

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 8

strojírenská technologie

zaměření

obrábění a montáž

Katedra obrábění a montáže

POLYOPTIMALIZACE OBRÁBĚCÍCH PROCESŮ
S DANOU ČASOVOU RESTRIKcí

Miroslav Okrouhlý

KOM - 157

Vedoucí práce: Doc. Ing. Vladimír Věchet, CSc
/ VSŠT Liberec /

Rozsah práce a příloh

Počet stran 61
Počet příloh 3
Počet tabulek 34
Počet obrázků 21

27.5.1983

Vysoká škola: strojní a textilní Fakulta: strojní
v Liberci
Katedra: obrábění a montáže Školní rok: 1982/83

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DILA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Miroslava Okrouhlého
obor 23 - 07 - 8 strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Polyoptimalizace obráběcích procesů
s danou časovou restrikcí

Zásady pro vypracování:

1. Základní metody polyoptimalizace technologických procesů
2. Základní tvary množin přípustných řešení v $N - t$ závislosti
3. Sestavení vstupních dat vybraných příkladů
4. Řešení polyoptimalizace s danou časovou restrikcí pro vybrané příklady

Autorské právo se řídí směrnicemi
MŠK pro státní záv. zkoušky č. j. 31
227/62-III/2 ze dne 13. července
1962-Věstník MŠK XVIII, sešit 24 ze
dne 31.8.1962 § 19 aut. z. č. 115/53 Sb.

VYŠOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC I, STUDENTSKÁ 8
PSC 461 17

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran + přílohy

Seznam odborné literatury: Věchet a kol.: Polyoptimalizace obráběcích
procesů. Zpráva F-2421/041,
Liberec, 1982

Janda: DP - VŠST 1982

Culek: DP - VŠST 1982

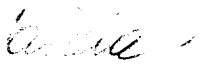
Jindra: DP - VŠST 1982

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Vladimír Věchet, CSc.

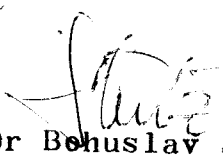
Datum zadání diplomové práce: 15. 10. 1982

Termín odevzdání diplomové práce: 27. 5. 1983

L.S.


Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.

Vedoucí katedry


Doc. RNDr. Bohuslav Stríž, CSc.

Děkan

v Liberci dne 22. 9. 1982

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury

V Liberci, dne 27.5.1983

ol. Čej

OBSAH

1. Seznam použitých zkratk a symbolů	5
2. Úvod	6
3. Základní metody polyoptimalizace technologických procesů	8
3.1 Parametry obrábění	8
3.2 Princip polyoptimalizace	8
3.3 Všeobecný postup optimalizace	10
3.4 Modely pro optimalizaci parametrů obrábění	10
3.4.1 Vymezení oblasti přípustných řešení	11
3.4.2 Optimální řešení, cílové funkce	11
3.5 Řešení modelů pro optimalizaci	12
3.5.1 Analytické metody	12
3.5.1.1 Extrém funkce z intervalu $a;b$	12
3.5.1.2 Lagrangeova metoda vázaných extrémů	13
3.5.2 Numerické metody	13
3.5.2.1 Výběr ze všech variant	13
3.5.2.2 Výběr z omezeného počtu variant	14
3.5.3 Kombinované metody	15
4. Základní tvary množin přípustných řešení v $N - t$ závislosti	16
4.1 Obecné základy vymezení pole přípustných řešení	16
4.2 Obecný charakter závislosti nákladovosti na pracovním čase	17
4.2.1 Výpočet trvanlivostní funkce pro základní způsoby obrábění	17
4.2.2 Analýza závislosti nákladovosti na pracovním čase	18

1. Seznam použitých zkratk a symbolů

- b - šířka obráběné plochy [mm]
 C_o - cena 1 min. práce dělníka a stroje [Kčs]
 C_w - náklady na nástroj vztažené na trvanlivost [Kčs]
 d - průměr obrobku nebo nástroje [mm]
 d_e - ekvivalentní průměr obrobku nebo nástroje [mm]
 e - šířka záběru [mm]
 ξ - vyosení nástroje [mm]
 F_z - tangenciální složka řezné síly [N]
 h - hloubka řezu [mm]
 L - délka obráběné plochy [mm]
 M - krouticí moment na vřetení [Nm]
 n - otáčky vřetena [min^{-1}]
 N - nákladovost [Kčs]
 H - hrana minimálního nákladu [Kčs]
 ω - čas nezávisající na optimalizovaných parametrech [min]
 R_p - výkon obráběcího stroje [W]
 s_z - posuv na zub [mm]
 t - pracovní čas [min]
 T - trvanlivost řezného nástroje [min]
 t_s - strojní čas [min]
 t_w - čas potřebný na výměnu nástroje [min]
 v - řezná rychlost [m min^{-1}]
 z - počet zubů nástroje
 v_s - posuvová rychlost [mm min^{-1}]
 R_v - výkonová restrikce

2. ÚVOD

Jedním ze základních principů, jimiž se prosazuje rentabilita průmyslových podniků, je zvyšování úrovně organizace výroby. Je to oblast, ve které zatím nedosahujeme úrovně průmyslově vyspělých zemí. Důkazem toho je neúměrně vysoký podíl ruční práce, velký podíl čekacích dob v průběžné době výrobků, jakož i nízký stupeň mechanizace a automatizace výroby. Hlavním cílem organizace výroby je zvyšování její technickoekonomické úrovně. Patří sem zdokonalování využití dosavadních, navrhování a realizace nových ucelených soustav výrobních procesů a jejich základních činitelů, k nimž patří pracovní síly, pracovní prostředky a pracovní předměty.

