tanulmányok 76/1978

MTA Számitástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet Budapest

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
SZÁMITÁSTECHNIKAI ÉS AUTOMATIZÁLÁSI KUTATÓ INTÉZETE

MÒDSZER MUNKADARABOK FORGÀCSOLÒ MEGMUNKÀLÀSI FOLYAMATÀNAK OPTIMALIZÀLÀSÀRA

Irta:

SOMLÓ JÁNOS
NAGY JUDIT

Tanulmányok 76/1978.

A kiadásért felel:

DR VÁMOS TIBOR

ISBN 963 311 059 9

ISSN 0324-2951

789578 MTA KESZ Sokszorosító. F. v.: dr. Héczey Lászlóné

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS

Forgácsoló megmunkálási folyamatok optimalizálásán általában a müveletelemek optimális előtolás és forgácsoló sebesség értékeinek meghatározását értik. Ehhez kapcsolódhat még, azokban az esetekben, amikor a ráhagyás egy fogásban nem távolitható el, az optimális fogásosztás meghatározása.

A jelen dolgozatban azzal a problémával foglalkozunk, amikor a munkarab forgácsoló megmunkálási folyamatának egészével kapcsolatosan támasztanak követelényeket. Ezek a követelmények vonatkozhatnak a megmunkálási időkre, vagy az egyes szerszámok kopásaira.

A munkadarab megmunkálási folyamatának jellemzőit (adott gépet feltételezve) a müveletek sorrendje, az alkalmazott szerszámok, az egy fogásban el nem távolitható ráhagyások fogásokra való felosztása, és az egyes müveletelemek során alkalmazott előtolások és forgácsoló sebességek szabják meg.

Az optimalizálási probléma általános megoldása igen bonyolult, ezért a következőkben arra a problémára korlátozódunk, amikor a cél a müveletelemek optimális előtolásainak és forgácsoló sebességeinek olyan megállapitása, hogy azok eleget tegyenek a munkadarabra vonatkozó (megmunkálási idő, szerszámkopás) feltételeknek is.

Érintjük az optimális fogásosztás kérdését is.
Vizsgálatainkat arra az esetre korlátozzuk, amikor a megmunkálást egyidejüleg csak egy-egy szerszám végzi.

1. A FORGÁCSOLÁSI FOLYAMAT LEIRÁSA.

Mivel a szakirodalom ezt a kérdést részletesen elmezi e helyen csak a jelen fejezetben felhasznált összefüggések igen tömör összefoglalását adjuk. A forgácsolási folyamattal szemben támasztott alapvető követelmény az alkatrész kivánt minőségének létrehozása ugy, hogy a megmunkálás egyidejüleg elégitsen ki bizonyos gazdaságossági feltételeket is. A minőségi és gazdaságossági követelmények mindig együttesen lépnek fel, bár a nagyoló müveletek esetében általában a gazdaságossági, simitó müveletek esetében pedig a minőségi mutatók kapnak nagyobb hangsulyt.

E kettős követelmény egyidejü kielégitése nem könnyü feladat. Nem ismerjük ugyanis pontosan a minőségi jellemzők és forgácsolási folyamat alapvető paraméterei - a fogásmélység, az előtolás, a forgácsolási sebesség, - közötti összefüggéseket. Rendkivül gyors folyamatról van szó, melynek közelitése sok elhanyagolás mellett is nehéz. Bonyolulttá teszi a feladatot a folyamatot meghatározó tényezők - a ráhagyás, az anyag keménysége és homogenitása, a forgácsolóképesség, a rugalmas és hő okozta deformációk, a beállitási pontatlanságok, stb. - elég széles határok közötti véletlenszerü ingadozása.

Végül igen összetett az a gazdasági modell, amelynek segitségével a folyamat gazdaságossági mutatói szabályozhatók.

1.1 Alapösszefüggések

A forgácsolási folyamat jellemzésére a forgácsoláselmélet néhány egyszerü alapösszefüggést alkalmaz. Ezeket használják fel összetettebb problémák megoldására is. Vizsgáljuk meg röviden a forgácsolóerő és az éltartam meghatározására szolgáló általános összefüggéseket, anélkül, hogy az egyes megmunkálási módok sajátosságait külön elemeznénk.

1.1.1 A forgácsolóerő számitása

Iparunkban főként az u.n. "kitevős erőegyenletek" terjedtek el, ezekre vannak többé-kevésbé összefüggő kisérleti adatok. Több tényezőt vesznek figyelembe, igy pontosabb eredményt szolgáltathatnak. A kitevős erőegyenlet a főforgácsolóerőre, esztergálás esetében

$$F_f = C_f \cdot f^{x_f} \cdot e^{y_f} \cdot v^{z_f}, \qquad (1.1)$$

ahol C_f - a megmunkálandó anyag pillanatnyi forgácsolhatóságát és a szerszám pillanatnyi forgácsoló képességét jellemző állandó.

x_f, y_f, z_f - a szerszámtól, a munkadarabtól és a megmunkálás körülményeitől függő kitevők

f - a fogásmélység mm

e - az előtolás mm/ford

v - a forgácsolósebesség m/perc

A forgácsolóerő normális és előtolás irányu összetevőire hasonló összefüggéseket alkalmaznak. A forgácsolás teljesitménye és a fellépő nyomatékok az erőegyenletek alkalmazásával könnyen számithatók.

A "fajlagos forgácsolóerőre" alapozott erőképlet nem más, mint a kitevős erőegyenlet egyszerüsitett változata. A forgácskeresztmetszet területe $S = e \cdot f$ mm^2. Ha az 1 mm^2 keresztmetszetü forgács leválasztásához szükséges erőt C_{f1} -gyel jelöljük,

akkor

$$F_f = C_{f1} \cdot e \cdot f \qquad (1.2)$$

Ehhez az összefüggéshez jutunk az (*1*) képletből, ha feltételezzük, hogy $x_f = y_f = 1$ és $z_f = 0$.

Más megmunkálások esetében az összefüggés jellege ugyanilyen, de v, e és f mellett, vagy helyett más paraméterek is szerepelhetnek.

1.1.2 A szerszám éltartama

A forgácsolási paraméterek, a megengedett kopásérték és a szerszám éltartama közötti valóságos összefüggés igen bonyolult, Az utóbbi időben több biztató eredményt értek el e témakörben, mégis az ipari gyakorlatban csupán az egyszerü Taylor egyenlet használható, mivel viszonylag megbizható és aránylag bő adathalmaz csak ehhez áll rendelkezésünkre.

A közismert Taylor-féle éltartam-összefüggés esztergálásra:

$$T^m = \frac{C_v}{v \cdot e^{y_v} \cdot f^{x_v}} \qquad (1.4)$$

amelyben

- T - a szerszám éltartam, perc,
- m - az u.n. Taylor kitevő,
- C_v - az összefüggés konstansa, amely függ a munkadarab anyagától, a szerszám minőségétől és a megmunkálás egyéb körülményeitől is;
- x_v, y_v - a megmunkálási körülményektől függő kitevők

1.2 A forgácsolási folyamat optimalitása

A gazdasági és minőségi követelmények elsődlegesen a megmunkálási mód, a szerszámgép és a gyártóeszközök helyes megválasztásával elégithetők ki. E meghatározó ereju döntések meghozatala után azonban a forgácsolási paraméterek optimális meghatározása az egyetlen eszköz a technológus kezében, amellyel befolyásolhatja a kitüzött müszaki és gazdasági célok elérését.

A leggyakoribb, minden megmunkálás során felmerülő optimumkritériumok a megmunkálás maximális termelékenységének, vagy minimális önköltségének megvalósitása. Ez annyit jelent, hogy a forgácsolási paramétereket ugy kell megválasztani, hogy az adott müveletelemre a megmunkálási idő, illetve a müveletelem önköltsége a lehető legkisebb legyen.

Vizsgáljuk meg az önköltség esetét. A megmunkálási idővel közvetlen kapcsolatban álló költségek, mint pl. a géphasználat költsége, a dolgozó munkabére, a vállalati költségek stb. jó megközelitéssel számithatók. A szerszám használatával, kopásával kapcsolatos költségekkel már több probléma akad, mivel a forgácsolási folyamat véletlenszerü változásai az éltartamot is befolyásolják.

A forgácsolási folyamat gazdaságosságának alapproblémája, hogy az előtolás és a fordulatszám növelésekor a gépi főidő és az azzal kapcsolatos költségek csökkennek, a szerszámozási költségek viszont növekednek. A feladat tehát olyan kompromisszum, optimumpont megkeresése, amelyben a költségek összege minimális.

Határozzuk meg a költségeknek a forgácsolási paraméterektől függő összetevőit. A megmunkálási hosszot h-val jelöltük.

Feladatunk a legkedvezőbb forgácsolási sebesség, s az azzal teljesen egyenértékü legkedvezőbb n fordulatszám meghatározása. Mivel a szerszám egy perc alatt n.e utat tesz meg, a h hossz megmunkálásának ideje

$$t_h = \frac{h}{n \cdot e} \text{ perc} \qquad (1.5)$$

Ha a gép egy percnyi munkájának költsége C_M Ft/perc, akkor ez a h hosszon

$$K_I = C_M \, t_h \text{ Ft} \qquad (1.6)$$

költséget ad. Azonban ez csak a költségek egyik része. A költségek másik részét a szerszámfelhasználás költsége adja.

Tételezzük fel, hogy a megmunkáláskor ismert a szerszám éltartama. Jelölje ezt T_h perc.

Ha az egy élezésre eső szerszámköltség K_{sz} Ft, akkor ennek a h hossz megmunkálásra eső része

$$K_{II} = K_{sz} \frac{t_h}{T_h} \text{ Ft} \qquad (1.7)$$

Ez azonban nem a szerszámmal kapcsolatos teljes költség, hiszen általában a szerszámcserével kapcsolatban is felmerülnek költségek.

Amikor a szerszámcsere a gép munkaidejének felhasználásával jár ez a költség

$$K_{III} = C_M \, t_{cs} \frac{t_h}{T_h} \text{ Ft} \qquad (1.8)$$

ahol t_{cs} - a szerszámcsere ideje, perc, mivel a szerszámcsere ideje egy teljes T_h éltartamra vonatkozik.

Összegezzük a költségeket:

$$K = K_I + K_{II} + K_{III} = C_M\, t_h + K_{sz}\frac{t_h}{T_h} + C_M\, t_{cs}\frac{t_h}{T_h} \;;\ \text{Ft} \qquad (1.9)$$

Vezessük be a

$$C_T = \frac{K_{sz}}{C_M} + t_{cs} \;;\ \text{perc} \qquad (1.1o)$$

jelölést.

Érdekes megfigyelni, hogy $\frac{K_{sz}}{C_M}$ idődimenzióju mennyiség.

Ez a hányados tulajdonképpen azt az időt adja meg, amelynek gépköltsége azonos az egy élezésre jutó szerszámköltséggel.

Helyettesitsük be a t_h értékét is:

$$K = \frac{h}{n \cdot e}\, C_M\left(1 + \frac{C_T}{T_h}\right) \qquad (1.11)$$

Az (*1.11*) képletben a $\frac{C_T}{T_h}$ dimenzió nélküli mennyiség azt fejezi ki, hogy a gép időegységnyi munkájának költségéhez e költség hányadrészét kell hozzáadni, hogy tekintetbe vegyük a szerszámmal kapcsolatos költségeket.

Mivel az optimalizáláskor a megmunkált hossznak nincsen jelentősége, célszerü a számitásokat $h = 1$ mm hosszra elvégezni.

Ekkor

$$K = \frac{C_M}{n\ e}\ (1 + \frac{C_T}{T})\ R \qquad (1.12)$$

Az optimalizálás célja az előtolás és a fordulatszám (vagy az ezzel arányos forgácsoló sebesség) olyan megválasztása, hogy a K költség, vagy célfüggvény minimumát érje el.
Gyakran a megmunkálási idő minimalizálása a cél. Ilyenkor szokás a *maximális termelékenység* célfüggvényéről beszélni. A megmunkálási idő a (*1.11*) kifejezésből könnyen megkapható, csupán $C_M = 1$ és $K_{sz} = 0$ értékeket kell behelyelyettesiteni. Az (*1.12*) célfüggvény alakja változatlan marad, de az optimumpont a C_T értékének változása miatt eltolódik a nagyobb fordulatszámok irányába.

