

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

Esztergálási műveletek kiterjesztett számítógépes szimulációja intelligens módszerek alkalmazásával

PhD értekezés

KÉSZÍTETTE:

Hornyák Olivér

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

DR. Tóth Tibor

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA

TUDOMÁNYOS VEZETŐ:

DR. Erdélyi Ferenc

A MŰSZAKI TUDOMÁNY KANDIDÁTUSA

MISKOLC, 2002

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék.....	2
Jelölések jegyzéke.....	5
Rövidítések listája.....	7
1 Bevezetés, tudományos célkitűzés.....	9
2 Tudományos előzmények.....	11
2.1 A számjegyes vezérlés.....	11
2.1.1 A számjegyes vezérlés fejlődése.....	11
2.1.2 A számjegyvezérlésű gépek programozása.....	12
2.1.3 Klasszikus CNC szimulációs feladatok.....	13
2.1.4 A modern NC szimulátorok által nyújtott szolgáltatások.....	15
2.2 Az esztergálási folyamat.....	18
2.2.1 A forgácsolás-elmélet fejlődése.....	18
2.2.2 Analitikus módszerek.....	22
2.2.3 Tapasztalati módszerek.....	23
2.2.4 Numerikus és mechanisztikus módszerek.....	24
2.2.5 Mesterséges intelligencia alapú módszerek.....	25
2.2.6 Hazai kutatási eredmények.....	25
2.2.7 A diszkrét eseményvezérelt szimulátorok.....	27
2.3 A gyártásirányítás feladatai.....	27
2.3.1 A gyártásirányítás fejlődése.....	28
2.3.2 A gyártásirányítás céljai.....	30
2.3.3 A bizonytalanságok kezelése.....	31
3 A kiterjesztett szimuláció koncepciója.....	33
3.1 A robusztus technológia fogalma.....	33
3.1.1 Alternatív NC program generálása.....	35
3.2 Az integrált gyártásirányítás.....	35
3.3 A kiterjesztett szimuláció lehetőségei.....	36
3.4 A kiterjesztett szimuláció integrálása CIM környezetben.....	37
4 Az esztergálás szimulációra alkalmas modellje.....	39
4.1 Az esztergálási művelet felbontása műveletelemekre.....	39

4.2	A forgácsolási műveletelem	41
4.2.1	Geometriai viszonyok	41
4.2.2	Kinematikai viszonyok	43
4.2.3	Dinamikai viszonyok	43
4.2.4	Technológiai viszonyok	44
4.3	Az esztergálási művelet műszaki-gazdasági modellje	47
4.3.1	A folyamat minősítési lehetőségei	47
4.3.2	Az intenzitás jelentősége	48
4.3.3	Az intenzitás kiterjesztett értelmezése esztergálásnál	48
4.3.4	Optimális forgácsolás	49
4.3.5	Robusztus esztergálási művelet	50
4.4	A folyamatjellemzők modellezése	50
4.5	Az analitikus és empirikus modellezés hátrányai	54
4.6	Modellezés neurális hálókkal	55
4.6.1	A mesterséges neurális hálók fejlődése	55
4.6.2	A neurális hálók tanítása – a backpropagation algoritmus	56
4.6.3	A neurális hálók korlátai	61
4.6.4	Folyamatmodellezés neurális hálókkal	62
5	Új, kiterjesztett NC szimulátor	64
5.1	A felhasznált szoftvertechnológia	64
5.1.1	Szoftver minőség	64
5.1.2	Az objektum orientált programozás	66
5.1.3	A fejlesztői nyelv és környezet	68
5.2	A szimulátor strukturális felépítése	69
5.2.1	Funkcionális modell	69
5.2.2	Architekturális modell	71
5.2.3	Interfészek, I/O környezet	74
5.3	A szimulátor szolgáltatásai	75
5.3.1	Üzem módok	75
5.3.2	Kezelői felület	75
5.3.3	I/O és belső adatbázis	77
5.3.4	Kimeneti reportok	78
5.4	Illusztratív példa	80
5.5	Megjegyzések a szimulátor futtatható változatához	83
6	A kiterjesztett szimuláció a gyártásban	85
6.1	A direkt feladatok támogatása	86
6.2	Az indirekt feladatok támogatása	87
7	Az értekezés tézisei	88
7.1	A kiterjesztett szimuláció koncepciója	88
7.2	A technológiai folyamatmodellezés és a geometriai modellezés összekapcsolása AI modellekkel	88
7.3	Az intenzitás alapú folyamattervezés szimulációs támogatása	89
7.4	A kiterjesztett szimulátor létrehozása	90
8	Hasznosíthatóság, továbbfejlesztési lehetőségek	91

9	Hivatkozott irodalom.....	93
10	Saját irodalom	99
11	Köszönetnyilvánítás	101
	Melléklet.....	102
	A SINUMERIC 810 T utasításrendszere	102
	Minta adatbázis a forgácsoló erő becsléséhez	104

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

- A – neurális háló átmeneti függvénye
 A_c – forgácskeresztmetszet
 A_Q – forgácsolási hatáskeresztmetszet
 C_v, x_v, y_v, q, m – Taylor konstansok
 c_w – egy perc munka fajlagos költsége
 C_T – az egy cserére jutó szerszámköltség,
 C_Σ, C_m, C_t – a műveletelemre jutó összköltség, anyagleválasztás költsége,
szerszámköltség
 d – fogásmélység
 D_Q – esztergálási középátmérő
 E – felhasznált energia; neurális háló hibafüggvény
 f – előtoló sebesség
 F_c – főforgácsoló erő
 F_x, F_y, F_z – forgácsoló erő komponensek
 k, K_i – fajlagos forgácsoló erő, erőállandók
 L_T – forgácsoló lapkára jutó terhelés
 M – forgácsoló nyomaték
 o_i – neuron kimenő paramétere
 P – forgácsolási teljesítmény
 p_s – selejtarány
 Q – technológiai intenzitás
 r_ε – szerszám csúc sugar
 R_a, R_z – felületi érdességi mérőszámok
 t_i – neurális háló tanító készletében az elvárt érték

t_m, t_c, t_r, t_i – megmunkálási idő; forgácsolási idő; gyorsmeneti mozgások ideje; egyéb, nem forgácsolással töltött idő

t_{ch} – szerszámcsere ideje

T – szerszám éltartama

x_i – neuron bemenő paramétere

w_i – neurális háló súlyok

v – forgácsolási sebesség

V – leválasztott anyagtérfogat

v_{Δ} – kopássebesség

Δ – szerszámkopás

κ – szerszámél-elhelyezési szög

η – neurális háló tanítási együtthatója; műveletek intenzitás hatásfoka

δ_a, δ_m – alakhűség, méretpontosság jellemzője

τ – költségekvivalens idő

RÖVIDÍTÉSEK LISTÁJA

- ADALINE – Adaptive linear element – neurális processzáló elem
- AI – Artificial Intelligence – mesterséges intelligencia
- ANN – Artificial Neural Network – mesterséges neurális háló
- API – Application Programming Interface – programozói interfész
- APT – Automatically Programmed Tool – NC programozási nyelv
- BP – Backpropagation – a mesterséges neurális hálók tanításának egyik módszere
- CAD – Computer Aided Design – számítógéppel segített konstrukciós tervezés
- CAE – Computer Aided Engineering – mérnöki feladatok számítógépes támogatása
- CAM – Computer Aided Manufacturing – számítógéppel segített gyártás
- CAPC – Computer Aided Process Control – számítógéppel segített üzemirányítás
- CAPE – Computer Aided Production Engineering – termelési feladatok számítógépes támogatása
- CAPP – Computer Aided Process Planning – számítógéppel segített folyamattervezés
- CAQA – Computer Aided Quality Assurance – számítógéppel segített minőségbiztosítás
- CAST – Computer Aided Storage and Transportation – számítógéppel segített tárolás és szállítás
- CC – Cell Controller – cellavezérlő
- CIM – Computer Integrated Manufacturing – számítógéppel integrált gyártás
- CLDATA – Cutter Location Data – az NC programok szabványos köztes formátuma (ISO 4343)
- CNC – Computer Numerical Control – számítógépes számjegyvezérlés
- DES – Discrete Event Simulation – diszkrét eseményvezérelt szimuláció
- DNC – Distributed Numerical Control, Direct Numerical Control – elosztott számjegyvezérlés; közvetlen számjegyvezérlés

ERP – Enterprise Resources Planning – vállalati erőforrások tervezése
 FEM – Finite Element Methods – végeelem módszerek
 FMC – Flexible Manufacturing Cell – rugalmas gyártócella
 FMS – Flexible Manufacturing System – rugalmas gyártórendszer
 GUI – Graphical User Interface – grafikus felhasználói interfész
 I/O – Input / Output – bemenő / kimenő
 IMS – Intelligent Manufacturing System – intelligens gyártórendszer
 JIT – Just-in-time– éppen időben gyártás
 MAP – Manufacturing Automation Protocol – szabványos üzemi hálózati protokoll
 MDE/BDE – Maschinen- und Betriebsdatenerfassung – üzemi mérés-adatgyűjtés
 MIS – Management Information System – vezetői információs rendszer
 MMS – Manufacturing Messages Specification – szabványos üzenetküldési specifikáció (ISO 9506)
 MLP – Multilayer Perceptron – a mesterséges neurális háló egyik fajtája, többrétegű háló
 MRR – Material Removal Rate – anyagleválasztási sebesség, technológiai intenzitás
 NC – Numerical Control – számjegyvezérlés
 NCL – NC Language – NC programozási nyelv
 NCP – NC Programming– NC programozás
 NN – Neural Network – neurális háló
 PAC – Production Activity Control – gyártási aktivitás kontrol
 PLC – Programmable Logic Controller – programozható logikai vezérlő
 PPS – Production Planning and Scheduling – termeléstervezés és ütemezés
 SFC – Shopfloor Control – műhelyszintű vezérlő, gyártásirányító
 SQL – Standard Query Language – szabványos lekérdező nyelv
 UML – Unified Modeling Language – egységesített modellezési nyelv
 URL – Uniform Resource Locator – az Interneten elérhető erőforrás címe
 VM – Virtual Manufacturing – virtuális gyártás
 WIP– Work In Progress– folyamatban lévő munka
 WOP– Workshop Oriented Programming – gépmelletti programozás

1 BEVEZETÉS, TUDOMÁNYOS CÉLKITŰZÉS

A gépgyártásban a fém alkatrészek közel 80 százaléka ma is forgácsolással készül. Ennek legfontosabb oka, hogy a forgácsoló szerszám egyszerű, az alakképzés folyamata a szerszámgépen, modell alapján, mozgásleképzéssel vezérelhető. A forgácsolással elérhető geometriai pontossággal és alakhűséggel más technológiák gyakran nem versenyképesek.

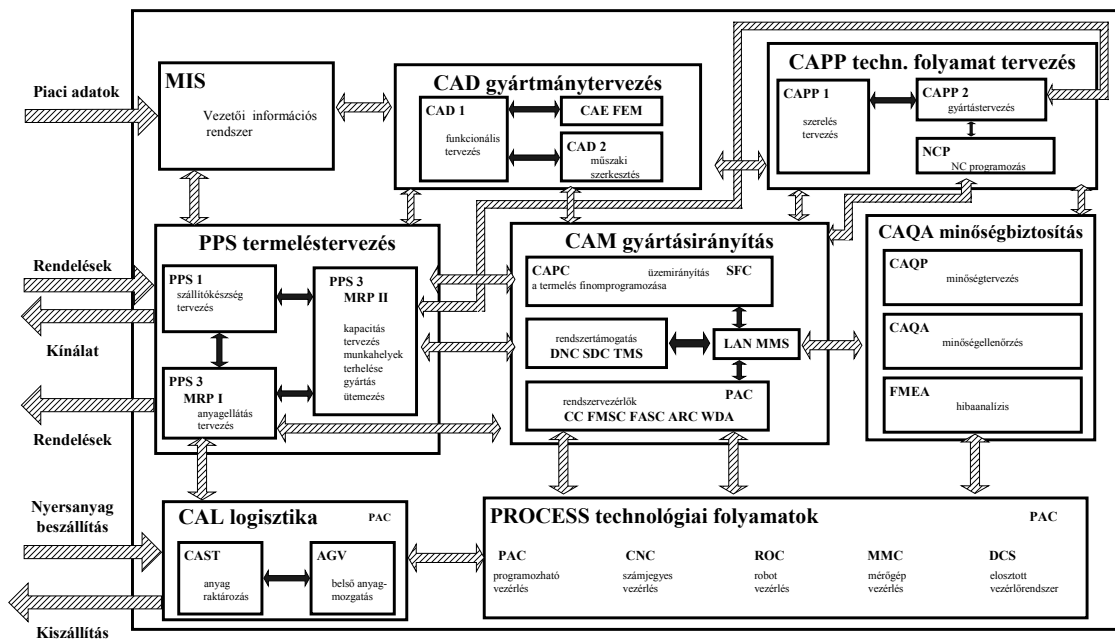
A modern gyártás megköveteli az automatizált folyamatok fölötti teljes kontrollt. A gyártórendszereket kis volumen, a termékek sokfélesége, szűk tűrések és magas minőségi követelmények jellemzik. A rendelkezésre álló infrastruktúra hatékony kihasználása magas fokú informatikai támogatást igényel. Felismerték, hogy a számítógéppel integrált gyártás (CIM) a versenyképesség hatékony alapja. A konstrukciós tervezés (CAD), a számítógéppel támogatott technológiai tervezés (CAPP) valamint a termelésstervezés és irányítás (PPS) integrációja lényegessé válik, különösen párhuzamos mérnöki tevékenységek esetén. A számítógéppel támogatott műszaki tervezés területét a CAE fogalma fogja össze.

A termékek rövidebb élelciklusa megkívánja a gyártórendszer nagyfokú rugalmasságát a piac változásainak követése érdekében. A rövidebb élelciklus lerövidíti az új gyártórendszerek kifejlesztésének, illetve a meglévők átkonfigurálásának az idejét.

Az NC programozás feladatainak jelentőségét elsősorban az elkészített programok nagy száma jelzi. Valójában ez egy interdiszciplináris mérnöki tevékenység, amely egyrészt alkalmazott informatikai ismereteket, másrészt az NC technológia ismeretét kívánja meg. Ilyen területek: az NC programozás (NCP), a CAPP, a számítógéppel segített tervezés és gyártás (CAD/CAM), illetve a folyamatok számítógépes szimulációja, ami geometriai modelleket, számítógépi algoritmusokat és grafikus animációt igényel.

Az informatikai támogatás – és így a szimulációs feladatok – fontos eleme a gyártási folyamatokat jellemző, értékelő menedzser-indexek pontos és megbízható becslése. Ide tartoznak például a megmunkálási idők, a költségek, a gyártmány minőségi jellemzői, stb.

A Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszékén folyó kutatómunka célja és az értekezés elkészítésének alapvető feladata volt hozzájárulni ahhoz a világszerte folytatott kutatómunkához, amely a megmunkálások szimulációjának új szolgáltatásokkal való kiterjesztését szolgálja. A disszertáció szűkebb értelemben vett célja áttekinteni az NC szimulátorok hátterét, jelenlegi szolgáltatásait és a velük szemben támasztott igényeket. A dolgozatban ismertetjük az NC szimulátorok egy lehetséges új koncepcióját, amely a hagyományos szimulációs feladatokon túlmutató szolgáltatásokat nyújt, mesterséges intelligencia módszerek alkalmazásával. Bemutatásra kerül a szerző által objektum orientált módszerekkel kifejlesztett szimulátor, amely egy lehetséges módszer az ismertetésre kerülő koncepció megvalósításra, így hozzájárul a forgácsolás témakörében, a technológiai intenzitás alapú optimalizációs módszerek területén végzett kutatásokhoz.



1. ábra A CIM fő komponensei

2 TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

2.1 A számjegyes vezérlés

2.1.1 A számjegyes vezérlés fejlődése

A *számjegyvezérlés* (Numerical Control, NC) olyan elektronikus, digitális gépvezérlés, amely különböző feladatokra rugalmasan programozható. A működési programot számjegyek és szimbólumok formájában tárolja.

A számjegyvezérlés története 1949-ig nyúlik vissza. Ekkor indult *Gordon S. Brown* professzor vezetésével *J. Parsons* kezdeményezésére egy kutatási projekt az amerikai *Massachusetts Institute of Technology*-ban (MIT), melynek célja olyan szerszámgépvezérlés kifejlesztése volt, mely másoló sablon nélkül alkalmas szoborszerű alkatrészek megmunkálására. Az első számjegyvezérlésű marógépet 1952-ben mutatták be Bostonban.

A *Direct Numerical Control* (DNC) elvét a 60-as évek közepén fejlesztették ki. Ez akkor azt jelentette, hogy a viszonylag egyszerű, saját vezérléssel rendelkező NC gépeket, az ezeken végrehajtott operációkat egy távoli számítógép koordinálja.

Ezzel ellentétben a *Computerized Numerical Control* (CNC) elv a gép melletti számítógépen alapszik. Az integrált áramkörök, a mikroszámítógépek, és az olcsó háttértárak megjelenése lehetővé tették a CNC elv megvalósulását. A CNC technológiailag a számjegyvezérlésből fejlődött ki. A CNC vezérlést úgy definiálhatjuk, mint olyan vezérlést, amely egy dedikált számítógépet tartalmaz, és így szoftveresen valósítja meg az NC funkciókat. A hagyományos NC gépekben hardver eszközökkel, elektronikus cél-áramkörökkel valósítottak meg minden funkciót, mint például az interpolációt, az utasítások dekódolását, az abszolút vagy növekményes pozicionálást, stb.

Elmondhatjuk, hogy a megjelenésüktől eltelt mintegy 50 év alatt az NC vezérlések jelentős változáson mentek keresztül mind külső felépítésüket, mind belső szerkezetüket tekintve. A fejlődés főbb technikai lépcsői a következők voltak:

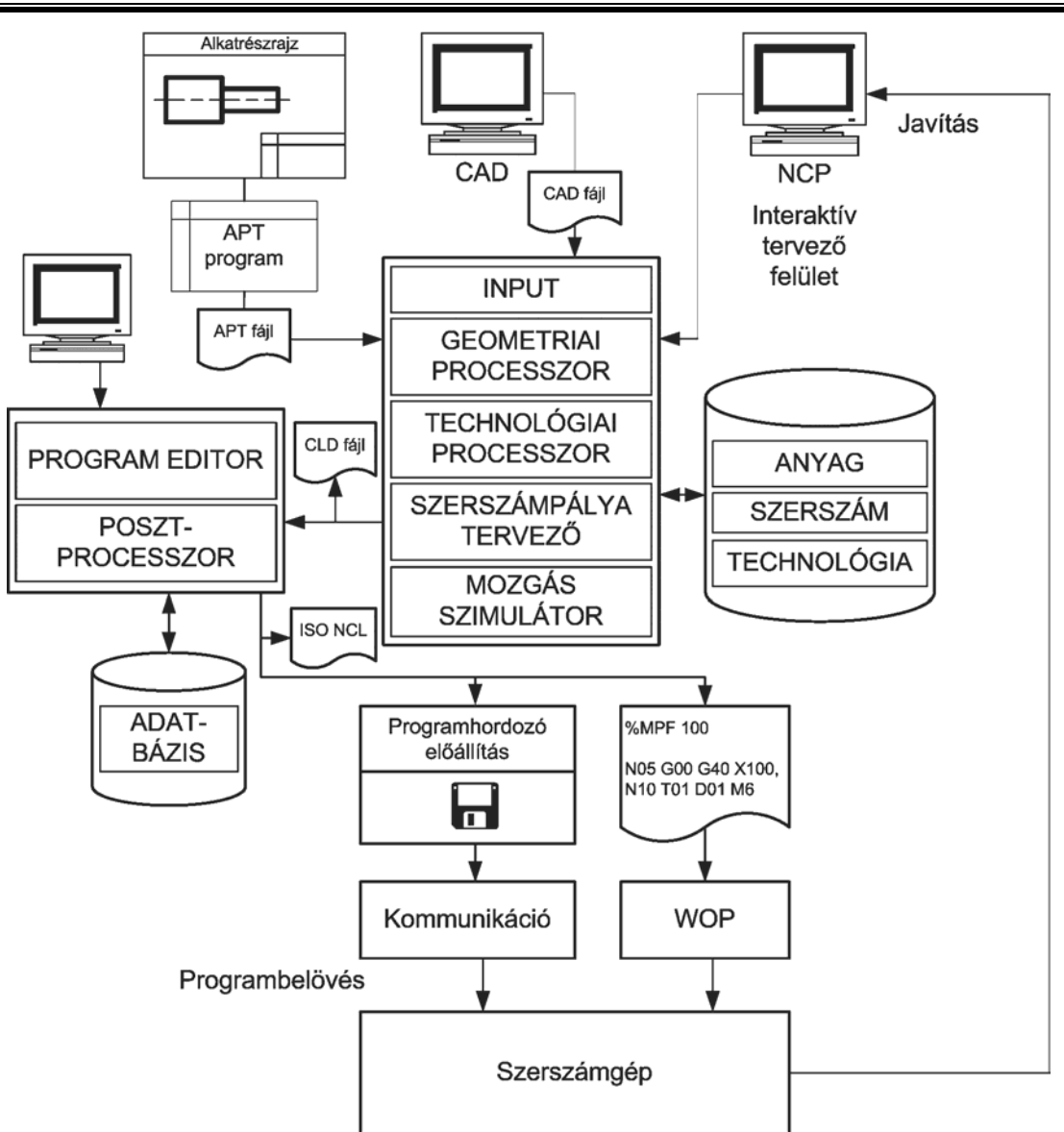
- Elektroncsövek, relék, hidraulikus hajtások.
- Tranzisztoros vezérlés, tirisztoros hajtások.
- Integrált áramkörös vezérlés, hardver interpoláció.
- Mikroprocesszoros CNC vezérlés, tranzisztoros hajtások.
- Multiprocesszoros vezérlés, szoftver interpoláció, AC szervók.
- Nyílt, hálózatba integrálható, intelligens vezérlések, intelligens hajtások.

2.1.2 A számjegyvezérlésű gépek programozása

A számjegyvezérlésű gépeket kezdetben egyedi kóddal programozták. Az első NC gép sikeres bemutatója után a MIT 1954-ben kezdte el egy számítógépes NC programozási nyelv kidolgozását, amit *Automatically Programmed Tool*-nak (APT) neveztek el [49]. Ez egy szimbolikus programozási nyelv, amely lehetőséget nyújtott a kész munkadarab geometriai definiálására, a technológia és a forgácsoló szerszám útjának leírására. Az APT nyelv azóta többször bővült, és az NC gépek szabványos magas szintű programozási nyelvévé vált. Ilyen APT származék nyelvek az APT-I, APT-II, APT IV, ADAPT, EXAPT, APTLOFT, MODAPT, MICROAPT NASA APT. A mai, CAD/CAM rendszernek nevezett számítógépes NC programozó rendszerek nagy része az APT elven alapul, habár az interaktív ember-gép kapcsolat a nyelvi szintaktikát rendszerint elrejti.

Az APT jelentősége abban is megnyilvánul, hogy bevezette a processzorposztprocesszor elvet. Az NC programok generálásának első lépcsőjében egy vezérlés-független kód, a *CLDATA* keletkezik. Ez a kód tartalmazza az NC programban szereplő geometriai és technológiai információkat. Az NC vezérlő által is értelmezhető kódot egy második processzálsági eljárás során generálják, ezt a fázist poszt-processzálsásnak nevezzük.

Az ISO szabványos programnyelve, az ISO 6983 NCL 1968-ban került elfogadásra. Ez egy assembly típusú programnyelv, amely az NC vezérlésű gépi funkciókat közvetlenül programozza. Az ISO NCL ma is a legegyszerűbben használt alkatrész programozási nyelv, jellegzetes utasításkészlete után szokás „G kódnak” is hívni. Az NCL-nek létezik alap, kiterjesztett, és bővített változata. A kiterjesztett változat az alap szintaktikáját megtartja, de az utasításokat kiterjeszti. A bővített változat az alaputasításokat szintaktikailag is módosított utasításokkal bővíti.



2. ábra AZ APT koncepcióján alapuló számítógépes NC programozás menete

Az alkatrész-programozás manapság mind a szerszám gép mellett, mind külső számítógépen elvégezhető, programnyelv használata nélkül, interaktív parancsorokkal, vagy a menük, grafika és lokátorok segítségével is.

2.1.3 Klasszikus CNC szimulációs feladatok

Az NC programok készítésének folyamata jelentős változáson ment keresztül az elmúlt 50 évben, mióta az NC technológia az MIT-n folyó kutatások eredményeképpen megjelent. A hagyományos számjegyvezérlést az azóta eltelt időben felváltotta a számítógépes számjegyvezérlés. A CNC vezérlésű szerszám gépek ma már többprocesszoros ipari számítógépek, amelyeknek programokkal való ellátása komoly

mérnöki feladat, amely informatikai, gépgyártástechnológiai, geometriai modellezési ismereteket igényel.

A hagyományos kézi NC programozást felváltotta a számítógépes NC programozás (*NC Programming*, NCP). A mai mérnöki munkaállomások teljesítménye lehetővé teszi az NC programozó alkalmazások futtatását.

Az NC programok megjelenésével egy időben felmerült az igény az elkészült NC programok „jóságának” ellenőrzésére. Ez indította el az NC szimulátorok fejlesztését. Ezek az eszközök a *Computer Aided Engineering*, CAE gyűjtőfogalmába esnek, hiszen a mérnöki munkát támogató ipari alkalmazásokról van szó.

A szimuláció fogalmát kiterjeszti a *Virtual Manufacturing* (VM), amely a teljes gyártási folyamat számítógépi modellezésének és szimulációjának víziója [27][41].

A mérnöki gyakorlatban számos területen alkalmaznak szimulátorokat. A szimuláció előnyei:

- alternatívák kipróbálásának lehetősége kockázatok nélkül,
- döntések meghozatalához szilárd alapot nyújt,
- a folyamatban lévő műveleteket nem zavarja,
- a folyamatok időbeli lefolyása tanulmányozható,
- a problémák azonosíthatók,
- az új szituációk feltérképezhetők,
- a rendszerről átfogó kép nyerhető.

Hátrányai:

- a szimulációs modell kívánt részletességi szintje nehezen határozható meg,
- nehéz a megvalósítható szimulációs célt meghatározni (irreális célok),
- a modell csupán a valóság absztrakt, egyszerűsített modellje,
- néha nehéz analizálni az eredményeket,
- a szimulációs modellek kidolgozása időigényes,
- időnként költséges hardver és szoftver szükséges.

A szimulátorok mérnöki, menedzseri alkalmazása szinte minden esetben visszavezethető valamilyen döntési tevékenység támogatására. Ilyenek például:

- a rendszer teljesítőképességének előrejelzése,
- alternatívák közötti választás,
- adat-, tudásgyűjtés a rendszer működésének különböző fázisaiban,
- várható, megjósolható problémák azonosítása,
- becslt adatok reprezentációja, ellenőrzése.

A számítógépes szimuláció céljai általában a következők lehetnek:

- verifikáció,
- analízis,
- optimalás.

A számjegyevezérlésű berendezések szimulátorait csoportosíthatjuk az input adatformátumaik szerint. Ezek a csoportok:

- ISO 6983 szerinti szabványos kód (szokás G kódnak is nevezni),
- APT-származék nyelv ISO 4342 szerint,
- CLDATA (Cutter Location Data), ISO 4343,
- NCP rendszerekbe integrált szimulátor esetén nem szabványosított, köztes fájl-formátum (pl.: a MasterCAM intermediate fájlformátuma).

2.1.4 A modern NC szimulátorok által nyújtott szolgáltatások

Ma számos, kereskedelmi forgalomban lévő eszköz létezik, amellyel valamilyen formában ellenőrizhetők az elkészített NC programok. Ezeket az eszközöket a alábbiak szerint osztályozhatjuk:

- különálló szimulátorok,
- NCP rendszerekbe épített szimulátorok,
- vezérlőkbe integrált szimulátorok.

Ebben a részben áttekintjük a különálló szimulátorok által nyújtott szolgáltatásokat, megjegyezve, hogy ezek a szimulátor eszközök gyakran megjelennek CAD/CAM rendszerekbe illetve a vezérlőkhöz nyújtott szoftverekbe integráltan is. Ezek a szolgáltatások a következők:

- program verifikáció,
- grafikus animáció,
- szerszám és munkadarab geometria definiálása,
- poszt-processzálás,
- szerszám-pálya optimalás,
- megmunkálás szimuláció,
- többtengelyes szimuláció,
- teljes integráció a CAD/CAM és NC programozó rendszerekkel,
- operátori kezelőszervek szimulációja,

-
- keresztmetszetek számítása,
 - a virtuálisan „legyártott” modell összevetése a CAD fájlal,
 - automatikus ráhagyás-ellenőrzés,
 - megmunkálási idők számítása,
 - megmunkált térfogat számítása.

A *verifikáció* magában foglal minden olyan tevékenységet, amivel a következő hibák felderíthetők:

- szintaktikai hiba az NC programban,
- érvénytelen célpont-tartomány,
- gyorsmeneti mozgás hibája,
- pályabejárás hibája,
- ütközés (pl. tokmánnal, készülékekkel, szerszámokkal, stb.),
- méret eltérés a definiált CAD modelltől.

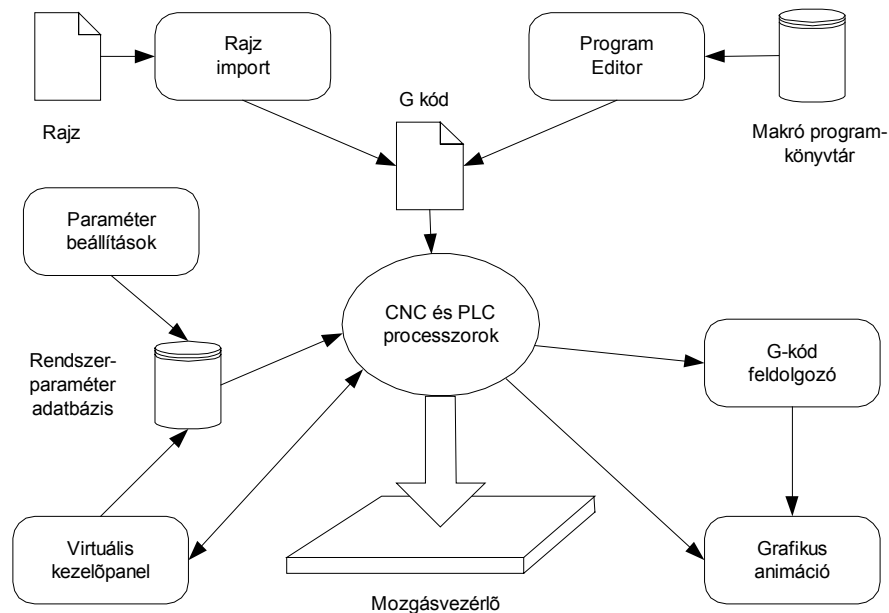
Általában megkülönböztetik egymástól a *munkadarab* vagy más néven *geometriai* szimulációt, illetve a *megmunkálás* szimulációt. Míg az előbbi csupán a munkadarab és a szerszám geometriai modelljét igényli, addig az utóbbi az egész szerszám gép komplex modellezését szolgálja. Egy többtengelyes megmunkáló központ esetén, ahol a szerszámok helyzete és orientációja gyakran változik, nagy a veszélye az ütközéseknek. Egy esetleges ütközés következményei komolyak lehetnek: ember, gép, szerszám, munkadarab sérülés, gépidő kiesés, határidő túllépés, újramunkálás szükségessége, stb. Ezért a modern szimulációs szoftverek lehetővé teszik az egész CNC szerszám gép geometriai modelljének megszerkesztését, illetve importálását CAD rendszerekből. Így a szimulátor fel tudja fedezni az ütközést vagy egy előre megadott biztonsági zóna megsértését a szerszám gép szánjai, revolverfeje, forgó asztalai, főorsói, szerszámcsereelő rendszere, befogó szerkezetei, forgácsoló szerszámjai, illetve egyéb, a felhasználó által definiált objektumai között.

Az 1. táblázatban megtalálhatók a felmérésben szereplő szimulátorok illetve azok honlapjának URL-jei a felmérés elkészítésekor.