S tím souvisí snaha v proudové organizaci výroby o synchronizaci operací. Zvyšování stupně synchronizace přináší výsledky ve formě lepšího využívání výrobního zařízení i pracovníků, zkrácení průběžných dob výrobků, a tím snižování vázanosti prostředků v rozpracované výrobě. Vyššího stupně synchronizace lze dosáhnout mnoha způsoby. Jedním z možných způsobů je navrhnout takové podmínky výroby, aby průběžné doby jednotlivých operací byly stejné. Konkrétně u operací prováděných obráběním to znamená navrhnout vhodné řezné podmínky.

V současné době stále ještě převládá izolované hodnocení částečných technologických procesů bez ohledu na jejich vzájemné vazby. Tomu také odpovídají používané metody optimalizace, kdy se např. počítají optimální řezné podmínky pro jednotlivé úseky obráběcí operace zvlášť, nezávisle na sobě. V důsledku toho pak při hodnocení technologického procesu jako celku, který se skládá z jednotlivých operací a ty dále z úseků optimalizovaných nezávisle na sobě, bývá

přijaté řešení značně rozdílné od optimálního.

Stále více se prosazuje tendence k tzv. polyoptimalizaci technologických procesů, kdy se hledá minimum nákladovosti takového procesu jako celku, vázané dále restrikcemi vyvolanými vzájemnými vazbami dílčích technologických procesů. jedná se o nový, moderní směr projektování technologických procesů, který nabývá stále většího významu zvláště s ohledem na postupující mechanizaci a automatizaci strojírenské výroby. Této problematice je věnována velká pozornost zvláště na Technische Universität Dresden v NDR, kde ji řeší kolektiv pracovníků pod vedením Prof. Dr. sc. techn. H. - J. Jacobse.

jejich velikost na jednom úseku je vázána na velikost otáček na úsecích jiných. Proto celý tento proces je nutné pojímat v jeho celku, vyjádřit celkovou nákladovost tohoto procesu a hledat poté minimum celkové nákladovosti vázané na podmínku rovnosti otáček. V tomto smyslu se tedy jedná o hledání nějakého kompromisu, vyvolaného technickými možnostmi stroje.

K vyrobení součásti je nutné provést jistý počet operací, které se skládají z úseků, přičemž vycházíme z toho, že je dáno technologicky odůvodněné pořadí těchto operací a úseků. V principu polyoptimalizace je pak pojímání takového technologického procesu, který se skládá z dílčích procesů, jako celku a najít minimum nákladovosti celého technologického procesu, vázané na dodržení výrobně-technických a ekonomických aspektů. Nyní jde o to jaké výrobně-technické a ekonomické aspekty máme na mysli.

Nechť např. výroba probíhá v dávkách a nechť je dána a ekonomicky odůvodněna průběžná doba dávky. V principu je to totéž, jako když řekneme, že součet časů t_{AC} jednotlivých operací je dán předem. V takovém případě tedy hledáme minimum nákladovosti celého technologického procesu, vázané na dodržení podmínky konstantního součtu časů jednotlivých operací. Když naopak výroba bude probíhat v taktu, budeme hledat minimum nákladovosti takového procesu, vázané na podmínku rovnosti časů na jednotlivých operacích /tím je dán i optimální takt /.

Souhrně je tedy možné říci, že pokud mluvíme o polyoptimalizaci technologických procesů, máme tím na mysli hledání minima nákladovosti takového procesu jako celku, vázané dále restrikcemi vyvolanými vzájemnými vazbami dílčích technologických procesů.

3.3 Všeobecný postup optimalizace

Všeobecný postup optimalizace technologických parametrů se skládá z těchto následujících kroků:

- definice základní množiny optimalizovaných parametrů
- definice množiny dostupných kombinací hledaných parametrů
- definice vyhovujících kombinací hledaných parametrů
- najití přípustných řešení úlohy jako průnik množin dostupných a vyhovujících kombinací hledaných parametrů
- určení počtu prvků množiny přípustných řešení P
- rozhodování o dalším postupu řešení:

Když počet prvků množiny P je $m_{(P)} \leq 1$, úloha nemá řešení nebo má právě jedno řešení. Výpočet skončíme.

Když počet prvků množiny P je $m_{(P)} > 1$, potom máme alespoň dvě přípustná řešení a ve výpočtu pokračujeme.