1.3 Az optimumkeresés határai, feltételrendszerek

Az aktuális gazdasági stratégia, a munkadarab, a készülék, szerszámgép és a szerszám - az adott MKGS rendszer- tulandonságai határozzák meg az optimumpont helyét.

A munkadarab minőségi jellemzői, a rendszer elemeinek konstrukciós szilárdsági és merevségi tulajdonságai, a forgácsolási folyamat stabilitása, a szerszámgép teljesitménye, a fogásvételi, előtolás és fordulatszám tartományok határai stb. a korlátozó feltételek egész rendszerét alkotják. Nyilvánvaló, hogy az optimumkeresés során csak olyan forgácsolási paraméterek jöhetnek számitásba, amelyek valamennyi korlátozó feltételt kielégitik. A lehetséges megoldások halmazát meghatározó korlátozások rendszere adja a *feltételrendszert*.

A korlátok egyrésze teljesen triviális, de vannak közöttük összetett, mélyebb elemzést igénylő feltételek is.

A leggyakoribb korlátozások az előtolás, a fordulatszám, a fogásmélység, a forgácsolóerővel és teljesitménnyel összefüggő, az adott felület minőségét, rezgésmentességet, stb. biztositó korlátozások.
A forgácsolóerő számitását tárgyaló részben bemutattuk, hogy az erő tipusu mennyiségek a fogásmélység, az előtolás és a forgácsoló sebesség különböző hatványokra emelt szorzata gyanánt határozhatók meg. Ugyanez igaz azokra a többi mennyiségekre is, amelyekre a fent felsorolt korlátozások vonatkoznak. Igy, ha ismeretesek azok a korlátértékek, amelyek nem léphetők tul, akkor az alkalmazható tecnhnológiai paramétereket a következő tipusu összefüggések korlátozzák.

$$E_{i\,min} \leq f^{x_i}\, e^{y_i}\, v^{z_i} \leq E_{i\,max} \qquad i=1,2,3,\ldots$$

ahol $E_{i\,min}$ és $E_{i\,max}$ alsó és (vagy) felső korlát értékek.

A fenti egyenlőtlenségek alkotják a megmunkálás ugynevezett *feltételrendszerét*, amelyek meghatározzák a technológiai adatok azon tartományát, amelyek egyáltalán alkalmazhatók. A feltételrendszer, az éltartam összefüggéssel és a célfüggvénnyel együtt alkotja a megmunkálás *matematikai modelljét*.

2. FORGÁCSOLÁSI PARAMÉTEREK OPTIMALIZÁLÁSA.

2.1 Opitmumkeresés rögzitett f érték mellett.

Az előzőekben ismertettük a forgácsolási folyamat egy lehetséges matematikai modelljét. Ebben a modellben három olyan mennyiség szerepelt, amelyeket, adott korlátozások betartásával, szabadon lehet megválasztani.
Matematikailag megalapozott ez a választás, ha a választott értékek mellett a célfüggvény optimális értékű.
Először azzal az esettel foglalkozunk, amikor a főorsó fordulatszáma fokozatmentesen változtatható.
Ekkor az előtolás és a főorsó fordulatszám szerepe hasonló.
Nevezetesen a feltételrendszer szabta korlátok között bármilyen értéket felvehetnek.
Nem igaz ugyanez a fogásmélységre. Nyilvánvaló, hogy adott ráhagyás eltávolitásakor, az egyes fogásmélységek összegének a ráhagyás értékét kell kiadnia. Vagyis

$$f_1 + f_2 + f_3 + \ldots + f_N = R \qquad (2.1)$$

ahol

R az adott ráhagyás
$f_1, f_2 \ldots$ az egyes fogásmélységek értékei
N a fogások száma.

A (2.1) korlátozás különbözik az előző fejezetben ismertetett matematikai modellek korlátozásaitól. Nevezetesen, nem csak egy müveletelemre vonatkozik, hanem többet kapcsol össze. Nem egyenlőtlenség, hanem egyenlőség, nem szorzat, hanem összeg tipusu.
Ez, általában azt jelenti, hogy a fogásmélységet tartalmazó háromdimenziós optimalizálási feladat nem kezelhető ugy, mint az előtolást, forgácsoló sebességet tartalmazó kétdimenziós feladat.

Természetesen a fogásmélység optimális, vagy kvázi-optimális megválasztásának is jelentős szerepe van. Azonban, ennek alapjául csak a kétdimenziós feladatok megoldása szolgálhat.

Ezért először azt az esetet elemezzük, amikor a fogásmélység adott.

Ekkor a megmunkálási folyamat feltételrendszere a következő általános alakban irható fel:

$$G_{i\,min} \leqq e^{y_i} v^{z_i} \leqq G_{i\,max} \qquad (2.2)$$

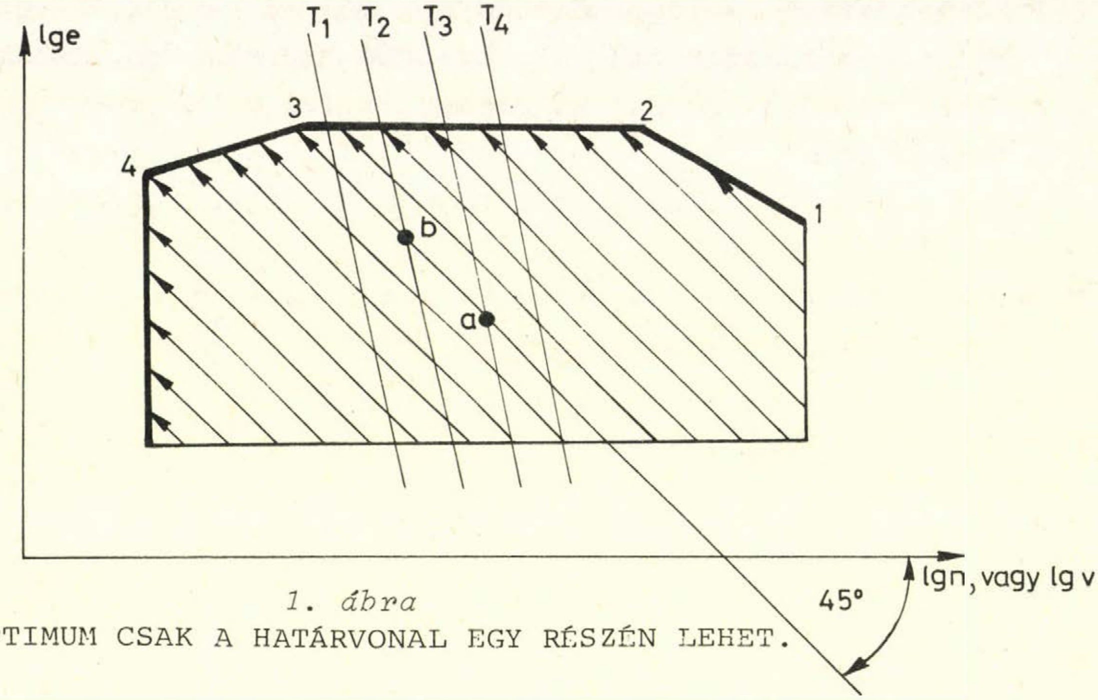
$$i=1,2,3,...$$

ahol $G_{i\,min}$ és $G_{i\,max}$ alsó és felső korlát értékek. Amikor csak az egyik érvényes, a másik hiányozhat. A csak az előtolásra, vagy a forgácsoló sebességre vonatkozó korlátozások esetében y_i, vagy z_i értéke zérus.

Ilyen korlátozások mellett az előtolás és forgácsoló sebesség pár optimalizálására a következő két tétel használható fel.

1. TÉTEL. Az optimumpont

Az optimumpont csak a keresési tartomány határán lehet, sőt ott sem akárhol, hanem csak azokon a szakaszokon, amelyeket a lg n, lg e sikban ábrázolt tartomány bármely pontjából felfelé induló -45° hajlásszögű egyenes metsz (1. ábra)



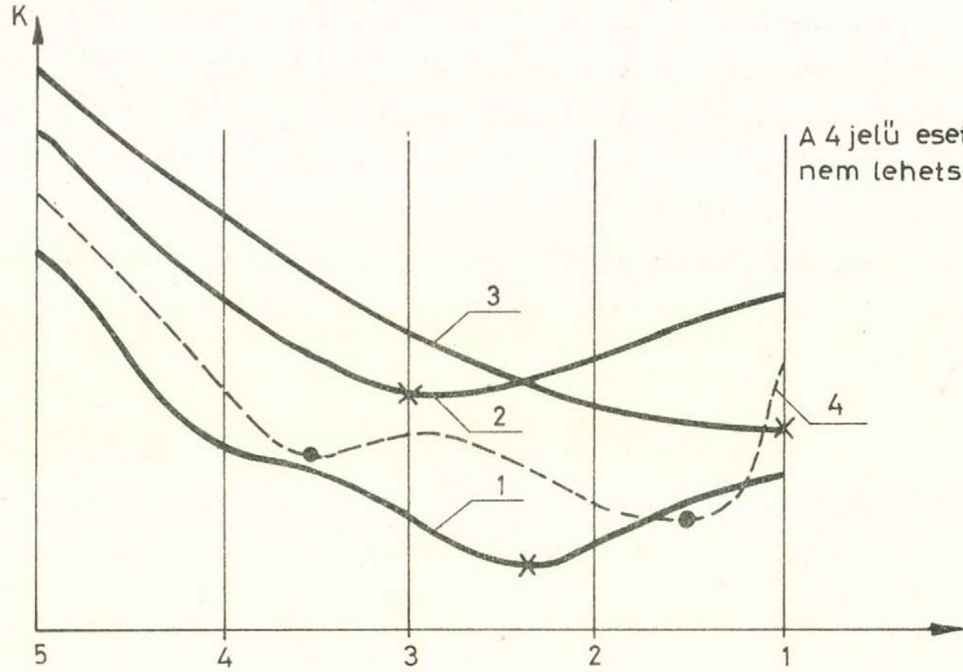
1. ábra
AZ OPTIMUM CSAK A HATÁRVONAL EGY RÉSZÉN LEHET.

Bármelyik -45° -os egyenesen az n•e szorzat értéke állandó, azaz az egyenesen felfelé haladva a megmunkálás főideje változatlan marad. Ugyanakkor viszont egyre nő a T éltartam értéke.
A $T_1, T_2, \ldots, T_n$ éltartam egyenesek meredekebbek, mint a -45° -os egyenes.
Hajlásszögük ugyanis

$$L = \operatorname{arctg}\left(-\frac{1}{y_v}\right)$$

s közismert, hogy az éltartam összefüggés y_v kitevőjének értéke általában 0,2 – 0,3 , de feltétlenül kisebb mint egy. Nyilvánvaló, hogy $T_1 > T_2 > \ldots > T_n$ s igy az 1. ábra kiemelt egyenesének a pontjában az éltartam kisebb mint a b pontban. A főidő állandósága és az éltartam növekedés (azaz a szerszámozási költségek csökkenése) azt jelenti, hogy az egyenesen felfelé haladva a költségfüggvény (célfüggvény) értéke egyre kisebb lesz. Csökkenésének a megengedett tartomány határába való ütközés vet gátat. A célfüggvény legkedvezőbb értéke az egyenes mentén a c pontban van. Ez a tétel bármelyik olyan egyenesre igaz, amelynek hajlásszöge -45^o és a tartomány bármely pontjából indul, igy belátható, hogy az optimális pont csak az 1-2-3-4-5 szakaszon lehet. Ezt a következőkben optimumesélyes határvonalnak nevezzük. Hogyan találhatjuk meg az optimális pontot? Ebben a következő, már nem ennyire egyszerüen belátható tétel segit.