Turbo Canvas	http://www.turbotek.co.kr/
NC Simul	http://www.ncsimul.com
CNC Simulator for Turning & Milling;	http://www.mts-cnc.com
MachineWorks CNC Simulation & Verification	http://www.lightwork.com
OneCNC NC Sentry	http://www.qarm.com.au
NC Verify	http://www.siriussys.com
Vericut	http://www.cgtech.com
Cimskil NCV - NC Verification	http://www.cimplex.com
Virtual NC	http://www.delmia.com
Powercut	http://www.cimco-software.com
Inplot	http://www.i-logic.com
XYZEditPro32 Edit Plus	http://www.ascendtec.com
STA-CNC Turning	http://www.sta-soft.de
Predator Virtual CNC	http://www.predator-software.com/virtualcnc.htm
Aztech CNC Software	http://web.ukonline.co.uk/aztechsoftware/

1. táblázat A felmérésben szereplő szoftverek

Az 3. ábra egy NC geometriai szimulátor általános felépítését mutatja.



3. ábra Egy geometriai NC szimulátor általános felépítése

2.2 Az esztergálási folyamat

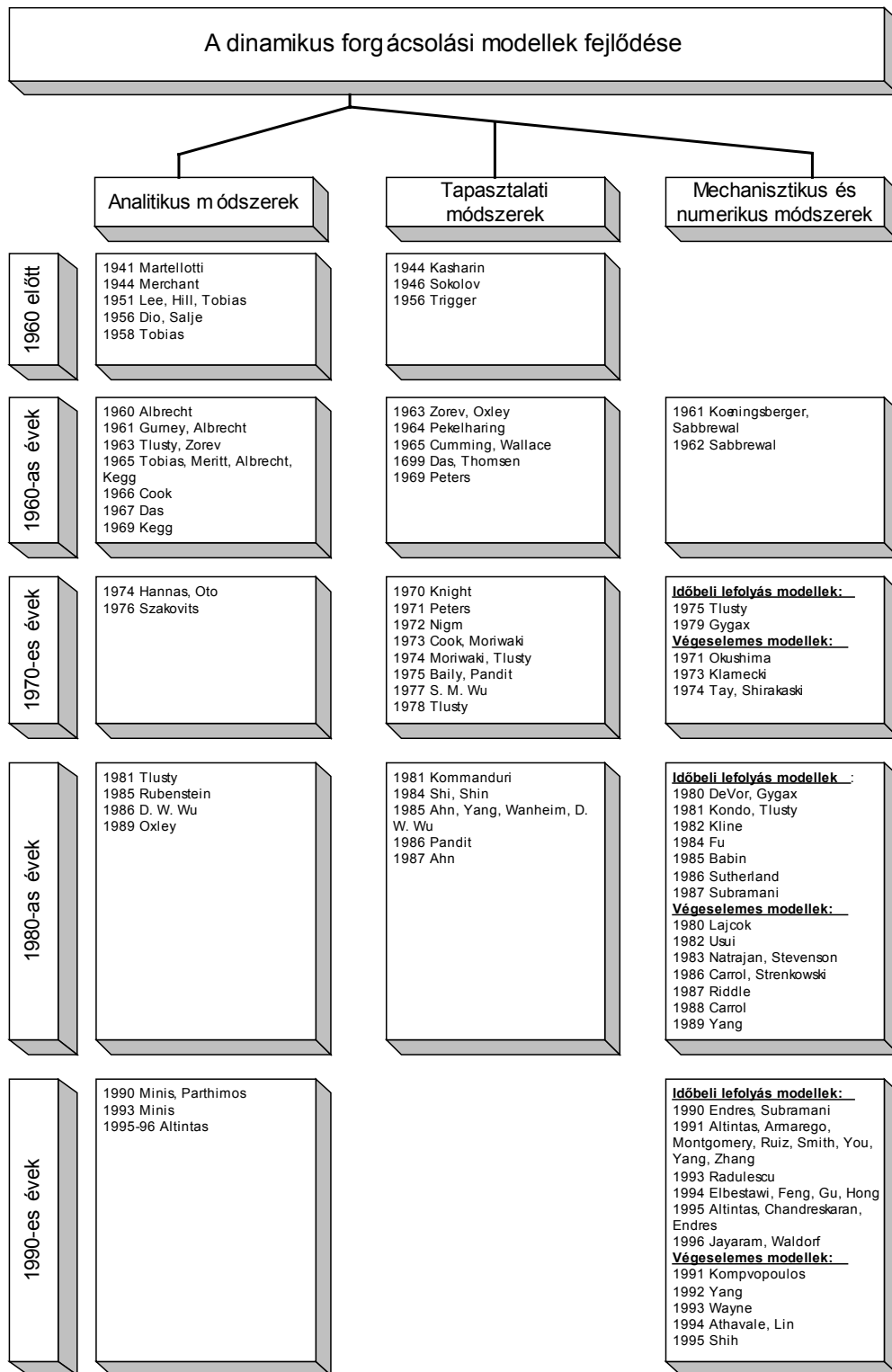
2.2.1 A forgácsolás-elmélet fejlődése

A forgácsolás témakörének igen szerteágazó irodalma van. Időtállóságával kiemelkedik *Taylor* - akit a forgácsolás atyjának is neveznek - sokat idézett műve [54], amelyet 1906-ban publikált. Inspiráló hatása a mai napig is érzékelhető a témához kapcsolódó tudományos közleményekben. *Merchant* dolgozata [37] 1945-ben vízváltó volt, és a fémforgácsolás művészetét a fémforgácsolás tudományává emelte. A forgácsolási gyakorlat számos kérdésben ma is ezeken a dolgozatokon alapszik.

Az 50-es évektől számos kezdeményezés indult a különböző forgácsolási adatok táblázatos gyűjtésére, majd a 70-es évektől adatbázisok alkalmazására. Ezt a Taylor illetve Merchant által képviselt irányvonal mellett egy harmadik fajta megközelítésnek tekinthetjük.

A forgácsolás dinamikai kérdésével foglalkozó munkákat összegezték *Ehmann* és társai 1997-ben [15]. A dolgozatokat tudományos megközelítés szempontjából három csoportba sorolták:

- analitikus módszerek,
- tapasztalati módszerek,
- numerikus és mechanisztikus módszerek.



4. ábra A forgácsolási folyamat dinamikája, modellezésének fejlődése [15]

A forgácsoló megmunkálásokban érdekelt ipari vállalatoknál megjelent az igény a forgácsoló műveletek műszaki-gazdasági modellezésére. Ennek a jelentőségét

mutatja, hogy a CIRP 1997-ben munkacsoportot hozott létre „*Modelling of Machining Operations*” néven, amely 1998-ban átfogó jelentést tett közzé [62]. Ez áttekintő értékelését tartalmaz. A téma a CIRP 1998-as konferencián *Keynote Paper*-ként szerepelt. A modellezés szükségességének fő céljaként a *megmunkálás teljesítőképességének* jó becslését jelölik meg, hogy lehetővé tegyék a megmunkáló műveletek tervezését, optimális termelékenység, minőség és költség elérését.

A megmunkálás teljesítőképességét két szempont szerint elemzik:

- technikai aspektus, mint például alak és mérethelyesség, felületi érdesség,
- gazdasági aspektus, mint például megmunkálási idő és költség, átfutási idő, selejtarány.

A modellezés nehézségeit az alábbi fő tényezőkre vezetik vissza:

- még a legegyszerűbb egyélű, lekerekítés nélküli szerszámmal egyenes mozgással végrehajtott ortogonális forgácsolás esetére is hiányos a szerszám-munkadarab kölcsönhatás mechanikájának alapvető megértése,
- a megmunkálások valós műveleteinek változatossága igen nagy, és céljaik is nagyon különbözőek.

A forgácsolás témakörében tanulmányozott állapotjelzők a következők:

- forgácsoló erők,
- szerszámkopás,
- hőmérsékleti viszonyok,
- anyagra gyakorolt hatások,
- forgácsképződés,
- szerszám élettartam,
- szerszám anyagok,
- szerszámtörés,
- szerszám geometria,
- forgácsolás dinamikája,
- szerszám anyagok,
- forgácsolás geometriája,
- diffúziós kopás,
- forgácsolás közben ébredő feszültségek,
- maradó feszültségek,
- nyírási szög,
- súrlódás,
- felületi érdesség,
- felületi integritás,
- munkadarab minőség,
- megmunkálhatóság,
- forgácsolás közben fellépő rezgések,
- forgácstörés,
- hűtő-kenő folyadékok hatása.

Ebben a tanulmányban a modelleket öt alapvető csoportba sorolták:

- analitikus,
- numerikus,
- mesterséges intelligencia alapú,
- prediktív (tapasztalati megerősítést kívánó) és
- valószínűségi/sztochasztikus modellek.

A modellekkel szemben támasztott igények hibrid modellezési technikák kifejlesztéséhez vezettek, amelyeket a felsorolt módszerek kombinációjaként kapunk.

Az analitikus modellek hibájaként felróják, hogy csupán bizonyos forgácsolási körülmények között, adott szerszám és munkadarab anyagokra, adott szerszámgeometria mellett érvényesek. A pontatlanságot tovább növeli a különböző szerszám és munkadarab anyagok eltérő mechanikai és hőtani tulajdonságai a magas forgácsolási hőmérsékleten, amelyek nagy feszültségeket okoznak. Ezek a korlátok a numerikus és a mesterséges intelligencia alapú modellekre is érvényesek.

A forgácsolási folyamatok modellezésének célja lehet:

- folyamatok tervezése,
- folyamatok optimalása,
- folyamatok adaptív vezérlése,
- folyamatok szimulációja,
- berendezés-tervezés.

Folyamattervezésnél sokszor egyszerű modellek is megfelelőek, amelyek segítségével kiválaszthatók, milyen műveletek, milyen szerszámok, és milyen szerszámanyagok szükségesek. A folyamatok optimalásához jóval összetettebb modellekre van szükség. Az ilyen modellek egy része csupán a megmunkálás technológiai szempontjait vizsgálja, míg más modellek a gazdasági szempontokat is figyelembe veszik.

A folyamatok adaptív vezérlésére használt modellek segítségével a forgácsolási műveletek eredményeinek szórása csökkenthető, ami a selejtarányt is lecsökkenti. A modellezés fő célja az, hogy meghatározzuk az input paramétereknek egy olyan halmazát, amivel az output változók egy adott, előre definiált tartományon belül tarthatók.

A folyamatok szimulációja alatt forgácsolásnál elsősorban a forgácsolás fizikai folyamatait leíró modelleket értik. Ezen a területen ma a végeeselemes módszerek (*Finite Element Methods*, FEM) tekinthetők a legkorszerűbbnek. A forgácsolás olyan

területein, ahol költséges termék-specifikus szerszámokra van szükség, az ilyen modellek alkalmazása folyamatosan terjed.

A berendezés (szerszámgép, célgép, készülék) tervezésnél használt modellek segítségével az adott munkadarabon végrehajtandó operációhoz szükséges forgácsoló erő, nyomaték, teljesítmény, forgácsoló sebesség becsülhető és így a megfelelő mechanizmus kiválasztható. Olyan modellek is vannak, amelyek segítségével a rugalmas és hő okozta deformációk tanulmányozhatók.

2.2.2 Analitikus módszerek

Merchant 1944-ben publikálta a nyírási szög meghatározására szolgáló matematikai modelljét, ami az energia-minimum elvére alapul. *Doi* és *Kato* 1956-ban analizálta az esztergálás közben fellépő rezgéseket. Dolgozatukban egy szabadságfokú rendszert írnak le, amelyre horizontális forgácsoló erő hat. *Salje* 1956-ban az esztergálás öngerjesztő rezgéseit vizsgálta, először tekintve a rendszert két szabadságfokú rendszernek.

Tobias és *Fishwick* 1958-ban a dinamikus forgácsoló erőt vizsgálta. Analízisük eredményeként a forgácsoló erő változását a forgácsvastagság, a behatolási hányados és a forgácsoló sebesség függvényeként határozták meg. Az öngerjesztett rezgés elméletüket stabilitási kártyák formájában képezték le. Megmutatták, hogy a rendszer stabilitása a forgácsoló sebességtől, a munkadarab anyagától, a szerszám geometriai alakjától, stb. bonyolultan függ, és bizonyos körülmények között a forgácsvastagságnak stabilizáló hatása lehet.

Az algebrai módszerek alternatívájaként *Gurney* és *Tobias* (1961) grafikus módszert javasolt a gép struktúrájának leírására. *Thusty* és *Polacek* a szerszámgépet egy n szabadságfokú rezgő rendszernek tekintették és részletes elméleti, illetve gyakorlati analízist adtak a szerszámgép dinamikáról általában, és részletesen az öngerjesztő rezgésekről is.

Albrecht (1965) a fémforgácsoló eljárások dinamikáját vizsgálta analitikus és tapasztalati módszerekkel. Analizálta a geometria, a pillanatnyi nyírási szögváltozás, a súrlódási szög, homlokszög, és a hátszög hatását. *Merrit* (1965) az n szabadságfokú rezgő rendszer stabilitásainak határait vizsgálta.

Gurney és *Tobias* (1961), *Thusty* és *Polacek* (1963) és *Merrit* (1965) a forgácsoló erő dinamikájával foglalkozva a következő arányosságot állapítja meg:

$$dF = k \cdot ds, \quad (1)$$

ahol ds a pillanatnyi nem deformált forgácsvastagság, k pedig konstans.

Das és *Tobias* (1967) modellje feltételezi, hogy a fő forgácsoló erő lineáris függvénye a nyírási sík területének és egy az anyagtól függő konstansnak. *Kegg* (1969) a kis

forgácsoló sebesség stabilitását vizsgálta. *Knight* (1970) a forgácsolás regeneratív tulajdonságait tanulmányozza nagysebességű kamerával. *Nigm et al.* (1977) a dinamikus forgácsolási együtthatót vizsgálja ideális nyírási síkot feltételezve, de figyelembe veszi a nyírási sík szögének változásait a forgácsolási paraméterek függvényében.

Nemlineáris forgácsoló erő modellt mutat be *Kashirin* (1944), *Sokolov* (1946) később *Hanna et al.* (1974) és *Shi et al.* (1984). Mindannyian polinom alakban adják meg az erőt olyan paraméterek függvényében, mint például forgácsvastagság, relatív rezgésebbesség, forgácsoló sebesség.

Hanna és Tobias (1974) a forgácsoló erőt a forgácsvastagság harmadfokú polinomjaként írja le. *Szavkovits és D'Souza* (1976) az ortogonális forgácsolásnál a forgácsolóerő hiszterézisét vizsgálja. *Thusty és Ismail* (1981) a folyamat nem-linearitásával foglalkozik, ami szerszám és a munkadarab közötti kapcsolat rezgések miatti megszakadásából ered.

Minis et al. (1990) Fourier analízisen alapuló átfogó matematikai modellt ad marásra. *Altintas et al.* időben változó dinamikus forgácsoló erő együtthatót javasol. Modelljének érvényességi korlátai lineáris kifejezésekből számíthatók.

A forgács képződésének mechanizmusát vizsgálja *Oxley et al.* (1963), *VanLuttervelt* (1977), *Komanduri et al.* (1981) és *Parthimos* (1990).

A súrlódás hatását analizálta *Cook* (1966), *Kegg* (1965), és *Bailey* (1975). *Wu* (1985) a rugalmas kapcsolódási deformáció és a súrlódás kapcsolatáról publikál. *Endres* (1992) kimutatta, hogy a forgácsoló erő csúcserőértéke fáziskéséssel jelenik meg a periódikusan változó forgácsvastagság miatt.

A szerszám-forgács kapcsolatot vizsgálja *Trigger et al.* (1956), *Cook* (1973), *Oxley* (1989).

2.2.3 Tapasztalati módszerek

Kezdetben a forgácsoló erő változás meghatározását tekintették a legfontosabbnak. *Peters et al.* (1969) statikus együtthatók normalizált módszerét javasolta. A dinamikus módszerek a dinamikus erők illetve a munkadarab elmozdulását vették alapul. (*Peters*, 1971). *Thusty et al.* erőmérőt és gyorsulásmérőt használtak a szerszám rezgések és forgácsoló erő komponensek mérésére.

A mérési eredmények pontosságát, különböző kompenzációk alkalmazásán keresztül javasolja feljavítani *Shiozaki* (1970) és *Knight* (1971).

Egy másik megközelítés az idősorok elve, amelyet *Moriwaki* (1973-74), *Pandit* et al. (1975, 1986) és *Wu* (1977) javasol. Ezzel a területtel foglalkozik *Shin* et al. (1984) *Ahn* et al. (1985, 1987) és *Yang* et al. (1985).

2.2.4 Numerikus és mechanisztikus módszerek

A mechanisztikus módszerek a megmunkálási folyamatokat a következő komponensek tükrében tekintik: forgácssterhelés – forgácsoló erő kapcsolat, *Koenigsberg* et al. (1961), *Sabberwal* (1962) és *Martellotti* (1941, 1945); forgácsoló szerszám geometria, a forgácsképződési folyamat geometriája, munkadarab geometria, megmunkálási körülmények, szerszám-munkadarab elmozdulás erő hatására. A mechanisztikus módszerek figyelembe veszik továbbá a szerszám-kifutás, a szerszámkopás, a munkadarab anyagának inhomogenitása hatását a forgácsoló erőkre és a felületi minőségre.

Koenigsberg és *Sabberwal* (1961) a forgácsoló erőt arányosnak tekinti a forgács szélesség és forgácsvastagság szorzatával. *Thusty* és *MacNeil* (1975) a sugárirányú és tangenciális forgácsoló erő komponenseket becsli. A tangenciális erőt arányosnak tekintik a forgácsra eső terheléssel, míg a sugárirányú erőt egy második tapasztalati konstans segítségével számítják a tangenciális erőből. Hasonló gondolatmenetet követ *Gygax* (1979-80), amikor a többfogú homlokmarás összefüggéseit adja meg egyfogú szerszámból kiindulva.

Sabberwal munkáit követte *DeVor* et al. (1980), *Kline* et al. (1983). Olyan átfogó modellt dolgoztak ki marásra, amely figyelembe veszi a szerszám kifutás és a szerszámelhajlás hatását a megmunkált alkatrész méretpontosságára. Ezen a területen publikált *Armareggo* et al. (1991), *Kolartis* et al. (1991), *Smith* et al. (1991), *Wang* et al. (1991), *Atlintas* et al. (1992, 1995), *Elbestawi* et al. (1994), *Yang* et al. (1991), *Feng* et al. (1994), *Lazoglu* (1997), *Chandrasekharan* (1995).

Fu, *DeVor* és *Kapoor* (1984) olyan erőrendszert ismertet, ami a forgácsoló szerszám geometrián kívül egyéb hatásokat is figyelembe vesz, mint például a főorsó elhajlását.

Atalintas és *Spence* testmodell alapú forgácsoló erő szimulátort tervezett 1991-ben. *Ruitz* (1991) és *Gu* (1994) továbbfejlesztik *Fu* módszerét és a forgácsoló szerszámot felületmodellel írták le. *Jayram* (1994) egy általános munkadarab reprezentációs eljárást mutat be, amely zárt polinomokkal közelíti a munkadarabot.

Ezekkel a kutatásokkal párhuzamosan folytak a megmunkált felület topográfiai leírását célzó törekvések dinamikus hatások alatt. Ide tartozik *Kline* et al. (1982), *Babin* et al. (1985) *Sutherland* et al. (1986), *Montgomery* et al. (1991), *You* et al. (1991),

Zhang és Kapoor (1991). *Hong et al* (1994) általános keretet ad bármilyen megmunkálás ideális topográfiai felületleírására. A megmunkálási folyamatok végeeselemes leírása a 70-es évek elején kezdődött (*Okushima* 1971, *Klamecki* 1973). *Stevenson et al.* úttörő munkát végzett a végeeselemes analízis terén. *Lajczok* (1980) síkbeli feszültségen alapuló forgácsolási modellt ír le. *Usui et al.* növekményes rugalmas-plasztikus végeeselem modellt javasol. *Strenkowski és Carrol* (1986) az elemeket elkülönítő technikát dolgozott ki, hasonlóan *Riddle* (1997), *Yang* (1989), *Komvopoulos* (1991) *Shih et al.* (1995).

2.2.5 Mesterséges intelligencia alapú módszerek

Az utóbbi évek kutatásai ráirányították a figyelmet a mesterséges intelligencia alapú modellek, elsősorban a neurális hálók és a fuzzy logika alkalmazhatóságára. Ezeket az intelligens módszereket alkalmazták például a különböző monitoring feladatokra.

Chryssolouris és Domroeses (1988) a legkisebb négyzetek elvére alapozott adat csoportosító eljárást közöl szerszámkopás becslésére. *Li et al.* (1992), *Ko* (1994), *Cho és Fang* (1995) fuzzy szakértő rendszert, fuzzy minta felismerő rendszert illetve döntési fákkal kombinált fuzzy halmaz elméletet alkalmaz.

Neurális hálót használ a szerszámkopás becslésére *Rangwala és Dornfeld* (1990), *Masory* (1991), *Emel* (1991), *Wang és Dornfeld* (1992), *Elanayar és Shin* (1992), *Weis* (1994), *Rahman et al.* (1995), *Choudhury et al.* (1999), és *Niu et al.* (1998).

Matsumura et al. (1992) a szerszám éltartamának becslésén túl a forgácsolási paraméterek optimalására is használja a neurális hálót.

Felügyelet nélküli neurális hálót használ a szenzorjelek osztályzására és a szerszám-törés detektálására *Burke* (1991), *Burke és Rangwala* (1992), *Niu et al* (1998).

Westkämper (1998) a forgácsolási folyamat optimalására használ neurális hálót. *Yang et al.* (1996) a hőokozta deformációt modellezik neurális hálóval [64]. *Kamarthi et al.* (1991) önszervező hálót ismertet, amely erő és rezgésmérés alapján jelzi a szerszám kopottságát. *Bauer* (1991) a szerszám-törés felismerésére NN megközelítést ismertet. Neuro monitoring rendszert ismertet *Dornfeld* (1990), *Barschdorff és Monostori* (1991).

2.2.6 Hazai kutatási eredmények

A magyar gépipar és a szerszámgyártás gyökerei az 1930-as évekre nyúlnak vissza. Az 1950-es évektől a Csepeli Szerszámgyártó és a Szerszámgyártó Ipari Művek a nemzetközi piacon is jó nevet szereztek. A magyar NC gépgyártás az 1970-es és 80-

as években igényelte a hazai kutató fejlesztő munkát mind a gazdaságos forgácsolás, mind az NC programozás területén.

A hazai kutatómunka fő bázisai:

- Gépipari Technológiai Intézet (GTI),
- Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME),
- Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézete (MTA SZTAKI),
- Miskolci Egyetem (ME).

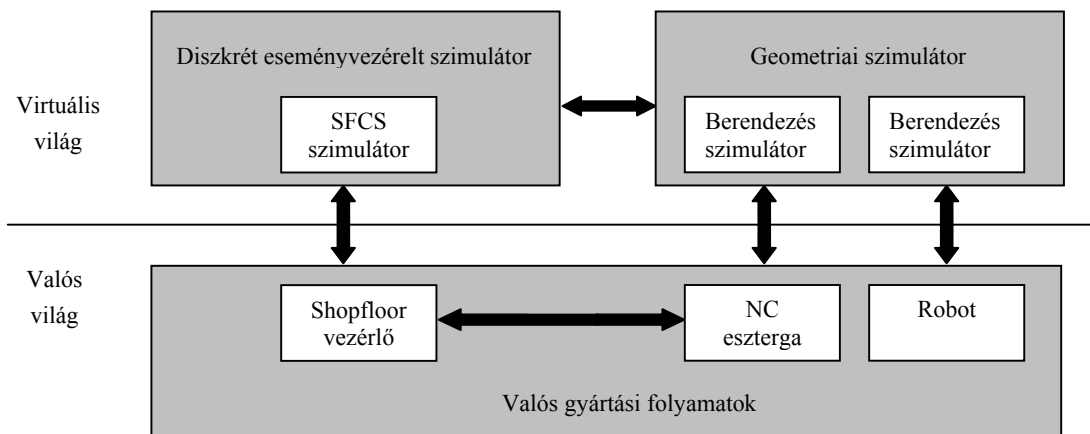
A hazai kutatások egyik tekintélyes alakja volt *Hatvany József*, aki az intelligens gyártás fogalmát megalkotta. A forgácsolási és a számítógépes technológiai tervezés kutatásai a GTI-ben folytak (*Szmejkál Attila, Tóth Tibor és Vadász Dénes.*) Itt dolgozták ki az első, magas teljesítőképességű NC programozó rendszert is *Horváth Mátyás* irányításával FORTAP néven [24]. A hetvenes évek második felében a BME Gépgyártástechnológiai Tanszéken a GTI-ből a tanszék élére került *Horváth Mátyás* professzor és munkatársai eredményei emelkedtek ki. A folyamattervezés és forgácsolási paraméterek optimalizálásával foglalkozott *Horváth Mátyás, Somló János*, valamint *Tóth Tibor* és *Detzky Iván* a ME Gépgyártástechnológia Tanszéken. A forgácsolási műveletek számítógépes támogatására készültek a TAUPROG T CAPP rendszerek. Ezek az esztergálási műveletek igen részletes modelljét tartalmazzák (*Tóth Tibor, Vadász Dénes* [61]). Szerszámkopást modellezett felügyeleti céllal *Bali János, Markos Sándor, Mészáros Imre és Reith János* [2].

Az MTA SZTAKI-ban nagy jelentőségű kutatások folynak különböző gyártási témakörökben, intelligens módszerek alkalmazásával. Kiemelkedő eredményeket ért el *Monostori László* [4][40]. Vezetésével számottevő eredmények születtek a digitális jelfeldolgozáson és alakfelismerésen alapuló többfunkciós felügyeleti rendszerek kutatása és fejlesztése terén. Neuro-fuzzy felügyeleti problémákkal foglalkozott *Monostori László* és *Egresits Csaba* [41], intelligens gyártási folyamatokat modellezett neurális hálókkal *Viharos Zsolt* [66]. Ágens alapú gyártórendszerek kérdéseit vizsgálja *Monostori László és Kádár Botond*.

A számítógéppel integrált gyártás területén AI módszerekkel végzett jelentős kutatásokat *Váncza* és *Márkus*. Intelligens nyílt NC vezérlésekkel *Kovács György, Nacsá János, Haidegger Géza* és *Drozdik Szilveszter*. A felügyelet, az NC vezérlés és a gyártórendszerek irányításának területén a ME Szerszámgépek tanszéken végzett kutató munkát *Erdélyi Ferenc, Csáki Tibor és Sántha Csongor*.

2.2.7 A diszkrét eseményvezérelt szimulátorok

Röviden meg kell említeni a gyártórendszerek magasabb hierarchiai szintjein használt szimulátorok jelentőségét. A magasabb szintű szimuláció más típusú modelleket igényel. *Klingstam* és *Gullander* [30] összefoglaló jellegű dolgozatukban áttekintik a cikk megírásakor a kereskedelmi forgalomban kapható *diszkrét eseményvezérelt szimulátorok* által nyújtott szolgáltatásokat. A berendezések szimulációjára nem térnek ki, azokat a *geometriai szimulátorok* gyűjtőfogalmába helyezik el (5. ábra). A geometriai, és más folytonos szimulációk közül elsősorban a robottal végzett műveleteket és az ehhez kapcsolódó szimulációs problémákat emeli ki.



5. ábra A diszkrét eseményvezérelt szimulátorok és a geometriai szimulátorok közötti kapcsolat [30]

2.3 A gyártásirányítás feladatai

Gyártásirányítás alatt (*Shop Floor Control*), azaz gyártórendszerek irányításán olyan komplex termelési funkciót értünk, ami valós időben felügyeli az integrált gyártórendszerekben zajló gyártási folyamatokat [19]. A gyártásirányítás központi fogalma a művelet (*operation*), amely négy további nagy objektum osztállyal áll kapcsolatban. Ezek:

- termékek,
- erőforrások,
- technológiai tervek,
- üzemi rendelések.

A forgácsolási műveletek minden tulajdonsága a gyártásirányítási feladatok

megoldása során kap értelemet. Nyilvánvaló, hogy az NC műveletek szimulációja a gyártásirányítás lehetőségeit is jelentősen bővíti, ezért követelményeit figyelembe kell venni.

2.3.1 A gyártásirányítás fejlődése

A modern gyártásirányítás fejlődését a tömeggyártás paradigmájának megjelenésétől számítjuk. A *futószalag koncepciót* elsősorban az autógyártáshoz, illetve *Ford* és *Taylor* nevéhez köthetjük (1920-as évek).

A gyártásirányítás főszereplői kezdetben a művezetők voltak. Minden üzemi szintű irányítási funkciót ők végeztek. Minden döntést ők hoztak. A gyártási folyamatok bonyolultságának és automatizáltság szintjének növekedésével ez a feladat egyre nehezebb lett. A gyártásirányítási grafikus táblákat és táblázatokat érdemben a számítógépes adatfeldolgozás üzemi megjelenése változtatta meg az 1970-es években.

Eleinte az üzemi adatbázisok létrehozása, az aktuális üzemi adatok gyűjtése volt az elsődleges. Ilyen rendszerek létrehozásában jelentős szerepet játszottak a német ipar nagy cégei a *Siemens* és a *Bosch* (MDE/BDE).

A gyártásautomatizálási területen kezdetben az alacsony szintű logikai feladatokat huzalozott vezérlésekkel oldották meg, míg a szabályzókörok jellegzetesen hidraulikus vagy pneumatikus működtetésűek voltak. A gyártásirányítási dokumentáció papíralapú volt.

Az 50-es években elkezdődött a forgácsoló gépek rugalmas, programozható automatizálása. A robotizálás fejlődését a 70-es évektől kísérhetjük figyelemmel.

A fejlődésre nagy hatással volt a mikroprocesszorok gyors és tömeges elterjedése. A programozható berendezés-vezérlők közé tartozik:

1. programozható logikai vezérlők (PLC),
2. számjegyes vezérlő (CNC),
3. robotvezérlő (ROC),
4. mérőgép vezérlő (MMC),
5. osztott számítógépes szabályzó (DCS).

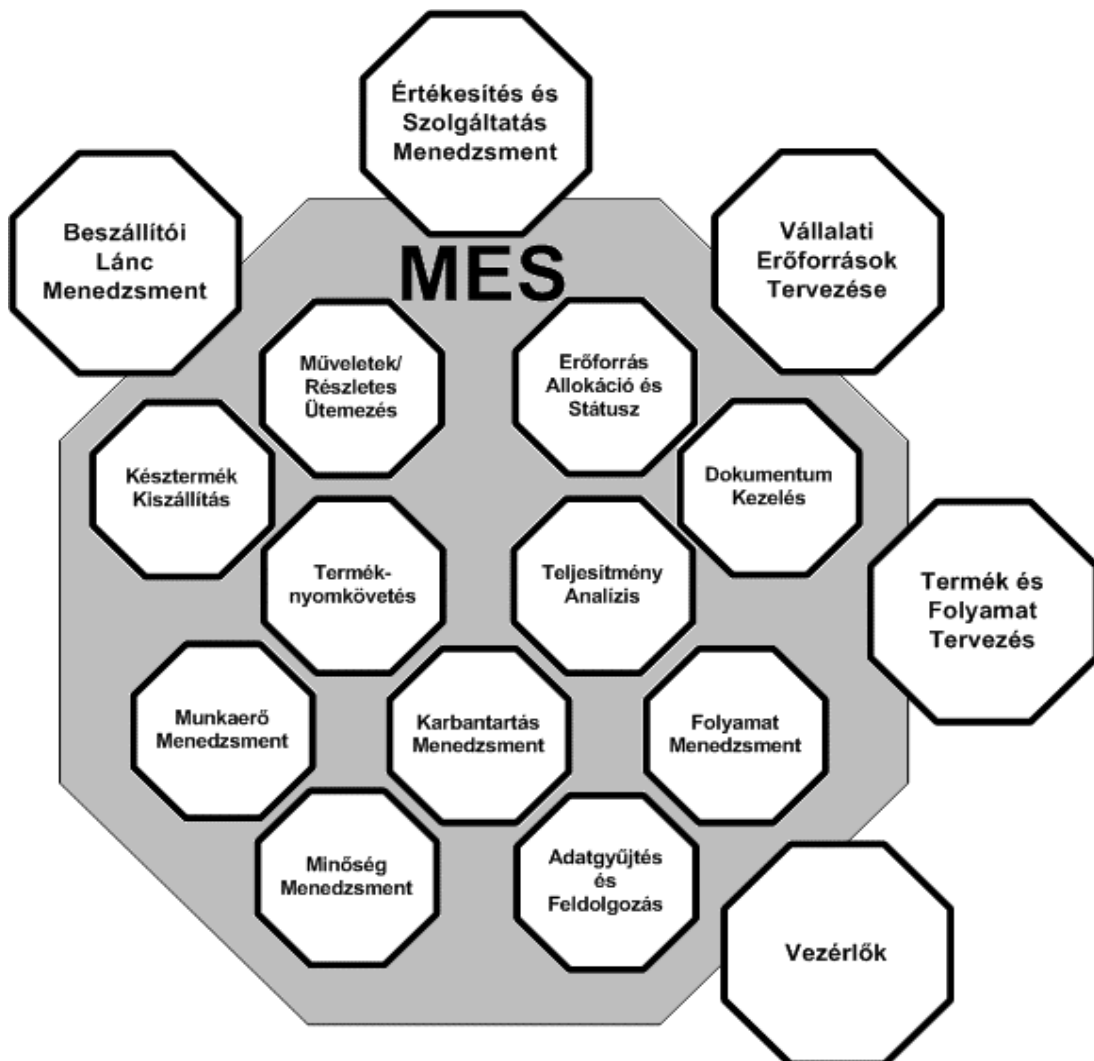
A 60-as években megjelent a *csoporttechnológia* (GT) fogalma, a 70-es években pedig a *rugalmas gyártórendszer* (FMS). Ezek a gyártási rendszerek a gyártásirányítást jelentősen átalakították.