- volba cílové funkce a stanovení jejího požadovaného extrému; když máme více cílových funkcí, je třeba stanovit i jejich váhu
- určení optimálního řešení, t.j. takovou kombinaci přípustných parametrů, která zabezpečí požadovaný extrém cílové funkce

3.4 Modely pro optimalizaci parametrů obrábění

Při optimalizaci parametrů obrábění využíváme poznatky které jsme získali při analýze procesu obrábění. Výsledkem optimalizace jsou statistické modely / empirické rovnice / charakteristik procesu obrábění. Úkolem je stanovit hodnoty parametrů obrábění na daném výrobním zařízení tak, aby obráběné plochy měly předepsanou jakost a současně byly komplexní cíle výroby maximální měrou splněny.

Modely pro optimalizaci parametrů obrábění sestávají z oblasti přípustných řešení, cílové funkce a označení jejího

žádaného extrému.

3.4.1 Vymezení oblasti přípustných řešení

Řešení každé technologické úlohy si můžeme představit jako kombinaci hledaných parametrů. Kombinace, které jsou k dispozici anebo jsou dostupné, tvoří prvky určité množiny. Jsou to např. stroje, které máme na dílně, nebo na ně máme finanční prostředky, nebo posuvy, otáčky vřetena apod., které můžeme na těchto strojích nastavit a použít vzhledem k pevnosti obráběného materiálu, volené hloubce řezu a výkonu elektromotoru stroje. Kombinace hledaných parametrů obrábění, které zabezpečí požadované vlastnosti výrobku / např. tvar, rozměry, toleranci, drsnost povrchu atd. /, nechť jsou prvky množiny vyhovujících kombinací.

V konkrétních podmínkách můžeme ve výrobě použít jen ty kombinace parametrů, které jsou průnikem těchto dvou množin. Tyto kombinace představují přípustné řešení dané úlohy.

3.4.2 Optimální řešení, cílové funkce

V rozhodovací situaci existuje možnost výběru alespoň ze dvou přípustných řešení. Je přirozenou snahou vybrat si řešení lepší. Vyžaduje to ohodnotit kvalitu přípustných řešení. Tato řešení můžeme ohodnotit z různých hledisek. Tato hlediska většinou vyjadřují určité komplexní cíle výroby jako např.:

- minimální náklady na nástroje
- minimální náklady na výrobu
- maximální zisk
- maximální produktivita apod

Postupujeme tak, že zvolený cíl vyjádříme jako funkci hledaných parametrů úlohy. Proto této funkci říkáme cílová funkce. Přípustné řešení, při kterém cílová funkce dosahuje

žádaný extrém / minimum nebo maximum /, je optimálním řešením. Výpočet komplexních cílů výroby, jako jsou náklady, zisk, produktivita, je často zdlouhavý a není z hlediska optimalizace ani potřebný. Nejde nám o hodnotu extrému cílové funkce, ale o optimální kombinaci hledaných parametrů úlohy. Proto komplexní cílové funkce nahradíme jednoduššími. Získáme je matematickou nebo logickou analýzou vlivu hledaných parametrů na volenou cílovou funkci.

3.5 Řešení modelů pro optimalizaci

Metoda řešení závisí na formálních vlastnostech modelu, t.j. na tom, jaký je počet optimalizovaných parametrů, jaký je tvar omezujících podmínek a cílové funkce, t.j. jsou-li lineární, derivovatelné, nebo jestli umožňují optimalizované proměnné vyjádřit explicitně atd.

Metody řešení matematických modelů optimalizace řezných podmínek rozdělujeme takto:

a) Analytické metody:

- extrém funkce z intervalu $\langle a, b \rangle$
- Lagrangeova metoda vázaných extrémů

b) Numerické metody:

- výběr ze všech variant
- výběr z omezeného počtu variant

c) Kombinované metody

3.5.1 Analytické metody

3.5.1.1 Extrém funkce z intervalu $\langle a, b \rangle$

Nezávislé proměnné cílové funkce vyjádříme pomocí optimalizovaných parametrů a hledáme extrém této funkce v intervalu $\langle a, b \rangle$. Postup řešení je z matematiky všeobecně známý. Nejprve najdeme lokální extrém z intervalu $\langle a, b \rangle$. Hodnotu cílové funkce v lokálním extrému porovnáme s jejími hodnotami

na hranicích intervalu $\langle a, b \rangle$, v bodech nespojitosti a v bodech nespojitosti derivace.

Metodu obvykle používáme, když máme jeden optimalizovaný parametr, cílová funkce je derivovatelná a z limitujících podmínek umíme vyjádřit interval $\langle a, b \rangle$.

3.5.1.2 Lagrangeova metoda vázaných extrémů

Postup řešení vychází z rozšíření přijaté cílové funkce Lagrangeovými koeficienty a z řešení soustavy rovnic, které získáme parciálními derivacemi rozšířené cílové funkce.

Metodu používáme, když omezující podmínky z hlediska řezných sil, výkonu řezání, drsnosti povrchu atd. jsou dány rovnicemi, t.j. při optimálním řešení se řezné síly, výkon řezání, drsnost povrchu atd. rovnají právě jejich dovoleným hodnotám. Rozšířená cílová funkce má být derivovatelná a soustava rovnic parciálních derivací řešitelná.

