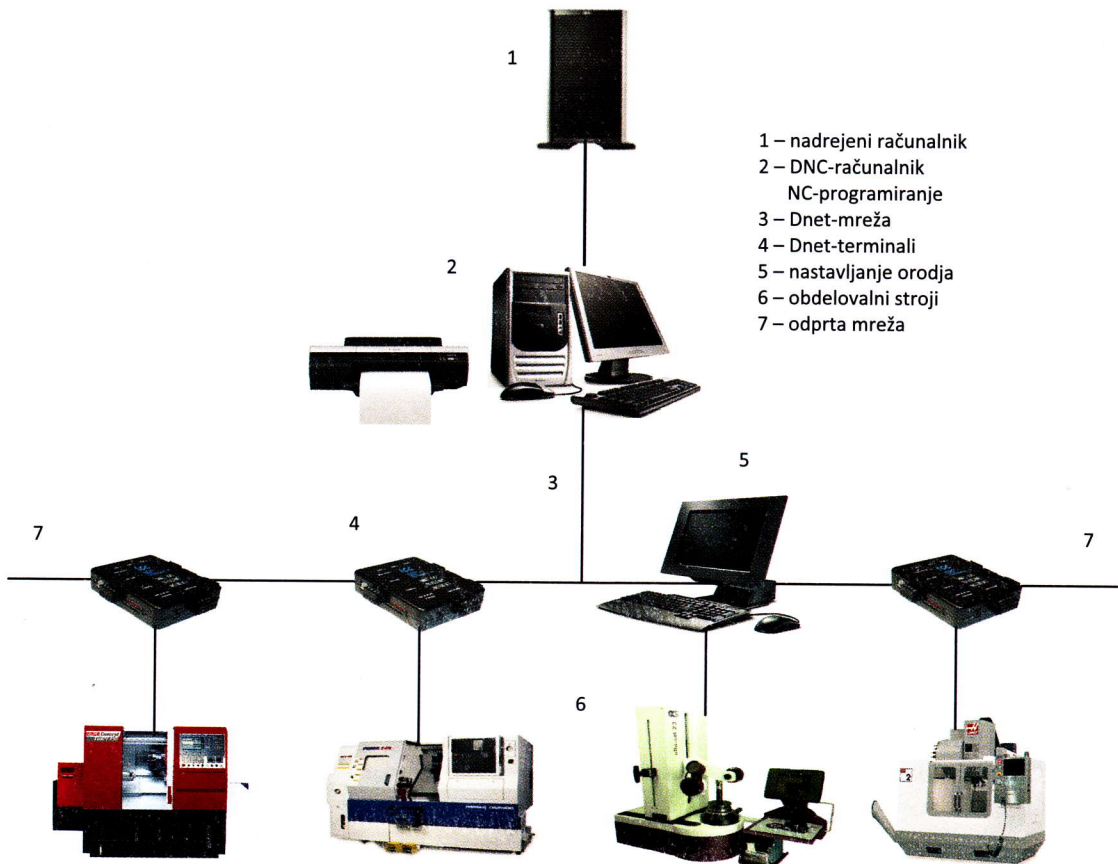
Priprava dela pri DNC-sistemih poteka v programskih oddelkih, ki so običajno odmaknjeni od delavnic. Programi se lahko pripravljajo vnaprej, proizvodnja se tako lahko bolj optimira.

DNC uporabljamo [3]:

- v proizvodnji, kjer imamo večje število NC-programov, ki se dnevno menjavajo,
- kjer imamo instalirano večje število CNC-strojov (4 do 6),
- v prilagodljivih obdelovalnih celicah (POC), kjer velikost NC-programov presega kapaciteto delovnega pomnilnika v CNC-krmilju,
- v prilagodljivih obdelovalnih sistemih (POS), ki imajo integriran transport, manipulacijo z izdelki in orodji, merjenje in nadzor orodja.

Prednosti DNC-upravljanja so naslednje:

- stalen nadzor več strojev hkrati,
- hitrejša dostopnost do centralne knjižnice podatkov,
- enostavno popravljanje in optimiranje programov ter optimiranje proizvodnje,
- velika prilagodljivost proizvodnje, ki ob uporabi robotov lahko deluje kot samostojna proizvodna linija,
- zanesljiv prenos podatkov na večje razdalje,
- prihranek časa,
- stalen nadzor stanja, obremenitve, zasedenosti strojev,
- zbiranje obratovalnih podatkov.



Slika 3: Primer DNC-sistema

#### 2.1.5 PRILAGODLJIVI PROIZVODNI SISTEMI (POS)

Prilagodljive proizvodne celice/sistemi (angl. Flexible Manufacturing Cells/Sistems – FMC/S) so organizirana množica podsistemov, načrtovanih in izvedenih tako, da delujejo kot celota (enota). Ta enota je skupek različnih podsistemov, modulov in komponent, kot so [3]:

- računalniško krmiljeni obdelovalni stroji,
- avtomatizirani manipulacijski sistemi (industrijski roboti),
- avtomatizirani manipulacijski sistem za surovce, obdelovance, rezalna orodja, vpenjalne priprave, pomožne naprave ...,
- integrirane koordinatne merilne naprave,
- pomožni stroji in naprave,
- nadzorno-upravljalni sistemi.