A számítógépes hálózatok fejlődése, illetve az OSI 7 rétegű hálózati architektúrájának szabvánnyá válása megteremtette a lehetőséget az üzemi hálózatok kiépítésére. A *Boing* és a *General Motors* kezdeményezésére megjelent a

Manufacturing Automation Protocol, a MAP (1982). A szabványosított gyártási üzenetek küldésére kidolgozták a *Manufacturing Messages Specification*-t (MMS, 1986).

A karcsúsított gyártás (*lean production*) előtérbe helyezte a kevésbé automatizált, kézi munkahelyek beillesztését a CAM környezetbe. Az „éppen időben” gyártás (Just-in-Time, JIT) paradigmájának megjelenése Japánból indult, bevezetésének haszna megfelelő informatikai támogatással a minőség, a termelékenység és a hatékonyság növekedésében, a kommunikáció javulásában, valamint a költségek és veszteségek csökkenésében nyilvánul meg.

Az utóbbi évek eredményeként az amerikai DEC számítógépgyártó fejlesztőinek munkája egy új szoftver alkalmazási kategóriát hozott létre, amelyet gyártás végrehajtó rendszernek (*Manufacturing Execution System*, MES) neveztek.



6. ábra A MES funkcionális modellje

A MES műhelyszintű számítógépes gyártásirányítási funkciók olyan együttese, melynek feladata a termelési tevékenységek tervezése, irányítása és optimalása, a függő rendelések kezelésétől az eredmények jelentéséig.

A MES fő komponensei a következők:

- Függő, üzemi rendelések menedzselése.
- Technológiai folyamat-menedzsment.
- Termelési finomprogramozás, ütemezés, újra-ütemezés.
- A feladatok erőforrásokhoz rendelése, felszabadítása, kiadása.
- A termelési folyamatok nyomkövetése, adatgyűjtés.
- Üzemi minőségbiztosítás.
- Menedzser indexek számítása, aktualizálása, jelentése.
- Üzemi teljesítmény analízis, értékelés, beavatkozás.
- Műhelyszintű fenntartó és karbantartó feladatok, menedzselése.

Napjainkban a piac változásai és a vevők igényeinek gyorsabb változásai miatt ezek a MES funkciók egyre fontosabbá válnak. A MES alkalmazás legfontosabb motivációja a lokális lehetőségek és a globális üzleti célok összehangolása. A MES funkciókat megvalósító szoftvereket olyan intelligens felülettel látják el, amelyeken át az üzemi adatok elérhetők a felhasználók számára a műszakvezető mérnöktől a szakmunkásokig. A MES funkciók elvi sémáját a 6. ábra szemlélteti [39] alapján.

A MES funkciók tudományos kutatásának irodalma ma már igen nagy terjedelmű. A gyártásirányítás, a termelésstervezés és a technológia tervezés integrációja a CIM keretében kutatási terület a Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai tanszékén is [59].

2.3.2 A gyártásirányítás céljai

A gyártásirányítás célja általában a termelési folyamatok optimális irányítása gyakran változó erőforrás feltételek, feladatprioritások és üzleti célok között. Ez a definíció jól érzékelteti az irányítási feladat nehézségi fokát, különösen akkor, ha tudjuk, hogy az irányított szakasz (a műhely vagy gyártórendszer szintű termelési folyamat) nemlineáris, nem stacionárius, sok paraméterrel és sok állapotváltozóval modellezhető. Számos korlátozó feltételt kell figyelembe venni, és a célfüggvények is összetettek. Ha a modellparaméterek és/vagy a célok időben változnak, becsléseket és dinamikus újra-tervezési módszereket kell használni. Ilyen esetben a hagyományos modellek alkalmazására csak kevés esély van, mert a megoldások megtalálására csak korlátozott idő áll rendelkezésre.

Az üzem, gyártórendszer termelési „teljesítményét” menedzser indexek mérhetik. Ezek között elméleti szempontból is kiemelkedő szerepe van háromnak. Ezek:

- az erőforrások kihasználtsága,
- a szállítókészség, azaz a határidő betartása,
- a készletek vagy a folyamatban lévő munkák szintje (WIP level).

Ezek mellett természetesen számos közvetlen költségdimenziójú mutató vagy más üzemi jellemző is szerepet játszhat az irányításban.

2.3.3 *A bizonytalanságok kezelése*

A gyártásirányítás fő problémája a bizonytalanságok kezelése. Az operatív gyártásirányítás a célok elérése érdekében döntéseket hoz. Ezek a döntések lokálisak, így hatásuk a gyártóműhely egészére vonatkoztatott célokra nem szükségszerűen pozitívak. Számítógéppel integrált gyártási környezetben elkerülhetők a lokális döntések által bevezetett hibák. A bizonytalanságok kezelésére olyan eszközökre van szükség, amelyek a döntéshozatalt pótlólagos információ bevonásával kezelni tudják.

Egy tipikus MES feladat például a következő. Egy termék szerelésénél kiderül, hogy egyes rendelések prioritása üzleti okok miatt megváltozott. Új határidők keletkeznek, amelyek azonban csak akkor tarthatók, ha egyes hiányzó alkatrészcsoportok a szokásosnál gyorsabban legyárthatók vagy beszerezhetők.

A nem tervezett események korrekciója beavatkozásokat igényel. A beavatkozások területei:

- A műveletek allokációja gépekhez illetve munkahelyekhez valamint a job-ok ütemezése, legkorábbi és legkésőbbi indítási időpontok megváltoztatása.
- A gyártandó sorozatok nagyságának változtatása, sorozatok összevonása vagy szétbontása.
- A technológiai folyamatok megváltoztatása. Alternatív technológiák, alternatív műveleti sorrendtervek, alternatív műveletek és változó technológiai intenzitás alkalmazása.

Lényegesen javítaná az újraütemezés sikerének esélyeit, ha pontosan ismertek lennének azok a határok, amelyek a forgácsolási műveletek átfutási idejét csökkenthetik, változatlan minőségi színvonalon, de kissé növekvő szerszámfelhasználással, esetleg némileg nagyobb selejtkockázattal. Ez operatíván és

hatékonyan megvalósítható, ha alternatív NC programok vannak a DNC (*Distributed Numerical Control*) szerver archív könyvtáraiban, amelyek szimulátorral ki vannak próbálva, azonnal letölthetők és felhasználhatók. Ilyen alternatívákat azonban csak megbízható műszaki-gazdasági modellek alapján lehet készíteni.

A forgácsolási műveletek optimalizálása kapcsán az irodalomban számos modell és módszer található az idő vagy költség tekintetében optimális technológiai adatok meghatározására. Az ilyen módon megválasztott optimális technológiai adatoknak azonban csak elvi jelentősége van, mert a célok és a korlátok nem várt változása új és új szituációkat hoz létre. Ezeknek a problémáknak a megoldását segíti a technológiai intenzitás fogalmának bevezetése. A technológiai intenzitás olyan összetett (integrált) állapotjelző, amely a fizika transzport állapotjelzőihez hasonlóan a technológiai folyamat időbeli és más (pl. műveleti költségbeli) tulajdonságait egyszerre jellemzi.

Ismeretes például hogy nagyoló esztergálásnál az anyagleválasztás sebessége intenzitás típusú jellemző:

$$Q = d \cdot f \cdot v \text{ [cm}^3\text{/min]}, \quad (2)$$

amely közvetlenül befolyásolja a műveleti főidőt, a műveleti költséget, a szerszámok élettartamát, és szerszám költségeket. Az intenzitás szimulációs ellenőrzésére a későbbiekben még részletesen visszatérünk.

Összefoglalva megállapíthatjuk, a technológia tervezés és a gyártásirányítás integrációjában a technológiai műveletek tulajdonságainak variálása fontos szerepet játszik és ennek a kiterjesztett szimuláció fontos eszköze lehet.

3 A KITERJESZTETT SZIMULÁCIÓ KONCEPCIÓJA

3.1 A robusztus technológia fogalma

A termelés tervezés (CAPP, NCP) és a gyártásirányítás számára egyaránt fontos kérdés, hogy a megtervezett műveletek alkalmasak legyenek változó körülmények között is a termelési célok elérésére. A ma használatos CAPP, NCP és MES alkalmazások ilyen típusú műveltervezést és műveletirányítást alig támogatnak. Szinte minden a művelettervező mérnök kreativitására, illetve az NC gépkezelő szaktudására van bízva.

Új lehetőségek látszik az alternatív és robusztus technológiai tervek alkalmazása, amelyek ma még alig játszanak szerepet a termelési menedzsment gyakorlatban.

A robusztus vezérlés fogalma a folyamatirányítás elméletében (*Robust Process Theory*) tűnt fel. A robusztus vezérlés a bizonytalanságokat kezelni képes rendszerek analízisét és tervezését jelenti, különösen olyan körülmények között, ahol egzakt matematikai modellezés nem lehetséges.

Nemlinearitások majdnem minden rendszerben léteznek, így gyártórendszerekben is. Ezeket csak többváltozós, nemlineáris állapotegyenletekkel írhatjuk le. Gyártórendszerek robusztusságát alternatív (nemlineáris) technológiai tervek generálásával biztosíthatjuk.

Alternatív technológiai tervek alatt olyan a technológiai szempontból egymással egyenértékű technológiai terveket értünk, amelyek erőforrásban, szerszámban, intenzitásban, sorrendben különböznek, és eltérő menedzser indexeket eredményeznek.

Robusztus technológiai tervek alatt olyan technológiai terveket értünk, amelyek nem, vagy csak kevésbé érzékenyek műveleti idő vagy költség tekintetében a technológiai paraméterek változására.

Az adott tervek elkészítésekor mindig figyelembe kell venni a korlátokat. Az alternatív technológiai tervek mindegyikének ki kell elégítenie ezeket a feltételeket. Valamilyen szempont szerinti optimális technológiai tervről akkor beszélhetünk, ha a tervek valamilyen célfüggvény extrémumát (minimumát vagy maximumát) is garantálják. Ilyen célfüggvények például:

- minimális átfutási idő,
- minimális költség,
- maximális erőforrás kihasználtság.

Összetett célok esetében komplex célfüggvényeket is definiálhatunk, ahol az egyes célok valamilyen súllyal jelennek meg.

Az alternatív technológiai tervek egy keresési teret definiálnak. Ez a keresési tér lehet folytonos, diszkrét illetve hibrid (szigeteken belül folytonos). Az optimális megoldás megtalálása bonyolult feladat, gyakran zárt alakban nem adható meg a megoldás. Ilyen esetekben heurisztikus módszerek, *branch and bound*, illetve genetikus algoritmus segítségével található meg az extrémum. A megoldás gyakran kvázi-optimum.

Az optimális technológiai terv keresésekor felmerülő problémák a következők lehetnek:

- az optimális változat a modell paramétereinek függvénye. Ha ezek a paraméterek változnak, a célfüggvény optimuma nem garantált;
- az optimális változat a korlátoktól függ. Ha a korlátok változnak, a megoldás nem optimum, sőt, legrosszabb esetben nem is valósítható meg;
- az optimális változat az aktuális célfüggvényeknek felel meg. Ha ezek megváltoznak (üzleti, technológiai vagy egyéb okból), akkor a megoldás nem használható.

A rugalmas és adaptív technológiai tervek a következőképpen érhetők el:

- a termék- és technológiai tervezés korai fázisában *concurrent engineering* módszerekkel alternatív tervek készítésével;
- olyan robusztus technológiai terv elkészítésével, ami egyetlen formában készült el, de könnyen áttranszformálható a termelés-menedzsment aktuális követelményeinek megfelelően. Ez az APT processzor-posztprocesszor technikájának kibővítése;
- technológiai terv osztályok létrehozásával, ami futási időben képes technológiai terv példányokat generálni. (Ez az objektum orientált metodika

alapja). A csoporttechnológiai illetve az intenzitás alapú technológiai tervezés [59] ebbe a csoportba sorolható.

3.1.1 Alternatív NC program generálása

A legtöbb üzemben a CNC gépek programmal való ellátását számítógépes alkalmazások, NCP - vagy más néven CAD/CAM - rendszerek látják el. Ezek az alkalmazások az alkatrészek és szerszámok geometriai modelljein túl a szerszám pálya generálását támogatják. Ennek a feldolgozásnak az eredménye a Cutter Location Data fájl. A posztprocesszor feladata ebből a fájlból az NC vezérlő által értelmezhető kód előállítását. A hagyományos posztprocesszálás során a megmunkálás geometriai modellje változatlan marad. A generált NC programnak ki kell elégíteni az adott és rendelkezésre álló vezérlés által megkövetelt formai, szintaktikai szabályokat. A modern CAD/CAM rendszerek segítségével a technológiai szolgáltatások kibővíthetők. A felület és térfogat modellezés, a parametrikus tervezés, az alakajátosság (feature) alapú geometriai modellezés megteremtették a robusztus technológiai alternatívák generálásának lehetőségét. A hagyományos szimulációs feladatok kiterjesztésére van szükség, hogy az alternatívák „jóságát” kiértékelhessük.

3.2 Az integrált gyártásirányítás

A termelés tervezés, a technológiai folyamat tervezés és a valós idejű gyártásirányítás számítógépes támogatására ma viszonylag önálló alkalmazás modulokat használnak, amelyek integrációja üzemi számítógépes hálózati alkalmazásával valósulhat meg. Ehhez szükség van számítógépes hálózati szolgáltatásokra, alkalmazási interfészekre és a termelési folyamat modellek kompatibilitására. Ha a fő funkcionális modulok integrálási tendenciáit vizsgáljuk, szemmel láthatóan több párhuzamos folyamat figyelhető meg. A fejlődés bizonyos mértékig spontán zajlik, bár jelentős ISO szabványosítási törekvések is vannak. Az üzleti folyamatok számítógépes alkalmazási rendszerei a termelés tervezés hagyományos műszaki funkcióját már integrálták az ERP rendszerek keretében (SAP R3). A terméktervezés és a technológiai folyamat tervezés integrációjának alapja az alaktulajdonság (feature) alapú párhuzamos tervezés. Praktikus, modellezési okai vannak a geometriai modellezés és az NC programozás erős integrációjának (pl. a MasterCam, vagy a ProEngineer alkalmazásokban).

A gyártásirányítási funkciók integrációjánál két viszonylagos önállóságú terület a gyártási végrehajtó rendszer (MES) és a gyártási aktivitás kontrol (PAC) területe. Ezek a tartományok a számítógépes hálózati integrációnál jelentősen eltérő tulajdonságú

hálózati protokollokat használnak. A hagyományos CIM fogalom mára a CIMEM (*Computer Integrated Manufacturing Engineering and Management*) fogalomra bővült, amely a műszaki, üzleti és menedzsment funkciókat egy rendszerbe integrálja.

Az integrált rendszerek nagy előnye a megosztott hozzáférési lehetőség adatokhoz és erőforrásokhoz. A kiterjesztett szimuláció nyilvánvalóan integrált környezetben lesz a leghatékonyabb eszköz az NC műveletek tervezésének és megvalósításának támogatására.

3.3 A kiterjesztett szimuláció lehetőségei

A robusztus és alternatív technológiai tervek MES szintű felhasználásának célja a gyártásirányítás rugalmasságának növelése. Gyakorlati tapasztalat, hogy a termelésirányítás leggyakoribb célfüggvénye, a készletszint, a gépkihasználás és a szállítókészség optimalása közül leggyakrabban a szállítókészség, azaz a határidők betartása játssza a főszerepet. Ezt a mutatót elsősorban az elindított sorozatok átfutási ideje határozza meg. Ezt gyakran csak korlátozottan lehet befolyásolni az ütemezés dinamikájával. A műveleti idők ellenőrzött módosítása csak akkor lehet sikeres, ha a műveletek alternatívái előre megtervezettek. Az alternatív megoldások szintézise számítógépes modellezést és szimulációt igényel. A szimulációnak ki kell terjedni a műveletek technikai, geometriai aspektusán túl az erőforrások felhasználására és a teljesítés minőségére is.

A műhelyszinten felmerülő paraméterek a következők:

- minőségi paraméterek (felületi érdesség, alak-, és mérettűrések, selejtarány),
- szerszám paraméterek (szerszámkopás, költség),
- szerszámpanya bejárásának stratégiája,
- fogásmélység az alprogramokban (nagyoló ciklusok, makrók),
- anyagleválasztás intenzitása,
- előtoló illetve forgácsoló sebesség.

A robusztus NC programok elkészítésénél két jelentős módszer áll rendelkezésre:

1. Alternatív fogásmélység stratégia választása az anyagleválasztásra.
2. A különböző célfüggvényeknek és korlátoknak megfelelő optimális technológiai intenzitás megkeresése és lebontása forgácsolási paraméterekre.

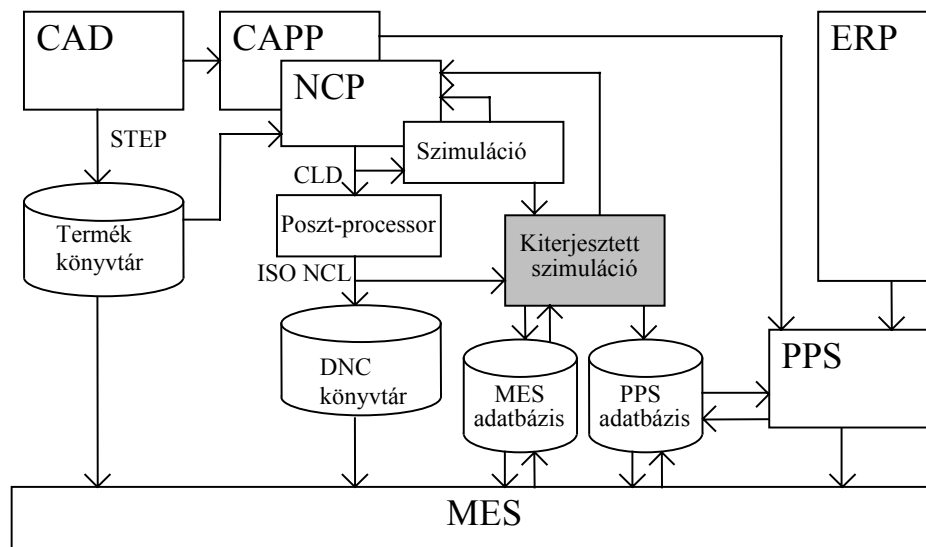
Az első módszernek elsősorban az alaksajátosság alapú makró programok használata esetén van jelentősége. A 80-as évektől fogva a jelentősebb CNC vezérlés gyártók (*Fanuc, Siemens*) ezekkel a makrókkal támogatják a gép melletti programozást (*Workshop Oriented Programming, WOP*). Ezek a makrók paraméteres alprogramok, és a paraméterek megváltoztatásával az alternatív NC programok könnyen elkészíthetők. A módszer előnye, hogy nincs szükség posztprocesszállásra, a célpontokat a CNC *executive* taszkja valós időben számítja. Hátránya viszont, hogy a célfüggvények csak a folyamat végrehajtása után értékelhetők ki.

A technológiai intenzitás alapú optimalálás során a folyamattervezés korai szakaszában meghatározható az optimális anyagleválasztási sebesség.

A kiterjesztett szimulátor célja az, hogy az NC program alternatívákhoz az említett paramétereket és menedzsment indexeket becsülje.

3.4 A kiterjesztett szimuláció integrálása CIM környezetben

A kiterjesztett szimuláció elsődlegesen a technológiai tervezés, az NC programozás során használható alternatív és robusztus művelettervek NC programok előállítására. Felfogható egy másodlagos poszt-processzállásnak is, amelynek során nemcsak a kód szintaktikája, hanem bizonyos határok között annak szemantikája, sőt pragmatikája is megváltozik. Különböző fogástervekkel, szerszám pályákkal, szerszám változatokkal, különböző intenzitással azonos geometriai, de jelentősen eltérő technológiai kimeneteket érhetünk el. A kiterjesztett szimuláció lehetővé teszi, hogy alternatív NC programokhoz menedzsment adatokat rendeljünk. Ezek az adatok a PPS adatbázisán keresztül a MES rendelkezésére állnak, és ez a MES rugalmas irányítási döntéseinek mozgásterét jelentősen kiterjesztheti. A 7. ábra a kiterjesztett szimuláció szerepét mutatja CIM környezetben.



7. ábra A kiterjesztett szimulátor szerepe CIM környezetben

4 AZ ESZTERGÁLÁS SZIMULÁCIÓRA ALKALMAS MODELLJE

4.1 Az esztergálási művelet felbontása műveletelemekre

A forgácsolási műveletek szimulációjánál alkalmazható modellek lehetséges 6 absztrakciós szintje a következő:

1. fizikai (physical) szint,
2. műveletelem (element) szint,
3. alaksajátosság (feature) szint,
4. művelet (operation) szint,
5. munka (job) szint,
6. rendelés (order) szint.

Az első három modellezési szinten a technológia fizikai folyamatai, a folytonos állapotjelzők játsszák a fő szerepet. Itt tehát olyan modellekre van szükség, amely az anyagleválasztás geometriai, kinematikai, dinamikai, fizikai tulajdonságait prezentálja. (Nem foglalkozunk itt most a további három szint modelljeivel, amelyek a eseményvezérelt diszkrét dinamikus modellezés (DES) hatáskörébe tartoznak.)

A forgácsolás elmélet, a technológiai tervezés elmélete, valamint a számítógépes NC programozás által kidolgozott eljárások alkalmasak a modellezési feladatok egy részének megoldására. Ezek geometriai és fizikai modellek. A hagyományos megoldások azonban nem támogatják a forgácsolási műveletek műszaki-gazdasági modellezését és szimulációját. A felmerülő nehézségek okai a következők:

- A modelleknek nagyszámú bemeneti, kimenő és belső változót kell kezelni.
- A változók közötti kapcsolatokra számos esetben nincs megbízható elméleti eredmény.

- Az anyagtulajdonságok figyelembevétele igen nehéz, csak empiriával lehetséges.
- A részfolyamatok között néhány csak sztochasztikus változókkal írható le.

A nehézségek áthidalására a számítógépes modellezés általános, sikeres módszerei nyújtanak reményt. Ilyen módszerek a következők:

1. Az objektum orientált modellezés következetes alkalmazása.
2. Az AI módszerek alkalmazása a nemlinearitások kezelésére.
3. Az állapotegyenletek használata a dinamikus folyamatleírásra.
4. A komponensekre épített szoftverfejlesztés.
5. A grafikus szemléltetés és az interaktív ember-gép együttműködés kihasználása.

A komplex szemléletnél a modellezési absztrakciós szintek között kiemelkedő szerep jut az alaksajátosság szintnek. Ezen a szinten lehet a legnagyobb valószínűséggel olyan modellt konstruálni, amely egyfelől kihasználja a fent felsorolt számítógépes technológiai előnyöket, másrészt lehetővé teszi az alacsonyabb és a magasabb szinteknek megfelelő modellek felépítését.

Az esztergálási műveletelemek részletes folyamat modelljére számos korábbi technológiai és NC programozó rendszerben készültek modellek. Különösen a generatív és a vario-generatív művelettervező alkalmazások tartalmazzak ilyeneket. Ezek között részletességével és hatékonyságával kiemelkedik a TAUPROG T rendszer modellje [61].

Az általam kidolgozott modell 3 lényeges tulajdonságában tér el a korábbiaktól. Ezek a következők:

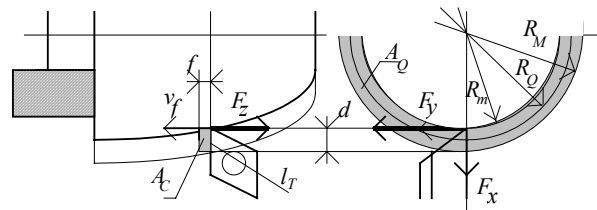
- Az anyagleválasztás geometriájának modellezésében a térfogati modell és a forgácsolási intenzitás alkalmazásának elvét követi, és a megtervezett NC program pontos szerszámpálya adataira támaszkodik.
- A technológiai jellemzők tekintetében a nemlineáris modellrészeknél AI módszereket, főként neurális hálót használ.
- A műveletelemek aggregálható (integrálható) indexeit, amelyek kulcsfontosságúak a műveletek gazdasági-menedzseri értékeléséhez, numerikus integrálási módszerekkel, viszonylag pontosan állítja elő.

4.2 A forgácsolási műveletelem

Az esztergálás műveletelem szintű modelljét, amely alkalmas folyamat menedzselési döntések támogatására is, a következő alfejezetek foglalják össze.

4.2.1 Geometriai viszonyok

Az esztergálás geometriai viszonyait mutatja a 8. ábra.



8. ábra Az esztergálás geometriai modellje

Az esztergálási középátmérő:

$$D_Q(t) = \frac{1}{2} \cdot (D_M + D_m), \quad (3)$$

ahol $D_m(t)$ a szerszám származtató felülete által súrolt pillanatnyi legkisebb átmérő. $D_M(t)$ az aktuális anyaghatároknak megfelelő pillanatnyi legnagyobb átmérő, ami munkadarab-geometria függő.

A pillanatnyi fogásmélységet a szimulátor számítja:

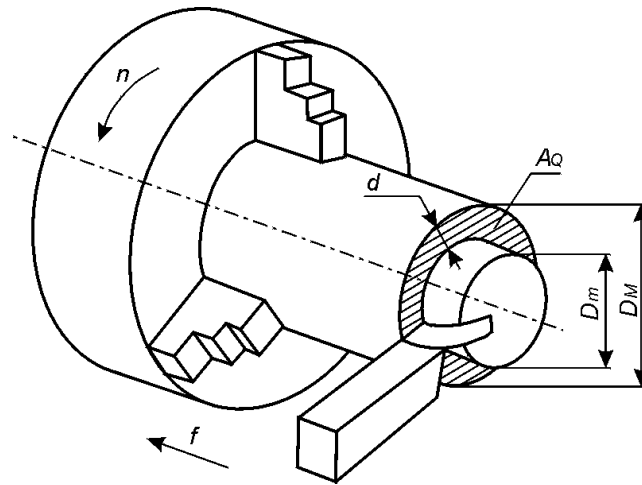
$$d(t) = \frac{1}{2} \cdot (D_M - D_m). \quad (4)$$

Az elemi anyagleválasztási térfogat számítása érdekében bevezetem a *forgácsolás hatáskeresztmetszetének* fogalmát. A forgácsolás hatáskeresztmetszete dinamikus, időben változó geometriai entitás. Definíciója a következő:

Forgácsolásnál a szerszám származtató felülete által meghatározott szerszámtest a szerszám pályán halad. A szerszámtestet a pillanatnyi előtolás irányára merőleges síkra vetítve, az fedésbe hozható a munkadarab aktuális anyagi kiterjedését jellemző ugyanezen síkbeli alakzattal. A két alakzat közös metszete a pillanatnyi forgácsolási hatáskeresztmetszet.

A forgácsolási hatáskeresztmetszet absztrakt állapotjelző. A szerszám származtató felülete és a szerszámtest fogalmát felhasználva kiküszöböli az anyagleválasztási folyamat egy főorsó fordulaton belüli változásait. Ez azért fontos,

mert ily módon a hatáskeresztmetszet tetszőleges sokélú forgácsoló szerszám esetén is jól használható.



9. ábra A forgácsolás hatáskeresztmetszete

Esztergálásnál a pillanatnyi hatás-keresztmetszet:

$$A_Q(t) = D_Q \pi d = \frac{\pi}{4} \cdot (D_M^2 - D_m^2) \text{ [mm}^2\text{]}. \quad (5)$$

A pillanatnyi hatáskeresztmetszet jelentősége abban áll, hogy teljesen általánosan:

$$Q(t) = A_Q(t) \cdot v_f(t) \text{ [cm}^3\text{/min]}. \quad (6)$$

Meg kell jegyezni, hogy a fenti összefüggés szigorúan csak akkor igaz, ha a hatáskeresztmetszet minden pontja ugyanazzal a v_f előtoló sebességgel halad. Pályavezérlésnél ez általában nem teljesül, ha szerszám-pálya tér- vagy síkgörbe. A mai NC forgácsolási gyakorlatban a fősíkbeli körpálya (körinterpoláció) programozása gyakori. Ilyenkor a hatáskeresztmetszet különböző pontjai különböző előtoló sebességgel haladnak. Ebben az esetben:

$$Q(t) = A_Q(t) \cdot v_{sf}(t), \quad (7)$$

ahol v_{sf} a hatáskeresztmetszet statikai középpontjának előtoló sebessége.

Esztergálásnál a pillanatnyi főorsó fordulatra eső előtolás:

$$f(t) = \frac{v_f}{n} \text{ [mm/fordulat]}. \quad (8)$$

A pillanatnyi forgácskeresztmetszet:

$$A_c(t) = d(t) \cdot f(t) \text{ [mm}^2\text{]}. \quad (9)$$

A pillanatnyi (az él mentén átlagos) forgácsvastagság:

$$h_c(t) = \frac{A_c}{l_T} \text{ [mm]}, \quad (10)$$

ahol $l_T(t)$ a pillanatnyi, fogásban lévő szerszám élhossz, ami szerszámgeometria függő.

4.2.2 Kinematikai viszonyok

A pillanatnyi közepes forgácsolási sebesség:

$$v(t) = D_Q(t) \cdot \pi \cdot n \text{ [mm/min]}, \quad (11)$$

ahol n [fordulat/min] a pillanatnyi főorsó fordulatszám.

A pillanatnyi előtoló sebesség:

$$v_f = n \cdot f \text{ [mm/min]}, \quad (12)$$

ahol f [mm/fordulat] a fordulatonkénti előtolás.

4.2.3 Dinamikai viszonyok

A fő forgácsoló erő:

$$F_y(t) = k_q \cdot A_c(t) \text{ [N]}. \quad (13)$$

Itt k_q a fajlagos forgácsoló erő, ami a forgácsvastagságtól és a szerszámanyagtól függ.

Az ipari gyakorlatban az empirikus képletek igen gyakran használatosak:

$$F_y(t) = C_F \cdot f^{y_F} \cdot d^{y_d} \cdot \prod_i K_i \text{ [N]}. \quad (14)$$

Itt C_F a szerszámanyagtól és geometriától függő erőállandó, K_i korrekciós tényezők, a hűtés, a nyersdarab, a befogás minőségének leírására.

A pillanatnyi előtolás irányú erő szerszámanyag- és geometria függő:

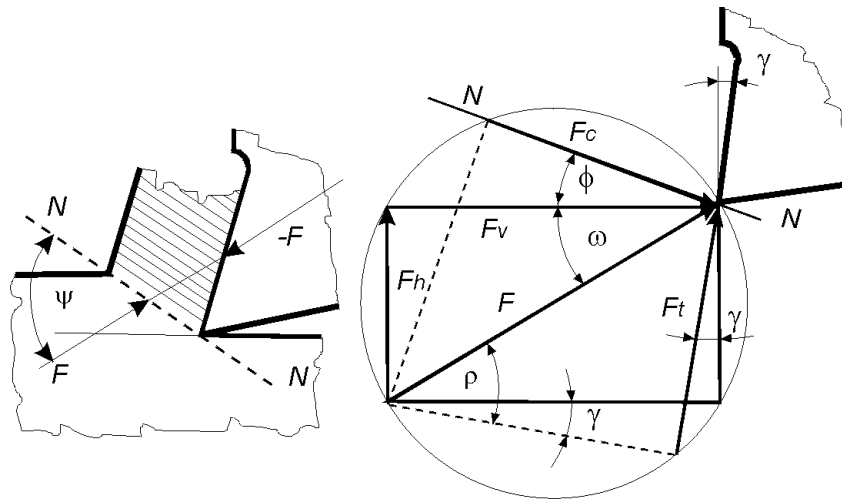
$$F_x = \lambda_x (\text{szerszám jellemzők}) \cdot F_y \text{ [N]}. \quad (15)$$

Hasonlóan a pillanatnyi fogásvétel irányú erő:

$$F_z = \lambda_z (\text{szerszám jellemzők}) \cdot F_y \text{ [N]}, \quad (16)$$

ahol λ_x és λ_z tapasztalati paraméterek és a szerszám illetve a forgácsolás geometriai viszonyától függenek.