3.5.2 Numerické metody

3.5.2.1 Výběr ze všech variant

Postup řešení vychází z vytvoření všech variant / kombinací / optimalizovaných parametrů. Když jsou spojité, volíme určité diskrétní hodnoty z intervalu jejich přípustných hodnot. Pro jednotlivé kombinace parametrů, které jsou pevnky přípustné množiny řešení, stanovíme hodnotu cílové funkce. Za optimální považujeme kombinaci, při které cílová funkce dosahuje požadovaný extrém.

Metoda má všeobecné použití, neklade žádné požadavky na tvar omezujících podmínek a cílové funkce. Počet variant nemá být příliš velký.

3.5.2.2 Výběr z omezeného počtu variant

Do této skupiny patří většina metod matematického programování, jako např.:

- lineární programování, cílová funkce a omezující podmínky mají být lineární nebo linearizovatelné
- nelineární programování / konvexní a kvadratické programování /. Cílová funkce a omezující podmínky nemusí být lineární, klademe na ně ale určité speciální nároky, např. musí mít tvar kvadratické rovnice, mají být konvexní atd.
- celočíselné programování používáme, když alespoň jeden z optimalizovaných parametrů může nabývat jen celočíselné hodnoty / např. počet záběrů při dělení přídatku /. Optimum v takových podmínkách nezískáme vždy jen jednoduchým zaokrouhlováním výsledku neceločíselného programování
- dynamické programování se vyznačuje etapovitostí úlohy nebo postupu řešení. Řešený proces má být markovský. Z oblasti optimalizace řezných podmínek za takovýto proces můžeme považovat stanovení meziperačního přídatku.
- heuristické metody vycházejí z využívání některého racionálního principu nebo vlastnosti modelu / tvar hyperboly cílové funkce pro různé, náhodně určené kombinace optimalizovaných parametrů. Na tvar omezení a cílové funkce nekladou žádné nároky
- stochastické programování na rozdíl od všech předcházejících metod bere do úvahy skutečnost, že každá reálná úloha se řeší v podmínkách neúplných informací, t.j. že parametry cílové funkce a omezení mohou být náhodnými veličinami.

3.5.3 Kombinované metody

Na řešení složitých modelů, jako jsou např. optimalizace řezných podmínek pro vícenástrojové obrábění, nebo modelů, které zahrnují kromě posuvu a řezné rychlosti schéma dělení přídatku, geometrii nástroje, výkon elektromotoru stroje apod., nejčastěji používáme kombinované metody. Některé části modelu řešíme analytickými, jiné numerickými metodami. Z numerických metod používáme přednostně ty, které nekladou žádné požadavky na tvar cílových funkcí a omezení. Když přípustné hodnoty optimalizovaného parametru jsou prvky konečné množiny a počet jejích prvků není příliš velký, používáme metodu výběru ze všech variant. Jinak obvykle používáme heuristické metody.

4. ZÁKLADNÍ TVARY MNOŽIN PŘÍPUSTNÝCH ŘEŠENÍ

V N - t ZÁVISLOSTI

4.1 Obecné základy vymezení pole přípustných řešení

Jak již bylo dříve uvedeno, můžeme si řešení každé technologické úlohy představit jako kombinaci jistých hledaných parametrů. Vycházíme z toho, že máme dvě množiny prvků. Kombinace, které jsou k dispozici anebo jsou dostupné / stroje, které máme na dílně, nebo na ně máme finanční prostředky /, tvoří prvky první množiny. Prvky druhé množiny jsou kombinacemi hledaných parametrů obrábění, které zabezpečí požadované vlastnosti výrobku.

V konkrétních podmínkách můžeme použít jen ty kombinace parametrů, které jsou průnikem těchto dvou množin. Tyto kombinace představují přípustné řešení úlohy.

Při vlastní konstrukci pole přípustných řešení se vychází z principu polyoptimalizace, kdy se hledá minimum nákladovosti takového procesu jako celku, vázané dále restrikcemi vyvolanými vzájemnými vazbami dílčích technologických procesů. Jako cílové kritérium se tedy volí minimum nákladovostní funkce, přičemž se uvažují pouze ty složky nákladovosti, které závisí na optimalizovaných parametrech, např. v případě obrábění na řezných podmínkách. Vlastní tvar pole přípustných řešení je dán charakterem křivek $s_z = \text{konst.}$; $v = \text{konst.}$ / respektive $n = \text{konst.}$ /, dále omezením z hlediska výkonu elektromotoru stroje a v případě frézování též ještě omezením vzhledem k posuvové rychlosti stolu frézky / $v_{s,\min}$; $v_{s,\max}$ / .

4.2 Obecný charakter závislosti nákladovosti na pracovním čase

4.2.1 Výpočet trvanlivostní funkce pro základní způsoby obrábění

Mezi základní způsoby obrábění patří soustružení, vrtání a frézování.