2. TÉTEL Az optimum szempontjából esélyes görbén legfeljebb egy lokális szélsőérték pont lehet.
A *2. tételt* megint az előző példán szemléltetjük.
Az 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 szakaszokat bennfoglaló egyenesekben a potenciális optimumpontok helye egyszerü szélsőérték számitással meghatározható. Ha a szélsőérték a megengedett tartományt behatároló valamelyik szakaszon van, akkor az az opitmális pont. Ha a szélsőérték pont kivül esik a tartomány határain, akkor a célfüggvény értéke a tartományt határoló szakasz valamelyik szélső pontjában lesz minimális. Ezek szerint az optimum az 1,2,3, 4,5 pontokon kivül csak az 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 szakasz valamely egyetlen pontjában lehet. A lehetséges eseteket a 2. ábra szemlélteti. Vagy az 1 jelü esettel találkozunk, amikor valamelyik szakaszon valóban létezik egy szélsőérték, vagy a 2 jelü görbével jelzett eset valósul meg, amikor két szakasz közös pontja az optimális, vagy a 3 jelü változat, amikor az optimumpont a tartomány szélére esik.



2. ábra

CSAK EGYETLEN LOKÁLIS SZÉLSŐÉRTÉK PONT LEHETSÉGES

2.1.1 Az optimalizálás algoritmusa

Bebizonyitható, hogy amikor az optimumesélyes határvonal valamelyik szakaszán létezik lokális szélsőértékpont, akkor az ehhez tartozó éltartam $T_{\text{szélsőérték } j} = T_{szj}$ állandó, és értékét a következő kifejezés határozza meg:

$$T_{szj} = \frac{1+y_v N_j - (N_j+1)\, m}{m\,(N_j+1)} C_T \qquad (2.3)$$

ahol N_j az

$$e = G_j v^{N_j} \qquad (2.4)$$

megengedett tartomány határoló görbe logaritmus transzformáció utáni meredeksége. (a j-index azt jelzi, hogy minden szakaszhoz saját opitmális éltartam érték tartozik).

A (2.3) kifejezés a (2.2) alakban felirt korlátozások esetén, mivel $N_j = -\frac{z_j}{y_j}$, a következő:

$$T_{szj} = \frac{y_j - y_v z_j - (y_j - z_j)m}{m(y_j - z_j)} C_T \qquad (2.5)$$

Az optimalizálás algoritmusa ennek alapján a következő: Sorban meghatározzuk az optimumra esélyes határvonal valamennyi szakaszának határpontjait az óramutatóval ellenkező irányban haladva. (Azért ezt az irányt választjuk, mert nagyobb a valószinüsége, hogy az első néhány szakaszon van az optimális pont.)
Minden egyes szakaszra csakis a következő esetek lehetségesek:

1. A szakasz pontjai közül valamelyik végpontban legkisebb a célfüggvény értéke, vagy
2. a szakasz valamelyik pontjában a célfüggvény lokális szélsőértékét éri el. Ez utóbbi esetben ez a pont (az 1. és 2. tételek szerint) globális szélsőérték pont is.

Az optimális pontot a következő eljárással határozhatjuk meg:

a) az 1. pontban az (1.4) képlet szerint kiszámitjuk a hozzá tartozó T_1 éltartamot. Meghatározzuk (2.3) képlet szerint az első (1-2) szakaszhoz (lásd 3. ábra) tartozó optimális T_{sz1} éltartamot.
b) Összehasonlitjuk a T_1 és T_{sz1} éltartamot.

c) Ha $T_1 \geqq T_{szl}$,

akkor az 1. pont opitmális.
(Ez nyilvánvaló, hiszen ekkor a célfüggvény értéke az adott szakaszon csökken és legkisebb értékét az 1. pontban éri el.)

d) Ha $T_1 < T_{szl}$

akkor kiszámitandó az éltartam értéke, T_2, a 2. pontban is.

e) Ha $T_2 > T_{szl}$

akkor a szakaszon lokális szélsőérték pont van (lásd 3. ábra)
Az optimális ponthoz tartozó előtolás és forgácsoló sebesség értékek (e_{opt} és v_{opt}) a

$$T^m = T^m_{szl} = \frac{C_v}{v\, e^{y_v} f^{x_v}}$$

és

$$e = G_1 v^{N_1}$$

összefüggésekből kiszámitható

$$v_{opt} = \left[\frac{C_v}{G_1^{y_v} f^{x_v} T^m_{szl}} \right]^{\frac{1}{y_v N_1 + 1}}$$

$$e_{opt} = G_1 v_{opt}^{N_1}$$

f) Ha $T_2 < T_{szl}$

akkor az első szakaszon nincs az optimális pont és a 2. ponttól kezdődően megismétlődnek az 1-2 szakaszra elvégzett vizsgálatok.

g) Ez az eljárás addig folytatandó, ameddig meg nem találjuk az optimális pontot. Megtörténhet még az is, hogy az eljárás folyamán eljutunk egy olyan szakaszig, amelyre az optimális éltartam negativnak bizonyul.
Ebben az esetben az előző szakasz második határpontja az opitmális pont.

Az MTA SZTAKI-ban a vázolt elvek alapján dolgoztunk ki optimalizálási programokat CDC-3300 számitógépre és különböző tipusu kis számitógépekre. Az eljárás még kis gépen is rendkivül gyorsnak bizonyult, igy még kalkulátor szintü alkalmazása is perspektivikus. Nagygépes alkalmazásakor, mint a későbbiekben bemutatjuk, magasabbszintü optimalizálási problémák megoldásának alapjául szolgálhat.

2.2 Optimalizálás más matematikai modellek esetében.

Az előbbi pontokban elemzett optimalizálási módszer feltételezi, hogy a rendszer matematikai modellje a korábbi pontokban leirt. Azonban, a módszer több alapgondolata más matematikai modell esetében is alkalmazható.

a) Diszkrét főorsó hajtásokra a módszer igen egyszerüen általánositható. Az 1. és 2. tételek alapján az optimális fordulatszám a folyamatos megoldás előtti, vagy utáni értékü lesz. Az optimális előtolást az optimum esélyes határvonalon lévő pont határozza meg. Nagyon ritka esetekben előfordulhat, hogy az optimális előtolást a folyamatos eset optimális fordulatszáma feletti fordulatszámnak a lokális szélsőérték pontja határozza meg (4. ábra)

Kiszámitandó a célfüggvény értéke a fenti pontokban (a harmadikban csak akkor, ha a megengedett tartományon belül van). Opitmális az a pont, amelyre a célfüggvény értéke a legkisebb.

b) Amikor a forgácsolás megengedett tartománya, valamilyen okból (például rezgések keletkezése miatt) több részre esik szét (lásd 4. ábra) az optimalizálási módszer gyakorlatilag változatlanul alkalmazható.
Ekkor az optimalizálást a résztartományokra külön kell elvégezni. Az egyes optimális pontokban kiszámitandó a célfüggvény értéke. Ahol ez a legkisebb, ott lesz a globális optimum.

c) A forgácsoló szerszámok éltartama az egyik legjelentősebb probléma. A gyakorlatban elterjedt összefüggéseket gyakran kritizálják és uj és uj javaslatok jelennek meg.
Vizsgáljuk meg, hogy az optimumkeresésre javasolt két tétel szempontjából milyen következménnyel jár, ha az éltartam összefüggés eltér a Taylor által javasolttól.

c-1) Először vizsgáljuk azt az esetet, amikor bizonyos sebesség résztartományokban a Taylor összefüggés jól leirja az éltartamot, azonban, az összefüggés paraméterei a résztartományokra különbözőek (szakaszos Taylor összefüggés).
Nyilvánvaló, hogy ekkor a jelen rész b) pontjában alkalmazott módszer alkalmazható. Ebben az esetben a megengedett résztartományok összefüggők, de a különböző sebesség (fordulatszám) tartományokhoz különböző Taylor összefüggés paraméterek tartoznak.

c-2) A szakaszos Taylor összefüggés bonyolultabb esetekben is az éltartam jó közelitését adhatja. A pontosság fokozható a sebesség tartományok felosztásának finomitásával. Ez lényeges számitástechnikai nehézséget az optimalizáláskor nem okoz.

d) Azokban az esetekben, amikor megfelelő megoldást ez sem nyujt, tehát az éltartam és a technológiai adatok összefüggése csak bonyolultabb módon jellemezhető, a következő megoldások segithetnek az optimalizáláskor.

Ismeretes, hogy általában a forgácsoló sebesség változása jóval jelentősebb az éltartamra, mint az előtolásé. Amikor ez érvényes, akkor az opitmalizálás *1. tétele* érvényben marad függetlenül az éltartam összefüggés formájától.

Igy, az optimális pont szintén a tartomány határán, nevezetesen, az *1. tétel szerint meghatározandó opitmum esélyes határvonalon* található. Amikor az ezt alkotó szakaszok lokális szélsőérték pontjai egyszerüen meghatározhatók, akkor a 2.1.1 pontban leirthoz hasonló algoritmus alkalmazható azzal a különbséggel, hogy a *2. tétel* adta egyszerüsités lehetősége hiányzik. - Más esetekban az optimum esélyes határvonalon való közvetlen keresés sem látszik számitástechnikailag különösebben nehéz feladatnak.

e) Azokban a ritka esetekben, amikor a forgácsolás megengedett tartományában találhatók olyan pontok, amelyekben az előtolás hatása az éltartamra nagyobb, mint a forgácsoló sebességé, akkor a helyzet megváltozik. Az optimumra esélyes pontok halmazának -45^{o} -os egyenesének mentén való keresése ekkor is helyes ut. Azonban, mint ezt a 6. ábra mutatja, ebben az esetben a

$$\frac{\partial T}{\partial e} = \frac{\partial T}{\partial v}$$

feltételnek eleget tevő pontokban, tehát a tartomány belsejében is lehet optimális pont.

Az optimális technológiai adatok meghatározhatók az erre esélyes pontok halmazán alkalmazott kereséssel. A keresés módja függ az éltartam összefüggés formájától.

f) Előfordulhatnak bonyolultabb alaku feltételrendszerek és éltartam összefüggések, amelyek nem teszik lehetővé a vázoltak alkalmazását. Azonban ezek, véleményünk szerint, a gyakorlati esetek kisrészét alkotják.
- Ekkor az optimalizálás megoldható szabvány matematikai programozási módszerekkel, azonban ennek számitásigényessége rendszerint jelentős.

3. OPTIMÁLIS FOGÁSOSZTÁS

Az eddigiekben feltételeztük, hogy az f fogásmélység adott s csak az előtolás és fordulatszám optimális értékét kell meghatározni. Általános esetben ez nem igaz, hiszen a ráhagyás nagyobb is lehet a legnagyobb megengedhető fogásmélységnél, de ellenkező esetben sem nyilvánvaló, hogy egy fogással érjük el az optimumot. Kimondhatjuk tehát, hogy a fogásmélységet is ismeretlen tényezőként kell kezelni.
Modellünk ekkor háromdimenzióssá válik. A probléma az f_1, $f_2, f_3, \ldots, f_k$ fogásmélységek, valamint a hozzájuk tartozó $e_1, n_1, e_2, n_2, \ldots, e_k, n_k$ előtolások és fordulatszámok olyan értékének meghatározása, amelyek mellett a

$$K = K_1 + K_2 \ldots + K_k$$

költség (vagy idő) minimális. Ennek során nemcsak a fogásmélységet, hanem a fogások k számát sem ismerjük előre. Nyilvánvaló és lényeges korlátozás, hogy mint emlitettük, a fogásmélység összegének a megadott R ráhagyást kell kiadnia, azaz

$$f_1 + f_2 + \ldots f_k = R.$$

A költség (vagy idő) számitásakor figyelembe kell venni a visszafutások költségeit, valamint a fogásvétellel kapcsolatos egyéb járulékos veszteségeket is.
Többfogásos megmunkálás esetében a költségösszefüggést egy-egy fogásra a következő alakban irhatjuk fel:

$$K = \frac{\Delta L \cdot C_M}{e \cdot n}\left(1 + \frac{C_T}{T}\right) + \frac{\Delta L_{vf} \cdot C_M}{e_{vf}} + C_M \cdot t_{ve} \qquad (3.1)$$

ahol

ΔL – a megmunkált hosszu mm,

ΔL_{vf} – a visszafutási hossz mm,

e_{vf} - a visszafutás sebessége mm/perc
t_{ve} - járulékos fogásonkénti veszteségidő perc.