A forgácsoló erő komponensek és a forgácsolás nyírási szögének klasszikus kapcsolatát a 10. ábra szemlélteti. A ma használatos nagy szilárdságú szerszámanyagok esetében általában a főforgácsoló erőkomponens szerepe döntő.



10. ábra a) Az erők egyensúlyi vázlat a) b) Az erőfelbontás vázlat a) [3]

A fogácsoló nyomaték:

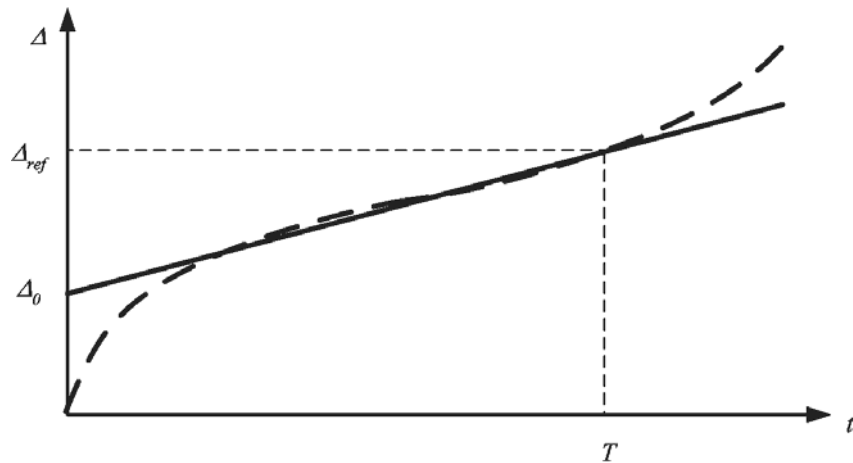
$$M(t) = \frac{1}{2} D_Q \cdot F_y \cdot 10^{-3} \text{ [Nm]}, \quad (17)$$

és a teljesítmény:

$$P(t) = M \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n \text{ [Nm/s]}. \quad (18)$$

4.2.4 Technológiai viszonyok

A technológiai viszonyok modellezésére analitikai modellt készíteni nem érdemes. A mechanikai alakváltozások, a súrlódások részletei ésszerű méretű modellekkel általánosan nem követhetők. Erre a célra csak empiria áll rendelkezésre. A legfontosabb technológiai állapotjelző a szerszám éltartama. Stacionárius forgácsolás esetén modellezésre a Taylor egyenlet (26) a legalkalmasabb, ha a forgácsolási adatok bizonyos határok között vannak. Nem stacionárius forgácsolás esetén a kísérleti tapasztalatok szerint egy terhelésfüggő lineáris modell is használható. Ez a modell a szerszámnyagtól és a terheléstől függő kopási sebességet (v_Δ) használja állapotjelzőként. A szerszám terhelés jellemzésére a bevonatos lapkánál a (19) egyenlettel leírható absztrakt „terhelés” fogalom használható.



11. ábra A szerszámkopás-görbe linearizációja

Definiáljunk egy a szerszám terhelésére jellemző állapotváltozót a következő formulával:

$$L_T = (d^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot v)^q . \quad (19)$$

Az összefüggésben a kitevők a Taylor egyenlet ismert kitevői:

$$q = 1/m \approx 4, \quad x_v \approx 1, \quad y_v \approx 0,75 . \quad (20)$$

A szerszám hátlap kopásának sebessége széles tartományban:

$$v_\Delta = k_\Delta (\text{szerszám anyag}) \cdot L_T \quad [\text{mm/min}], \quad (21)$$

ahol:

$$k_\Delta = \frac{\Delta_{ref}}{C_v^q} . \quad (22)$$

Itt C_v a Taylor egyenlet munkadarab és szerszám anyagtól függő konstansa, Δ_{ref} a megengedett hátlapkopás.

Ezek segítségével a halmozódó kopás változó $v_\Delta(t)$ esetén is számható:

$$\Delta(t) = \Delta_0 + \int_0^t v_\Delta(t) dt . \quad (23)$$

Ha a megengedett hátlapkopást (Δ_{ref}) előírjuk, mint a szerszám éltartam kritériumát, akkor ezt relatív skálán is mérhetjük:

$$\delta(t) = \frac{\Delta(t)}{\Delta_{ref}}, \quad 0 \leq \delta \leq 1, \quad (24)$$

és a szerszám elhasználódott, ha $\delta = 1$.

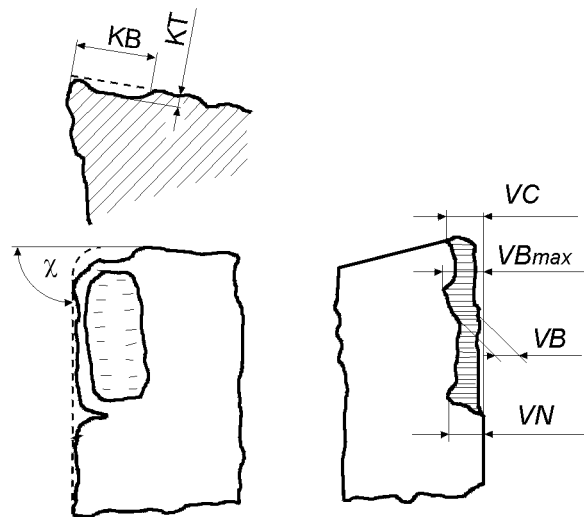
Stacionárius forgácsolás esetén $v_\Delta = \text{constans}$, és ha $\Delta_o \approx 0$, akkor

$$\Delta_{ref} = \int_0^T v_\Delta(t) dt = v_\Delta \cdot T = k_\Delta \cdot L_T \cdot T = \Delta_{ref} \cdot \frac{(d^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot v)^q}{C_v^q} \cdot T \quad (25)$$

Innen tehát stacionárius estben az ismert Taylor összefüggést kapjuk:

$$T^m = \frac{C_v}{d^{x_v} f^{y_v} v} \quad (26)$$

Ez a modell statisztikus modellezésre is alkalmas, ha k_Δ -t valószínűségi változóként modellezzük exponenciális (vagy más) eloszlással.



12. ábra Esztergakés kopásformák [2]

A technológiai viszonyok modellezésére szolgál az öngerjesztett rezgési hajlam becslése. Az öngerjesztéses állapot a munkadarab és a szerszámgeometria mellett a gép-befogó-munkadarab-szerszám rugalmas mechanikai rendszer tulajdonságaitól is függ. Itt a modellezés számára három út járható:

- Mérési adatok alapján szimulációs időben működő dinamikai modell felépítése.
- Stabilitási kártya leképzése a modellbe.
- Neurális háló használata a hajlam becslésére.

A szimulációs feladatra ez utóbbi tűnik a legalkalmasabbnak.

A felhasznált forgácsolási energia a forgácsoló erő modellje segítségével:

$$E_c(s) = \int_0^{t_c} P(t) dt . \quad (27)$$

A forgácsolással eltöltött idő:

$$t_c = \int_0^s \frac{ds}{v_f(ds)} , \quad (28)$$

ahol d_s a szerszám-pálya elemi ívhossza.

A várható közepes felületi érdesség (\bar{R}_a), a várható átlagos méretpontosság ($\bar{\delta}_m$), várható átlagos alakhúság ($\bar{\delta}_a$) illetve a várható selejtarány (p_s) modellezése nagyon nehéz. A kiterjesztett szimulátor koncepciójánál mesterséges intelligencia módszerek alkalmazását választottuk a modellezéshez. Így létező gépek esetén, mérések mintái alapján, neurális háló betanításával van esély ezeknek a változóknak a becslésére.

Ha korrekt adatfelvétellel a fenti változók mért értékeit a hozzátartozó NC program geometriai és technológiai adataival összevetjük, olyan mintához jutunk, amely alkalmas neurális háló betanítására. Erre a kérdésre a későbbiekben még visszatérünk.

4.3 Az esztergálási művelet műszaki-gazdasági modellje

4.3.1 A folyamat minősítési lehetőségei

Az esztergálási folyamat értékeléséhez nélkülözhetetlenek a műszaki-gazdasági állapotjelzők, és ezek integrált, vagy átlagos értékei.

Az integrált, vagy más néven aggregált állapotjelzők:

$$K_i = \int_0^T F_i(x_1, \dots, x_n) dt \quad (29)$$

alakúak, ahol az x_1, \dots, x_n állapotjelzőket a szimulátor folyamatosan számítja. Az átlagos állapotjelzők:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) dt \quad (30)$$

alakúak. Fontosak lehetnek az állapotjelzőknek a művelet ideje alatt felvett maximális (esetleg minimális) értékei is:

$$x_{i \max} = \text{Max}_{t=0 \rightarrow T}(x_i(t)) . \quad (31)$$

A technológiai alternatívák összehasonlítása és kiértékelése bizonyos *menedzsment indexek* ismeretét követeli meg. Ilyenek például:

- műveleti költség és idő,
- felhasznált szerszámok listája, mennyisége, költsége,
- gép típusa (a posztprocesszor nevének megadásával), leterheltsége,
- forgácsolási nyomaték, teljesítmény,
- felhasznált energia,
- elért felületi érdesség, méretpontosság, selejtarány.

Ezeket az indexeket, amelyek vagy integrált vagy átlagos állapotjelzők, a szimulátor viszonylag pontosan számítani tudja numerikus integrálással.

4.3.2 Az intenzitás jelentősége

A technológia intenzitás fogalmát az irodalom egyre szélesebb körben használja. Az erre alapozott éltartam számítások *Raviani* és *Tipnis* munkáiból ismertek. Költség és/vagy műveleti idő optimalásra Tóth Tibor dolgozott ki új módszert [59]. Vizsgálataiból kiderült, hogy egy célszerűen megválasztott új változó, nevezetesen az *egységnyi idő alatt leválasztott anyagterfogat* az optimalási feladatot áttekinthetőbbé és könnyebben kezelhetővé teszi. A bevezetett módszer egyúttal a robusztus technológiai tervezést is támogatja, hiszen az előidejű tervezés során az egyes forgácsolási paramétereket nem rögzíti le, azok bizonyos korlátok között rugalmasan származtathatók az optimális intenzitásból.

További előnye a módszernek, hogy csoporttechnológia alkalmazásakor az optimális intenzitást elegendő a vezérdarabra meghatározni, a számított intenzitás az egész csoportra érvényes.

4.3.3 Az intenzitás kiterjesztett értelmezése esztergálásnál

Definíció: Nagyoló forgácsolási műveletek esetén a technológiai folyamatot a forgácsolás intenzitásával jellemezhetjük, amely a pillanatnyi forgácsolási hatáskeresztmetszet és a hozzátartozó statikai középpont előtolási sebességének szorzata.

Ezt a definíciót a forgácsolási intenzitás kiterjesztésének tekinthetjük, amely nem csupán esztergálásra érvényes. A Tóth Tibor és munkatársai által kidolgozott módszer [59] a fogásmélység kvázi-optimális értéket heurisztikusan rögzíti. A hatáskeresztmetszetre alapozott definíció bonyolult ráhagyás alakzat esetén is érvényes.

Ezek alapján:

$$Q = A_Q \cdot v_f \text{ [cm}^3\text{/min]} . \quad (32)$$

Esztergálás esetén az összefüggés a következőképpen alakul:

$$Q = A_Q \cdot v_f = D_Q \cdot \pi \cdot d \cdot v_f = D_Q \cdot \pi \cdot d \cdot n \cdot f = v \cdot f \cdot d = A_c \cdot v . \quad (33)$$

Az intenzitás tehát mind a hatáskeresztmetszet, mind a forgácskeresztmetszet, mind a három klasszikus forgácsolási paraméter pillanatnyi értékei alapján számítható.

Az intenzitás hatáskeresztmetszet alapú értelmezése többélű szerszámmal végzett forgácsleválasztásnál (például marás) nagy jelentőségű. Ebben az esetben forgácskeresztmetszet alapú megközelítésnél a pillanatnyi leválasztott anyagterfogat a foganként leválasztott térfogatok összegeként adódik. Figyelembe véve azt a tényt, hogy ezekben az esetekben a forgácskeresztmetszet is bonyolult alakú, így szimulációs számításokhoz a bevezetett formula előnyösebben alkalmazható.

4.3.4 Optimális forgácsolás

Az optimális forgácsolási paraméterek meghatározása klasszikus probléma. A feladat matematikai modelljét [57] a következőképpen fogalmazza meg:

$$U = \{u_i\}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (34)$$

$$S = \{s_j(\mathbf{u})\}, \quad j = 1, \dots, J; \quad \mathbf{u} \subset U, \quad (35)$$

$$C = \{c_k(\mathbf{u}, \mathbf{s})\}, \quad k = 1, \dots, K; \quad \mathbf{s} \subset S, \quad (36)$$

$$E = \{e_j(\mathbf{u})\}, \quad (37)$$

$$\Phi = \{\phi_m(\mathbf{u}, \mathbf{s})\}, \quad m = 1, \dots, M, \quad (38)$$

ahol:

U – a technológiai paraméterek halmaza,

S – az állapotváltozók halmaza,

C – a termelési célfüggvények halmaza,

E – az állapotegyenletek halmaza,

Φ – a korlátozó relációk halmaza.

A probléma megoldására számos módszert javasoltak. Különösen figyelemre méltó a Tóth Tibor, Detzky Iván és Erdélyi Ferenc által javasolt megoldás [59], ami technológiai intenzitás optimalására vezeti vissza a feladatot. A módszer a hatáskeresztmetszet alapú intenzitás megközelítéssel kiegészítve szimulációs feladatokra alkalmas, ugyanakkor támogatja a robusztus gyártást.

4.3.5 Robusztus esztergálási művelet

Az esztergálási művelet robusztusságát a technológiai intenzitás optimalálásán alapuló tervezési módszerrel lehet biztosítani. A kiszámított Q^* optimumot számos d, f, v paraméterre bonthatjuk le. A dekompozíciónál figyelembe kell venni bizonyos technológiai korlátokat, azonban a lehetséges változatok száma még így is elegendően nagy. Nyilvánvalóan, az egyes paraméterek különbözőképpen befolyásolják a menedzser indexeket, ezért fontos, hogy ezeket az indexeket az NC program verziókhöz hozzárendeljük.

Az alternatív programok generálásánál fontos szerepet játszik annak az informatikai támogatottsága. A modern CNC vezérlők támogatják a paraméterezhető makrók futtatását, illetve az NCP alkalmazások interaktív grafikus felületet biztosítanak a paraméterek megadására. Ezekkel a technikákkal a különböző NC programverziók elkészítésének időigénye lerövidül.

A létező NCP alkalmazások illetve NC szimulátorok esetén nincs lehetőség a menedzser indexek számítására. Szükséges tehát a megfelelő modellek, illetve a modelleken alapuló számítógépes szimulátor kifejlesztése. Ez a szimulációs technika kiterjesztésének tekinthető, ami a szimulátorok új generációjának megjelenéséhez vezet.

4.4 A folyamatjellemzők modellezése

A műveletelem várható forgácsolási ideje:

$$t_m = t_c + t_r + t_i, \quad (39)$$

ahol t_r a gyorsmenettel megtett utakhoz szükséges idő, t_i az előtolás nélkül felhasznált idő (például szerszám váltás és szerszámcsere idő). A forgácsolással eltöltött műveletelem ideje, t_c , az NC program, tehát a geometriai modell alapján nagyon pontosan számítható.

A műveletelem várható költsége csak az adott környezet (cég) érvényes adatainak és konvencióinak figyelembevételével számítható. A műveletelem szinten használható modell:

$$C_\Sigma = C_m + C_t = c_w \cdot t_m + \frac{t_m}{T} (c_w \cdot t_{ch} + C_T), \quad (40)$$

ahol c_w egy perc munka fajlagos költsége, C_T az egy cserére jutó szerszámköltség, t_{ch} a szerszám csere idő, C_t a műveletelemre jutó szerszámköltség.

A művelelem átlagos anyagleválasztási intenzitása:

$$\bar{Q} = \frac{V}{t_c}, \quad (41)$$

ahol V a munkadarabról az adott művelelem alatt leválasztandó anyagtérfogat [cm³].

Az optimális technológiai intenzitás a technológiai korlátok figyelembevételével meghatározható. A [59]-ben leírt modell alapján:

$$\tau = \frac{C_\Sigma}{V \cdot c_w} = \frac{1}{Q} + \frac{\bar{Q}^{q-1}}{R^q}, \quad (42)$$

ahol:

$$R = \frac{d^{1-x_v} \cdot f^{1-y_v} \cdot C_v}{t_H^m}, \quad (43)$$

és:

$$t_H = \frac{C_t}{c_w} + t_{ch}. \quad (44)$$

A költség-optimális intenzitás állandó fogásmélység és előtolás (vagy azzal egyenértékű erő) korlát esetén a következőképpen számítható:

$$Q^* = \frac{R_M}{(q-1)^m}, \quad (45)$$

ahol:

$$R_M = \frac{d^{1-x_v} \cdot f_{\max}^{1-y_v} \cdot C_v}{t_H^m}. \quad (46)$$

A menedzsment számára fontos jellemző lehet a gyártásirányítás határfoka. Vezessük be az alkalmazott technológia hatékonyságát intenzitás szempontjából leíró jellemzőt:

$$\eta = \frac{\bar{Q}}{Q^*}. \quad (47)$$

Mivel az optimális Q^* az érvényes korlátoktól (R_M) függ, az optimális intenzitás akár megmunkált szakaszonként is változhat. Egy szerszámmal több, különböző ráhagyás alakzatot (feature-t) is megmunkálhatunk, különböző R_M korlátokkal. Az η intenzitási határfoknak következésképpen van pillanatnyi értéke, lehet átlagos értéke egy művelelemre (fogásra), egy ráhagyásalakzatra, vagy egy NC program szegmensre. Értelmezése kiterjeszhető egy teljes NC programra is, de itt a több

szerszámra értelmezett átlag a részleteket elrejtheti. Az átlagos forgácsolási intenzitásra is érvényesek korlátozások:

$$Q_m \leq \bar{Q} \leq Q_M. \quad (48)$$

A Q_M maximális intenzitás abból a feltételből számítható, hogy az aktuális szerszám éltartama semmiképpen sem csökkenhet a műveletelem vagy programszegmens forgácsolási főideje alá. A mai NC technológiai gyakorlatban a művelet futása közbeni szerszámcsere szigorúan kerülendő. Szerszámköltség megtakarítás céljából az intenzitás csökkenthető, ha a gép kapacitása egyébként sincs leterhelve, tehát a kisebb intenzitás nem okoz szűk keresztmetszetet a gyártásirányításban. A Q_m minimális intenzitás ilyenkor τ értékének tapasztalatilag elfogadható maximumából adódik:

$$Q_M = \frac{V}{T} = V^{\frac{m}{m-1}} \cdot \frac{1}{R_M^{\frac{1}{m-1}} \cdot t_H^{\frac{m}{m-1}}}, \quad (49)$$

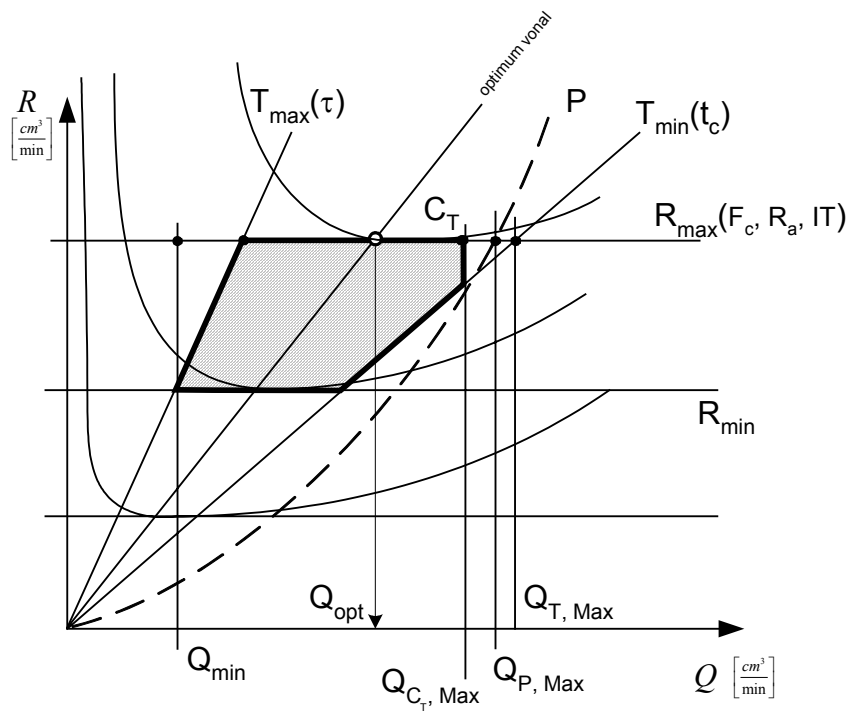
$$Q_m \cong \frac{1}{\tau_{max}}. \quad (50)$$

Ezekkel az értékekkel:

$$t_{c \ min} = \frac{V}{Q_M}, \quad (51)$$

$$t_{c \ max} = V \cdot \tau_{max}. \quad (52)$$

Ennek a gondolatmenetnek fontos eredménye tehát, hogy a Q határainak ismerete lehetővé teszi a költségtartalék aktuális és maximális értéke, a minimális műveletelem idő, az időtartalék, és a hozzátartozó intenzitás, valamint az éltartam szinkronizálás hatásfokának mérését. Ez jelentősen növeli a gyártásirányítás mozgásterét, és elősegíti a rugalmas gyártásirányítás megvalósítását. Ha az éltartam minimális értékét korlát feltételnek írjuk elő, vagy a gép teljesítménye korlátozott, akkor az NC programban kódolt aktuális \bar{Q} intenzitást $Q_{T,Max}$ és $Q_{P,Max}$ aktuális értékével is össze kell vetni (lásd 13. ábra). Ez a fent részletezett modell esetén már nem okoz gondot.

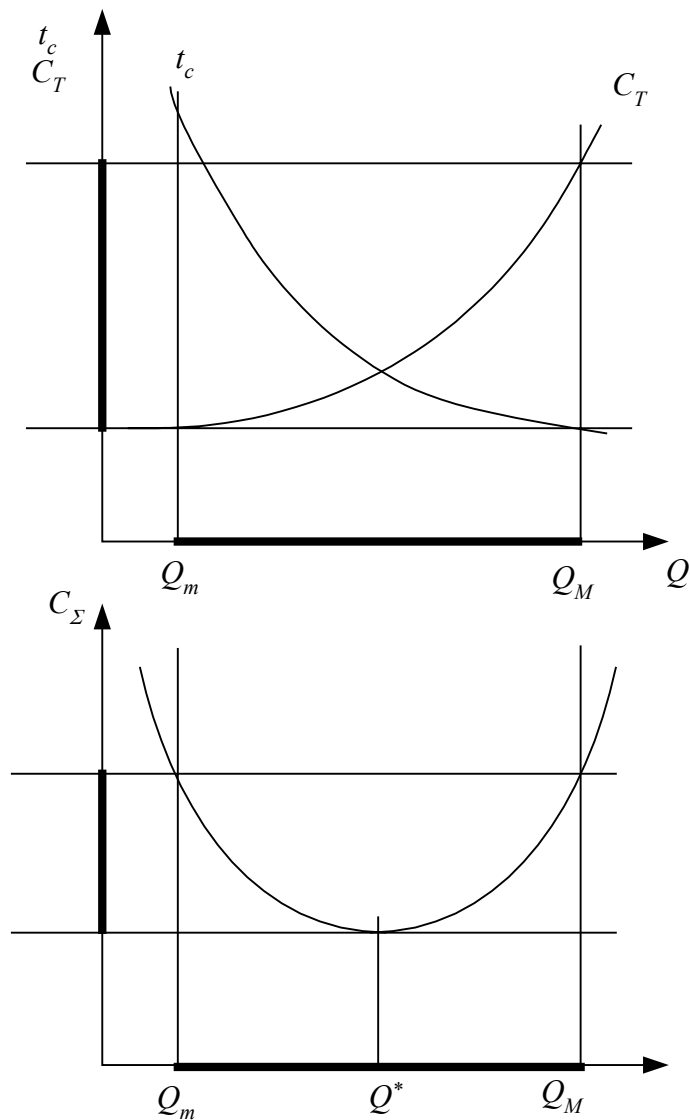


13. ábra A technológiai intenzitás optimális értékének környezete

A döntéshozatal magasabb szintjei irányában ez a modell jól aggregálható. Az aggregálás olyan komplex modell-funkció, amely az alacsonyabb szintű modell adataira építve állítja elő a magasabb szintű modell jellemzőit. A műveletelemek aggregálása idő és költség-vonatkozásokban additív. A 14. ábra a fogácsolási idő, a szerszámköltség és összköltség alakulásának jellegét az optimális technológiai intenzitás környezetében mutatja.

Az alacsonyabb szint modelljének irányában dekompozícióra van szükség. Mivel a modell belső kapcsolatai nemlineárisak, a dekompozíció körültekintést igényel.

A modell pontossága a nemlineáris részmodellek miatt csak konkrét esetekben becsülhető. Fontos szempont lehet a részmodellek kimenő jellemzőinek mérhetősége. A modell validálása végül csak laboratóriumi kísérletekkel végezhető el.



14. ábra A fogácsolási idő, a szerszámköltség és összköltség alakulása az optimális technológiai intenzitás környezetében

4.5 Az analitikus és empirikus modellezés hátrányai

A különböző modellek összehasonlításakor meg kell jegyezni, hogy önmagában egyik modellezési módszer alkalmazása sem nyújtja a mérnökök által elvárt eredményt. Az analitikus modellek a megfigyelt viselkedések leírására fizikai, mechanikai, anyagtudomány területéről származó összefüggéseket állítanak fel. Az analitikus módszerek „finomsága” nagyon különböző lehet, és ez behatárolja az alkalmazhatóságukat és pontosságukat. Az analitikus modelleknek két fő fajtája van. Az egyik nyírási síkban vagy zónában ébredő erők egyensúlyából indul ki. A másik a

mechanisztikus modell, amely nem tekinthető tisztán analitikusnak. Az ilyen modellek hibájaként felróható, hogy a sztochasztikus folyamatokat – ide tartozik például a szerszám és forgács között fellépő súrolódás - nem kezelik pontosan. A felírt modellek erősen egyszerűsítettek, gyakran csak egyszerű, egyélű szerszámra érvényesek, és figyelmen kívül hagyják a szerszám lekerekítési sugarának hatását, stb. A kapott eredmények pontossága nem minden esetben megfelelő.

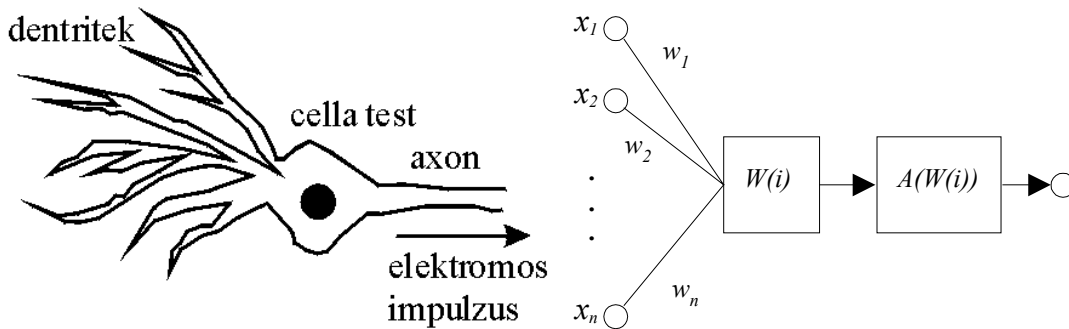
Az empirikus modellek elsősorban egyszerűségük és könnyű alkalmazhatóságuk miatt kedveltek. Ide tartozik például a Taylor-féle szerszám éltartam egyenlet (26), ami hatványfüggvény alakban modellezi az összefüggéseket. Hátránya az empirikus módszereknek, hogy a forgácsolási folyamat összefüggéseit mélységében nem vizsgálja. Ha egy új forgácsolási paramétert kell bevezetnünk a hatványfüggvény alakú összefüggésbe, akkor az egész kísérleti adatgyűjtési folyamatot meg kell ismételni. Hasonlóan kell eljárni, minden új szerszám-munkadarab anyagpár esetén. Tekintettel a műhelyekben használt nagyszámú munkadarab és szerszám anyagra, ez a feladat hatalmas lehet. Az empirikus módszerek hibája, hogy nem biztosít olyan mechanizmust, ami lehetővé tenné, hogy a modell *tanuljon* a meglévő tapasztalati eredményekből.

4.6 Modellezés neurális hálókkal

4.6.1 A mesterséges neurális hálók fejlődése

A neurális hálókat a 40-es évek óta tanulmányozzák. *McCulloch* és *Pitts* 1943-ban írták le a biológiai neuron működését. Megállapították, hogy a neurális jelek átvitelének folyamata két állapottal leírható: vagy van átvitel, vagy egyáltalán nincs. A neuron akkor *tűzel*, amikor az ingerküszöbe feletti jellel stimulálják. A kimenő jel általában állandó jelerősségű. Dolgozatukban leírták, hogy egy több neuronból álló hálózat egy általános Turing gépet alkothat.

Rosenblatt alkalmazott először egyrétegű *perceptron* architektúrát mintafelismerési feladatra. A perceptronoknak a biológiai neuronok matematikai analógiáját nevezzük (15. ábra).



15. ábra A biológiai neuron és a perceptron

A perceptronok első rétege detektorként működik és a bemenő jelekhez van kötve. A második (kimeneti) réteg megkapja a detektortól a jelet és osztályozza azt. A perceptron betanítása tulajdonképpen a kapcsolatok erősségének és a küszöbértékeknek a megfelelő beállítását jelenti.

Minsky és *Papert* 1969-ben publikált dolgozatukban rámutattak az egyrétegű hálózatok korlátaira, és pesszimizmusuknak adtak hangot a többrétegű hálózatokkal szemben.

Az új tanulási algoritmusok neurális és a párhuzamos feldolgozási technikák fejlődése azonban újjáélesztette a tudományos érdeklődést a mesterséges neurális hálók iránt.