Pro případ soustružení je $z = 1$, a tedy $s = s_z$. V případě čelního soustružení, nebo soustružení kuželů se ovšem řezná rychlost s časem mění. Proto v těchto případech budeme počítat s tzv. ekvivalentním průměrem obrobku d_e , což je neměnný průměr obrobku, kterému odpovídá stejná trvanlivost nástroje jako v uvažovaném případě. Přibližně lze psát:

$$d_e = \left[\frac{d_{\max}^{1-A_2} - d_{\min}^{1-A_2}}{(1-A_2)(d_{\max} - d_{\min})} \right]^{-1/A_2} \quad (1)$$

Trvanlivost lze tedy pro soustružení vyjádřit ve tvaru:

$$T = A_1 \cdot v^{A_2} \cdot s^{A_3} \cdot h^{A_4} = A_1 \cdot (\pi \cdot d_e)^{A_2} \cdot n^{A_2} \cdot s_z^{A_3} \cdot h^{A_4} \quad (2)$$

kde A_1 až A_4 jsou konstanty a pak pro dané h platí:

$$A_{1,r} = A_1 \cdot h^{A_4} \quad (3)$$

V případě vrtání je $z = 2$ a tedy $s = 2s_z$. Trvanlivost se vyjadřuje ve tvaru:

$$T = A_1 \cdot v^{A_2} \cdot s^{A_3} = A_1 \cdot (\pi \cdot d_e)^{A_2} \cdot n^{A_2} \cdot 2^{A_3} \cdot s_z^{A_3} \quad (3)$$

Pak tedy:

$$A_{1,r} = A_1 \cdot 2^{A_3} \quad (4)$$

Při frézování se udává posuv na zub s_z a počet zubů z a trvanlivost se vyjadřuje ve tvaru:

$$\begin{aligned} T &= A_1 \cdot v^{A_2} \cdot s_z^{A_3} \cdot h^{A_4} \cdot (e/d_e)^{A_5} \cdot (z/d_e)^{A_6} = \\ &= A_1 \cdot (\pi \cdot d_e)^{A_2} \cdot n^{A_2} \cdot s_z^{A_3} \cdot h^{A_4} \cdot (e/d_e)^{A_5} \cdot (z/d_e)^{A_6} \end{aligned} \quad (6)$$

V tomto případě pak bude:

$$A_{1,r} = A_1 \cdot h^{A_4} \cdot (e/d_e)^{A_5} \cdot (z/d_e)^{A_6} \quad (7)$$

4.2.2 Analýza závislosti nákladovosti na pracovním čase

Při určování závislosti nákladovosti na pracovním čase vycházíme ze vztahů (8) až (11).

$$N = t_s \cdot (C_o + C_w / T) \quad (8)$$

$$t = t_s \cdot (1 + t_w / T) \quad (9)$$

$$T = A_{1,r} \cdot v^{A_2} \cdot s_z^{A_3} \quad (10)$$

$$t_s = \frac{\pi \cdot d_e \cdot L}{v \cdot s_z \cdot z} \quad (11)$$

Při analýze závislosti $N - t$ určíme nejprve charakter křivek $s_z = \text{konst.}$ Funkce je dána parametricky a tedy:

$$\frac{d}{dt} N(t) = \frac{d}{dv} N(v) \cdot \frac{1}{\frac{d}{dv} t(v)} \quad (12)$$

Derivováním a úpravou dostaneme:

$$\frac{d}{dt} N(t) = \frac{C_o \cdot T + C_w \cdot (A_2 + 1)}{T + t_w \cdot (A_2 + 1)} \quad (13)$$

kde T je dáno vztahem (10).

V nejjednodušším případě, když $A_2 = -1$, tak

$$\frac{d}{dt} N(t) = C_o \quad (14)$$

a čáry konstantního posuvu jsou přímky rovnoběžné s přímkou

$$N = C_o \cdot t$$

Praktický význam mají případy, když $A_2 < -1$. Pro $\frac{d}{dt} N(t) = 0$ dostaneme minimum nákladovosti, kterému odpovídá čas

$$t_1 = \frac{\pi \cdot d_e \cdot L}{v_1 \cdot s_z \cdot z} \cdot \left(1 + \frac{t_w}{T_1}\right) \quad (15)$$

$$\text{kde } T_1 = - \frac{C_w}{C_o} \cdot (A_2 + 1) \quad (16)$$

$$v_1 = \frac{T_1}{A_{1,r} \cdot s_z^{A_3}} \quad (17)$$

Lokální minimum nákladovosti bude:

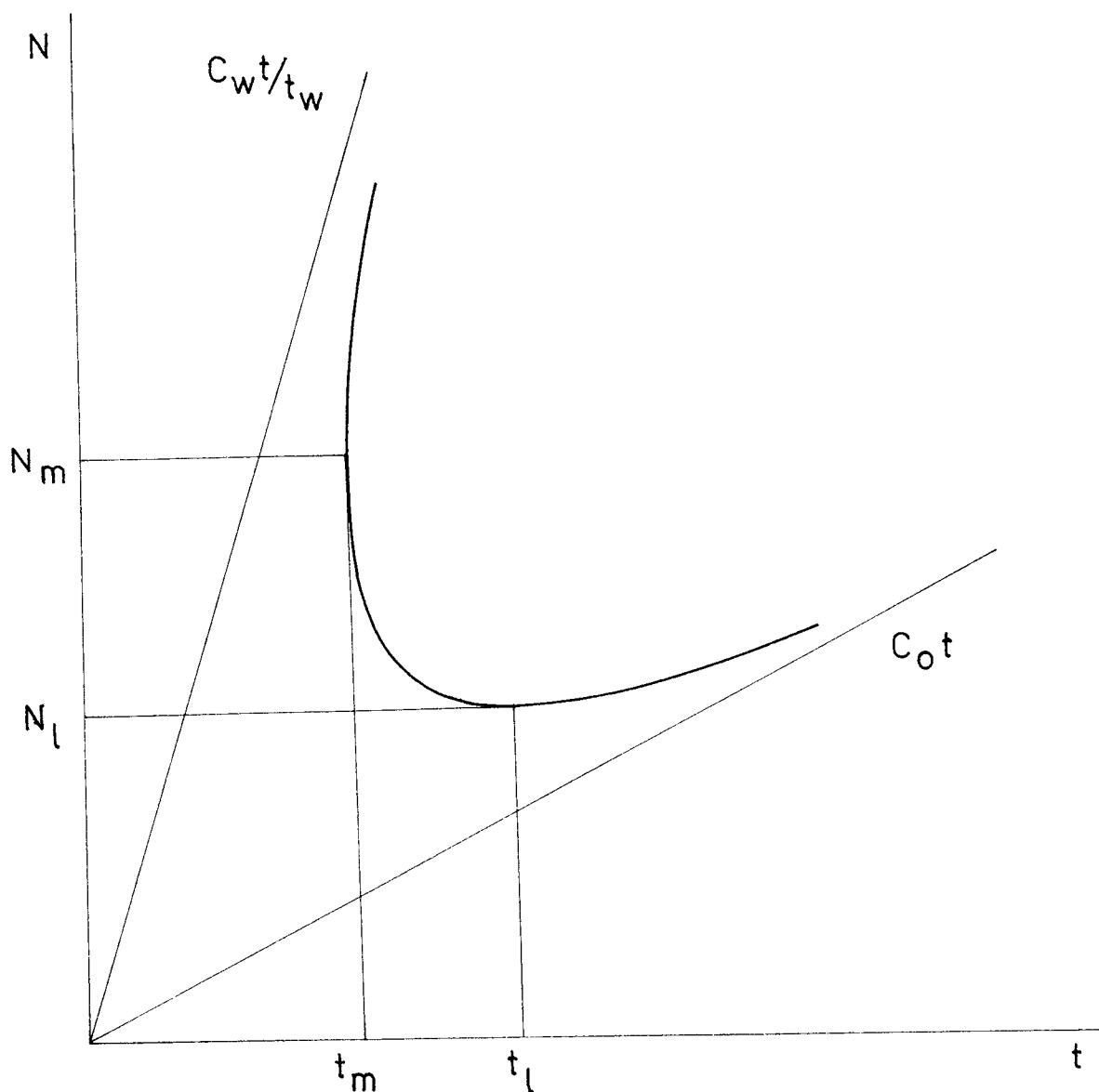
$$N_1 = \frac{\pi \cdot d_e \cdot L}{v_1 \cdot s_z \cdot z} \cdot (C_o + \frac{C_w}{T_1}) \quad (18)$$

Obdobné vztahy dostaneme pro výpočet minimální hodnoty pracovního času, kdy platí $\frac{dt}{dN} = 0$.

$$T_m = -t_w \cdot (A_2 + 1) \quad (19)$$

$$t_m = \frac{\pi \cdot d_e \cdot L}{v_m \cdot s_z \cdot z} \cdot (1 + \frac{t_w}{T_m}) \quad (20)$$

$$v_m = \frac{A_2 \cdot T_m}{A_{1,r} \cdot s_z \cdot A_3} \quad (21)$$



obr. 1

Tomuto minimálnímu času t_m odpovídají náklady

$$N_m = \frac{\pi \cdot d_e \cdot L}{v_m \cdot s_z \cdot z} \cdot (C_o + \frac{C_w}{T_m}) \quad (22)$$

Tyto hodnoty jsou zakresleny na obr. 1.

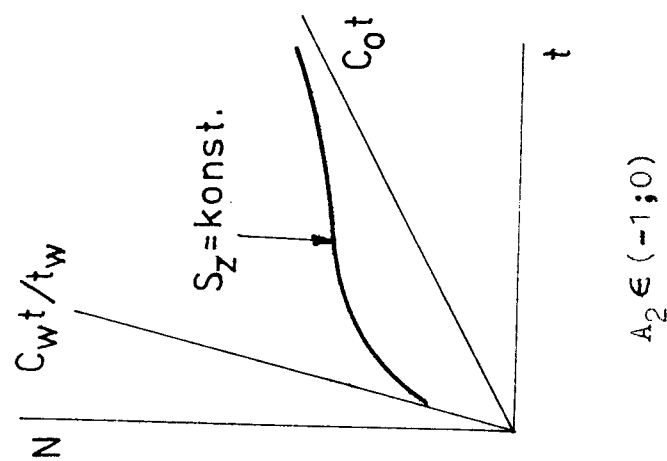
Pro úplnost analyzujeme ještě případ, kdy $A_2 \in (-1; 0)$. Pak pro všechna t bude $\frac{d}{dt} N(t) > 0$ a lze ukázat, že funkce $N(t)$ je monotónně rostoucí v oblasti vymezené přímkami $N(t) = C_o \cdot t$ a $N(t) = \frac{C_w}{t_w} \cdot t$. Souhrně jsou všechny tři případy zakresleny na obr. 2.