Vsi ti podsistemi in komponente so med seboj povezani z namenom, da izdelajo izdelke ob primernem času in s primerno učinkovitostjo.

Z združevanjem in nadgradnjami CNC-strojev lahko vplivamo na višjo stopnjo avtomatizacije proizvodnje. Pri tem ločimo tri nivoje avtomatizacije [13]:

- fleksibilne ali prilagodljive proizvodne celice,
- fleksibilni ali prilagodljivi sistemi,
- popolnoma računalniško avtomatizirane tovarne.

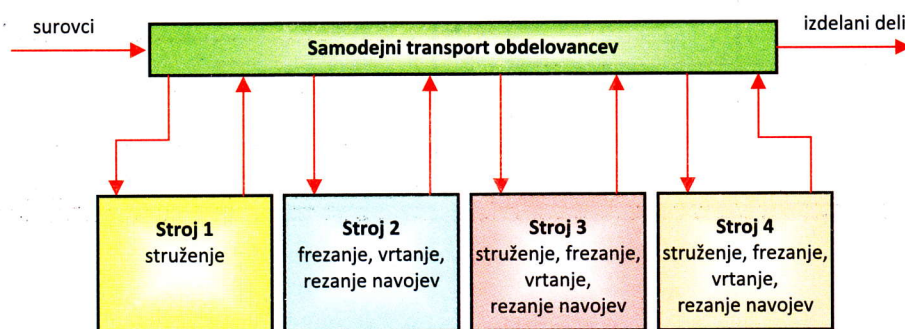
V vseh primerih imamo zaporedno, vzporedno ali kombinirano postavljenih več CNC-strojev, lahko tudi različnih. Medsebojno so povezani s transporterji, roboti in manipulatorji, ki služijo za stregovanje strojev, vse pa nadzira in upravlja centralni računalnik, ki hkrati tudi omogoča, da se sistem reorganizira za proizvodnjo različnih izdelkov. Obdelovanci so pritrjeni na paletna mesta in potujejo od enega obdelovalnega mesta do drugega. Če je potrebno na določenem stroju opraviti katero izmed operacij, ga robot pozicionira, sicer obdelovanec potuje naprej. Tudi menjava orodij poteka avtomatično. Vse skupaj preko DNC-povezav upravlja in optimira osrednji računalnik, ki nadzira tako stregovanje kot obdelovalne stroje. Takšne celice in sisteme najpogosteje srečamo v avtomobilski industriji.

Prednosti, ki jih dosežemo s takšno skupinsko tehnologijo, kakršno predstavljajo prilagodljive celice, so [3]:

- bistveno krajši čas priprave dela,
- krajši čas menjave obdelovancev in drugega posrednega dela,
- lažje določljivi izdelovalni čas,
- boljše kontrola kakovosti in prioritet pri obdelavi delov,
- večji izkoristek virov in sredstev,
- boljše opazovanje dela celice in proizvodnje izdelkov.

Z dograjevanjem in širjenjem prilagodljivih celic dobimo prilagodljive sisteme, kjer gre za avtomatizacijo v večjem obsegu. Taki sistemi pokrivajo celotno področje tehnologije, logistike za orodja in obdelovance ter skladiščenje orodij, surovcev in izdelkov.

Prilagodljivi obdelovalni sistemi prispevajo predvsem k učinkoviti izrabi opreme, povečani produktivnosti in kakovosti izdelkov, zmanjšanju potrebnega dela, stroškov in prostorskih kapacitet. Vendar pa postavitve takšnih sistemov pogojujejo visoki investicijski stroški, potrebno je natančno načrtovanje proizvodnje, večja strokovna usposobljenost osebja ...



Slika 4: Načelo izdelovanja v prilagodljivem proizvodnem sistemu

Prilagodljivi proizvodni sistemi omogočajo nenehno menjavanje obdelovalnih postopkov in spremembo velikosti proizvodnje. V njih lahko obdelujemo različne obdelovance v poljubnem vrstnem redu. Načelo izdelovanja pogosto izvira iz tega, da se združi več strojev, ki se medsebojno dopolnjujejo in nadomeščajo. Tako lahko celotni sistem ostane produktiven tudi pri izpadu nekega stroja.

Prilagodljivost obdelovalnih sistemov je odvisna od različnih dejavnikov, ki pa so v največji meri odvisni od problema, ki ga želimo rešiti. Prilagodljivost obdelovalnih sistemov je v splošnem mogoče definirati kot [3]:

- prilagodljivost opreme,
- tehnološka prilagodljivost,
- strukturna prilagodljivost,
- proizvodna prilagodljivost,
- prilagodljivost uvajanju novih izdelkov,
- prilagodljivost obsega proizvodnje,
- prilagodljivost različnosti izdelkov.