4.6.2 A neurális hálók tanítása – a *backpropagation* algoritmus

A biológiai neuron matematikai modellje egy súlyfüggvényre szuperponált aktivációs függvény. A súlyfüggvény leggyakrabban alkalmazott alakja:

$$W(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i . \quad (53)$$

A biológiai neuron ingerküszöbének matematikai analógiája egy θ értékű lineáris szinteltoló egység. A szinteltolás után kapott jelből az aktivációs függvény segítségével számítható a perceptron kimenő értéke:

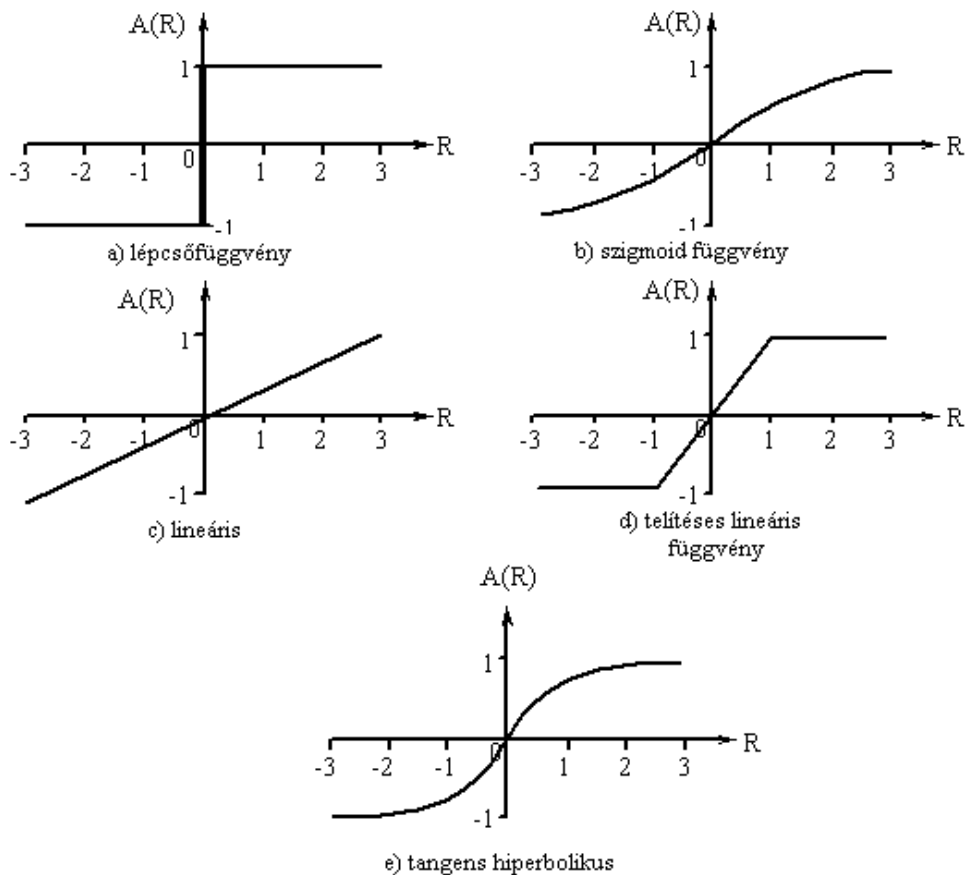
$$o = A(W(x) - \theta) = A\left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i - \theta\right) . \quad (54)$$

A gyakorlati alkalmazásokban a szinteltolás mértékét úgy tekintjük, mintha egy állandóan 1 értékkel rendelkező csomóponthoz tartozó súly tag lenne, azaz $w_0 \equiv -\theta; x_0 \equiv 1$, és így:

$$o = A\left(\sum_{i=0}^n w_i \cdot x_i\right). \quad (55)$$

A leggyakrabban használt aktivációs, vagy más néven átviteli függvények a következők (16. ábra):

- lépcsőfüggvény,
- szigmoid függvény,
- lineáris függvény,
- telítésszerű lineáris függvény,
- tangens hiperbolikus függvény.



16. ábra A leggyakrabban használatos aktivációs függvények.

Amint azt már említettük, a többrétegű hálók tanításánál (*Multilayer Perceptrons*, MLPs) a 80-as évek eredményei hozták meg az áttörést. A háló tanítására

rendelkezésre áll egy számhalmaz, amely összerendelt bemeneti és kimeneti értékekből áll. *Widrow* és *Hoff* a delta szabályt javasolták a súlyok módosítására ADALINE (*ADaptive LINear Element*) hálókhoz. A p -edik bemenő-kimenő mintára számítható hiba mértéke ekkor:

$$E_p = (t_p - o_p)^2, \quad (56)$$

ahol o_p a háló által számított kimeneti érték, t_p a betanító halmazból ismert cél érték. Mivel az aktivációs függvény lineáris, a hibafüggvény súly szerinti parciális deriváltja:

$$\frac{\partial E_p}{\partial w_i} = -2 \cdot (t_p - o_p) \cdot x_i. \quad (57)$$

Így a gradiens irányában csökkentve a p -edik bemeneti-kimeneti értékhez tartozó hibát a w_i súlyokat módosítsuk úgy, hogy:

$$\Delta w_i = \eta \cdot (t_p - o_p) \cdot x_i \quad (58)$$

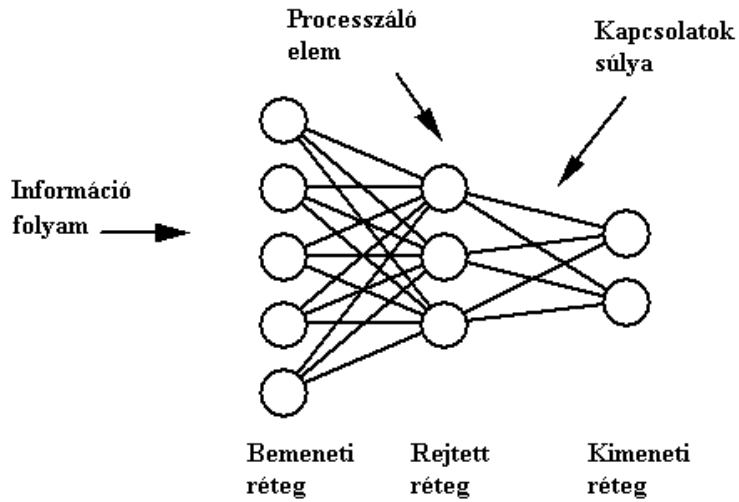
legyen, ahol η a tanítási együttható.

Többrétegű hálók esetén a *backpropagation* (*BP*) vagy más néven az általánosított delta szabályt használják a leggyakrabban: A BP egy felügyelt, hibajavító tanulási algoritmus. Míg ADALINE háló esetén bizonyítható, hogy a hibafelületnek egyetlen minimuma van, és a háló tanulása a minimumpontra befejeződik, addig többrétegű háló esetén ez nem áll fent. Ez azért van, mert a globális hibaminimumon kívül a rejtett rétegek lokális minimumokat generálnak, ahol a tanulási folyamat megrekedhet.

A MLP neurális háló a bemeneti rétegen jelentkező mintára kiszámítja a kimeneti értéket. Ezt az értéket hasonlítja össze az elvárt értékkel. A két érték különbségét tekintjük hibának. Formálisan tehát az i -edik neuron hibája a p -edik bemenő-kimenő párra:

$$\varepsilon_{pi} = t_{pi} - o_{pi}. \quad (59)$$

A tanító algoritmus célja az, hogy a súlyokat úgy módosítsa, hogy a hibát a gradiense mentén csökkentse. A tanulási folyamat akkor áll meg, mikor minden bemenő-kimenő párra a hiba egy megadott határérték alá esik, vagy további hibacsökkenés már nem érhető el.



17. ábra Többrétegű neurális háló architektúra

Rumelhart és társai a hálózat hibáját leíró energia függvényt, vagy más néven hiba függvényt, a hibatagok négyzetének összegeként írták fel:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^n \varepsilon_{pi}^2 . \quad (60)$$

Egy adott p-edik bemenő-kimenő párra:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{pi}^2 . \quad (61)$$

A BP algoritmusnak két fajtája létezik: az online és a kötegelt. Online esetben a (61) szerint számolt hiba alapján a súlyokat azonnal újraszámoljuk minden bemenő-kimenő értékpárra. Kötegelt BP algoritmus esetén (60) egyenlet használatos, azaz a hiba akkumulálódik. Kötegelt módban a súlyok módosítását a következőképp végezzük el:

$$w_{ij}^{s+1} = w_{ij}^s + \eta \cdot G_{ij}^s , \quad (62)$$

ahol:

$$G_{ij}^s = \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^s} . \quad (63)$$

A képletben szereplő s index a tanulási folyamat iterációs lépésszámát jelenti, míg az η érték a tanítási együttható. A hiba függvény súly szerinti parciális deriváltja:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}^s} = \frac{\partial E}{\partial \sum_{j=0}^n w_{ij}^s \cdot x_j} \cdot \frac{\partial \sum_{j=0}^n w_{ij}^s \cdot x_j}{\partial w_{ij}^s} . \quad (64)$$

Jelölje:

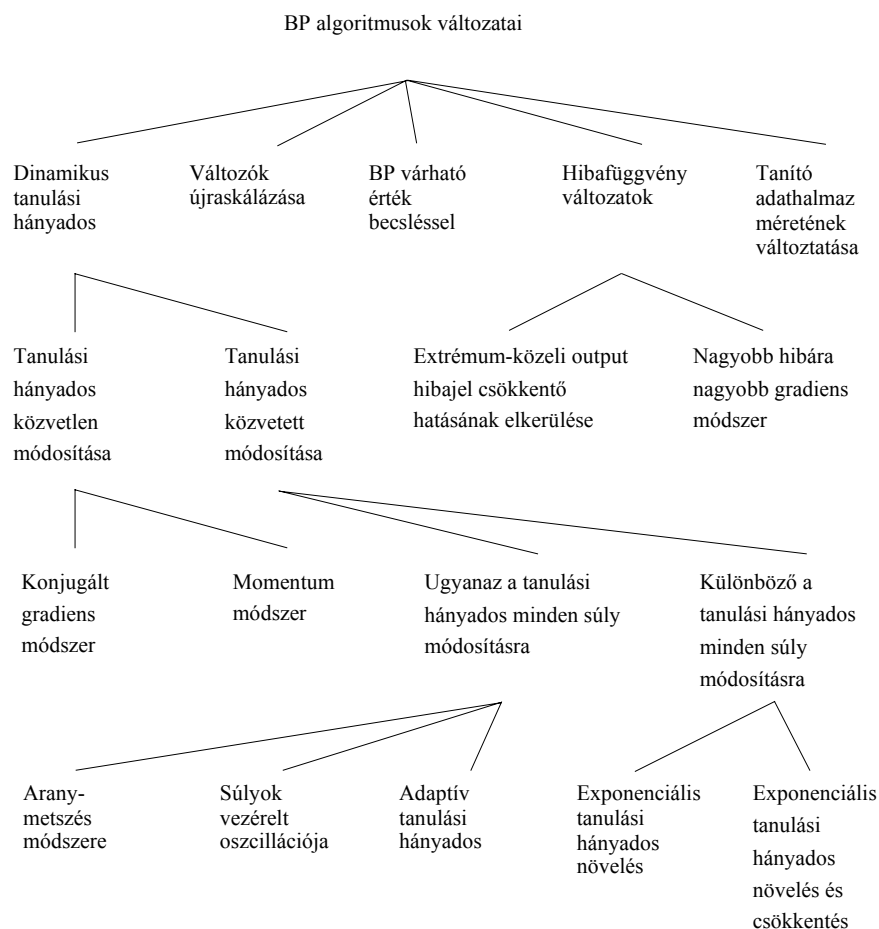
$$\delta_{pi} = \frac{\partial E}{\partial \sum_{j=0}^n w_{ij}^s \cdot x_j} \quad (65)$$

Így a súlyok módosítására szolgáló összefüggés:

$$w_{ij}^{s+1} = w_{ij}^s + \eta \cdot \delta_{pi} \cdot o_{pj}^s \quad (66)$$

A súlymódosítást láncszerűen a kimenő rétegek felől a bemenő réteg felé haladva lehet elvégezni.

A neurális hálózat által feldolgozott számhalmazt a gyakorlati felhasználásokhoz skálázni kell. Például a bemenő adatok skálázása tangens hiperbolikus átmeneti függvény alkalmazásakor azt jelenti, hogy a cél értékek essenek a $[-1, 1]$ tartományba. A BP tanító eljárás konvergenciájának növelésére valamint a lokális hibaminimumok elkerülésére számos eljárást dolgoztak ki. A 18. ábra a BP algoritmus változatok főbb csoportjait mutatja.



18. ábra A BP algoritmusok változatai [50]

A rejtett rétegek és a bennfoglalt neuronok számát tekintve az irodalom nem ad egyértelmű állásfoglalást, azaz ezek alkalmazásfüggők. Elméletileg egy egyrétegű MLP képes bármilyen folytonos függvényt leképezni [13]. Gyakorlati alkalmazásokban több réteget is használhatunk, ami hatékonyabb, de nehezebb betanítani.

4.6.3 *A neurális hálók korlátai*

A neurális hálóknak számos előnyük mellett korlátai is vannak. Működésük fekete doboz, azaz belső összefüggéseikbe kívülről belelátni nem lehet. Számítási igényüket tekintve nyilvánvalóan több műveletet igényelnek a tapasztalati képletekhez képest. Jelenleg nem állnak rendelkezésre olyan módszerek, amelyekkel az optimális hálózati struktúra (rétegek, neuronok száma) meghatározható lenne. A betanítás folyamata lassú, a megfelelő konvergencia-sebességet biztosító tanító algoritmus csak heurisztikusan választható ki.

A neurális háló a meglévő kísérleti adatok alapján képes tanulni. Ezért fontos a tanítási adathalmaz gondos megválasztása. A jó tanító készlet egyenletes, nem tartalmaz „lyukakat”, és számosságát tekintve megfelelő méretű populációt képez. A neurális háló elfogadható pontosságú közelítést csak a betanító halmaz határain belül, illetve a határok közelében ad. Az extrapoláció neurális hálók esetében (nemlineáris feladatokra) nagyon gyenge eredményt produkálhat. Bizonyos nem sima feladatokra, mint például pszeudo-véletlenszám generálás, vagy titkosítási funkciók a neurális hálók egyáltalán nem használhatók.

Az érvényességi tartomány tekintetében a neurális hálóra alapozott modellt kísérletekkel validálni kell.

Az adatokban lévő zaj szintén hatással van a neurális háló pontosságára. A bemenő oldalon fellépő zajok hatása kevésbé negatív, mint a cél értékeknél tapasztalható zajoké. (Bizonyos NN módszerek mesterséges zajt adnak az input oldalra, így erősítik a háló általánosító képességét.) Minél többet tudunk a zajok eloszlásáról, annál pontosabb lehet a NN becslése.

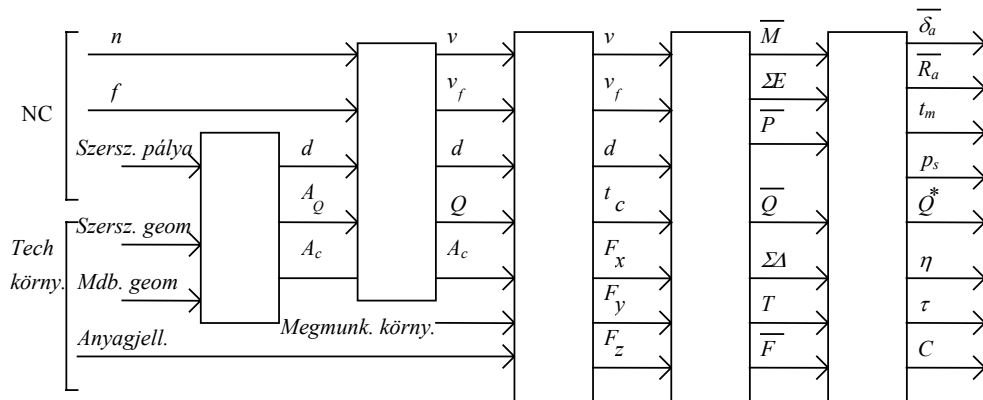
A NN háló pontosságát úgy lehet becsülni, hogy a betanító adathalmaz egy részét elkülönítjük, és ez a teszt rész a tanulási folyamatban egyáltalán nem vesz részt. A betanítás után teszt halmazt lefuttatjuk a hálózaton, és a hiba meghatározható. Ez a módszer csökkenti a rendelkezésre álló tanítóhalmaz méretét.

4.6.4 Folyamatmodellezés neurális hálókkal

Az esztergálási műveletelem nemlineáris folyamatainak modellezésére célszerű hibrid, többszintű neurális háló modellt bevezetni. Hibrid modellről beszélhetünk, mivel bizonyos paramétereket neurális hálóval becslünk (például a forgácsoló erőt), más paramétereket pedig a becsült értékek felhasználásával analitikus képletek segítségével számolunk. Ilyen például a forgácsoló nyomaték számítása (17).

Az első szinten az alapvető geometriai és technológia állapotváltozók kerülnek kiértékelésre. Ezeket a paramétereket a szimulátor számítja az (3)-(9) matematikai összefüggések alapján.

A második szinten az összetett determinisztikus állapotváltozók aktuális értékei kerülnek meghatározásra. Ezzel a geometriai folyamatmodellezés véget ér.

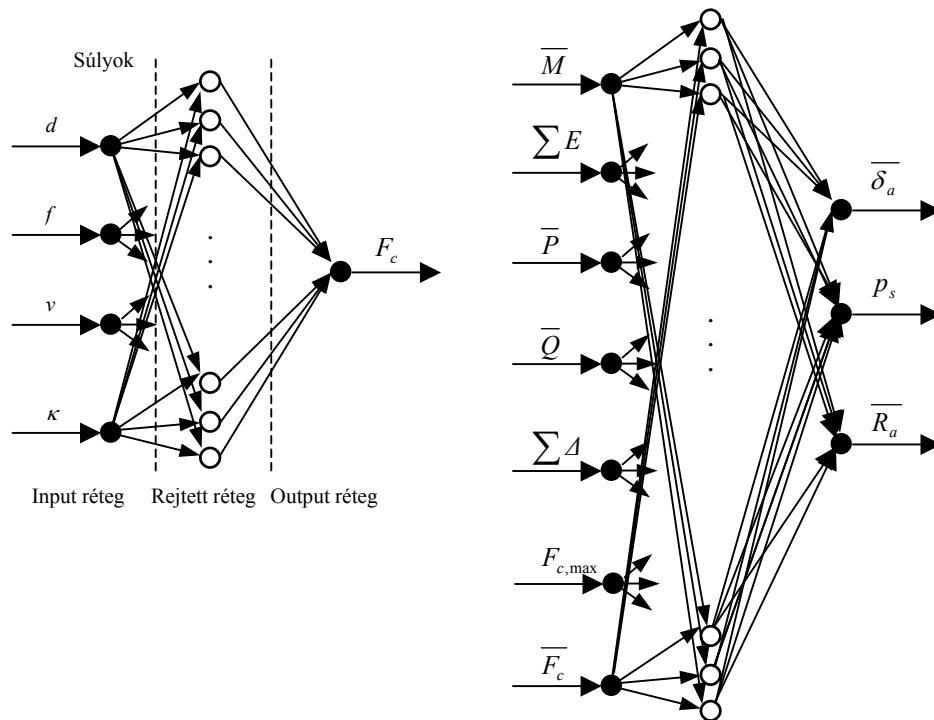


19. ábra A többretegű forgácsolási folyamat modell

A harmadik szinten a forgácsoló erők aktuális értékének becslése a legfontosabb feladat. Ezt a feladatot neurális háló valamint empirikus összefüggés alapján több módszerrel is számíthatja a szimulátor modellje.

Az erők ismeretében a negyedik szinten a forgácsoló nyomaték, a forgácsoló teljesítmény és a felhasznált energia számítása lehetséges. Ez utóbbi már integrált jellemző, mint ahogyan ilyen a műveleti idő is. Számítható a halmozott szerszámkopás, a még hátralévő éltartam, az átlagos és a maximális főforgácsoló erő, stb.

Az utolsó, ötödik szinten a menedzser indexek aktuális értékei és a technológiai jellemzők aggregált vagy átlagos értékeit számítjuk. A szimuláció végén ezek az esztergálási művelet minden gyártásirányítás szempontjából fontos tulajdonságát tartalmazzák.



20. ábra Egy rejtett rétegű ANN a forgácsoló erő illetve a technológiai kimenetek becslésére

Az ötödik szint modellje abból a feltevésből indul ki, hogy egy adott szerszámgepen meghatározott szerszámokkal egy adott munkadarab megmunkálása során a gyártmány minősége elsősorban a megmunkálás során fellépő erőktől, azok csúcsértékeitől, az anyagleválasztás intenzitásától, a szerszám kopottságától, a fellépő forgácsoló nyomatóéktól és forgácsolási teljesítménytől, a felhasznált energiától függ. Ezeket a nemlineáris kapcsolatokat hagyományos modellekkel leírni nem lehetséges. A neurális háló üzemi mérések adatain alapuló betanításával azonban a modellezésre mód nyílik.

A modell és az ez alapján kidolgozott szimulátor elsősorban ott alkalmazható, ahol az alkatrészek ismétlődő sorozatgyártása folyik, így a gyártás megkezdése előtt, vagy annak korai szakaszában méréssel és adatgyűjtéssel mindkét neurális háló betanításához elegendő adatot lehet összegyűjteni. A modern gyártóüzemekben az ehhez szükséges infrastruktúra rendelkezésre áll.

A modell hátránya a neurális hálók gyenge extrapolációs képességéből ered: amennyiben a gyártás során valamilyen paraméter jelentősen megváltozik, úgy a méréseket és a betanításokat újra el kell végezni.

5 ÚJ, KITERJESZTETT NC SZIMULÁTOR

5.1 A felhasznált szoftvertechnológia

A szoftver termék, sőt egyre inkább tömegtermék, így tudományos ismeretek alkalmazásával történő gazdaságos előállításának mikéntjét indokolt technológiának nevezni. Kezdetben programozási technikák, később módszerek aztán módszertanok, paradigmák jelentek meg. A kiterjesztett szimulátor létrehozásához szükség volt a legújabb szoftvertechnológia alkalmazására.

5.1.1 Szoftver minőség

Az információs technológia fejlődésével, a szoftvertermékek számának növekedésével a szoftverek minőségbiztosítása nagyon lényegessé vált. A szoftver, mint termék sajátos jellegénél fogva a szoftver minőségének megragadása, számszerűsítése és mérése nem könnyű feladat.

A szoftver minőségének kritériumait vizsgálhatjuk mind a felhasználó, mind a fejlesztő szempontjából. Ezek a kritériumok a következők:

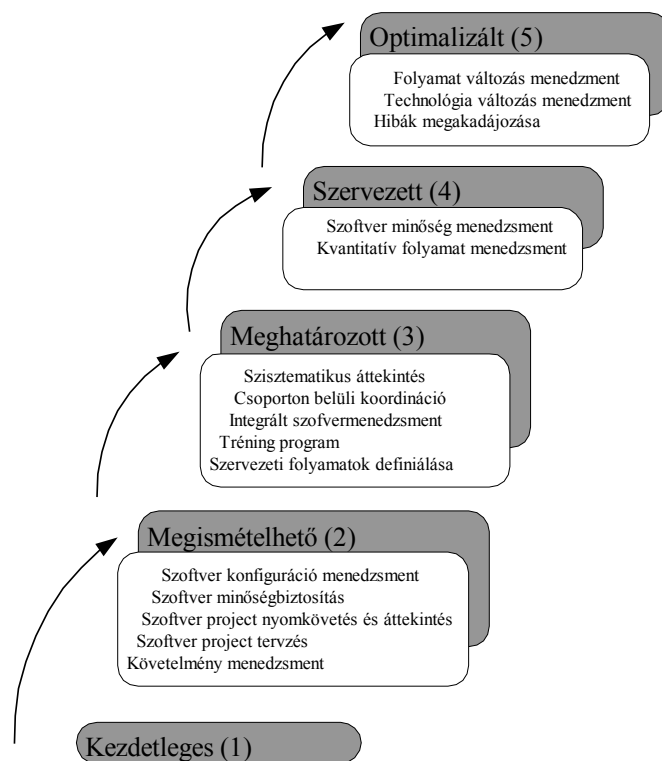
- helyesség,
- felhasználó-barátság,
- robusztusság,
- kompatibilitás,
- hatékonyság,
- szabványosság,
- karbantarthatóság,
- bővíthetőség,
- újrafelhasználhatóság,
- hordozhatóság,
- ellenőrizhetőség.

A szoftvertermékek minőségbiztosításának tekintetében Európában az ISO 9000-3 ajánlására hivatkoznak [12], míg az Egyesült Államokban a szoftverfejlesztés

érettségének meghatározására a *Capability Maturity Model* (CMM) a leginkább elfogadott [45].

Az ISO 9000-3 irányelveket ad, melyek megadják:

- az alapdefiníciókat (szoftver, szoftver termék, fejlesztés, fejlesztési fázis, ellenőrzés),
- a kereteket (szervezeti formák, felelősségi körök),
- életciklus tevékenységeket (specifikáció, analízis, tervezés, implementáció, tesztelés, karbantartás),
- kiegészítő tevékenységeket (konfiguráció, dokumentáció, betanítás).



21. ábra A Capability Maturity Model

A CMM modell kiértékelése alapján egy adott munkafolyamat a következő öt kategória valamelyikébe sorolható:

- kezdetleges,
- megismételhető,
- jól meghatározott,
- szervezett,
- optimalizált.

Az ismertetett szabványok, ajánlások nem kötik meg az alkalmazható fejlesztési módszertanokat. Rögzítik viszont, hogy kellően definiált, kezelhető metodikát kell alkalmazni.

5.1.2 Az objektum orientált programozás

Az egyik legnépszerűbb módszertan az objektum-orientált programozás. Az objektum-orientált módszertan alkalmazásával kifejlesztendő rendszert együttműködő objektumokkal modellezzük; a tervezés és az implementáció során ezeket az objektumokat megvalósító programegységeket alakítunk ki.

Az objektum a rendszer egyedileg azonosítható szereplője, amelyet a külvilág felé mutatott viselkedésével, belső struktúrájával és állapotával jellemezhetünk. Az objektum a rendszeren belül olyan szerepet játszik, amilyenre a rendszer feladatainak ellátásához szükség van. A többi szereplő nem lát bele az objektumba, a struktúrájára és állapotára csak a viselkedéséből következtethetünk. Ezt az információelrejtési formát egységbe zárásnak nevezzük.

Az egyes objektumok egymásnak küldött üzeneteken keresztül kommunikálnak. Minden objektum az üzenetek egy meghatározott készletét képes elfogadni és értelmezni. Az üzenet két fontos komponenssel rendelkezik: van neve és vannak paraméterei. Ezek a paraméterek az üzenet aktuális tartalmának tekinthetők. Az objektumok kölcsönhatásának vizsgálatakor eltekinthetünk a történés folyamatának részleteitől. Az ilyen pillanatszerű történést eseménynek nevezzük. Az üzenetek és események együttes alkalmazása is elképzelhető, amivel finom különbségeket tudunk tenni.

Az objektumhoz érkező üzenet hatására az objektum valamilyen cselekvést hajt végre. Ha egy objektum képes fogadni egy adott nevű üzenetet, akkor erre az üzenetre az üzenet neve által meghatározott metódus végrehajtásával reagál. Az objektum viselkedésének pontos leírása, implementációja metódusainak kódjában található. Az üzenet tehát megmondja, hogy *mit* kell csinálni, a metódus pedig azt, hogy *hogyan*. Az objektum azonos tartalmú üzenetekre különféleképpen tud reagálni az állapotától függően. Az objektumba tehát a viselkedésén kívül bele kell foglalni az állapotinformációt. Az objektum állapotát csak az objektum által végrehajtott metódusok változtathatják meg, kívülről ezek nem is láthatóak. Az objektum állapotát attribútumai tárolják. Az attribútumok értékei az objektum élete során változhatnak, ezért változókkal jelenítjük meg azokat.

Az objektum tehát olyan modellje a világ egy részének, amely a számára kívülről érkezett üzenetekre reagálva valahogyan viselkedik. Az objektumnak kívülről nem

látható belső statikus struktúrája van, amely az állapotok értékét rögzítő attribútumokkal definiálható. Beszélhetünk az objektum állapotáról, amely a belső struktúrát egy adott pillanatban kitöltő értékek halmaza. A megegyező viselkedésű és struktúrájú objektumok egy közös minta alapján készülnek, amit osztálynak nevezünk. Az objektum tehát az őt definiáló osztály egy példánya.

Az objektum-orientált tervezés az analízisnél kezdődik. Az analízis során a feladat definíciójából az alapvető objektumok, és a rájuk ruházott felelőségek összegyűjthetők. Az analízis során előállíthatóak absztrakt modellek, amelyeket le kell képeznünk a fizikai rendszerünk által biztosított szolgáltatásokra. Ezt a leképezést nevezzük tervezésnek. A tervezésnek három szintjét különböztetjük meg:

- architekturális tervezés: a létrehozandó program egészét érintő kérdések eldöntése;
- külső interfész tervezése: a külvilággal való kapcsolattartás módjának és részleteinek leírása;
- részletes tervezés: az osztályok és az objektumok specifikációja olyan módon, hogy azok együtt tudjanak működni.

A tervezés során nehézséget jelent, ha a megvalósítandó program több párhuzamos folyamatból, taszkból áll. A különböző folyamatok közötti kommunikációt lényegesen nehezebb implementálni, mint a taszkon belüli párbeszédet.

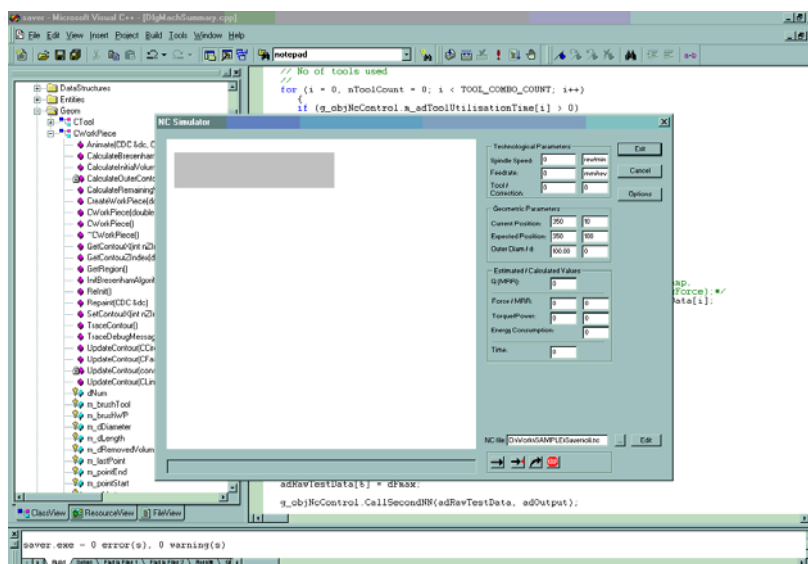
Az objektum orientált programozást összevethetjük a strukturált programozással. A strukturált más néven funkcionális stratégiák funkcionális szempontból tervezendők. A munka felülről indul, és a részletek feltárásával halad lefelé. A rendszer állapota oszthatatlan egész, egyetlen helyen van számontartva, és ehhez a helyhez (állapotleíráshoz, adatbázishoz) minden funkció hozzáférhet.

A tiszta strukturáltság betartásának a hatékonyság csökkenése lehet az eredménye. Előfordulhat, hogy egy magasabb szintű rétegben olyan egyszerű műveletekre is szükség van, amelyre az alacsonyabb rétegekben is számítanak. Ha ilyenkor következetesen betartjuk a strukturált programozás elveit, akkor több rétegen keresztül is csupán közvetítő szerepet betöltő funkciókat veszünk fel. A rendszer állapotváltozóihoz való közvetlen hozzáférés rendkívüli veszélyeket rejt, és nehezen felfedezhető hibák forrásává válhat. Az objektum-orientált rendszereknél a rendszer állapota részekre tagolódik, és egy-egy ilyen állapotrész a megfelelő objektum hatáskörébe tartozik.

5.1.3 A fejlesztői nyelv és környezet

A szimulátor szoftver elkészítéséhez a Microsoft cég Visual Studio 6.0 termékcsaládját használtam. A felhasznált fejlesztői környezet a Visual C++ 6.0 verziója volt. A fejlesztői környezet rendelkezik erőforrás szerkesztővel, amely segítségével a grafikus felhasználói interfész (GUI) könnyen megszerkeszthető. A szoftver kezelőfelülete és üzenetei angol nyelvűek, de egyetlen erőforrás fájl módosításával magyar nyelvre lefordítható.

A Visual C++ támogatja az objektum orientált programozást. Számos funkció (például osztályok, tagfüggvények, tagváltozók, eseménykezelés definiálása) menürendszer segítségével elérhető. A fejlesztői környezettel a kód strukturális vázát varázslók segítségével elkészíthetjük. A fejlesztői környezet hatékony módszereket nyújt a hibakeresésre is (debugging).



22. ábra A fejlesztői környezet a szoftver futtatása közben

Objektum orientált fejlesztői környezet esetén az egyik legfontosabb szempont, hogy milyen előre elkészített osztálykönyvtárakra támaszkodhat a fejlesztő. Az ismertetésre kerülő kiterjesztett NC szimulátor fejlesztéshez a Microsoft Foundation Classes (MFC) osztálykönyvtárakat használtam. Meg kell jegyezni, hogy szintén rendelkezésre áll az Active Template Library (ATL) és a Standard Template Library (STL) is. Az MFC osztályokból származnak öröklődéssel többek között a dialógus ablakok, a vezérlőelemek, a grafikus kontextus objektuma, stb. A felhasználó által definiált osztályokat is célszerű lehet a *CObject* nevű őosztályból származtatni. Ennek elsősorban alkalmazás-fejlesztési szempontból vannak előnyei.

A szimulátor egyik alapvető feladata a grafikus animáció megvalósítása, ezért indokolt a fejlesztőkörnyezet által biztosított grafikus osztályrendszer áttekintése. Az alapvető grafikus osztályokat a Microsoft fejlesztőkörnyezete biztosítja. Ilyenek például a grafikus kontextusok, grafikus primitívek (egyenes, körív, téglalap, stb.). Hiányzik azonban a grafikus animáció hatékony támogatása, így az egyik legnagyobb kihívás az animáció implementálása volt.