Pokud bychom chtěli do závislosti $N(t)$ vyznačit čáry $v = \text{konst.}$, tak mají stejný charakter jako čáry $s = \text{konst.}$ a tento charakter je dán velikostí konstanty A_3 . V tomto případě, když řídicím parametrem je posuv s , bude:

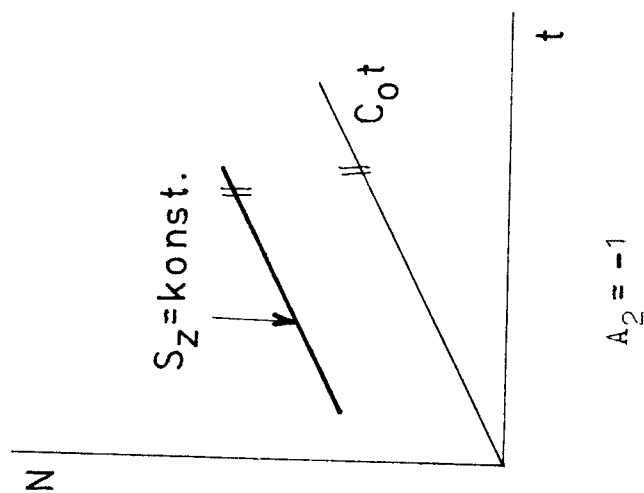
$$\frac{d}{dt} N(t) = \frac{C_o \cdot T + C_w \cdot (A_3 + 1)}{T + t_w \cdot (A_3 + 1)} \quad (23)$$

Charakter závislosti $N - t$ rovněž závisí na relaci mezi hodnotami A_2 a A_3 . Jestliže je $A_3 > A_2$, tak se zvyšující se hodnotou s_z se hodnoty t_1 , N_1 , t_m , N_m zmenšují a naopak pro $A_3 < A_2$ se se zvyšováním s_z tyto hodnoty rovněž zvětšují / viz obr. 3a /. Ve speciálním případě, když $A_2 = A_3$, bude závislost N na t reprezentována křivkou, jejíž každý bod odpovídá hodnotě $s_z \cdot v = \text{konst.}$ / viz obr. 3b /. Analogické závěry lze získat i pro čáry $v = \text{konst.}$ / viz obr. 3c až 3e /. Při vrtání epoxydové pryskyřice zpevněné sklotextilem je $A_3 \approx 0$, $A_2 < -1$ / viz obr. 3f /. Podobné rozborů lze učinit i v dalších speciálních případech. Nejčastěji se však vyskytují případy podle obr. 3e.

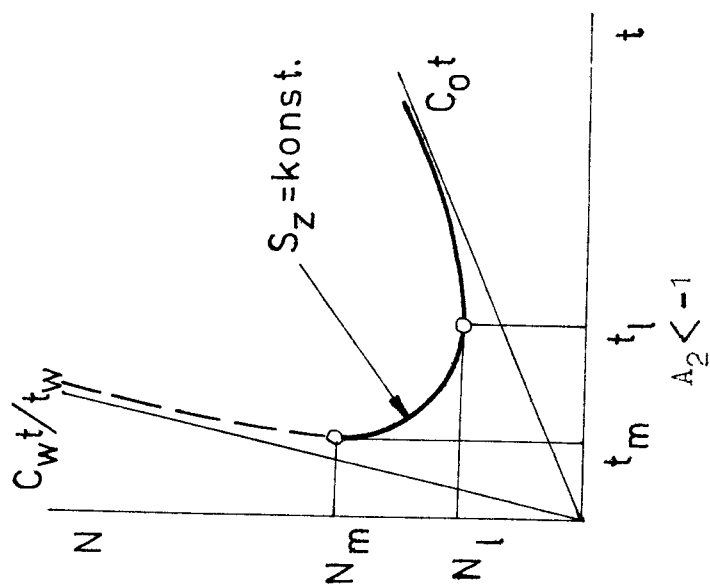
Základní tvar pole přípustných řešení je dán, nepočítáme - li výkonové omezení, o kterém bude pojednáno dále, charakterem křivek $s_z = \text{konst.}$, $v = \text{konst.}$ / respektive