A fogásosztás optimalizálására kidolgozott módszerek közös vonása, hogy a feladatot kétdimenziósra redukálják, azaz különböző megfontolások alapján előre megtervezik a ráhagyás leválasztását több változatban, minden változat mindegyik - immár ismert - fogásmélységéhez a már ismertetett módszerrel rendre kiszámitják az opitmális e és n értékeket, majd a leválasztási tervek közül azt a változatot fogadják el optimálisnak, amely mellett a célfüggvény összegezett értéke minimálisra adódik.
A Magyarországon kidolgozott TAUPROG és a TURNMOD rendszerben a ráhagyást különböző számu egyenlő fogásokra osztják el. A legkisebb fogásszámot a ráhagyás és a maximálisan megengedett fogásmélység felfelé kerekitett hányadosa adja meg. Az igy kapott fogásmélység mellett meghatározzák a célfüggvény optimális értékét, majd a fogások számát eggyel növelik, s az uj fogásmélységgel ujból elvégzik az optimalizálást. Az eljárást addig ismétlik, mig a fogásszám ujabb növelésekor a célfüggvény értékének növekedését nem észlelik. Az utolsó előtti optimalizáláskor kapott fogásmélységet tekintik optimálisnak.

Ez a módszer jól akalmazható akkor is, ha a ráhagyást nem egyenlő fogásokra, hanem meghatározott mérnöki - heurisztikus szabályok szerint osztják fel.
Ilyen szabály lehet pl., hogy az első fogást az esetleges kéreg és a méretszóródás miatt külön kezelik, az utolsó fogást kisebbre veszik, stb.

A módszer fokozatmentes előtolás és fordulatszám változtatási lehetőségek esetében is jól alkalmazható.
Amikor az egyes fogások körülményei azonosak, a fenti eljárással a valódi optimumot határozzuk meg. Más a helyzet azonban akkor, mint pl. esztergálás esetében, amikor az átmérő is fogásról-fogásra változik. Ilyenkor nem tudhatjuk, hogy a kapott megoldás mennyire közeliti meg a valódi optimumot.

Fontos tehát a probléma szabatos matematikai megfogalmazása és megoldása.

A feladat a Bellman-féle dinamikus programozással oldható meg [6]. Ez szintén különböző esetek megoldásán, összehasonlításán és a legkedvezőbb változatok kiválasztásán alapul. A megoldás elve egyszerüsitve a következőkben foglalható össze: kiválasztanak bármely Δf elemi rétegvastagságot, s az egyes fogásokat ennek különböző egész számu többszöröseiként állitják elő.

Ezután azt vizsgálják, hogy hányszoros Δf értékig legkedvezőbb a ráhagyást egy fogásban eltávolitani. Ez ugy állapitható meg, hogy minden $2\Delta f$, $3\Delta f$, $4\Delta f$ stb. esetében kiszámitják az egy és valamennyi lehetséges két fogásban való megmunkálásra az optimális megmunkálási költséget. Amikor megjelenik egy olyan változat, amelynél a kétfogásos megmunkálás költsége kisebb, mint az egyfogásosé, attól kezdve a ráhagyást két fogásban kell eltávolitani. Tételezzük fel konkrét példaként, hogy $12\Delta f$ értékig az egy fogásban való megmunkálás a kedvező. Ekkor a $13\Delta f$ esetben meg kell vizsgálni azokat a változatokat, amikor az első fogás Δf, $2\Delta f$, $3\Delta f$,..., $12\Delta f$. Tételezzük fel, hogy $9\Delta f$ első és $4\Delta f$, második fogás alkalmazásákor a megmunkálás összköltsége kisebb, mint $13\Delta f$ egy fogásban való eltávolitásakor.

Tehát $13\Delta f$ ráhagyás esetében két fogás, mégpedig a $9\Delta f$ első a $4\Delta f$ második fogás az optimális. Hasonló módszerrel határozható meg az optimális fogásosztás $14\Delta f$, $15\Delta f$,...stb. esetekre is. Azonban ezeknél már a három fogásban való forgácsolást is vizsgálat alá kell venni. A dinamikus programozás nagy előnye itt mutatkozik meg. E módszer szerint azokat a változatokat nem kell megvizsgálni, amelyeknél valamely $13\Delta f$-nél kisebb réteg két fogásban lenne eltávolitva, hiszen $12\Delta f$-ig az egy fogás az optimális. Ez tetemesen csökkenti a megvizsgálandó változatok számát. A módszer hasonló módon alkalmazható három, négy stb. fogás esetére is.

A módszer a még igy is igen nagyszámu variáns miatt nagyon számitásigényes. A számitások mennyisége csökkenthető, ha felhasználjuk azt a tapasztalatot, hogy az optimum rendszerint a megengedett legnagyobb fogásmélység környezetében van.
Az optimális fogásosztás meghatározásának ezt a módszerét a [7] munka taglalja. A módszer alapján kidolgozott számitógépi program egy-egy esetre az optimális fogásosztást néhány perc alatt határozza meg. Ez a gyakorlati alkalmazások szemszögéből sok.
Ugyanez a program alkalmas viszont u.n. fogásosztási diagramok késziitésére, amelyek különböző átmérők és ráhagyások esetére megadják az opitmális fogásosztást, igy egy-egy optimalizálás helyett tulajdonképpen széles feladatcsoportot oldanak meg. Egy fogásosztási diagramot mutat be a 7. ábra. Ha valamely konkrét ráhagyás értékhez függőlegest állitunk, azt a diagram az optimális fogásoknak megfelelő szakaszokra bontja.

Pl. ha $R = 30$ mm, akkor $f_1 = 6{,}4$; $f_2 = 6{,}2$; $f_3 = 6$; $f_4 = 5{,}8$ és $f_5 = 5{,}6$ mm.

A fogásosztási diagramok hozzásegithetnek megalapozott fogásosztási stratégiák kialakitásához, s ahhoz, hogy a korábban felvetett problémára - milyen messze vannak a heurisztikus szabályok által adott eredmények az optimumtól - választ adhassunk.

4. MAGASABBRENDÜ OPTIMUMFELTÉTELEK KIELÉGITÉSE.

Az előzőekben tárgyalt számitógépes optimalizálási módszerek - az általános rendszer is -csak egy-egy müvelet optimumát határozzák meg, ugy, hogy a müveletet környezetéből kiszakitva vizsgálják, nincsenek tekintettel más müveletekre, más szerszámokra, a teljes megmunkálásra vagy munkadarabra, a gyártórendszer állapotára. Segitségükkel tehát közvetlenül nem oldható meg a szerszámcserék rendszeres időközönkénti végrehajtása, vagy - általánosságban fogalmazva - a müveletnél magasabbszintü optimumfeltételek kielégitése.
Különleges szerepet játszik ebből a szempontból a fogásosztás optimalizálása. Itt több müveletelem egymással való kapcsolata szerepel. Azonban, az optimalizálás, amikor csak dinamikus programozással oldható meg, önmagában is olyan bonyolultságu, hogy további magasabbrendü optimalizálási problémák szempontjából lezártnak tekintendő. Igy a külön optimalizált, vagy heurisztikusan megadott fogásosztás megadottnak tekintendő. Ellenkező esetben bármilyen magasabbrendü optimalizálási probléma méretei megoldási esély nélküli nagyságura nőnének.

A következőkben egy olyan módszert ismertetünk amelynek lényege, hogy első lépésben a korábban ismertetett módon meghatározzuk az egyes müveletek optimális paramétereit, kiszámitjuk az egyes müveletekhez tartozó megmunkálási időket, éltartamokat, majd egy következő lépésben elégitjük ki a magasabb - pl. munkadarab szintü - optimumfeltételeket, szinkronizáljuk a különböző szerszámok kopását [8], módositjuk a megmunkálás időtartamát stb. Ezzel a módszerrel valóban elérhető, hogy a szerszámok egyszerre kopjanak el, hogy egy éltartamcikluson belül a kivánt számu alkatrészt lehessen kielégiteni, hogy a több szerszámmal megvalósitott sok müvelet eredője az egész müveletre megadott feltételeket kielégitve, optimális legyen.

Vizsgáljuk meg egy munakdarab megmunkálását. Tételezzük fel, hogy a megmunkáláshoz R számu szerszám kell. Mindegyik szerszám különböző számu müveletben vesz részt. Az egyes megmunkált hosszak ismertek. Határozzuk meg a müveletek optimális fogásmélység, előtolás és forgácsoló sebesség értékeit. Legyen tehát az egyes szerszámok sorszáma

$$K = 1,2,3, \ldots R$$

Legyen az egyes szerszámokkal megmunkált müveletelemek száma

$$N_1, N_2, N_3, \ldots N_R.$$

Nyilvánvaló, hogy teljesen közömbös, hogy az

$$N_1 + N_2 + N_3 \ldots N_R = N$$

számu müveletelemet milyen sorrendben tekintjük végig. Jellemezzék az i-edik müveletelemre érvényes matematikai modellt az

$$E_{jmin} \leqq f_i^{x_j} e_i^{y_j} v_i^{z_j} \leqq E_{jmax} \qquad (j=1,2,\ldots h_i) \qquad (4.1)$$

$$T_i^{m_i} = \frac{B_i}{e_i^{y_{vi}} v_i f_i^{x_{vi}}} \qquad (4.2)$$

$$K_i = \frac{\Delta L_i C_M}{e_i n_i} \left(1 + \frac{C_{Ti}}{T_i}\right) + \Delta K_i \qquad (4.3)$$

összefüggések, ahol i=1,2,3,...N

ΔK_i a visszafutással és egyéb veszteséggel kapcsolatos költségeket jellemzi.

Minden egyes müveletelemre ismeretesek a megfelelő ΔL_i, d_i, f_i, hosszak, átmérők és fogásmélységek.

A 2. részben ismertetett módszerrel az egyes müveletelemekre meghatározhatók az optimális előtolás és forgácsoló sebesség (fordulatszám) értékek.

Ezek alapján könnyen meghatározható a munkadarab megmunkálásának összköltsége és összideje, csupán összegezni kell valamennyi müveletre ezeket a mennyiségeket. Hasonló módon valamennyi szerszámra meghatározható kopásuk mértéke, csak összegezni kell szerszámonként a müveletekhez tartozó részkopásokat.

Jelöljük az összköltséget, az időt a kopásokat rendre K_Σ, t_Σ, és $\Delta_1, \Delta_2, \ldots \Delta_N$ jelekkel.

A fentiek szerint

$$K_\Sigma \doteq \sum_{i=1}^{N} K_i \doteq \sum_{i=1}^{N} \left\{ \frac{\Delta L_i C_M}{e_i n_i} \left(1 + \frac{C_{Ti}}{T_i} \right) + \Delta K_i \right\} \tag{4.4}$$

$$t_\Sigma = \sum_{i=1}^{N} t = \sum_{i=1}^{N} \left\{ \frac{\Delta L_i}{e_i n_i} + \Delta t_i \right\} \tag{4.5}$$

(Δt_i az i-edik müveletelemhez tartozó veszteség időket jellemzi)

$$\Delta_k = \sum_{j=S_{k-1}}^{S_k} \frac{t_j}{T_j} = \sum_{j \in I_k} \frac{\Delta L_j}{e_j n_j T_j} \qquad k=1,2,\ldots R \tag{4.6}$$

(az összegezés azokra a müveletelemekre terjed ki, amelyekben a K-adik szerszám forgácsol; $S_k - S_{k-1} = N_k$)

A müveletelemek optimális technológiai adatainak meghatározását, a minimális költség kritérium szerint, és ezek alapján a munkadarabra összesitett költség, megmunkálási idő és szerszám kopások kiértékelését *elsődleges optimalizálásnak* nevezzük.
- Ezzel párhuzamosan egyszerüen kiértékelhetők a feltételrendszerek által megszabott minimálisan és maximálisan lehetséges értékek ugyanezekre a mennyiségekre.
A minimális megmunkálási időhöz maximális szerszámkopások tartoznak és forditva, minimális szerszámkopásokhoz maximális megmunkálási idő.
Vezessük be ezekre a mennyiségekre a következő jelöléseket:

a) Minimális idő, maximális kopás

t_{Σ}^{min}, Δ_k^{max}, $k=1,2,...R.$

Ekkor a megmunkálási költségeket

K_{Σ}^{a} jelöli

b) Minimális kopás, maximális idő

Δ_k^{min}, t_{Σ}^{max},

a költségeket

K_{Σ}^{b} jelöli.