A belső adatbázis kezelésére a Microsoft Access 2000 szolgáltatásait használtam. Ez egy relációs adatbázis kezelő rendszer, ami támogatja a szabványos SQL lekérdezéseket. Kis számú konkurens hozzáférés esetén hatékony megoldást jelent adatbázisok elérésére. A szimulátor futtatható verziójához az Access alkalmazást nem szükséges telepíteni, ez csupán a fejlesztéshez szükséges. A megfelelő meghajtó programok Windows 2000 és újabb verziók esetén az operációs rendszer részét képezik.

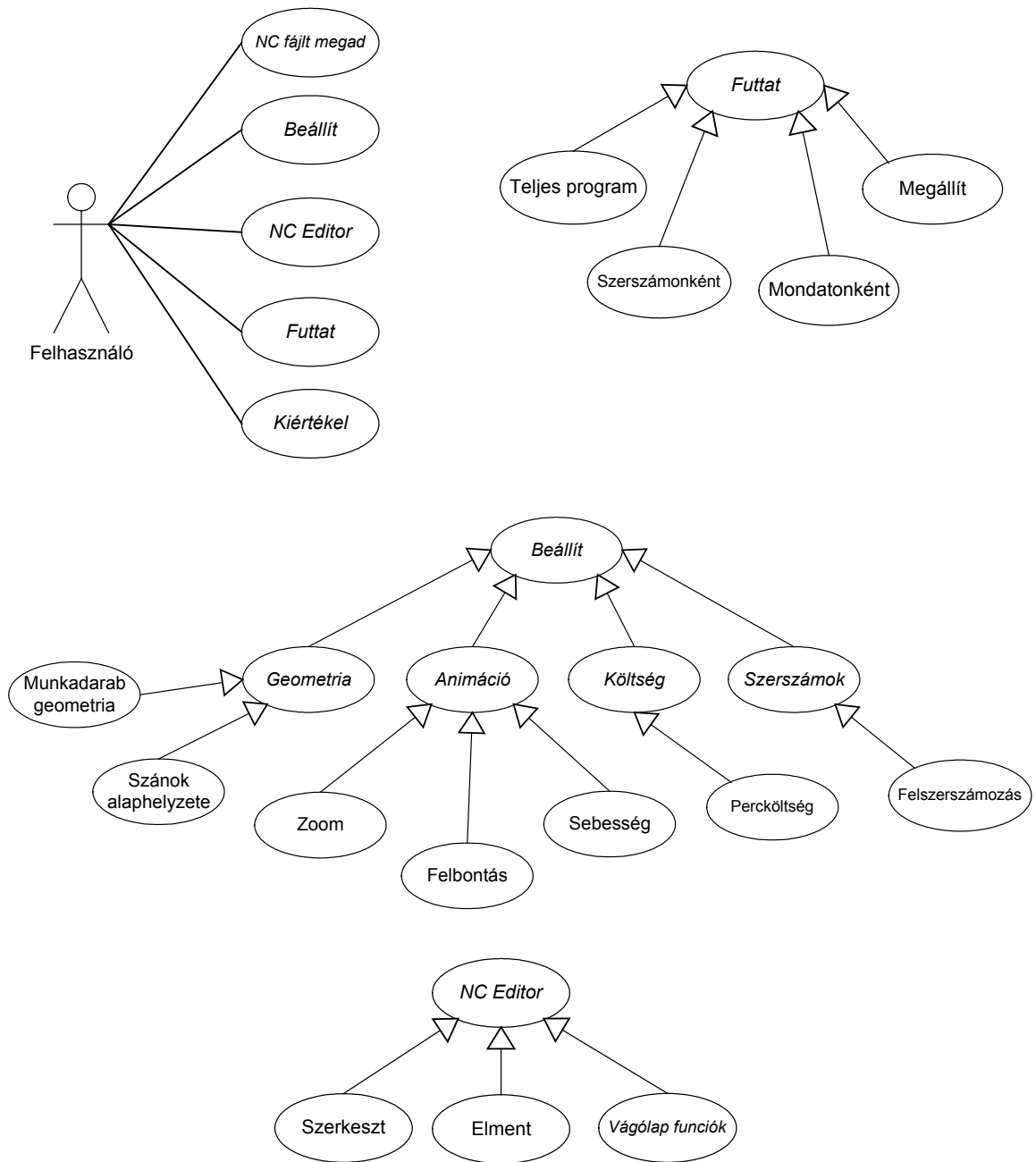
A neurális hálózatok kezeléséhez a Mathworks *MATLAB R12.1* termékét használtam. A szimulátor futtatásához ezt sem szükséges installálni. A betanított neurális háló struktúrákat MATLAB workspace kompatibilis formában tároltam el. Ezek bináris fájlok, amelyekhez megfelelő applikációs interfészt (API) dolgoztam ki. A leggyakrabban használt átmeneti függvényeket és a neurális számító modult C++ nyelven implementáltam. Tapasztalatom szerint a számítási sebesség egy közepes teljesítményű PC-n elfogadhatóan rövid ideig tart.

A szoftvertechnológiai modellezés a *Unified Modeling Language (UML)* specifikációnak megfelelően történt.

5.2 A szimulátor strukturális felépítése

5.2.1 Funkcionális modell

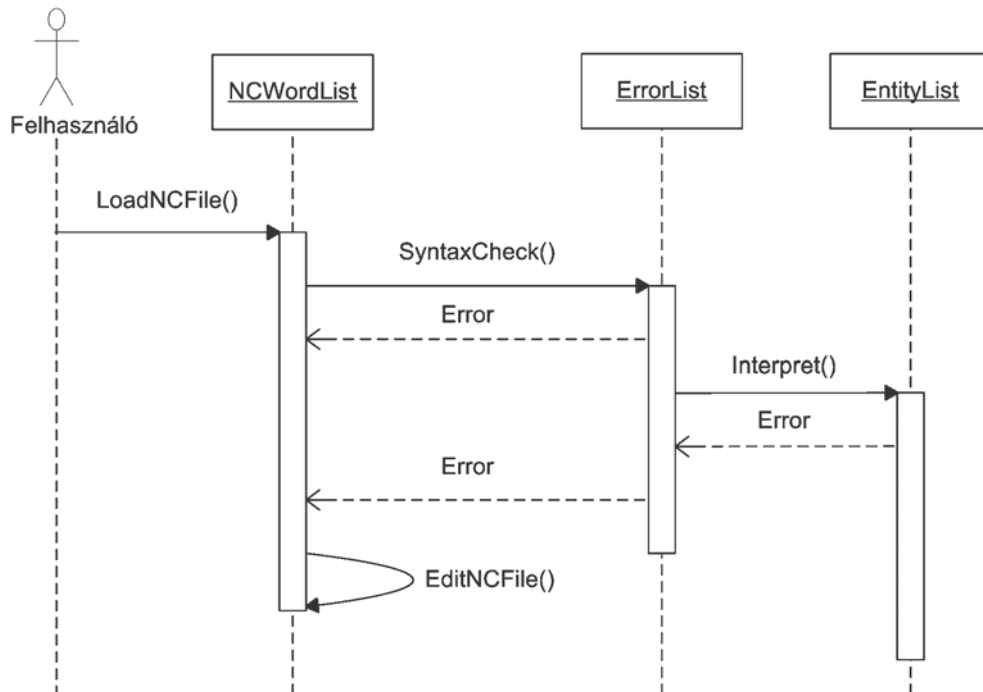
A funkcionális modellt az UML use case diagrammjai segítségével [47] írjuk le. A felhasználó által elérhető funkciók a következők: beállítások, NC program szerkesztés/hibajavítás, NC program futtatás, a futtatási jelentések (reportok) megtekintése. A beállítások opció magában foglalja a szerszám és munkadarab beállításokat, az animációs beállításokat és a neurális háló interfész fájljainak megadását.



23. a), b), c), d) ábra A funkcionális modell

Az NC programozás szimulációjának első lépése az, hogy az NC programból kinyerhető információt feldolgozzuk. Az NC program végrehajtása szekvenciális, így az objektum orientált leképzés is arra irányul, hogy az entitásoknak egy szekvenciáját állítsa elő. A feldolgozás két fázisban történik. Először a NC programnyelv szintaktikai helyességét ellenőrizzük lexikai analízissel. Hiba esetén egy hibalista készül és a szimulátor az NC editor ablakot megnyitja. Az interpretálás során is előbukkanhatnak

hibák, amit hasonlóan kezelünk. Hibátlan NC program esetén elkészül az entitások szekvenciális listája. Az interpretálás menetét a 24. ábra mutatja.



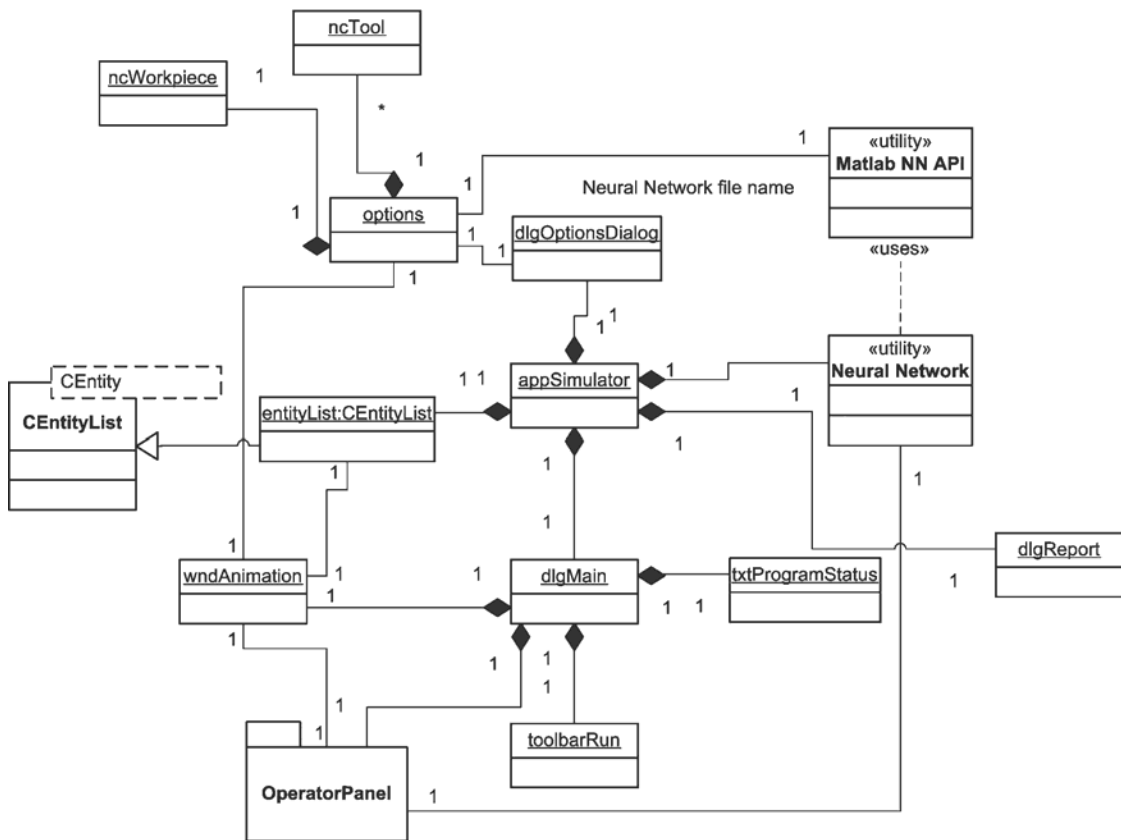
24. ábra Az NC program interpretálásának menete – a lehetséges hibákkal

5.2.2 Architektúrális modell

Az objektum orientált módon fejlesztett szoftver együttműködő, statikus és dinamikus objektumokkal modellezhető. Az objektumok egy része magát a folyamatot írja le, ezek dinamikus objektumok. Az ilyen fajta objektumok futási időben keletkeznek - az NC szimulátor esetében az NC programba kódolt információ feldolgoása során.

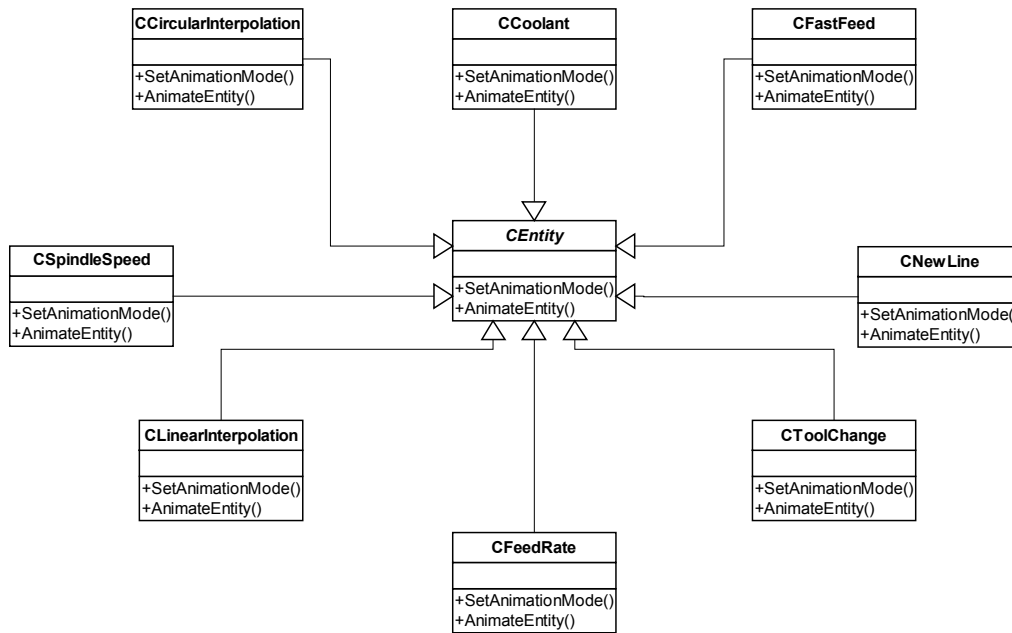
Bizonyos objektumokra pusztán informatikai szempontból van szükség, ezek támogatják a folyamat szimulációjának számítógépi megjelenítését. Ide tartoznak például a felhasználói interfész objektumai (pl.: ablakok, vezérlőelemek), az adatbázis kezelő objektumok, a neurális háló objektum, segéd (*utility*) objektumok, vagy az applikáció objektum, ami a Windows-os alkalmazás kerete.

A 25. ábra a főbb objektumok architektúráját mutatja. Az áttekinthetőség kedvéért egyes objektumokat az ábráról elhagytam, míg másokat csomagokba (*package*) összevontan ábrázoltam.



25. ábra A szimulátor főbb együttműködő objektumai

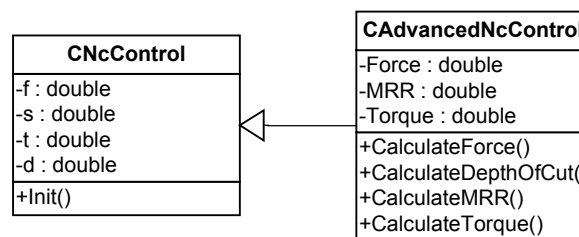
Az NC program feldolgozásának legfontosabb objektumai a geometriai-technológiai entitások. Ezek tartalmazzák azokat az elemi adatokat, amelyek alapján a grafikus animáció megjeleníthető, és így a kiterjesztett szimuláció alapjául szolgálnak. Ilyen entitás például az egyenes és kör interpoláció, a gyorsmeneti mozgás, a szerszámcseré, de ide tartozik az NC mondat vége entitás is. A 26. ábra a jellegzetes entitások osztálydiagramját mutatja. Az entitások listájának létrehozásához szükség volt egy közös absztrakt ősszóra, ez a *CEntity*. Az egyes entitások animációs megjelenítése egymástól eltérő. Az objektumok polimorfózisának kihasználásával ez azt jelenti, hogy az entitás lista minden tagjának az *AnimateEntity()* függvényét meghívjuk.



26. ábra Az entitások osztálydiagramja

Az NC entitások dinamikus objektumok, amelyek futási időben keletkeznek. Szükség van azonban statikus objektumokra is, jellegzetesen ilyenek például a dialógus ablakok.

A szimulátor kiterjesztett funkciói a hagyományos NC vezérlő feladatain túlmutatnak. Indokolt tehát a *CAdvancedNcControl* osztályt a *CNcControl* osztályból származtatni. Ez nem lehet absztrakt osztály, mint a *CEntity*, hiszen az interpretálás során az *ncControl* objektum tárolja el a vezérlés pillanatnyi állapotát.



27. ábra Az *NcControl* osztályok hierarchiája

A kiterjesztett szimulátor az ismertett osztályokon kívül még számos osztályt tartalmaz. Ezek részletes ismertetésétől terjedelmi okokból eltekintünk.

5.2.3 *Interfészek, I/O környezet*

A szimulátor négy fajta interfésszel rendelkezik: grafikus felhasználói interfésszel, adatbázis interfésszel, fájl interfésszel az NC programok betöltéséhez és fájl szintű interfésszel a bináris, MATLAB kompatibilis neurális háló leíró fájlhoz. A kezelői felületet és az adatbázis interfészt később részletesen tárgyaljuk.

Az NC programot hagyományos text fájl formátumban kell megadni, az alapértelmezett fájl kiterjesztés: *.nc.

A neurális háló struktúrájának leírása érdekes feladat. Még a legegyszerűbb MLP háló is legalább három réteget tartalmaznak, több neuronnal. Hierarchikus struktúrába rendezetten tárolni kell az egyes rétegekre a súlyokat, küszöbértékeket, átviteli függvényeket, a neuronok számát, stb. Gyakorlati alkalmazásokhoz a bemeneti és kimeneti rétegen megjelenő adatokat skálázni kell, azaz lineárisan transzformálni a (-1; 1) tartományba. Az interfész fájl tartalmazza a skálázás előtti maximum és minimum értékeket mind a bemenő mind a kimenő oldalon. Mivel a háló csupán numerikus értéket tárol el, ezért szükség van egy leíró mezőre, ami rögzíti, hogy a háló melyik bemeneti neuronja milyen mennyiséget ábrázol és mi a kimenetek jelentése. Az interfész fájl az említett struktúrán kívül eltárolja az utolsó módosítás idejét is.

Az interfészben eltárolt MATLAB workspace változók a következők:

- net (neurális háló struktúra),
- minp, maxp (a bemenő oldal maximum és minimum értékeit tartalmazó vektor),
- mint, maxt (hasonlóan a kimenő oldalon),
- netStruct (szöveges leírás, karaktertömb típusú),
- timeStamp (az utolsó módosítás ideje, év, hónap, nap, óra, perc, másodperc).

A MATLAB on-line súgója [36] részletesen leírja a workspace változók betöltésének és kimentésének menetét.

Tekintettel arra, hogy a szimulátor két, egymásra épülő neurális hálót használ, ezért a felsorolt változók meg vannak kettőzve olyan módon, hogy a második neurális háló leírására szolgáló változók neve után a „2” indexet fűztük.

A neurális háló struktúrája tetszőleges lehet, a megkötés csupán az, hogy egyetlen rejtett réteget használhatunk. Ez a gyakorlati alkalmazásokban nem jelent korlátozást, mivel az egy rejtett rétegű háló „univerzális approximátoroknak” tekinthető [22]. Az input, output és rejtett rétegekben tetszőleges számú neuron lehet, és az átmeneti függvények is tetszőlegesen megválaszthatók.

5.3 A szimulátor szolgáltatásai

5.3.1 Üzem módok

A szimulátor beállítási üzemmódjait a funkcionális modellnél már tárgyaltuk. Azokon túlmenően a szimulátor négy futtatási üzemmódot biztosít. Ezek a következők:

1. teljes program futtatása,
2. szerszámonkénti futtatás,
3. mondatonként futtatás,
4. stop.

A futtatási módokat a felhasználó a 28. ábrán látható ikonok segítségével változtathatja, az ikonok az előző felsorolás sorrendjében vannak elrendezve.



28. ábra A futtatási üzemmódok ikonjai

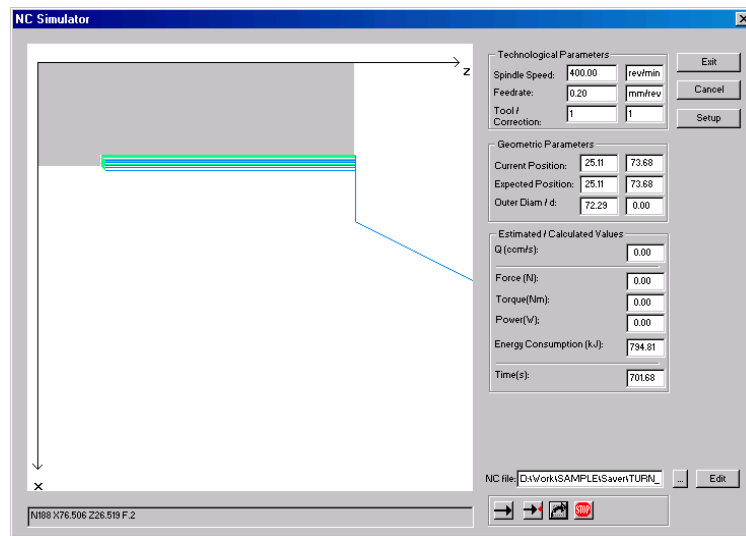
5.3.2 Kezelői felület

A kezelői felület kialakításakor tudatosan az egyszerű kezelhetőségre törekedtem. A kezelői felület középpontjában az animációs ablak áll. Jobboldalt a kijelző panel, alatta az NC fájl megadására szolgáló beviteli mező illetve az üzemmód választó ikonok vannak. Az éppen végrehajtott NC mondat az animációs ablak alatt látható.

A kijelző panelen nyomon követhetőek az aktuális forgácsolási paraméterek, valamint a neurális háló által becsült jellemzők pillanatnyi értékei. Az egyes értékek jelentése a címkék alapján azonosíthatók. A kijelző panelen megjelenő értékek három csoportba foglalhatók:

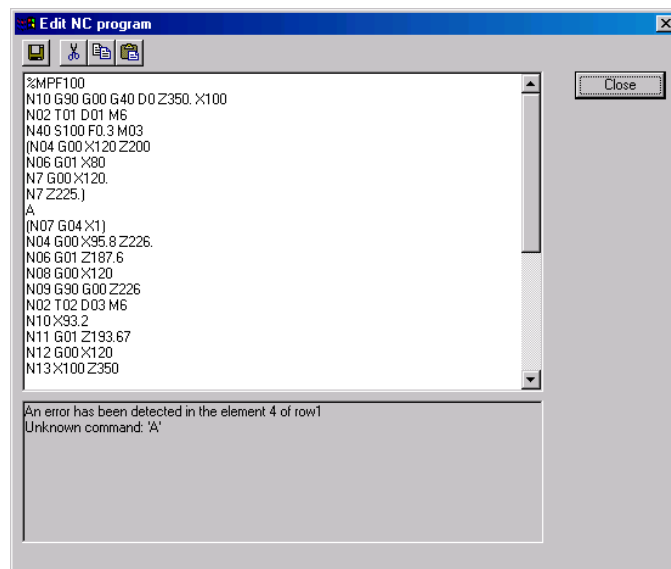
- az NC programból kinyerhető technológiai információk,
- geometriai információk,
- menedzser indexek pillanatnyi értékei.

A szimulálandó NC fájl megadására szintén a fő ablakon találunk vezérlő mezőt illetve fájl kijelölő gombot.



29. ábra A szimulátor fő ablaka

Az NC editor ablakot a 30. ábra mutatja. A már megszokott vágólap műveletek mellett az editor a módosított NC fájl mentését támogatja. A dialógus ablak alsó részén az NC program feldolgozása során feltárt hibákat jelenítettem meg hibalista formájában.



30. ábra Az NC editor ablak

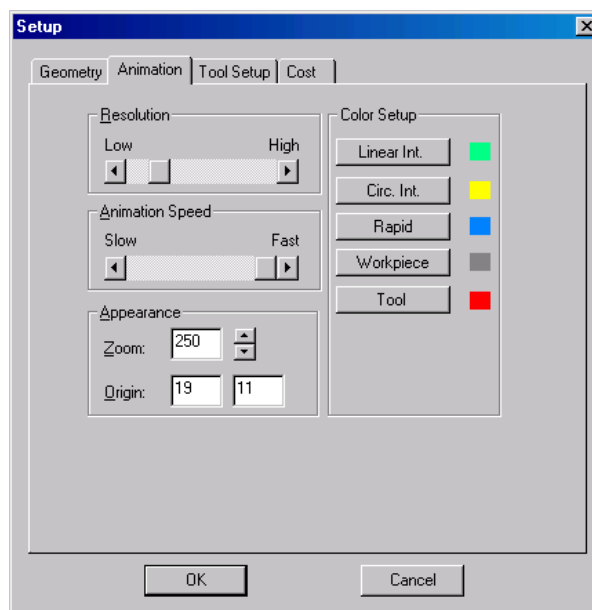
A beállítás opció alatt a már ismertetett beállításokat vihetjük be. Az egyes beállító ablakokat a megfelelő a fülek kiválasztásával aktiválhatjuk. A 31. ábrán az animációs ablakot látható.

A geometria (*Geometry*) fülön a nyersdarab befoglaló méreteit adhatjuk meg. A szimulátor továbbfejlesztett változatában szükség lehet CAD fájl vagy kontúrleírás bemenet választására is.

Az animáció (*Animation*) fülön az animációs sebességet illetve felbontást, a nagyítás mértékét illetve a nagyító ablak kezdőpontjának (bal felső sarkának) koordinátáit adhatjuk meg. Lehetőség van az egyes interpoláció típusokhoz, a gyorsmeneti mozgáshoz valamint a szerszámokhoz és munkadarabhoz különböző megjelenítési színeket definiálni.

A szerszámok (*Tool Setup*) fülön a szerszámtár pozíciókhoz hozzárendelhetjük a szerszámadatbázis szerszámaikat, illetve megadhatjuk, melyik neurális hálót leíró fájlt használjuk. Lehetőség van szerszámonként eltérő fájl megadására is.

A költség (*Cost*) fülön a műszaki gazdasági adatokat definiálhatjuk, ide értve a valutanemet illetve a gép percköltségét.

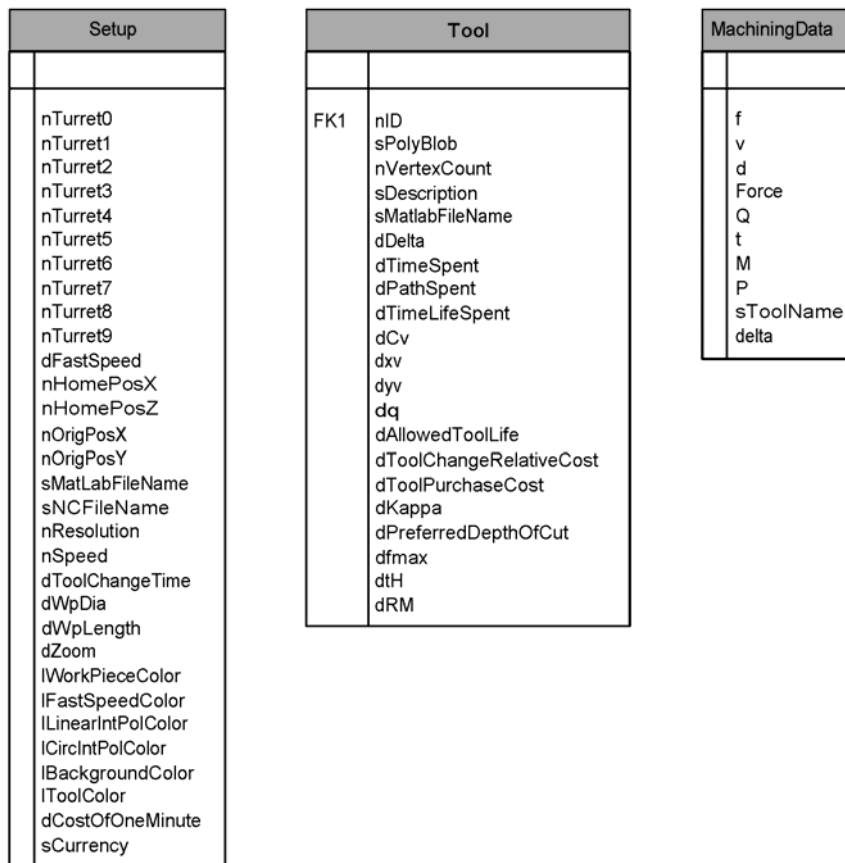


31. ábra Az animáció beállításai

5.3.3 I/O és belső adatbázis

A belső adatbázis felépítését mutatja a 32. ábra. A belső adatbázis három táblából áll. A *Setup* tábla a szimulátor beállításait tárolja el. Ide tartoznak a szerszámtárakban eltárolt szerszám azonosítók, a gyorsmeneti sebesség, az átlagos szerszámcsere idők, a nyersdarab befoglaló méreteinek megadása. A grafikus animáció beállításait is itt tárolja a rendszer, például az animációs sebességet, az animációs fázis hosszát, a színek beállításait. A *Tool* tábla tartalmazza a szerszámokkal kapcsolatos

rekordokat. Ide tartozik a szerszámazonosító, a szerszám szöveges leírása, geometriai definíció, a fogásban eltöltött idő és a fogásban megtett pályahossz, a Taylor konstansok. Célszerű a szerszámra megengedett $d_{ajánlott}$ és f_{max} értéket is itt megadni. Ez egyelőre NC program szegmensenként egy átlagos $\overline{Q^*}$ számítását teszi lehetővé. A szimulátor továbbfejlesztése során ez tovább finomítható. A *MachiningData* tábla tárolja a szimuláció diszkrét időpontjaiban a számított forgácsolási paraméterek értékeit, az erőt, nyomatékot, pillanatnyi technológiai intenzitást, valamint a szerszámonként a halmozódó kopást. Ez lehetőséget nyújt arra is, hogy külső programokhoz a neurális háló által számított összefüggéseket kiexportáljuk.



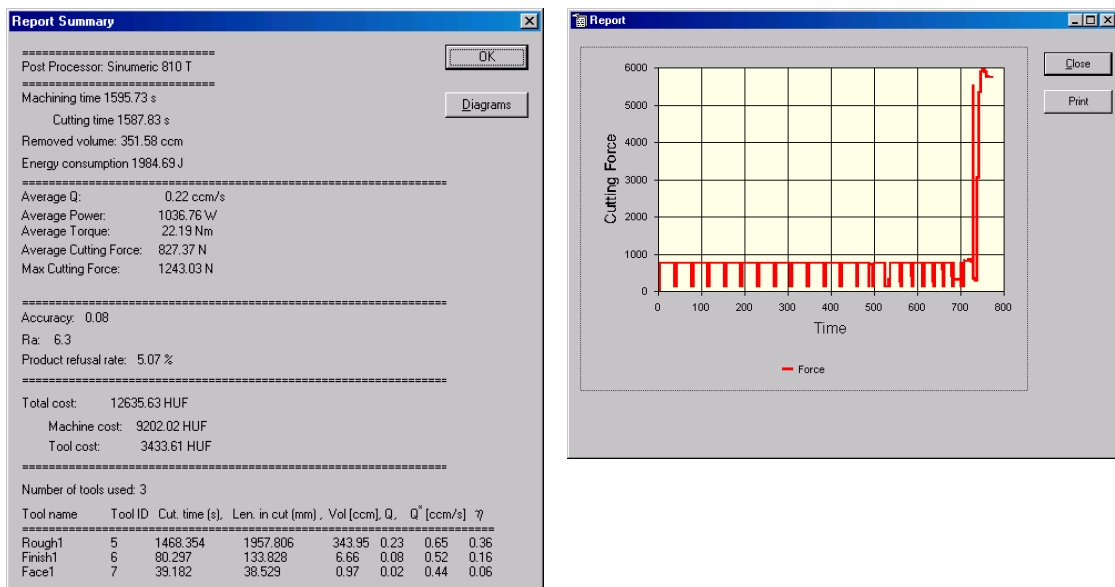
32. ábra A belső adatbázis felépítése

5.3.4 Kimeneti riportok

A kimeneti jelentéseknek (reportoknak) két fajtáját nyújtja a szimulátor. Az egyik szöveges jelentés, ami a menedzser indexeket számított, összegzett értékeit mutatja. Ezek a következők:

- megmunkálási és forgácsolási idő,

- leválasztott anyagtérfogat,
- felhasznált energia,
- átlagos technológiai intenzitás,
- átlagos teljesítményigény,
- átlagos forgácsoló erő és nyomaték,
- maximális fellépő forgácsoló erő,
- becsült átlagos méretpontosság,
- becsült átlagos felületi minőség,
- becsült selejtarány,
- összköltség, szerszámköltség, gépköltség,
- felhasznált szerszámok listája, fogásban töltött idő-, és pályahossz.