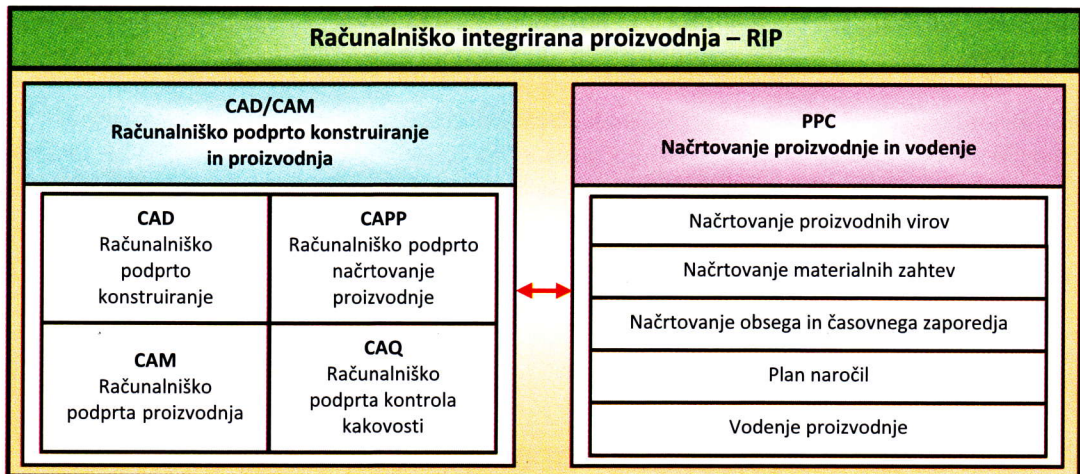
Navedene kriterije je v praksi težko doseči, zato se pri proizvajalcih in uporabnikih prilagodljivih obdelovalnih sistemov prilagodljivost definira predvsem kot:

- strukturna prilagodljivost (svoboda izbire poteka obdelave, modularna gradnja, tehnološka prilagodljivost, prilagodljivost opreme sistema),
- organizacijska prilagodljivost (določa strukturo prilagodljivega obdelovalnega sistema).

Vendar pa moramo pri projektiranju organizacijske prilagodljivosti upoštevati tudi nasprotno učinke, saj lahko npr. zmanjšanje števila delovnih postaj vpliva na podaljšanje ciklusa proizvodnje. Če pa želimo skrajšati proizvodni cikel, lahko pride do neracionalnega izkoristka opreme. Zatorej nam zahteve po prilagodljivosti v največji meri določa tržišče, ki vpliva na prilagodljivost izdelkov, rokov, količin in cen. Proizvajati moramo pravo količino izdelkov, v pravem času za trenutne zahteve potrošnikov.

#### 2.1.6 RAČUNALNIŠKO INTEGRIRANA PROIZVODNJA

Računalniško integrirana proizvodnja – RIP (angl. Computer Integrated Manufacturing – CIM) je sistem, v katerem so posamezni podsistemi v podjetju, od snovanja, konstruiranja, analiziranja, planiranja, nabave, spremljanja stroškov, spremljanja in upravljanja izkoriščanja proizvodne opreme ter dobave kupcem, računalniško povezani s podsistemi v proizvodnem obratu. Ti posamezni podsistemi so namenjeni upravljanju z materialnimi tokovi ter za direkten nadzor in upravljanje proizvodnje [6]. Na naslednji sliki je prikazana večravenska struktura proizvodnega sistema v računalniško integrirani proizvodnji.



Slika 5: Struktura računalniško integrirane proizvodnje [6]

Na najvišji ravni se oblikujeta proizvodna in tržna politika, odloča se o strategiji razvoja in investicijah, pri tem pa je potreben ustrezen informacijski sistem z bazo podatkov in znanj.

Na drugi ravni, imenujemo jo vodstvena ali menedžmentska raven, se načrtuje in krmili celotna proizvodnja, naročila, izračunavajo se stroški, določajo cene izdelkov, načrtuje in krmili se podsistem kontrole kakovosti. Potrebni so tudi drugi podsistemi, kot so podsistemi za raziskavo in razvoj, nabavo delovnih, transportnih in drugih sredstev, nabavo materiala in komponent, nabavo energije ter podsistem za marketing.

Tretja raven, ki jo imenujemo proizvodna raven, vsebuje vse podsisteme za realizacijo proizvodnega procesa, kot so podsistem za konstruiranje, modeliranje in izračun (CAD/CAE), podsistem za tehnološko planiranje, razporejanje kapacitet in upravljanje proizvodnje (CAM).

Z uvedbo RIP-tehnologije dosežemo [2]:

- krajši čas od razvoja do izdelave končnega izdelka,
- natančnejše kalkulacije za posamezen izdelek ter celotno proizvodnjo,
- realnejše termine, večjo prilagodljivost pri planiranju in proizvodnji,
- cenejšo proizvodnjo,
- natančnejše izračunavanje stroškov v krajšem času.