Nyilvánvalóan

$$t_{\Sigma}^{min} \leqq t_{\Sigma} \leqq t_{\Sigma}^{max}$$

$$\Delta_k^{min} \leqq \Delta_k \leqq \Delta_k^{max}$$

$$K^a \geqq K_{\Sigma} \; ; \; K^b \geqq K_{\Sigma}$$

A fenti adatok kiindulásul szolgálnak a termelési programok összeállitásához, termelésirányitási döntésekhez, intézkedésekhez.

Ezek a feladatok elvileg magasabbszintü optimalizálási problémák. Megoldásukkor kiderülhet, hogy az alacsonyabb szinten kapott eredmények nem kedvezőek a magasabb szinten.

Igy például kiderülhet, hogy a t_Σ idő, vagy egyes szerszámok kopása tul nagy. Bizonyos esetekben bekövetkezhet, hogy a kiinduló adatokkal összeállitott programok szerint egyes gépek időnként munka nélkül maradnak.

Az első esetben bizonyos müveletek intenzitását fokozni kell.

A második esetben a rendelkezésre álló idő teljes kihasználásával lényeges szerszámmegtakaritás érhető el. Általában a következő követelmények fogalmazhatók meg:

a) Bizonyos munkadarabokra a megmunkálási idő tul nagy.
Ekkor a következő korlátozás bevezetése szükséges

$$t_\Sigma \leqq t_m \qquad (4.7)$$

ahol t_m - megadott idő

$$(t_\Sigma^{min} \leqq t_m < t_\Sigma)$$

b) Bizonyos szerszámokra a kopás tul nagy
Az uj korlátozások

$$\Delta_s \leqq \Delta_{sm} \qquad (s=1,2,...R) \qquad (4.8)$$

ahol Δ_{sm} megadott kopásérték

$$(\Delta_{sm} \geqq \Delta_s^{min})$$

c) Több idő áll rendelkezésre a megmunkálásra mint t_Σ.
Ekkor a következő korlátozást célszerü bevezetni.

$$t_\Sigma \geqq t_r \qquad (4.9)$$

ahol t_r - megadott idő.

A korlátozások kombinálása is lehetséges. Például előfordulhat olyan eset, amikor a megmunkálási időt csökkenteni kell ugy, hogy bizonyos szerszámok kopása is csökkenjen. Ez persze csak a többi szerszám kopásának növekedése rovására lehetséges.

Az elsődleges optimalizáláskor a müveletelemek adatainak optimalizálása külön-külön elvégezhető. A kapott adatok az egész munkadarabra is minimális megmunkálási költséget eredményeznek.

A (*4.7*),(*4.8*),(*4.9*) korlátozások bevezetése azonban gyökeresen megváltoztatja a helyzetet. Ezekben az egyes müveletelemek technológiai adatainak hatása együttesen jelentkezik. Az optimalizálási probléma dimenziója sokszorosan növekszik. Nyilvánvalóan a cél, az uj korlátozások tekintetbe vétele mellett is, a (*4.4*) költségfüggvény minimalizálása. Nevezzük ezt *másodlagos optimalizálási* problémának.
A másodlagos optimalizálási probléma, a megadott matematikai modellnek megfelelően, megoldható a geometriai programozás módszereivel. Azonban, a feladat bonyolultsága miatt, ezek a módszerek, legalábbis szokásos alakjukban, nehezen alkalmazhatók. Ezért a feladat megoldására a következőkben olyan módszert javaslunk, amely tekintetbe veszi a probléma speciális sajátságait.
Vizsgáljuk meg azt a kérdést, hogy a munakdarab megmunkálási idejére és egyes szerszámok kopására megadott korlátozások hogyan befolyásolják az egyes müveletelemek technológiai adatait. A 8. ábra egy müveletelemre mutatja a forgácsolás megengedett tartományát.
Amikor a munkadarab megmunkálási idejét csökkenteni óhajtjuk, ez a müveletelemekre azt fogja jelenteni, hogy a megmunkálási adatokat jellemző pont az optimumra esélyes határvonalon az óramutatóval megegyező irányban eltolódik (hacsak nem a legszélső pontban van egyébként is).

Nyilvánvaló, hogy az optimum esélyes határvonalakon kivül más pontokat a vizsgálatokba bevonni nem szükséges. Bármilyen más pontban a határponttal azonos megmunkálási időhöz nagyobb kopás, tehát nagyobb forgácsolási költség tartozik.
Amikor nem a lehető legkisebb megmunkálási idő elérését tüzzük ki célul - amelynek adatait egyébként már az elsődleges optimalizáláskor meghatározzuk - akkor ez különböző változatokban valósitható meg. Az egyes müveletelemek megmunkálási idejei különböző mértékben változtathatók ugy, hogy összegükben kiadják a kivánt hatást és ennek költségkihatásai különbözőek. A cél annak a változatnak a kiválasztása, amely minimális költségnövekedést okoz.
Erre a következő módszert javasoljuk:
Legyen a bevezetett uj korlátozás

$$t_\Sigma = \sum_{i=1}^{N} t_i \leqq t_m$$

Az optimális pontot a feltételes szélsőérték keresés Lagrange féle módszere szerint határozzuk meg.
Vezessük be (4.4) helyett a következő célfüggvényt

$$L = K_\Sigma + \lambda_o (t_\Sigma - t_m) \qquad (4.10)$$

ahol λ_o - a Lagrange féle változó

A $\frac{\partial L}{\partial T_i} = 0$ feltételt az opitmum esélyes határvonalra alkalmazva azt kapjuk, hogy az egyes müveletelemek opitmális pontjaihoz tartozó éltartamok értéke nem az elsődleges optimalizáláskor kapott

$$T_{szj} = \frac{1 + y_{vi} N_j - (N_j + 1) m_i}{m_i (N_j + 1)} C_T$$

lesz, hanem

$$T_i(\lambda_o) = \frac{1 + y_{vi}N_j - (N_j + 1)m_i}{m_i(N_j + 1)(1 + \lambda_o)} C_{Ti} = \frac{T_{szj}}{1 + \lambda_o} \qquad (4.11)$$

(T_{szj} az i-edik müveletelem j-edik korlátozásának szélsőérték pontjához tartozó éltartam).

A λ_o érték növekedése a müveletelemek intenzitását fokozza az éltartamot csökkenti.

A $\frac{\partial L}{\partial \lambda_o} = 0$ feltétel a

$$t_\Sigma = \sum_{i=1}^{N} t_i = t_m \qquad (4.12)$$

triviális eredményre vezet.

$T_i(\lambda_o)$ érték az optimum esélyes határvonalon meghatározza az optimális előtolás és forgácsoló sebesség értékeket. Ezeknek olyanoknak kell lenniük, hogy kielégitsék a (4.12) feltételt.
Ez a feltétel meghatározza λ_o értékét, amelynek hatása azután a (4.11) összefüggés szerint a technológiai adatokon tükröződik. Ez tehát az a mechanizmus, amelyen keresztül a magasabbrendü követelmények tükröződhetnek a müveletelemek technológiai adataiban.

A fentiekhez hasonló módon kezelhető az az eset, amikor az egyes szerszámok kopására vannak megadva korlátozások

Legyen $\qquad \Delta_k \leq \Delta_{km}.$

Ekkor az uj célfüggvény bevezetésével, a $\frac{\partial L}{\partial T_i} = 0$ összefüggésből levezethető, hogy

$$T_i(\lambda_k) = T_{szj}(1 + \lambda_k) \qquad (4.12)$$

A λ_k szorzónak a

$$\Delta_k = \Delta_{km}$$

összefüggést kell kielégitenie.

λ_k növekedése a forgácsolás intenzitását és igy a szerszámkopást csökkenti.

A másodlagos optimalizálás módszere pontosan azonos az előző esetben alkalmazottal.

Rendkivül érdekes eset az, amikor egyidejüleg akarjuk a megmunkálás idejét és bizonyos szerszámok kopását csökkenteni.

Ez nyilvánvalóan csak a további szerszámok kopásának a rovására történhet (és csak akkor, ha a követelmények nem ellentmondóak).

Ez rendkivül egyszerüen oldható meg olyan módon, hogy szétválasztjuk a müveletelemeket aszerint, hogy olyan szerszámmal végzik ezeket, amelyek kopását korlátozni akarjuk vagy pedig nem.

A megkivánt kopások előbb leirt módon való biztositása után a fennmaradó müveletelemek, szintén előbb leirt módon való változtatásával érhetjük el a megmunkálási idő kivánt értékét.

Bizonyitható, hogy ez a módszer a másodlagos optimalizálási probléma szabatos megoldását adja.

Ez a következő egyenletrendszer megoldásával határozható meg

$$T_{ik} = T_{szj} \frac{1 + \lambda_k}{1 + \lambda_o}$$

$$\sum_{i=1}^{N} C_L C_5 T_{ik}^{L_j} = t_m \qquad (4.13)$$

$$\sum_{i=S_{k-1}}^{S_k} C_L C_5 T_{ik}^{L_{j-1}} = \Delta_{km} \qquad (4.13)$$

Az ik index - az i-edik müveletet jelenti, amelyet a k-adik szerszámmal végzünk.

L_j, C_L és C_5 megfelelő kitevők illetve együtthatók.

A másodlagos optimalizálás eredményei fontos információkat szolgáltatnak a munkadarab megmunkálás jellemzőinek kiértékeléséhez. Már az elsődleges optimalizálás megmutatja az optimális megmunkálási költségen, időn és szerszámkopásokon kivül, hogy egyáltalán milyen határok között változhatnak célszerü módon ezek a jellemzők.

A másodlagos optimalizálás megmutatja, hogy a magasabbszintü követelményeknek mi az ára.

Ez bizonyos tipusu érzékenységi vizsgálatokat tesz lehetővé, megmutatva, hogy mire milyen módon reagálnak a megmunkálási költségek, ami jelentős segitséget nyujthat a termelésirányitási szakembernek.

4.1 Másodlagos optimalizálás diszkrét forgácsoló sebességek esetén.

Amikor a forgácsoló sebességek csak megadott értékeket vehetnek fel, tehát a szerszámgép nem rendelkezik folyamatos főorsó hajtással, a másodlagos optimalizálási módszer következő változata javasolható.

Elvégzendő a másodlagos optimalizálás folyamatos rendszert feltételezve.

A folyamatos esetre kapott optimális pontok környzetében megkeressük a korábban vázoltak alapján (lásd 4. ábra) a legkedvezőbb diszkrét pontot.

Ily módon kapunk egy alap megoldást. Ha ez kielégiti a megmunkálási időre és a kopásokra megadott kiegészitő feltételeket, esetleg tartalékkal is, akkor a kapott adatok tekinthetők a másodlagos optimalizálás eredményének.

Amikor a feltételek nem teljesülnek, a következő eljárás alkalmazható.
Mindegyik müveletelemre, amelynek szerszámára kopás korlátozás van megadva, egy-egy fokozattal változtatjuk (csökkentjük) a főorsó fordulatot. Képezzük a kopáscsökkenés és a megmunkálási költség változás hányadosát. Annál a müveletelemnél, ahol ez a legkisebb, megváltoztatjuk a fordulatszámot.
Ennek oka az, hogy az adott müveletelemnél érjük el az egységnyi költségnövekedésre a legnagyobb kopáscsökkenést.
Ezt az eljárást addig folytatjuk, ameddig a megadott kopásokat el nem érjük.
A megmunkálási időre megadott korlátozások esetében hasonló eljárás alkalmazható.
Ekkor a müveletelemekre a megmunkálási időváltozások és költségváltozások hányadosa számitandó ki és a hajtásfokozat változtatások az ezekre vonatkozóan legkedvezőbb müveletelemekre végzendők el, sorozatosan, a követelmények teljesüléséig.