33. ábra A kimenő szöveges és grafikus jelentések

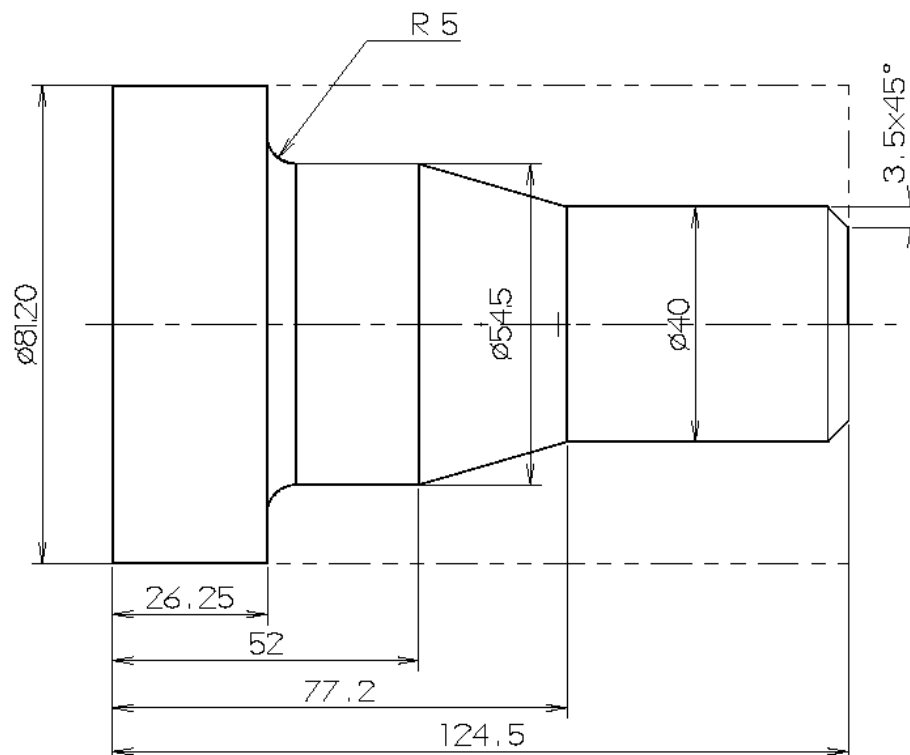
A szimulátor továbbfejlesztett változatában lehetőség lesz az idő- és költségtartalékok, valamint a készdarabokra vonatkozó minőségi tartalékok becslésére és reportjára is.

A jelentések másik csoportjába tartoznak a diagrammok. Ezek az eltelt idő függvényében ábrázolják:

- a főforgácsoló erőt,
- a forgácsoló nyomatékot,
- a felvett teljesítményt,
- a pillanatnyi forgácsolási intenzitást, a halmozódó szerszámkopást.

5.4 Illusztratív példa

A szimulátor működésének illusztrálására vegyük a 34. ábra szerinti alkatrészt. Az alkatrészt nagyoló, simító, majd oldalazó művelettel munkáljuk meg. A nagyoló megmunkálásra szolgáló NC program két verzióját dolgoztam ki a *MasterCAM* szoftver segítségével: 1 mm illetve 2 mm fogásmélységgel. A simítási ráhagyás mindkét esetben 0,5 mm. Az NC programok több száz sor hosszúak, a szoftver installálása során ezek is telepítésre kerülnek.

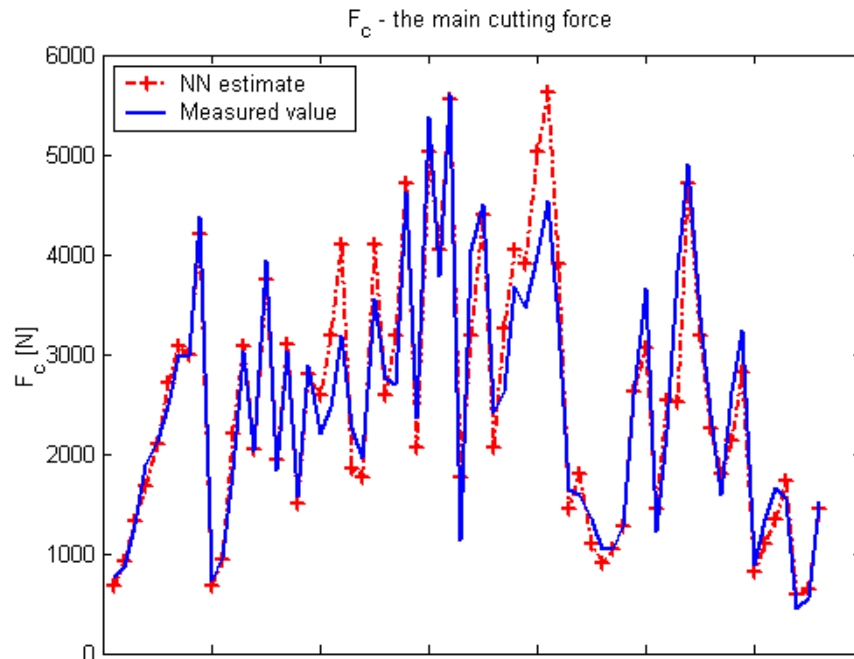


34. ábra A megmunkálandó alkatrész műszaki rajza

Az első neurális háló betanítására [56] alapján a mellékletben szereplő adatokat használtam fel. A rendelkezésre álló adatok kétharmadából véletlenszerűen generáltam egy betanító készletet. Az adatok másik részét a betanítás pontosságának ellenőrzésére használtam fel. A neurális háló elfogadható pontossággal közelítette a mérési eredményeket. A 35. ábra a mért (folytonos vonal) illetve a becsült (pontvonal) forgácsoló erőt mutatja a teszt adathalmaz felhasználásával.

A forgácsoló erő becslésére egy rejtett rétegű neurális hálót használtam, ahol a rejtett rétegben 30 neuron volt. A tapasztalatom szerint a skálázott konjugált gradiensek módszere mutatta a legjobb konvergencia sebességet a tanítás során. A

tanítás leállításának a feltétele a hibafüggvény 10^{-6} -os értékének elérése vagy 10^5 iterációs ciklus végrehajtása volt. A betanítás megkezdése előtt az input és output adathalmazt normalizáltam, és véletlenszerű súlyokat illetve szinteltolást vettem fel.



35. ábra A neurális háló betanulásának ellenőrzése

A szerszám adatokat [58] alapján a következőképpen vettem fel:

Szerszám ID	Poz.	C_v	x_v	y_v	m	$d_{ajánl}$	f_{max}	t_H	R_M	Beszerzési költség
Rough1	1	265,86	0,09	0,35	0,2	2	0.2	203.5	0.862373	5500
Finish1	2	323,95	0,05	0,3	0,25	1	0.15	125.4	0.684612	8000
Face1	3	387,12	0,04	0,31	0,25	1	0.2	220	0.579607	6000

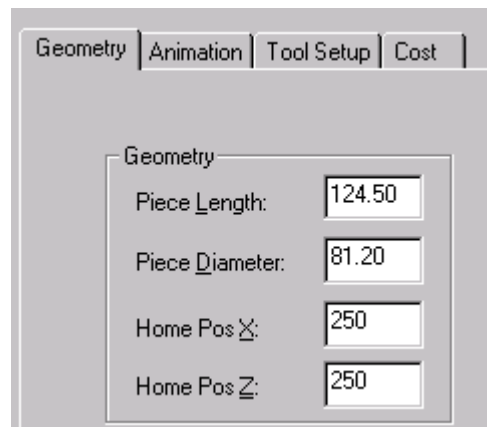
2. táblázat A szerszámbeállítások

A második szintű neurális háló tanításához kisebb és hiányos tanítóhalmazt tételeztem fel. Ennek a bemenő paraméterei $\bar{M}, \sum E, \bar{P}, \bar{Q}, \sum A, F_{c,max}, \bar{F}_c$ voltak, míg a kimenetén a méretpontosságot leíró számérték (δ_m), a felületi érdesség mérőszáma (R_a), és a selejtarány (p_s) jelent meg. A bemenő paramétereket a szimulátor korábbi futási eredményeiből vettem, és ezekhez kimenő értékeket rendeltem.

A betanító adathalmaz itt 20 elemű volt. A neurális háló struktúrája az első hálózhoz hasonló volt: egy rejtett rétegben 30 neuron. A tanító algoritmus megválasztása, a tanítás leállítása, és a hálózat inicializálása során ugyanúgy jártam el, mint az első esetben.

A szimulátor lehetőséget biztosít szerszámonként különböző neurális háló fájl definiálására. Ennél a példánál mindegyik szerszám ugyanazt a fájlt használta.

A nyersdarab geometriai méreteit a 36. ábra szerint adtam meg:



36. ábra A nyersdarab befoglaló méreteinek definiálása

A két NC program szimulációs futtatása az alábbi eredményt hozta:

Report Summary

Post Processor: Sinumeric 810 T

Machining time 3015.26 s

 Cutting time 3007.38 s

Removed volume: 351.75 ccm

Energy consumption 2711.01 J

Average Q: 0.12 ccm/s

Average Power: 800.23 W

Average Torque: 17.48 Nm

Average Cutting Force: 642.70 N

Max Cutting Force: 753.55 N

Accuracy: 0.0687

Ra: 6.3000

Product refusal rate: 7.0243 %

Total cost: 21558.57 HUF

 Machine cost: 17388.03 HUF

 Tool cost: 4170.54 HUF

Number of tools used: 3

Tool name	Tool ID	Cut. time (s)	Len. in cut (mm)	Vol [ccm]	Q	Q [*] [ccm/s]	γ
Rough1	5	2887.944	3850.592	347.15	0.12	0.65	0.18
Finish1	6	80.253	133.754	3.59	0.04	0.52	0.09
Face1	7	39.182	38.529	1.01	0.03	0.44	0.06

The screenshot shows a 'Report Summary' window with the following data:

```

=====
Post Processor: Sinumeric 810 T
=====
Machining time 1595.73 s
    Cutting time 1587.83 s
Removed volume: 351.58 ccm
Energy consumption 1984.69 J
=====
Average Q:          0.22 ccm/s
Average Power:     1036.76 W
Average Torque:    22.19 Nm
Average Cutting Force: 827.37 N
Max Cutting Force: 1243.03 N
=====
Accuracy: 0.0689
Ra: 6.3000
Product refusal rate: 7.4510 %
=====
Total cost: 12635.63 HUF
    Machine cost: 9202.02 HUF
    Tool cost: 3433.61 HUF
=====
Number of tools used: 3
Tool name   Tool ID  Cut. time (s)  Len. in cut (mm)  Vol [ccm]  Qc  Qc* [ccm/s]  η
=====
Rough1     5       1468.354     1957.806         343.95  0.23  0.65  0.36
Finish1    6        80.297       133.828           6.66  0.08  0.52  0.16
Face1     7        39.182        38.529            0.97  0.02  0.44  0.06
=====
    
```

37. ábra A futtatási eredmények

5.5 Megjegyzések a szimulátor futtatható változatához

A szimulátor futtatásához 32 bites Windows operációs rendszer szükséges. A fejlesztés és tesztelés Windows 2000 operációs rendszeren történt. A rendszeradatbázis elérése ODBC kapcsolaton keresztül történik, amit a telepítő szoftver készít el. A rendszeradatbázis Microsoft Access 2000 kompatibilis adatbázis állomány. Az ehhez szükséges meghajtó programok a Windows 2000 és későbbi operációs rendszerek részét képezik. Régebbi verziójú operációs rendszernél ezeket szükség szerint telepíteni kell. A szoftver a *Microsoft Foundation Class* osztálykönyvtárakat használja, így az ehhez szükséges dll fájlokat is telepíteni kell. A grafikus animáció nem igényel különleges videokártyát vagy meghajtó programot. A szimulátor jelen változatában SIMUMERIC 810 T kompatibilis NC programokat képes interpretálni. Az NC programokat hagyományos szövegfájl formátumban kell elkészíteni. A betanított neurális hálók topológiáját, súlyait, küszöbértékeit speciális bináris formában kell eltárolni. Ez a bináris fájl a MATLAB R12.1 verziójával kompatibilis formátum. A MATLAB rendszerben **load fájlnev** illetve **save fájlnev** utasításokkal a fájl betölthető illetve kimenthető. A szimulátor futtatásához a MATLAB rendszert nem kell telepíteni, mivel mind a megfelelő program interfész (API), mind a neurális hálózatokat számító modul implementálásra került a szimulátorban. Az ehhez

szükséges dll fájlokat a szoftver telepíti. A diagramok megjelenítéséhez az MSChart ActiveX control 2.0 verzióját telepíti az installer.

A telepítést adminisztrátori jogosultságokkal kell elvégezni.

A javasolt minimális számítógép konfiguráció:

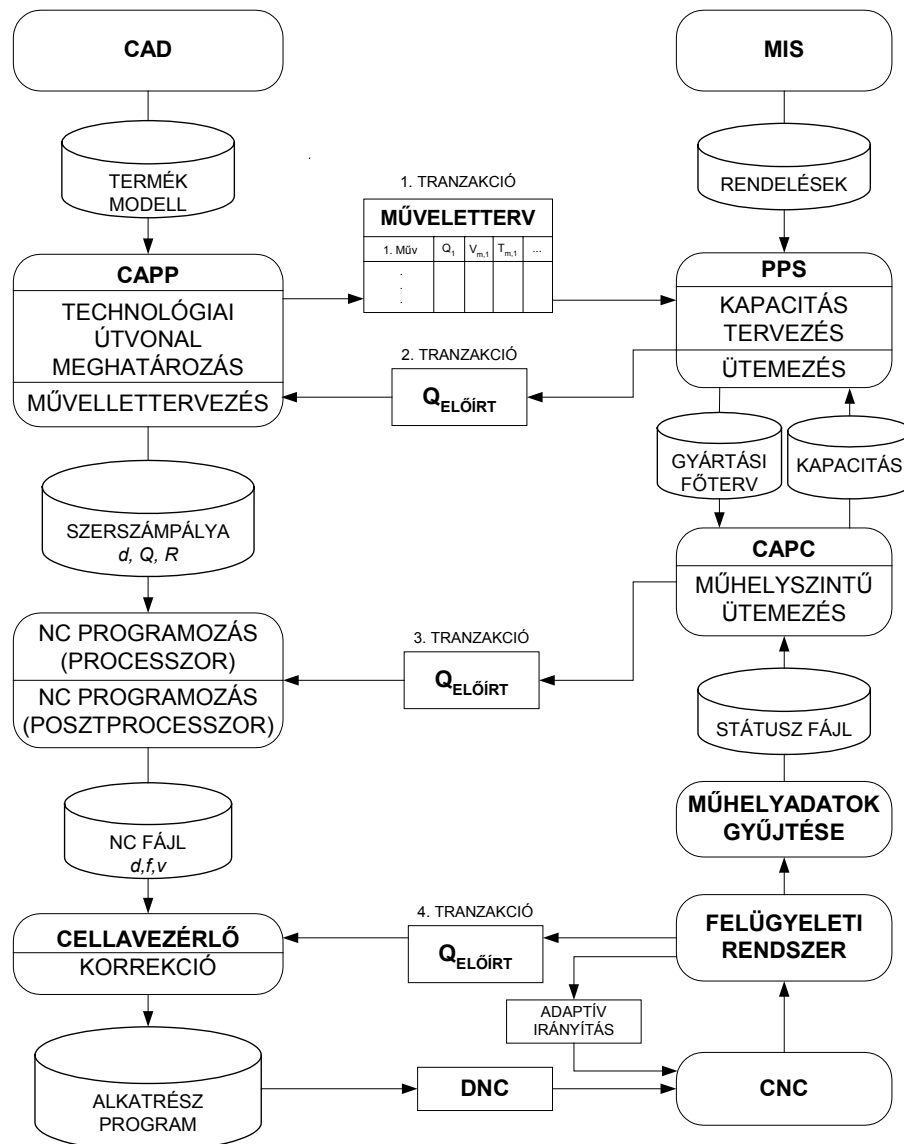
- Pentium III processzor,
- 256 MB RAM,
- 1024 x 768 felbontásra alkalmas videokártya,
- CD ROM,
- Windows 2000, vagy újabb operációs rendszer,
- 10 MB üres hely a merevlemezen a telepítéshez.

6 A KITERJESZTETT SZIMULÁCIÓ A GYÁRTÁSBAN

A kiterjesztett NC szimulátor a technológiai folyamattervezést és a gyártásirányítás (MES) folyamat-menedzselési funkcióját *direkt* és *indirekt* módon támogathatja [58]. A direkt jelző arra utal, hogy tervezésnél a mindenkori feltételrendszert kielégítő optimális megoldást keressük. Indirekt feladatnak tekintjük azokat a problémákat, amikor az előzetesen megtervezett optimális értékektől eltérve keressük a megváltozott aktuális feltételeknek megfelelő új intenzitást. Tipikus indirekt feladat a szűk keresztmetszet elhárítása, amikor is az adott berendezésen az intenzitás növelése költségnövekedéssel jár, azonban a műhelyszinten fellépő költségek mégis csökkenhetnek.

A 38. ábra a tipikus direkt és indirekt feladatokat mutatja integrált gyártási környezetben [58]. A vázolt modellben az 1. tranzakció a direkt feladat eredményét továbbítja. Az előtervezés fázisában, amikor a gyártóberendezések adatai csak feltételelesen állnak rendelkezésre, indokolatlan a megmunkálási paraméterek konkrét értékeivel foglalkozni. Ugyanakkor a PPS rendszer, a gyártásirányítás illetve a szerszámgép felügyelet előírhat konkrét technológiai intenzitás értékeket a változó menedzsment célok illetve technológiai korlátozó feltételek alapján. Ezek a 2. – 4. tranzakciók, amelyeket indirekt feladatok megoldását igénylik.

Mindkét feladattípus számítógépes támogatást igényel. A következő alfejezetek áttekintik, hogyan támogathatják az NC szimulátorok a két jellegzetes feladattípust.



38. ábra Direkt és indirekt feladatok integrált CAPP-PPS-CAPC környezetben [58]

6.1 A direkt feladatok támogatása

A disszertáció keretein belül kidolgozott esztergálás szimulátor a direkt feladatokat a hagyományos szimulátor funkciókkal támogatja. A direkt optimalizációs feladat során meghatározásra kerül egy optimális technológiai intenzitás. Az NC programok robusztusságát úgy biztosíthatjuk, hogy magasabb hierarchiai szinteken az optimalizálás után kiszámított technológia intenzitást lebontjuk fogásvétel, előtolás és forgácsolási sebesség paraméterekre. Egy adott szerszámgépre – figyelembe véve a technológiai, fizikai korlátokat – ez a lebontás sokféleképpen elvégezhető. Az

elkészített program változatokat a szimulátor segítségével ellenőrizni kell. A szimulátor a következő ellenőrző funkciókat nyújtja:

- szintaktikai ellenőrzés,
- szemantikai analízis,
- gyorsmeneti pályabejárás hibájának felderítése,
- interferencia kiszűrése,
- tervezett menedzser indexek ellenőrzése.

A szintaktikai ellenőrzés a használt NC programnyelv lexikális elemzését jelenti. A szemantikai analízis során a szerszám pálya megadása során keletkező hibák szűrhetők ki, például a hibásan megadott célpontok. A gyorsmeneti mozgás során bizonyos köztes célpontokat az *executive* taszk számít. Ellenőrizni kell, hogy a köztes célpontok megközelítése nem jár-e ütközéssel. Interferencia hibán a késznek tekintett felületek megsértését értjük.

Az ellenőrzéseket támogató szimulátor modulok az NC program editor, illetve a grafikus animáció.

A robusztus NC programozás az NC programok több változatban történő elkészítését igényli. Az egyes változatokhoz a menedzser indexek hozzárendelhetők, illetve az előtervezés helyessége, a programba kódolt technológiai intenzitás ellenőrizhető.

6.2 Az indirekt feladatok támogatása

Az indirekt feladatok támogatására a szimulátor a *kiterjesztett funkciókat* biztosítja. A feladat ilyenkor az, hogy meghatározzuk az optimális intenzitásnak egy olyan környezetét, amely az adott szerszám gépen fizikailag és technológiailag megvalósítható. Az egyik legfontosabb korlátfeltétel a szerszám élettartama, amely a technológiai intenzitásnak nemlineáris függvénye. Az ipari gyakorlat számára a műveletközi szerszámcsere nem megengedhető, ezért a megnövelt intenzitású NC program szerszámélettartam-igényét ismerni kell. Hasonló korlátozó feltételként szerepelhet a forgácsoló erő, illetve nyomaték. A menedzsment számára fontos a költség adatok illetve a minőségi mutatók ellenőrzése. Ezek a szimulátorral szintén meghatározhatók. Amennyiben a technológiai intenzitás módosítását nem *override* funkcióval valósítják meg, hanem az NC programba kódolt paramétereket változtatják meg, akkor a direkt feladatoknál már tárgyalt ellenőrzéseket is el kell végezni minden programverzió elkészítése után.

7 AZ ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

7.1 A kiterjesztett szimuláció koncepciója

A robusztus és alternatív technológiai tervezésben, valamint a CAPP-PPS-MES integráció megvalósításában egyre nagyobb igény jelentkezik a forgácsolási műveletek műszaki-technológiai-gazdasági jellemzőinek gyors, megbízható meghatározására. Ennek az igénynek a kielégítésére *kidolgoztam a kiterjesztett szimulátor koncepcióját.*

A számítógépes NC programtervező alkalmazások az NC forgácsolás teljes geometriáját modellezik, és ennek a modellnek csaknem 100 százalékát az NC programba kódolják. Kiegészítve ezt az információhalmazzt a nyersdarabra, a szerszámra és a gépre vonatkozó információkkal, *AI módszerek alkalmazásával olyan kiterjesztett szimulációs program hozható létre, amely a művelet technológiai-gazdasági eredményeire az eddigieknél pontosabb információt ad.*

A koncepció az NC programozás ismert makró technikáját, a paraméteres programozást, az intenzitás alapú anyagleválasztás szemléletét, és a szerszámgép felügyeleti technikáknál bevált AI módszereket ötvözi az objektum orientált szoftvertechnológiával. A kiterjesztett szimuláció koncepciója növeli a rugalmas és hatékony gyártásirányítás mozgásterét, és kihasználja a számítógépes integráció eszközszerét.

7.2 A technológiai folyamatmodellezés és a geometriai modellezés összekapcsolása AI modellekkel

A kiterjesztett szimuláció feladatainak megoldásához módszert kellett kidolgozni a forgácsolási folyamatok kiterjesztett modellezésére.

Ráműtattam arra, hogy az elkészült NC program kódolt formában tartalmazza a modellezéshez szükséges geometriai információk csaknem teljes körét, így indokolt erre alapozni a szimulátor modelljét.

A technológiai állapotjelzők és a menedzser indexek megbízható modellezésére többszintű, hierarchikus struktúrájú, backpropagation betanítású, neurális háló alapú modellt dolgoztam ki. Ez a modell alkalmas a forgácsolási folyamatot kísérő összes jelenség leírására. Az első hierarchiai szinten a forgácsolás alap paramétereit, a második szinten az összetett állapotváltozókat, a harmadik szinten a forgácsoló erőt, a negyedik szinten a szerszámkopás folyamatát, a felhasznált energiát, a műveleti időt számítja a modell. Végül a legfelső szinten, a menedzser indexekre ad becslést a szimulátor egy második neurális hálóval.

A többszintű hierarchikus modell lehetővé teszi, hogy a belső állapotváltozókat, forgácsolási paramétereket és indexeket különböző gyakorisággal számítsa a szimulátor. Ez a szimuláció futási idejének hatékonysága szempontjából fontos.

7.3 Az intenzitás alapú folyamattervezés szimulációs támogatása

A technológiai műveletek műszaki gazdasági megítélésének pontosabb és hatékonyabb módszerei fontos szerepet kapnak a rugalmas és integrált gyártásban. Ezt az integrációt támogatja a technológiai intenzitás fogalma, amelynek nyomon követése a gyártásirányítás döntési hatókörét kiterjeszti.

A kiterjesztett szimulátor szolgáltatásainak növelése érdekében újradefiniáltam a technológiai intenzitás meghatározásának módszerét, és bevezettem a forgácsolási hatáskeresztmetszet fogalmát. Ily módon esztergálásnál az intenzitás 3 egyenértékű számítási modellje adódott, amely az intenzitás értékének felhasználását a technológiai tervezésben és a gyártásirányításban még szélesebb körűvé teszi:

$$Q = A_Q \cdot v_f = v \cdot f \cdot d = A_c \cdot v. \quad (67)$$

Kifejtettem a hatáskeresztmetszet alapú megközelítés előnyét többélű szerszámmal végzett forgácsolás esetére.

Ráműtattam a direkt és indirekt tervezési és irányítási feladatok szimulációs támogatásának lehetőségére, definiáltam a maximális és minimális intenzitás határértékeit.

Bevezettem a műveletelemek és a műveletek gyártásirányítási hatásfokának fogalmát, amely az átlagos és az optimális intenzitás hányadosaként állítható elő a szimulátorral.

Az intenzitás határértékeinek, illetve az átlagos és az optimális intenzitás viszonyának ismerete feltárja a gyártás idő és költségtartalékait, amelyek a MES szintjén hasznosíthatók.

7.4 A kiterjesztett szimulátor létrehozása

Az objektum orientált módon fejlesztett szoftver együttműködő statikus és dinamikus objektumokkal modellezhető. Az objektumok egy része magát a folyamatot írja le, ezek általában dinamikus objektumok. Bizonyos objektumokra pusztán informatikai szempontból van szükség, ezek támogatják a folyamat szimulációjának számítógépi megjelenítését.

A kidolgozott koncepció alapján megterveztem és megvalósítottam az esztergálási műveletek új, kiterjesztett számítógépes szimulátorát. A szimulátort objektum orientált szoftvertechnológia alkalmazásával valósítottam meg. Rámutattam, hogy az NC program által hordozott információ áttranszformálható megválasztott dinamikus entitások szekvenciális sorozatává. Ez a dekompozíció általánosítva alkalmas tetszőleges, szekvenciálisan leírható jelenség objektum orientált modellezésére.

A szimulátor kimenetként a felállított modellek alapján új állapotváltozókat, ezek integrális és átlagos értékeit, valamint a művelet minősítésére alkalmas menedzsment indexeket állít elő.

8 HASZNOSÍTHATÓSÁG, TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

Értekezésemben az NC szimulátorok továbbfejlesztésének lehetőségével, a hagyományos szimulációs feladatok kiterjesztésével foglalkoztam. Az összefoglalt tudományos eredmények a Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszékén folytatott kutatásokhoz csatlakoznak.

Az elért eredmények a következő projektben kerültek közvetlenül felhasználásra:

1. *Gyártási folyamatok objektum orientált modellezése*,
Felsőoktatási Kutatási Fejlesztési Pályázat,
azonosító: 0275,
projektvezető: Dr. Erdélyi Ferenc.
2. *Digitális vállalatok*,
Széchenyi-terv Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program,
azonosító: 2/040/2001.

Az értekezés eredményei a műszaki gyakorlatban is hasznosíthatók. A megvalósított szoftvert esztergálási műveletekre dolgoztam ki. Ez fontos eszköze lehet a CAPP-PPS-MES integrációnak. A szimulátor támogatja az ebben az integrált környezetben jelentkező direkt és indirekt feladatokat. Gyakorlati alkalmazásokhoz szükséges lehet a különböző poszt-processorokkal generált kód interpretálásának lehetősége, illetve egy univerzális interpreter kidolgozása.

A szimulátor könnyen kezelhető grafikus felülete miatt a graduális képzésben is felhasználható a „*Számítógépes gyártásirányítás*” című tárgy keretein belül.

A továbbfejlesztés egyik lehetséges iránya a felállított AI modellek validálása jól megtervezett forgácsolási kísérletek segítségével. A szimulátor adatbázisa alkalmas relációs szerszám adatbázisokhoz, *Tool Management System*-hez való kapcsolódásra.

Az ilyen irányú integráció gyakorlati szempontból is hasznos lehet. Hasonlóan előnyös lehet a DNC szerverekkel való integráció megvalósítása is.

9 HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Avgoustinov, N.: *Virtual Shaping and Virtual Verification of NC-Programs* (Simulation of Part Manufacturing by Means of NC Machines in Virtual Reality). Proceedings of the 31th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Berkeley, USA, 1998.
- [2] Bali, J., Markos, S., Mészáros, I., Reith. J.: *Szerszámkopás modellezése passzív felügyeleti céllal*. Gépgyártástechnológia, XXVII. évfolyam 8. szám 1987. augusztus., pp. 342-246.
- [3] Bali, J.: *Forgácsolás. Tankönyv*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1988. p. 540.
- [4] Barschdorff, D., Monostori, L.: *Neural networks, their applications and perspectives in the intelligent machining*. Computers in Industry, Elsevier, Spec. Issue on Learning in Intelligent Manufacturing Systems, 1991, pp. 101-119.
- [5] Békés, J.: *A fémforgácsolás tervezése*. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1984.
- [6] Berta, M., Juhász, M.: *FORTAP programozási rendszer NC esztergákhoz.*, Technos'75. A Gépipari Technológiai Intézet V. tudományos ülészaka. 1975., pp.172-179.
- [7] Booch, G.: *Object oriented analysis and design with application*. Second Edition, Benjamin/Cummings, 1994. p. 624.
- [8] Carlsson, T.E. Strand, F.: *A Statistical Model for Prediction of Tool Life as a Basis for Economical Optimization of the Cutting Process*. Annals of the CIRP Vol. 41/1/1992, p. 79.
- [9] Chryssolouris, G. 1992: *Manufacturing Systems, Theory and Practice*. Springer, New York, 1992, p. 412.

- [10] Chryssolouris, G., Mavrikos, D., Fragos, D., Karabatsan V. : *A Virtual Reality Based Experimentation Environment for the Verification of Human Related Factors in Assembly Process*. Robotics and CIM. V.16. No.4. August 2000., pp. 267-277.
- [11] Chua, C.K., Teh, S. H., Gay, R. K. L.: *Rapid Prototyping Versus Virtual Prototyping in Product Design and Manufacturing*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 15, Issue 8, pp. 597-603, 1999.
- [12] *DIN ISO 9000* Teil 3. 1991., pp. 4-31
- [13] Gybenko, G.: *Approximation by Superposition of Sigmoidal Functions*, Mathematics of Control, Signals and Systems, Vol. 2, No. 4., 1989., pp. 303-314
- [14] Eddon, G., Eddon, H.: *Inside Distributed COM*. Microsoft Press, Redmond, 1998., p. 557.
- [15] Ehmann K. F., Kapoor S. G., DeVor R. E., Lazoglu, I.: *Machining process modeling: A review*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997. Vol. 119, pp. 655-663.
- [16] ElMaraghy, H. A.: *Evolution and Future Perspectives of CAPP* Annals of the CIRP, Vol. 42/2: p. 739-751. 1993.
- [17] Erdélyi, F.: *Szerszámgépek és diszkrét gyártási folyamatok számítógépes irányítása. Kandidátusi értekezés*. Miskolc, 1993., p 144.
- [18] Erdélyi, F., Kovács Gy., Haidegger, G., Hermann Gy.: *Számítógépes gyártásirányítás. A technológiai menedzsment informatikai eszközei; információ rendszerek*. (Szerk.: Erdélyi, F.) 1. rész. Miskolc, OMFB kézirat, 1997., pp. 235-315.
- [19] Erdélyi, F., Tóth, T.: *Gyártórendszerek irányításának hierarchája*. Oktatási segédlet. Miskolc, 1995.
- [20] Erdélyi, F., Strerlecz, L.: *SINUMERIK 810T számjegyes vezérlő berendezés esztergagépek számára*. Oktatási segédlet, Miskolc, 1993. p. 73.
- [21] Forrant, R.: *Good Jobs and the Cutting Edge: The U.S. Machine Tool Industry and Sustainable Prosperity*. The Jerome Levy Economics Institute Working Paper No. 199, Economics Department of Washington University, ewp-mac/9712008. 1997., p. 31.
- [22] Hornik, K.: *Approximation capabilities of multilayer feedforward networks*. Neural Networks 4, 1991, pp 251-257.
- [23] Horváth G.: *Neurális hálózatok és műszaki alkalmazásaik*. Egyetemi tankönyv. Műegyetemi kiadó, Budapest, 1998., p. 314.