Példa.

A 9. ábra egy munkadarabot mutat be, amelyet NC revolveresztergán munkálnak meg. A szerszámgép a Csepeli Szerszámgépgyár ERI-250 tipusu gépe. A szerszámválasztást a müveleti sorrendet és a matematikai modellt a FORTAP automatikus programozási rendszer szolgáltatta. A rövidség kedvéért csak az összegezett mennyiségeket közöljük.
A megmunkálást furás, oldalazás, lyukesztergálás és esztergálás müveletekkel végzik.

Elsődleges optimalizálás

t_{Σ}^{opt}(perc)	t_{Σ}^{min}	t_{Σ}^{max}
6,44	5,40	210,91
K_{Σ}^{opt}(Ft)	K_{Σ}^{a}	K_{Σ}^{b}
13,85	19,58	421,81

Szerszám Nº	Δ_k^{opt}(%)	Δ_k^{min}(%)	Δ_k^{max}(%)
1	3,17	0,00008	50,72
2	1,63	0,00028	86,06
3	1,59	0,00003	5,79
4	2,27	0,00014	18,14

1. Furás
2. Oldalazás
3. Feleszterqálás
4. Esztergálás

Másodlagos optimalizálás

a) Legyen $t_{\Sigma} \leqq 6$ perc

$t_{\Sigma} = 5{,}97$ perc

$K_{\Sigma} = 14{,}13$ Ft

szerszám N°	Δ_k (%)
1	12,89
2	3,57
3	1,93
4	3,4

b) Legyen minden szerszám kopása kisebb, mint 1,5%.
($\Delta_k \leqq 1{,}5\%$, $k=1,2,3,4$)

$t_{\Sigma} = 7{,}17$ perc

$K_{\Sigma} = 14{,}88$ Ft

szerszám N°	Δ_k (%)
1	0,85
2	1,23
3	1,22
4	1,26

c) A gép leterheletlensége miatt a megmunkálási időt elégséges 10 perc körüli értékünek hagyni. ($t_{\Sigma} \geqq 10$ perc). A másodlagos optimalizálás során kapjuk:

$t_{\Sigma} = 10,27$

$(K_{\Sigma} = 21,09)$

szerszám $N^{\underline{o}}$	Δ_k(%)
1	3,17
2	0,19
3	1,59
4	0,46

A megadott korlátozásoktól való eltéréseket az okozza, hogy a gép főorsója nem folyamatos, hanem diszkrét fordulatszám változtatási lehetőséggel rendelkezik.
Az itt bemutatott néhány másodlagos optimalizálási példa csak a lehetőségeket szemlélteti.
Az elsődleges optimalizálás világosan bemutatja, hogy az optimális technológia meglehetősen "kihegyezett". A megmunkálási időt lényegesen csökkenteni nem is lehet, de a csekély csökkentésnek is igen nagy az ára a szerszámok kopásában.
A szerszámkopások azonban jól manipulálhatók. Az elsődleges optimalizálás mutatja, hogy a megmunkálás intenzitásának csökkentésével a szerszámkopások jelentősen csökkenthetők. A másodlagos optimalizálás módot nyujt a tervezőnek a megfelelő kompromisszum elérésére.

IRODALOM

[1] *Somló J. Girnt M., Gyürki J., Laufer J.:* Optimalizáló adaptiv szerszámgépirányitási rendszerek. MTA SZTAKI Közlemények 1973 N° 5

[2] *Somló J. Girnt M., Gyürki J., Laufer J.:* Szerszámgépek optimalizáló adaptiv irányitása. MTA SZTAKI belső munkaanyag 1973. december.

[3] *Horváth M., Somló J.:* A forgácsolás adaptiv vezérlésének stratégiái és megoldásai. OMFB tanulmány. 1976. május.

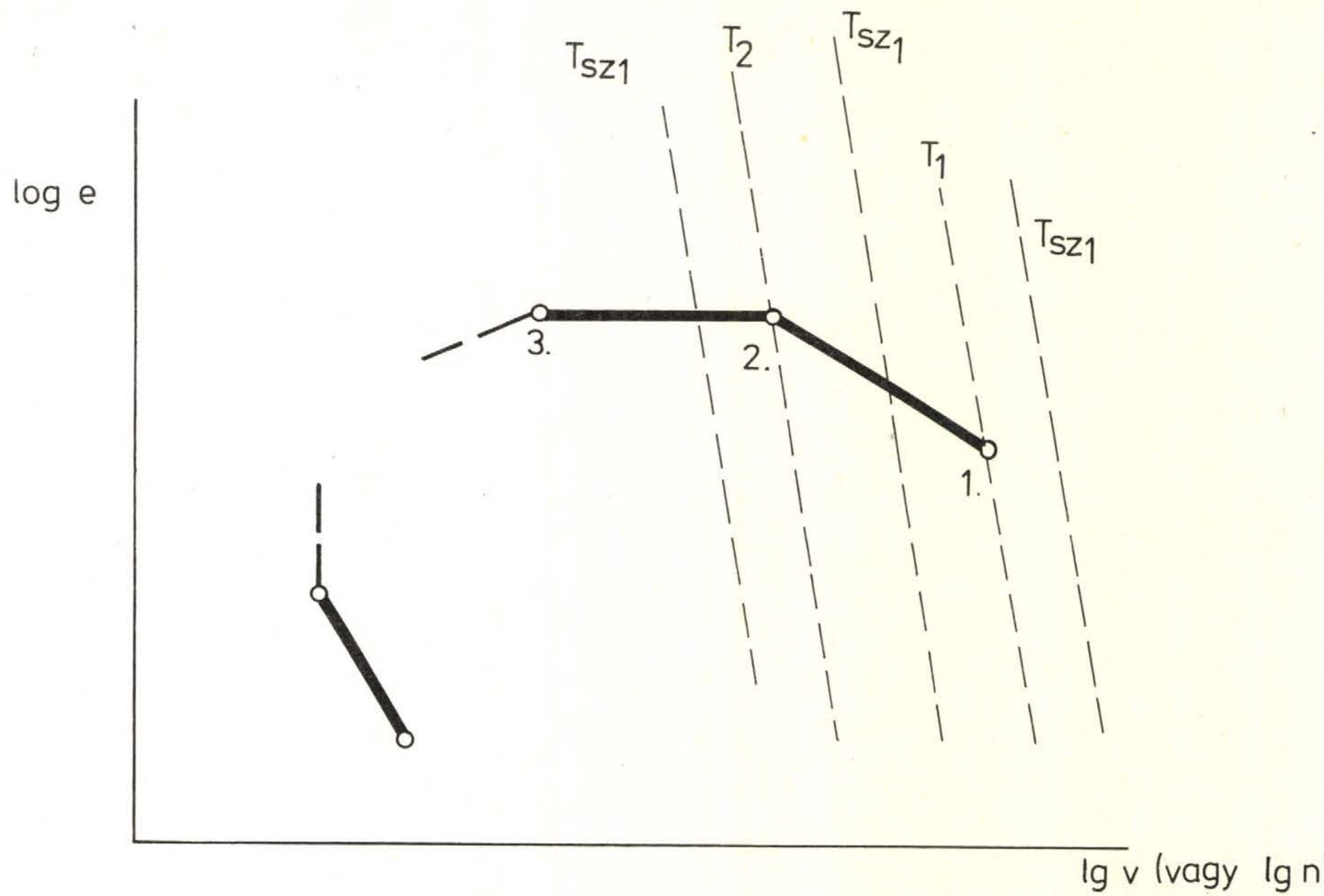
[4] *Tóth T., Vadász D.:* TAUPROG programrendszer. Gépgyártástechnológia, XIII. N° 4.

[5] *Tóth T.:* Forgácsolástechnológia tervezése számitógéppel. Gépgyártástechnológia, 1975 N° 1.

[6] *R. Bellman:* Dynamic Programming. Princeton University Press 1975.

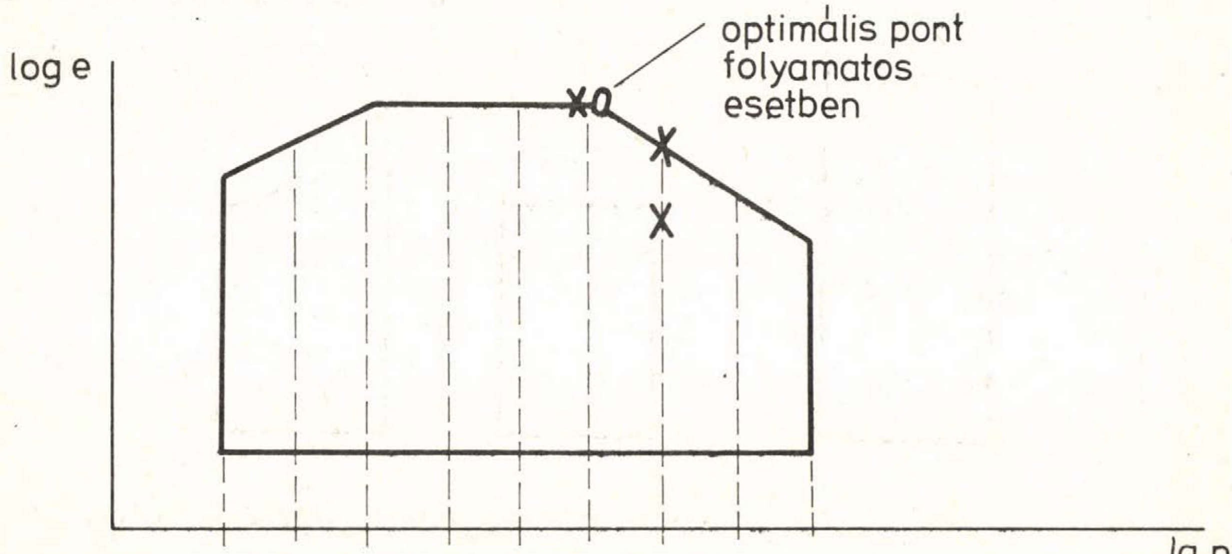
[7] *Frey T., Nagy J., Somló J.:* Programcsomag az optimális fogásosztás meghatározására eszterga tipusu megmunkálásoknál. COMPCONTROL '74 Szeged. 1974.

[8] *Somló J., Nagy J.,:* On a new approach to cutting data optimization problem. PROLAMAT 1976 junius



AZ OPTIMALIZÁLÁS ALGORITMUSÁNAK SZEMLÉLTETÉSE

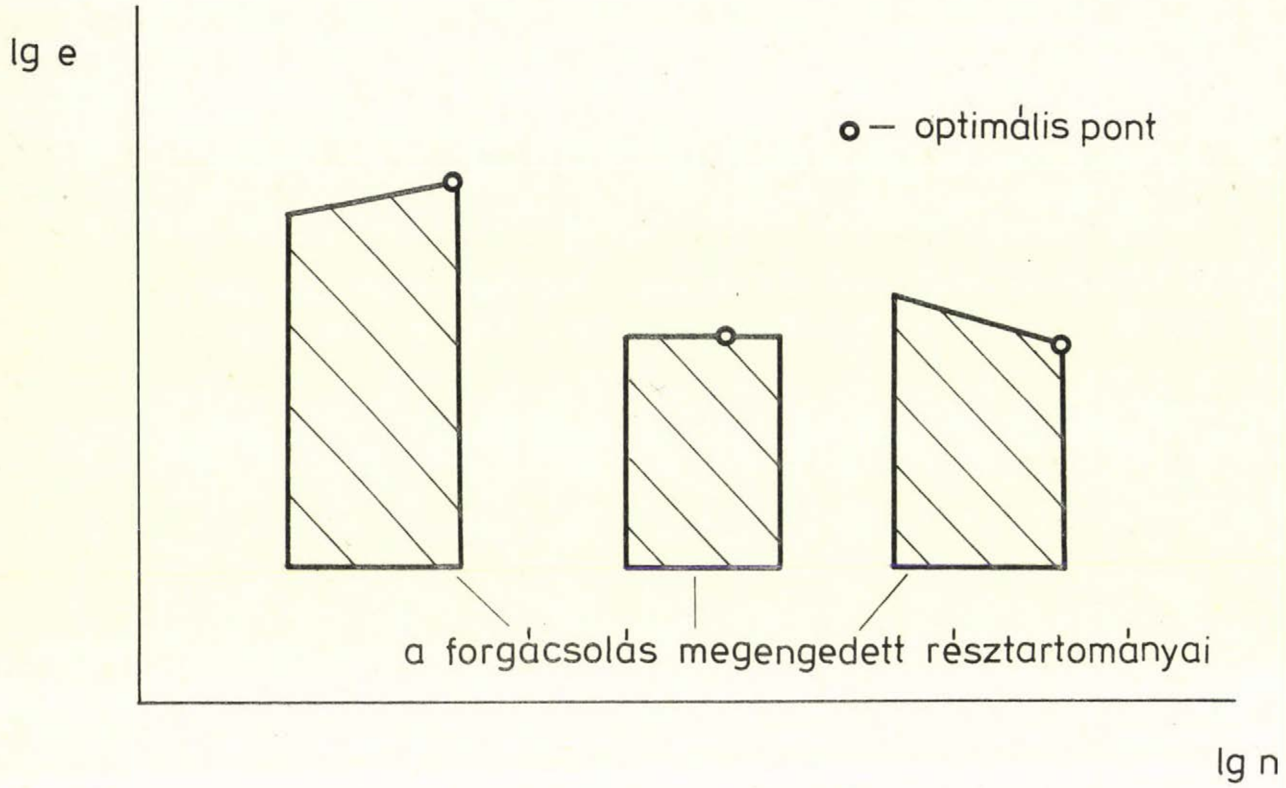
3. ábra



4. ábra

OPTIMALIZÁLÁS DISZKRÉT FŐORSÓ

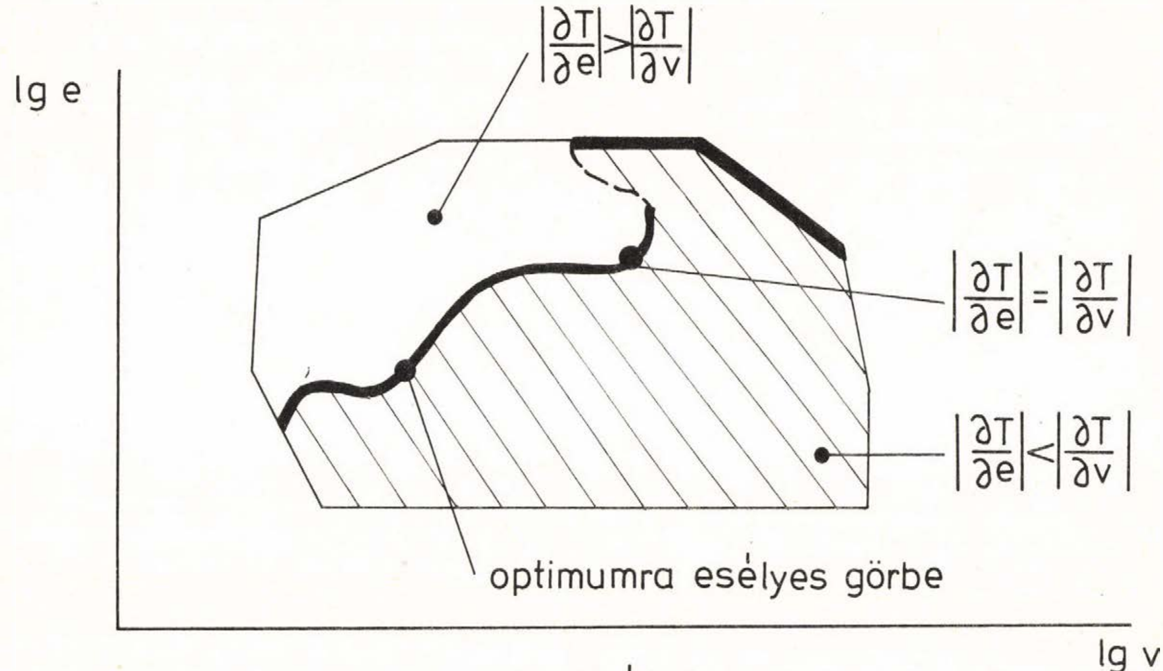
HAJTÁS ESETÉBEN



5. ábra

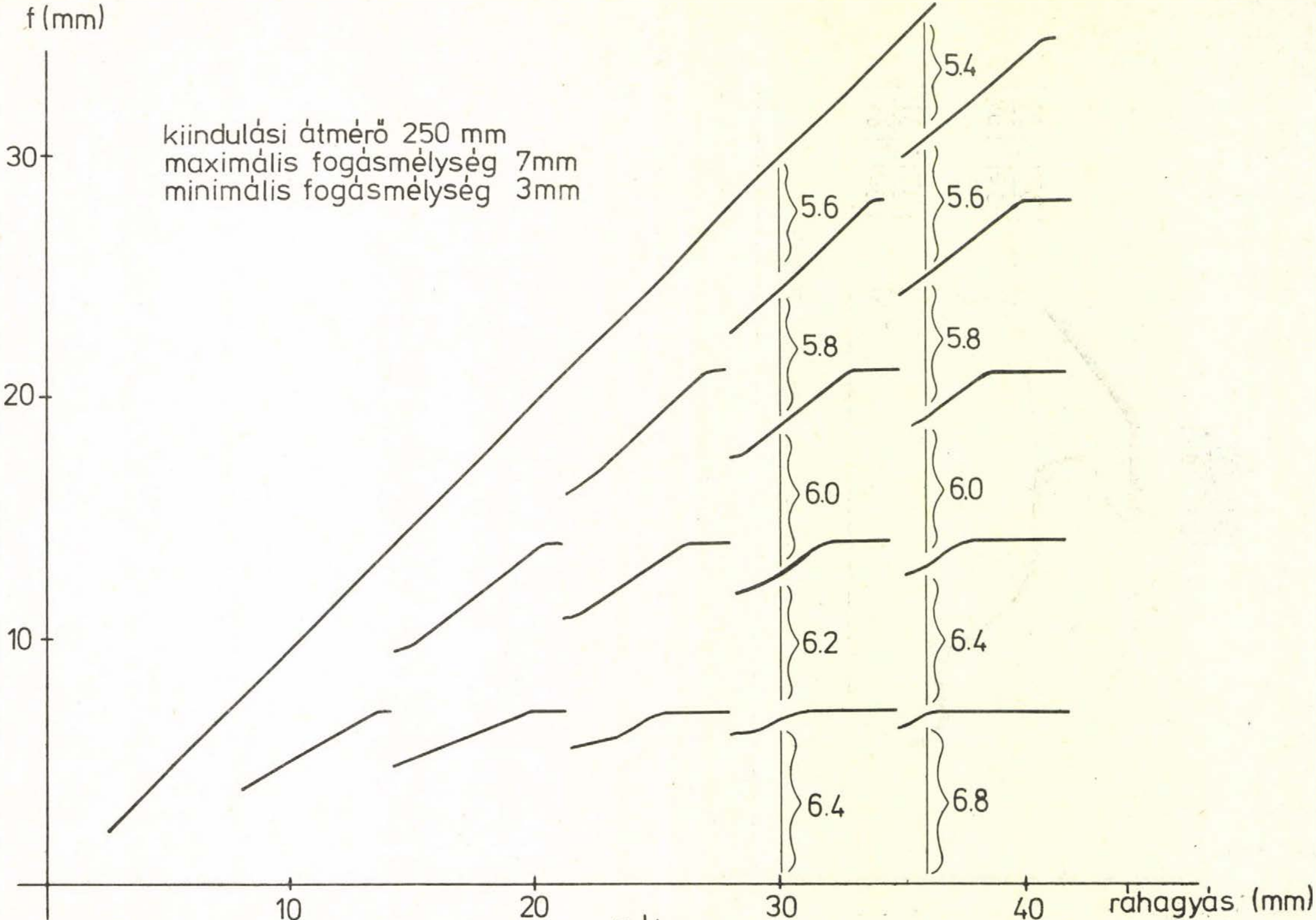
NEM ÖSSZEFÜGGŐ MEGENGEDETT

TARTOMÁNYOK ESETE



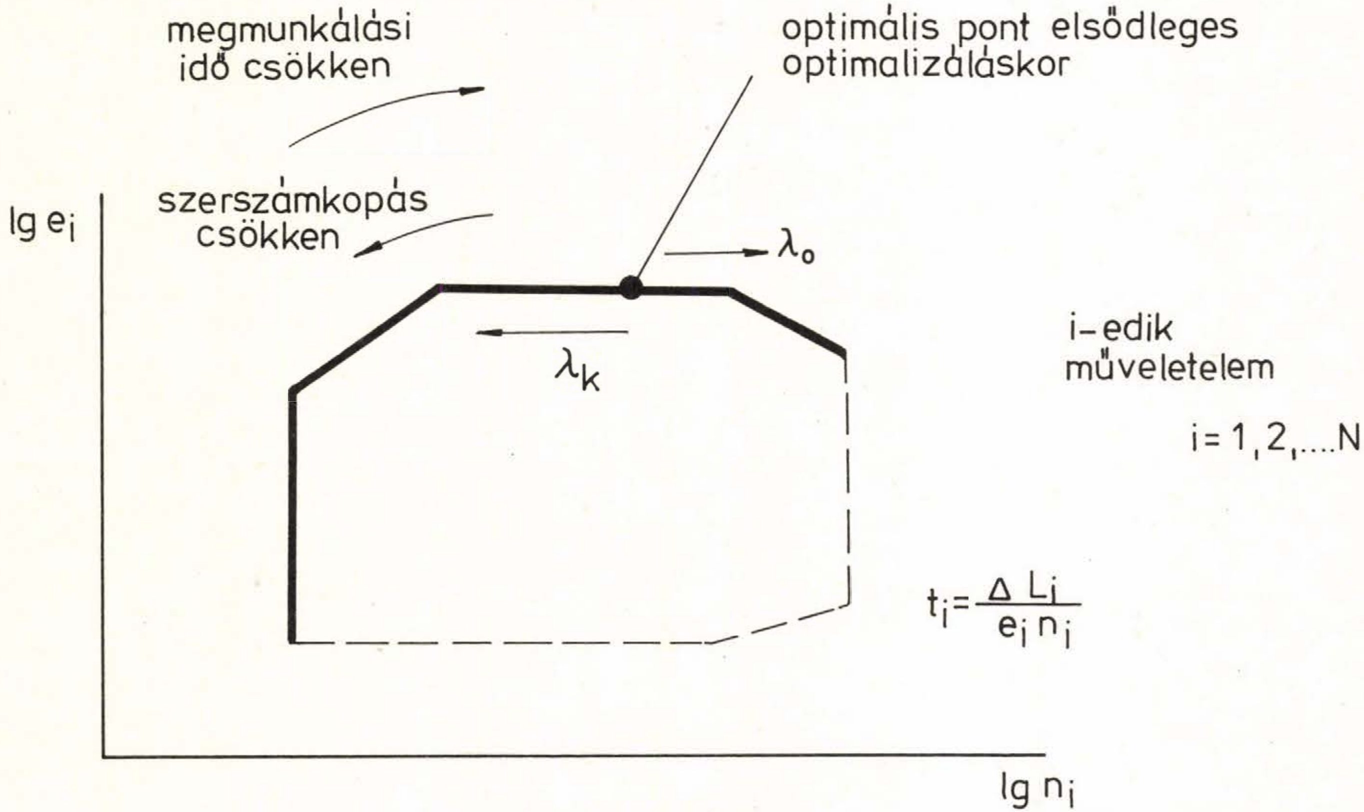
6. ábra

KÜLÖNLEGES ÉLTARTAM ÖSSZEFÜGGÉSEK

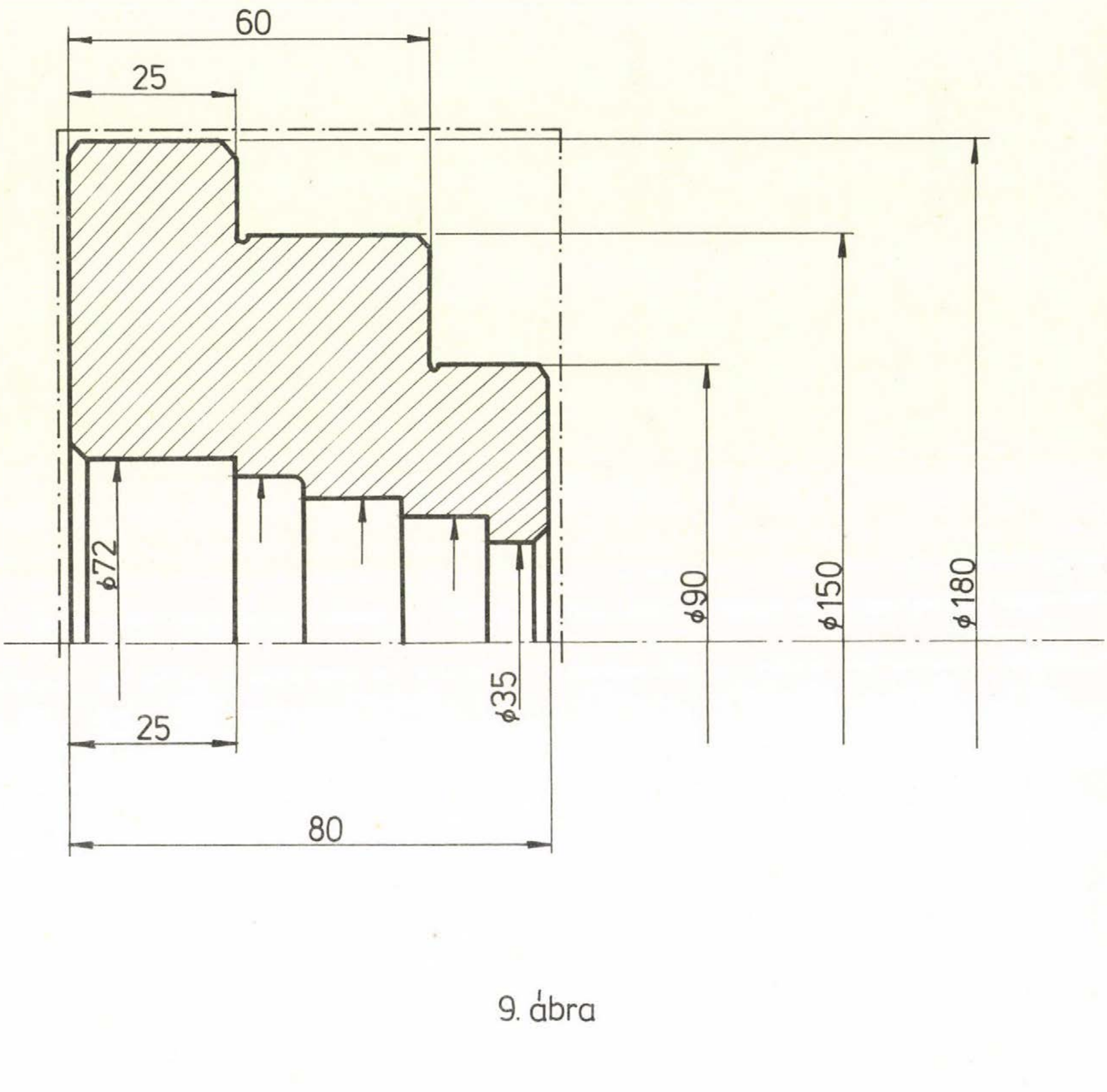


7. ábra

OPTIMÁLIS FOGÁSOSZTÁSI DIAGRAM


megmunkálási
idő csökken
optimális pont elsődleges
optimalizáláskor
lg e_i
szerszámkopás
csökken
λ_o
λ_k
i-edik
műveletelem
$i = 1, 2, \ldots N$
$t_i = \frac{\Delta L_i}{e_i n_i}$
lg n_i

8.ábra



9. ábra

A *TANULMÁNYOK* sorozatban eddig megjelentek:

1/1973. Pásztor Katalin: Módszerek Boole-függvények minimális vagy nem redundáns, $\{\wedge,\vee,\neg\}$ vagy {NOR} vagy {NAND} bázisbeli, zárójeles, vagy zárójel nélküli formuláinak előállitására

2/1973 Вашкеви Иштван: Расчленение многосвязных промышленных процессов с помощью вычислительных машин

3/1973 Ádám György: A számitógépipar helyzete 1972 második felében

4/1973 Bányász Csilla: Identification in the Presence of Drift

5/1973* Gyürki J. - Laufer J. - Girnt M. - Somló J.: Optimalizáló adaptiv szerszámgépirányitási rendszerek

6/1973 Szelke E. - Tóth K.: Felhasználói Kézikönyv /USER MANUAL/ a Folytonos Rendszerek Szimulációjára készült ANDISIM programnyelvhez

7/1973 Legendi Tamás: A CHANGE nyelv/multiprocesszor

8/1973 Klafszky Emil: Geometriai programozás és néhány alkalmazáaa

9/1973 R. Narasimhan: Picture Processing Using Pax

10/1973 Dibuz Á. - Gáspár J. - Várszegi S.: MANU-WRAP hátlaphuzalozó, MSI- TESTER integrált áramköröket mérő, TESTOMAT-C logikai hálózatokat vizsgáló berendezések ismertetése

11/1973 Matolcsi Tamás: Az optimum-számitás egy uj módszeréről

12/1973 Makroprocesszorok, programozási nyelvek. Cikkgyüjtemény az NJSzT és SZTAKI közös kiadásában. Szerkesztette: Legendi Tamás

*A *-gal jelölt kivételével a sorozat kötetei megrendelhetők az Intézet könyvtáránál /Budapest, XIII. Victor Hugo u. 18-22./.

13/1973 Jedlovszky Pál: Uj módszer bonyolult rektifikáló oszlopok vegyészmérnöki számitására

14/1973 Bakó András: MTA kutatóintézeteinek bérszámfejtése számitógéppel

15/1973 Ádám György: Kelet-nyugati kapcsolatok a számitógépiparban

16/1973 Fidrich I. - Uzsoky M.: LIDI-72 listakezelő rendszer a Digitális Osztályon, 1972. évi változat

17/1974 Gyürki József: ADaptiv termelésprogramozó rendszer /APS/ termelőmühelyek irányitására

18/1974 Pikler Gyula: MINI-számitógépes interaktiv alkatrészprogramiró rendszer NC szerszámgépek automatikus programozásához

19/1974 Gertler J. - Sedlak J.: Software for process control

20/1974 Vámos T. - Vassy Z.: Industrial Pattern Recognition Experiment - A Syntax Aided Approach

21/1974 A KGST I. - 15-1.: "Diszkrét rendszerek automatikus vezérlése" c. témában 1973. februárban rendezett szeminárium előadásai

22/1974 Arató M. - Benczur A. - Krámli A. - Pergel J.: Stochastic Processes, Part I.

23/1974 Benkő S. - Renner G.: Erősentelitett mágneskörök számitógépes tervezési módszerei

24/1974 Kovács György-Franta Lászlóné: Programcsomagok elektronikus berendezések hátlaphuzalozásának tervezésére

25/1974 Járdán R. Kálmán: Háromfázisu tirisztoros inverterek állandóan tranziens jelenségei és belső impedanciája

26/1974 Gergely József: Numerikus módszerek sparse mátrixokra