- [24] Horváth M., Molnár B. E., Nagy S.: *An attempt in High Level Automation of NC Lates. The FORTAP System*, Computer Languages for Numerical Control., Amsterdam-London. North-Holland Publishing Company, 1973, pp. 535-547.
- [25] Huang, S. H., Zhang, H.-C.: *Artificial Neural Networks in Manufacturing: Concepts, Applications, and Perspectives*, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology - Part I, Vol. 17, No. 2, 1994, pp. 212-228.
- [26] Ip, W. H, Fung, R., Keung, K. W.: *An Investigation of Stochastic Analysis of Flexible Manufacturing Systems Simulation*. Volume 15, Issue 4, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999., pp. 244-250.
- [27] Iwata, K., Onosato, M., Teramoto, K., Osaki, S.: *A Modelling and Simulation Architecture for Virtual Manufacturing System*. Annals of the CIRP, 44, No. 1, pp. 399-402.
- [28] Jacobs, H. R.: *Optimális forgácsolás*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981., p. 251.
- [29] Jang, J.-S. R., Sun, C.-T. , Mizutani, E.: *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Matlab Curriculum. Prentice Hall, 1997., p. 614.
- [30] Klingstam, P., Gullander, P.: *Overview of Simulation Tools for Computer-Aided Production Engineering*. Computers in Industry, Vol. 38, No. 3, 1999., pp. 173-186.
- [31] Kondorosi, K., László Z., Szirmai-Kalos, L.: *Objektum-orientált szoftverfejlesztés*; ComputerBooks Budapest, 1997., p. 427.
- [32] Landers, R. G., Ulsoy, A. G.: *Model-Based Machining Force Control*. ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol. 122, No. 3, 2000., pp. 521-527.
- [33] Li, X.: *Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 3. Cutting Force Estimation Using Current Sensors*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 17, Issue 9, 2001. , pp. 659-664.
- [34] Li, X.: *Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 4. Cutting-Force-Induced Errors*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 17, Issue 9, 2001., pp. 665-669.
- [35] Liang, M., Mgwatu, M., Zuo, M.: *Integration of Cutting Parameter Selection and Tool Adjustment Decisions for Multipass Turning*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 17, Issue 12, 2000.,pp. 861-869.
- [36] MATLAB R12.1 help files *External Interface/API*. Mathworks, 2001.

- [37] Merchant, M. E.: *Basic Mechanics of the Metal Cutting Process.*, Transactions ASME, Journal of Industrial Engineering, 66:A65-A71, 1944 .
- [38] Mesina, O. S, Langari, R.: *A Neuro-Fuzzy System for Tool Condition Monitoring in MetalCutting.* Journal of Manufacturing Science and Engineering. May 2001, Vol. 123, pp. 312-318.
- [39] MESA International: *MES Explained: A High Level Vision.* White Paper, Number 6., 1997 szeptember., <http://www.mesa.org/whitepapers/>
- [40] Monostori, L.: *A step towards intelligent manufacturing: modelling and monitoring of manufacturing processes through artificial neural networks.* Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1, 1993, pp. 485-488.
- [41] Monostori, L., Kádár, B., Egresits, Cs.: *Virtual Manufacturing Using a Hierarchically Coupled Hybrid AI System.* 3rd IFAC/IFIP/IFORS workshop on intelligent manufacturing systems. IMS '95. 1995. Vol. 2, Bucharest, 1995. pp. 369-374.
- [42] Monostori, L., Viharos J. Zs.: *Multipurpose modelling and optimisation of production processes and process chains by combining machine learning and search techniques.* The 32nd CIRP international seminar on manufacturing Systems. New supporting tools for designing products and production systems. Proceedings. Leuven, 1999, pp. 399-408.
- [43] Onosato, M., Iwata, K.: *Development of a Virtual Manufacturing System by Integrating Product Models and Factory Models,* Annals of the CIRP, 42, No. 1, pp.475-478.
- [44] Ong, S. K., An, N. , Nee, A. Y. C.: *Web-Based Fault Diagnostic and Learning System.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 18, Issue 7, 2001., pp. 502-511.
- [45] Paulk, M. C., Curtis, B., Chrissis, M. B., Weber, C. V.: *Capability Maturity Model, Version 1.1,* IEEE Software, Vol. 10, No. 4, July 1993, pp. 18-27.
- [46] Phadke, M.S.: *Quality Engineering Using Robust Design.* Prentice Hall, Englewood Cliffs. 1998., p. 670.
- [47] Priestley, M.: *Practical Object-Oriented Design with UML.* McGraw-Hill Publishing Company, University of Westminster, 2000., p. 338.
- [48] Qiu, Z. M., Chen, Y. P., Zhou , Z. D., Ong, S. K., Nee, A. Y .C.: *Multi-User NC Machining Simulation over the WWW.* Volume 18, Issue 1, International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2001. , pp. 1-6.
- [49] Ross, D. T.: *Origins of the APT Language for Automatically Programmed Tools.* ACM SIGPLAN Notices, Vol. 13, No. 8, August 1978, pp. 61-99.
-

- [50] Sarkar, D.: *Methods to Speed Up Error Back-Propagation Learning Algorithm*. ACM Computmg Surveys, Vol. 27, No. 4, 1995, pp. 519- 542.
- [51] Srinivasa Pai, P., Nagabhushana, T. N., Ramakrishna Rao, P. K.: *Tool wear estimation using resource allocation network*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 41 Number 5 April 2001. , pp. 673-685.
- [52] Suh, S.-H., Lee, E.-S.: *Contouring Performance Measurement and Evaluation of NC Machine Controller for Virtual Machining CAM System*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 16, Issue 4, 2000., pp. 271-276.
- [53] Tandon, V., El-Mounayri, H.: *A Novel Artificial Neural Networks Force Model for End Milling*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 18, Issue 10, 2001., pp. 693-700.
- [54] Taylor, F.W.: On the art of cutting metals. Trans. ASME, Vol 28, 1906., p. 31.
- [55] Tóth, T.: *A megmunkálási hiba korszerű számítási módszerei esztergáláskor és az eljárás algoritmusának kidolgozása elektronikus számítógépre*. A Nehézipari Műszaki Egyetem közleményei, XX. kötet, 1974., pp. 179-204.
- [56] Tóth, T.: *Esztergálás technológiai adatainak tervezése elektronikus számítógéppel a megmunkálási pontosság alapján, Egyetemi doktori értekezés*. Miskolc, 1968., p. 118.
- [57] Tóth, T.: *Automatizált műszaki tervezés a gépgyártástechnológiában, Akadémiai doktori értekezés*, Budapest, Magyar Tudományos Akadémia, 1988.
- [58] Tóth, T.: *Tervezési elvek, modellek és módszerek a számítógéppel integrált gyártásban. Tankönyv*. Miskolci Egyetemi Kiadó 1998., p. 244.
- [59] Tóth, T., Erdélyi, F.: *The Role of Optimization and Robustness in Planning and Control of Discrete Manufacturing Processes*. Proceeding of the 2nd World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems. June 10-13. 1997. Budapest, Hungary, Springer, pp. 205-210.
- [60] Tóth, T., Vadász, D.: *Az optimális újraélezési szám meghatározása kísérleti-analitikai módszerrel kráteres szerszámkopás esetében*. Műszaki Tudomány 41/3-4 1969. pp. 207-223.
- [61] Tóth, T., Vadász, D., Perger G.: *A TAUPROG rendszerek jellemzői és az ipari alkalmazás tapasztalatai*. Technos'75. A Gépipari Technológiai Intézet V. tudományos ülészsaka.1975. pp. 236-249.
- [62] van Lutterveit, C. A., Childs, T. H. C., Jawahir, I. S., Klocke, F., Venuvinod P. K.: *Present Situation and Future Trends in Modelling of Machining Operations*. CIRP keynote papers. 1998. pp. 1-42.
-

- [63] Xu, H.-Y., Tam, H.-Y., Zhou, Z., Tse, P. W.: *Variable Feedrate CNC Interpolation for Planar Implicit Curves*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 18, Issue 11, 2001., pp. 794-800.
- [64] Yang S., Yuan J., Ni J: *The improvement of thermal error modeling and compensation on machine tools by CMAC neural network*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, pp. 527-537.
- [65] Young, K.W., Piggan, R., Rachitrangan P.: *An Object-Oriented Approach to an Agile Manufacturing Control System Design*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 17, Issue 11, 2001., pp. 840-859, 2001.
- [66] Viharos, ZS. J.; Monostori, L.: *Automatic input-output configuration of ANN-based process models and its application in machining*. Lecture Notes of Artificial Intelligence - Multiple Approaches to Intelligent Systems, Cairo, May 31-June 3, 1999, pp. 659-668.
- [67] Westkämper, E., Schmidt, T.: *Computer-assisted manufacturing process optimization with neural networks*, Journal of Intelligent Manufacturing, 9., 1998., pp. 289-294.
- [68] Wang, K.-S., Lin, W.-S., Hsu, F.-S.: *A New Approach for Determining the Reliability of a Cutting Tool*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 17, Issue 10, 2001. pp. 705-709.
- [69] Zhang, L., Deng, J., Chan, C.-F.: *A Next Generation NC Machining System Based on NC Feature Unit and Real-Time Tool-Path Generation*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 16, Issue 12, , 2000., pp. 889-901

10 SAJÁT IRODALOM

- [70] Hornyák, O.: *NC program ellenőrző szimulátor fejlesztése*. Diplomamunka, 1997. p. 80.
- [71] Hornyák, O.: *Szoftverek minőségbiztosítása paradigmák használatával*. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, 1998. márc. 20-21., pp. 97-99.
- [72] Hornyák, O.: *Gépészeti szimulációs feladatok támogatása mai szoftverfejlesztő eszközökkel*. Magyar Tudomány Napja, Doktoranduszok Fóruma, Miskolc, 1998. nov. 6., pp. 23-27.
- [73] Hornyák, O.: *Object Oriented Design of NC Part Program Simulation Software for Virtual Manufacturing*. MicroCAD'99 International Computer Science Conference, Miskolc, February 24-25, 1999., pp. 91-95.
- [74] Hornyák, O.: *Object Oriented Software Engineering for Simulation of NC Machining Operations*, X Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems. Innovate and Integrated Manufacturing, pp. 96-102. 1999.
- [75] Hornyák, O.: *Advanced Simulation of NC Machining Operations*, 2nd International Conference of PhD Students, Miskolc, 8-14 August., 1999., pp. 111-226.
- [76] Hornyák, O.: *Gyártási folyamatok szimulációs modelljei*. Magyar Tudomány Napja, Doktoranduszok Fóruma, Miskolc, 1999. nov. 5., pp. 18-21.
- [77] Erdélyi, F., Hornyák, O.: *Overview of the Possibilities of NC Simulation for Computer Aided Manufacturing*. MicroCAD' 2000 International Computer Science Conference, Miskolc, February 23-24, 2000., pp. 49-54.
- [78] Erdélyi F., Hornyák, O.: *Virtual Manufacturing for Supporting Robust Process Planning in the Field of NC Machining*. MicroCAD' 2001 International Computer Science Conference, Miskolc, March 1-2, 2001., pp. 61-68.

- [79] Erdélyi, F., Hornyák, O.: *NC Program Simulation with the Capability of Generating Alternative Process Plan for Flexible Manufacturing*. 11th Prolamat 2001 Conference on Digital Enterprise, Budapest 2001. Nov. 7-10. Kluwer Academic Publishers, pp. 43-50.
- [80] Erdélyi, F., Hornyák, O.: *Simulation tools for supporting robust process planning in the field of NC turning*. Proceedings 3rd Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration, 2001, June, pp. 27-29.
- [81] Erdélyi, F., Hornyák, O.: *NC programok kiterjesztett számítógépes szimulációja*. MicroCAD '2002. International Conference. 2002., pp. 65-70.
- [82] Erdélyi, F., Hornyák, O.: *Szimulátorok a termelésinformatika oktatásában*. Informatika a Felsőoktatásban 2002, Debrecen, 2002. augusztus 28-30., pp. 224-230.
- [83] Erdélyi, F., Hornyák, O.: *Extended Simulation Approach for NC Turning Operations*. The Tenth International Conference on Machine Design and Production 4 - 6 September 2002, Cappadocia, Turkey, pp. 153-164.

11 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A dolgozat a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki Karán, a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola keretein belül elvégzett kutatási eredményeket foglalja össze.

Köszönettel tartozom mindazoknak, akik lehetővé tették, illetve közvetlen vagy közvetett módon megkönnyítették, hogy ez a dolgozat megszülethessen.

Köszönöm **családomnak** a támogatást.

Köszönet illeti korábbi tanárait, oktatóimat., akik megalapozták szakmai képzésemet.

Ezúton fejezem ki köszönetemet témavezetőmnek, **Dr. Erdélyi Ferencnek**, aki figyelmemet a tudomány felé irányította, munkámat mindvégig támogatta, a dolgozat megírásához nélkülözhetetlen segítséget nyújtott.

Hálás vagyok **Dr. Tóth Tibor** tanszékvezetőnek, a Doktori Iskola vezetőjének, aki a nyugodt munkához való feltételeket megteremtette, a publikációim elkészítése során hasznos tanácsokkal látott el.

Köszönöm a Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszéke kollektívájának szakmai és erkölcsi támogatását.

MELLÉKLET

A SINUMERIC 810 T utasításrendszere

Szóció	Kód	Funkció, jelentés
%MPF..	1..9999	Főprogram
SPF..	1..999	Alprogram
LF		Mondat vége jel
N	1..9999	Mondatszám, címke
G	00	Gyorsmenet, durva megállással
	01 *	Lineáris interpoláció
	02	Körinterpoláció órajárás irányba
	03	Körinterpoláció órajárással ellentétes irányba
G	04	Várakozási idő, az X vagy F címen megadott ideig (sec), vagy az S címen (fordulatok száma)
G	40	Csúcsgár korrekció törölve
	41	Csúcsgár korrekció balra
	42	Csúcsgár korrekció jobbra
G	53	Nullponteltolás törölve
G	58	Programozható additív nullponteltolás
G	60	Sebességcsökkentés pontos megállással
	64 *	Pályavezérlés sebességcsökkentés nélkül
G	90 *	Abszolút méretmegadás
	91	Növekményes méretmegadás
G	94	Előtolás az F címen, mm/min-ben
	95	Előtolás az F címen, mm/ford-ban
	96	Előtolás az F címen, mm/ford-ban
		Vágósebesség az S címen m/min-ben
	97	G96 törölve

Szócím	Kód	Funkció, jelentés
X	5.3	Útadatok mm-ben Várakozási idő s-ban
Z	5.3	Útadatok mm-ben
I	5.3	Interpolációs paraméter mm-ben
K	5.3	Interpolációs paraméter mm-ben
R	0..999	Paraméterek
F	5.3	Előtolás Várakozási idő s-ban
S	5.3	Fordulatszám Várakozás fordulatokban
T	1..10	Szerszám azonosító
D	1..99 0	Szerszámkorrekció kiválasztása Szerszámkorrekció törölve
L	1..999	Alprogram hívás
P	1..99	Alprogram ismétlési szám
M	02 17 30	Program vége Alprogram vége Program vége
M	03 04 05	Orsófordulat jobbra Orsófordulat balra Orsó állj
M	08 09	Hűtés indul Hűtés állj
=		Egyenlőség jel, értékadás
+		Paraméterek összeadása
-		Paraméterek kivonása, negatív előjel
*		Paraméterek szorzása
/		Paraméterek osztása

Minta adatbázis a forgácsoló erő becsléséhez

A táblázatokban szereplő mérési adatokat Tóth Tibor bocsátotta rendelkezésemre [56].

Munkadarab anyag: C60		Szerszám anyag: 'A' lapka				
v = 110 m/min		r _e : 1.5		κ=45 °		
Sorszám	f [mm/ford]	d [mm]	P [kW]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
1	0.1	1	3.8	415.55	257.51	180.11
2	0.158	1	4.2	568.49	525.23	218.86
3	0.2	1	4.3	723.68	662.67	217.19
4	0.316	1	4.7	949.71	704.55	255.65
5	0.4	1	5.1	1187.30	836.30	298.03
1	0.2	1.5	4.7	750.96	356.69	402.11
2	0.316	1.5	5.4	1336.12	361.60	456.85
3	0.4	1.5	6	1606.19	719.07	501.09
4	0.542	1.5	6.9	1832.51	1025.15	577.32
1	0.2	2	5.2	1253.72	937.84	380.63
2	0.316	2	6.1	1677.51	1074.20	543.47
3	0.4	2	6.8	2207.25	1421.47	752.43
4	0.542	2	7.8	2752.69	1706.94	820.12
5	0.66	2	8.5	3021.48	2105.23	762.24
1	0.2	2.5	5.6	1482.29	485.60	584.68
2	0.316	2.5	6.6	2017.92	1039.86	823.06
3	0.4	2.5	7.7	2651.64	1534.28	889.77
4	0.542	2.5	8.4	3248.09	1858.01	971.19
5	0.66	2.5	9.2	3712.10	2098.36	1074.20
1	0.2	3	6	1780.52	1425.39	689.64
2	0.316	3	7.2	2480.95	1466.60	793.63
3	0.4	3	8.1	3017.56	1492.10	948.63
4	0.542	3	9.4	3938.72	1603.94	1274.32
1	0.1	3.5	5	1094.80	753.41	486.58
2	0.2	3.5	6.5	1825.64	850.53	687.68
3	0.316	3.5	7.8	2947.91	1011.41	888.79
4	0.4	3.5	8.4	3438.41	1430.30	1132.07
5	0.542	3.5	9.8	4532.22	1666.72	1372.42
1	0.1	4	5.4	1486.22	508.16	529.74
2	0.2	4	6.9	1824.66	784.80	717.11
3	0.316	4	7.8	3032.27	2254.34	1170.33

Munkadarab anyag: C60		Szerszám anyag: 'A' lapka				
v = 110 m/min		r _e : 1.5 κ=45 °				
Sorszám	f [mm/ford]	d [mm]	P [kW]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
1	0.1	1	3.62	498.74	351.39	107.71
2	0.158	1	3.9	548.38	937.84	96.33
3	0.2	1	4	755.08	712.60	209.44
4	0.316	1	4.46	996.89	830.12	223.47
5	0.4	1	4.8	1346.23	782.84	282.43
1	0.2	1.5	4.5	873.87	374.64	339.43
2	0.316	1.5	5.2	1295.02	376.90	485.79
3	0.4	1.5	5.6	1522.81	1366.04	470.88
4	0.542	1.5	6.4	2028.32	1827.80	540.53
1	0.2	2	5	1300.41	814.03	310.78
2	0.316	2	5.8	1879.60	876.03	458.42
3	0.4	2	6.5	2140.35	1248.81	683.76
4	0.542	2	7.4	2479.38	1654.95	781.66
5	0.66	2	8.2	2984.59	1991.63	798.53
1	0.316	3	6	2114.06	1786.40	745.56
2	0.4	3	7.2	2974.39	1910.99	924.10
3	0.542	3	8.1	3551.22	2147.41	960.40
4	0.66	3	9.4	4374.28	2816.45	999.64

Munkadarab anyag: C60		Szerszám anyag: 'A' lapka				
v = 110 m/min		r _e : 1.5 κ=45 °				
Sorszám	f [mm/ford]	d [mm]	P [kW]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
1	0.2	3	5.8	1573.52	1089.89	665.12
2	0.316	3	7.8	2312.22	624.90	504.23
3	0.4	3	8.8	3157.84	387.50	622.94
4	0.542	3		2886.10	849.55	1116.38
1	0.2	4		1257.64	267.81	1187.01
2	0.316	4		2203.33	943.72	1391.06
3	0.4	4		2470.16	1555.87	1456.79
4	0.542	4		3181.38	1579.41	1810.93
1	0.2	3.5	6.2	1404.79	486.58	1291.98
2	0.316	3.5	7.6	2215.10	501.29	1243.91
3	0.4	3.5	8.4	2360.29	1328.27	1540.17
4	0.542	3.5	10	2378.93	776.95	1642.19

Munkadarab anyag: C60			Szerszám anyag: 'A' lapka			
v = 80 m/min			r _e : 1.5	κ=90 °		
Sorszám	f [mm/ford]	d [mm]	P [kW]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
5	0.66	4.5	11.4	4961.90	1750.10	2035.58
	0.2	4.5	6	2248.45	549.36	1082.04
	0.316	4.5	7.8	3228.47	579.77	1462.67
1	0.2	4	5.8	1951.21	370.82	643.54
2	0.316	4	7	2870.41	165.79	1219.38
3	0.4	4	8	3213.76	943.72	1271.38
4	0.542	4	8.8	3551.22	1353.78	1426.37
5	0.66	4	10	5027.63	1298.84	1446.98
1	0.2	4	5.8	2005.16	143.23	952.55
2	0.316	4	7	2758.57	578.79	1252.74
3	0.4	4	7.8	2697.75	1126.19	1526.44
4	0.542	4	9.2	3971.09	1236.06	1521.53
5	0.66	4	10.8	4624.43	1793.27	1493.08

Munkadarab anyag: C60			Szerszám anyag: 'A' lapka		
v = 80 m/min			r _e : 1.5	κ=90 °	
Sorszám	f [mm/ford]	d [mm]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
5	0.66	4	4898.13	1634.35	1849.19
3	0.4	4	3828.84	927.05	1543.11
2	0.316	5	3901.44	773.03	1607.86
3	0.4	5	3789.60	1701.05	1864.88
4	0.542	5	5250.31	1813.87	2200.38

Munkadarab anyag: C60			Szerszám anyag: 'A' lapka		
v = 80 m/min			r _e : 1.5	κ=90 °	
Sorszám	f [mm/ford]	d [mm]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
2	0.316	4	2797.81	746.54	1939.44
3	0.4	4	3205.91	1080.08	2163.11
4	0.542	4	4384.09	1568.62	2678.13
5	0.66	4	4907.94	1629.44	3055.82
3	0.4	4	3377.58	926.06	2380.89
2	0.316	5	3489.42	770.09	2473.10
3	0.4	5	3789.60	1687.32	2804.68
4	0.542	5	5220.88	1862.92	3490.40

Munkadarab anyag: C60		Szerszám anyag: 'A' lapka				
v = 80 m/min		r _e : 1.5		κ=90 °		
Sorszám	f [mm/ford]	d [mm]	P [kW]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
1	0.2	5	6.4	2366.17	450.28	1298.84
2	0.316	5	8.2	2974.39	728.88	1471.50
3	0.4	5	11.1	5219.90	1471.50	1835.45
4	0.542	5	13.4	5373.92	1581.37	2489.78
1	0.2	5	6.2	2206.27	817.17	1342.01
2	0.316	5		3014.61	527.78	1442.07
3	0.4	5		3774.89	722.02	1682.42
4	0.542	5	10.2	5408.25	1053.59	2226.87
5	0.66	5	12.2	5607.40	1715.77	2555.51
1	0.2	4	6.8	1133.06	308.03	1036.92
2	0.316	4	7	2685.00	1205.65	1674.57
3	0.4	4	9	4038.78	1253.72	1641.21
4	0.542	4	9	4050.55	1155.62	1783.46
5	0.66	4	10	4660.73	1165.43	1512.70
1	0.2	4	5.8	1915.89	824.63	1084.99
2	0.316	4	6.8	2259.24	1644.16	1165.43
3	0.4	4	7.2	3269.67	1279.22	1168.37
4	0.542	4	8.4	3887.70	1146.79	1580.39
5	0.66	4	10.2	4849.08	1308.65	1713.81
6	0.799	4	11.2	5259.14	1716.75	1826.62
7	0.95	4	12.8	5717.27	2338.70	1947.29

Munkadarab anyag: C60		Szerszám anyag: 'A' lapka				
v = 80 m/min		r _g : 1.5		κ=90 °		
Sorszám	f [mm/ford]	d [mm]	P [kW]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
1	0.316	6	8.2	4110.39	1039.86	2717.37
2	0.4	6	10.4	4508.68	1322.39	2964.58
3	0.475	6	12	4719.59	2785.06	3252.02
4	0.542	6	13.4	4972.69	2984.20	3493.34
5	0.66	6	14.6	6579.57	2949.87	3574.76
1	0.2	5	6.4	1995.35	99.08	1075.18
2	0.316	5	8.2	2964.58	727.90	1470.52
3	0.4	5	9	3654.23	1472.48	1608.84
4	0.542	5	11	4619.53	1814.85	1572.54
1	0.2	5	6	2420.13	219.74	1073.21
2	0.316	5	8	2622.21	962.36	1511.72
3	0.4	5	9.2	3677.77	929.99	1800.14
4	0.542	5	11.2	4884.40	1239.00	1656.91
1	0.2	4.5	5.8	1979.66	189.33	1271.38
2	0.316	4.5	7.4	2784.08	716.13	1420.49
3	0.4	4.5	8	3469.80	826.98	1484.25
4	0.542	4.5	9.8	3983.84	1081.06	1859.98
5	0.66	4.5	12	4527.32	1544.09	1746.18
1	0.2	4.5	6	1918.84	553.28	1060.46
2	0.316	4.5	6.2	2791.93	948.63	1322.39
3	0.4	4.5	8	3316.76	1257.64	1571.56
4	0.542	4.5	10	5441.61	1239.00	1608.84

Munkadarab anyag: C60		Szerszám anyag: 'A' lapka				
v = 80 m/min		r _g : 1.5		κ=90 °		
Sorszám	f [mm/ford]	d [mm]	P [kW]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
1	0.2	2	4.6	1027.11	582.71	655.31
2	0.316	2	5	1637.29	1020.24	679.83
3	0.4	2	6	1660.83	544.46	871.13
4	0.542	2	6.9	2399.53	1049.67	881.92
5	0.66	2	7	2566.30	1022.20	1104.61
1	0.2	2.5	5	1485.23	140.28	698.47
2	0.316	2.5	5.8	1583.33	506.20	880.94
3	0.4	2.5	6.4	2224.91	779.90	1121.28
4	0.542	2.5	7.2	2809.58	1172.30	1100.68
5	0.66	2.5	7.5	3217.68	1164.45	1098.72
1	0.2	1.5	4	889.77	372.78	428.70
2	0.316	1.5	4.8	1346.91	473.82	545.44
3	0.4	1.5	5	1569.60	666.10	615.09
4	0.542	1.5	6	1553.90	444.39	811.29
5	0.66	1.5	6.2	2100.32	459.11	722.02
1	0.1	1	3.4	447.34	77.50	97.12
2	0.146	1	3.6	572.90	301.17	280.57
3	0.2	1	3.8	652.37	604.30	302.15
4	0.316	1	4.1	1052.61	413.00	336.48
5	0.4	1	4.4	1050.65	661.19	361.01
6	0.542	1	4.8	1280.21	1076.16	407.12
7	0.66	1	5.2	1402.83	1150.71	404.17

Munkadarab anyag: C60		Szerszám anyag: 'A' lapka				
v = 80 m/min		r _g : 1.5		κ=90 °		
Sorszám	f [mm/ford]	d [mm]	P [kW]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
1	0.2	3.5	5.8	1519.57	770.09	817.17
2	0.316	3.5	6.8	2076.78	1304.73	1017.30
3	0.4	3.5	7.7	2585.92	720.05	981.98
4	0.542	3.5	8	3584.57	618.03	1009.45
5	0.66	3.5	9	3653.24	1084.01	1000.62
1	0.2	3	5	1384.19	592.52	565.06
2	0.316	3	5.8	2112.09	438.51	575.85
3	0.4	3	6.3	2361.27	521.89	862.30
4	0.542	3	7.4	2468.20	612.14	995.72
5	0.66	3	9	3657.17	913.31	1074.20
1	0.2	3	5	1501.91	742.62	551.32
1	0.2	2.5	4.9	1189.95	239.36	564.08
2	0.316	2.5	5.8	1653.97	258.98	532.68
3	0.4	2.5	6.8	1833.49	716.13	657.27
4	0.542	2.5	8	2135.64	827.96	767.14
5	0.66	2.5	9	2649.68	960.40	908.41
1	0.2	2	4.4	933.91	272.72	423.79
2	0.316	2	5.4	1221.35	722.02	662.18
3	0.4	2	6	1755.99	745.56	715.15
4	0.542	2	7	1854.09	1363.59	946.67
5	0.66	2	7.2	2240.60	1433.24	925.08

Munkadarab anyag: C60		Szerszám anyag: 'A' lapka				
v = 80 m/min		r _e : 1.5		κ=90 °		
Sorszám	f [mm/ford]	d [mm]	P [kW]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
1	0.2	2	4.6	1030.05	578.79	657.27
2	0.316	2	5	1638.27	1030.05	686.70
3	0.4	2	6	1687.32	549.36	873.09
4	0.542	2	6.9	2393.64	951.57	882.90
5	0.66	2	7	2580.03	922.14	1108.53
1	0.2	2.5	5	1490.14	139.30	677.87
2	0.316	2.5	5.8	1593.14	504.23	859.36
3	0.4	2.5	6.4	2617.31	800.50	1089.89
4	0.542	2.5	7.2	2809.58	1165.43	1062.42
5	0.66	2.5	7.5	3237.30	1163.47	1054.58
1	0.2	1.5	4	892.71	469.90	416.93
2	0.316	1.5	4.8	1346.91	536.61	526.80
3	0.4	1.5	5	1652.99	665.12	594.49
4	0.542	1.5	6	1558.81	506.20	792.65
5	0.66	1.5	6.2	2100.32	458.13	694.55
1	0.1	1	3.4	447.34	76.52	190.31
2	0.146	1	3.6	556.23	302.15	273.70
3	0.2	1	3.8	593.51	605.28	294.30
4	0.316	1	4.1	1052.61	412.02	337.46
5	0.4	1	4.4	1050.65	664.14	361.01
6	0.542	1	4.8	1280.21	786.76	407.12
7	0.66	1	5.2	1513.68	1152.68	404.17

Munkadarab anyag: C60 d=3 mm			Szerszám anyag: 'A' lapka r _ε : 1.5 κ=90 °		
Sorszám	v [m/min]	f [mm/ford]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
1	110	0.2	1702.04	792.65	963.34
2	110	0.316	2613.38	915.27	1122.26
3	110	0.4	2973.41	1026.13	1394.98
4	110	0.542	3573.78	1456.79	1639.25
5	110	0.66	4635.23	1831.53	1974.75
1	80	0.2	1417.55	524.84	1094.80
2	80	0.316	1979.66	704.36	1137.96
3	80	0.4	2631.04	747.52	1338.08
4	80	0.542	3421.73	1229.19	1583.33
5	80	0.66	4354.66	1471.50	1717.73
1	65	0.2	2226.87	588.60	1094.80
2	65	0.316	2601.61	875.05	1292.96
3	65	0.4	3362.87	1040.84	1347.89
4	65	0.542	3737.61	1247.83	1497.99
5	65	0.66	4388.99	1939.44	1638.27
1	50	0.2	1620.61	875.05	996.70
2	50	0.316	2585.92	959.42	1209.57
3	50	0.4	2672.24	1297.86	1357.70
4	50	0.542	3501.19	1572.54	1575.49
5	50	0.66	4174.16	2025.77	1908.05

Munkadarab anyag: C60		Szerszám anyag: 'A' lapka			
d=2 mm		r _g : 1.5		κ=90 °	
Sorszám	v [m/min]	f [mm/ford]	F _f [N]	F _m [N]	F _e [N]
1	110	0.2	1678.49	661.19	591.54
2	110	0.316	1759.91	739.67	665.12
3	110	0.4	1973.77	706.32	905.46
4	110	0.542	2650.66	909.39	1141.88
5	110	0.66	2948.89	1562.73	1179.16
1	80	0.2	1226.25	620.97	608.22
2	80	0.316	1640.23	778.91	727.90
3	80	0.4	1822.70	990.81	851.51
4	80	0.542	2707.56	861.32	917.24
5	80	0.66	3068.57	1155.62	1262.55
1	65	0.2	1101.66	873.09	694.55
2	65	0.316	1854.09	807.36	944.70
3	65	0.4	2043.42	1000.62	971.19
4	65	0.542	2507.44	1168.37	1218.40
5	65	0.66	3041.10	1553.90	1507.80
1	50	0.2	1009.45	920.18	876.03
2	50	0.316	2084.63	1118.34	917.24
3	50	0.4	2191.55	1213.50	1050.65
4	50	0.542	2759.55	1309.64	1177.20
5	50	0.66	3006.77	1393.02	1439.13