27/1974 Somló János: Analitikus optimalizálás

28/1974 Vámos Tibor: Tárgyfelismerési kisérlet nyelvi módszerekkel

29/1974 Móricz Péter: Vegyészmérnöki számitási módszerek fázisegyensulyok és kémiai egyensulyok vizsgálatára

30/1974 Vassy Z. - Vámos T.: The Budapest Robot - Pragmatic Intelligence

31/1975 Nagy István: Frekvenciaosztásos középfrekvenciás inverterek elmélete

32/1975 Singer D. - Borossay Gy. - Kolati T.: Gázhálózatok optimális irányitása különös tekintettel a Fővárosi Gázmüvek hálózataira

33/1975 Vámos T. - Vassy Z.: Limited and Pragmatic Robot Intelligence
Mérő L. - Vassy Z.: A Simplified and Fastened Version of the Hueckel Operator for Finding Optimal Edges in Pictures

Галло В.: Программа для распознавания геометрических образов, основанная на лингвистическом методе описания и анализа геометрических структур

34/1975 László Nemes: Pattern Identification Method for Industrial Robots by Extracting the Main Features of Objects

35/1975 Garádi-Krámli-Ratkó-Ruda: Statisztikai és számitástechnikai módszerek alkalmazása kórházi morbiditási vizsgálatokban

36/1975	Renner Gábor: Elektromágneses tér számitása nagyhőmérsékletü anyagban
37/1975	Edgardo Felipe: Specification problems of a process control display
38/1975	Hajnal Andrásné: Nemlineáris egyenletrendszerek megoldási módszerei
39/1975*	A.Abd El-Sattar: Control of induction motor by three phase thyristor connections in the secondary circuit
40/1975	Gerhardt Géza: QDP Grafikus interaktiv szubrutinok a CDC 3300-GD'71 grafikus konfigurációra
41/1975	Arató M. Benczur A. - Krámli A. - Pergel J.: Stochastic Processes, Part II.
42/1975	Arató Mátyás: Fejezetek a matematikai statisztikából számitógépes alkalmazásokkal
43/1975	Matavovszky Tibor - dr Pásztorné Varga Katalin: Programrendszer Boole-függvényrendszer együttes egyszerüsitésére vagy minimalizálására
44/1975	Bacsó Nándorné: Pneumatikus áramköri hazardok
45/1975	Varga András: Ellenpárhuzamos félvezetőpárokkal vezérelt aszinkronmotoros hajtások számitási módszerei
46/1976	Galántai Aurél: Egylépéses módszerek lokális hibabecslései
47/1976	Abaffy József: A feltétel nélküli függvényminimalizálás kvadratikus befejezésü módszerei

62/1977 S.A. Coons: Geometry and Algebra Some Papers

63/1977 Dokladü Szeminara RIGA - Cikkgyüjtemény

64/1977 Győry Gy. - Halász F. - Szilléry A. - Tóth B.: A PSL/PSA rendszer használata az információs rendszerek tervezésében és dokumentálásában

65/1977 Gertler J. - Bakonyi P. - Szentgyörgyi Zs. - Orbán L.: Az ESZR és MSZR berendezésekkel szemben támasztott hardware és software követelmények az AMT szempontjából

66/1977 Lipcsey Zsolt: N-személyes minőségi differenciáljátékok késleltetéssel és késleltetés nélkül

67/1977 Gyürki József: Az ANSI/X3/SPARC bizottság modellje adatbázis kezelő rendszerekre

68/1977 Gyárfás András: A PL360 programozási nyelv

69/1977 Téli iskola - Visegrád,

70/1977 Krámli A. - Ratkó I. - Ruda M. - Soltész J.: A statisztikai adatfeldolgozás matematikai és számitástechnikai problémái

71/1977 Gyárfás András: Particiófedések és lefogóhalmazok hipergráfokban

72/1977 Pham Thuong Cát: Modell-referenciás adaptiv rendszerek tervezésének néhány problémája /Kandidátusi értekezés/

73/1978 S.A. Coons: Homogeneous coordinates, projective transformations, and conics - Tutorial -

74/1978 Vortrüge über das graphische Display GD'71

75/1978 Vaskövi István-Gallbavy Márta: Anyagszétválasztási rendszerek tervezésének és optimális üzemeltetésének általános megközelitése