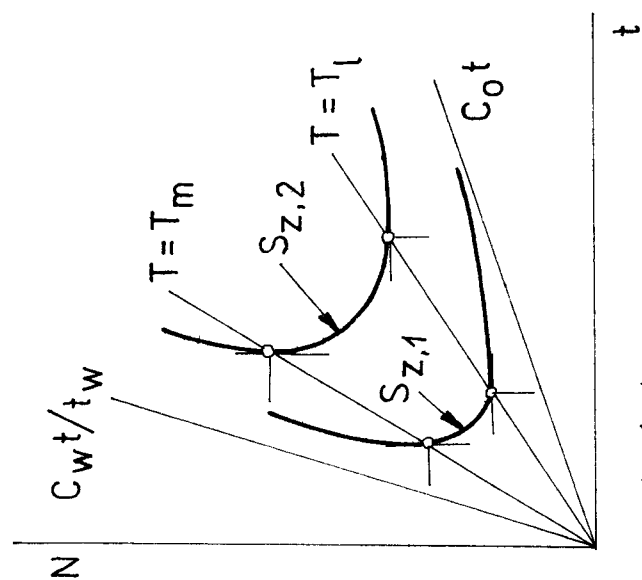
$$A_2 \in (-1; 0)$$



$$A_2 = -1$$



obr. 2

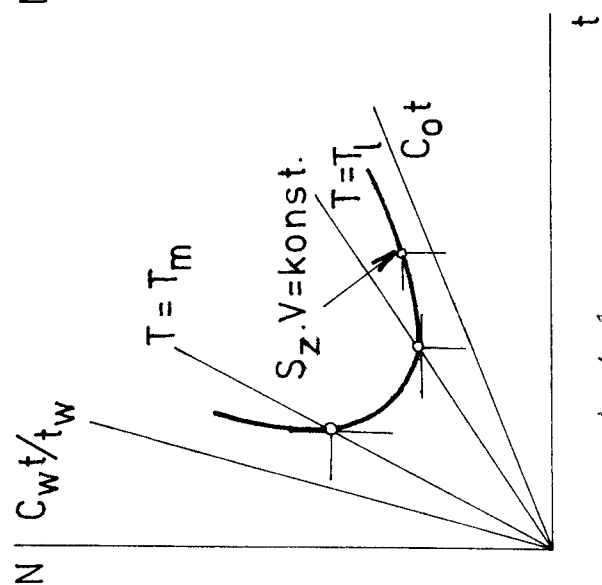


$$A_2 < -1$$

$$A_3 > A_2 ; s_{z,1} > s_{z,2}$$

$$A_3 < A_2 ; s_{z,1} < s_{z,2}$$

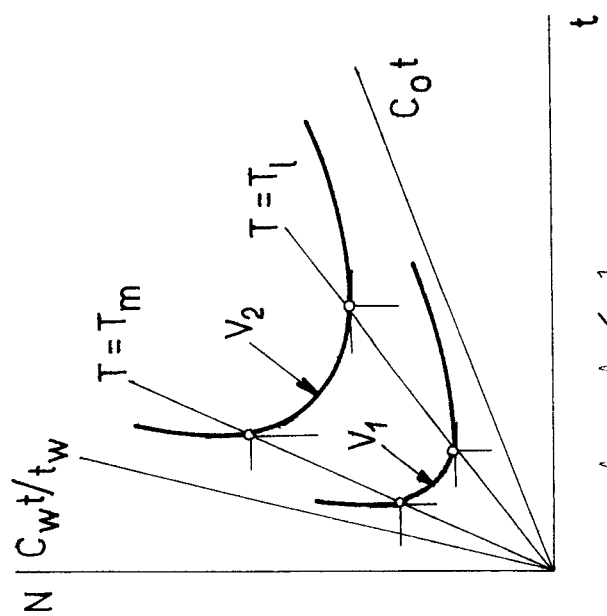
a)



$$A_2 < -1$$

$$A_3 = A_2$$

b)

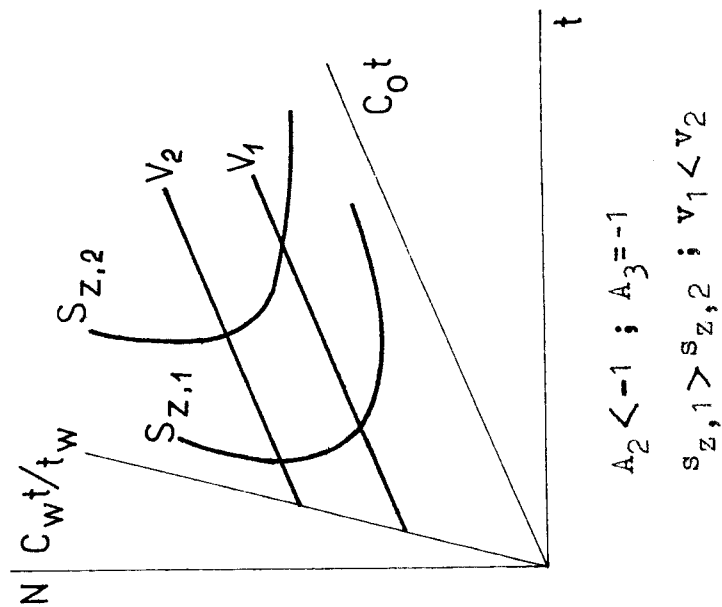


$$A_2 , A_3 < -1$$

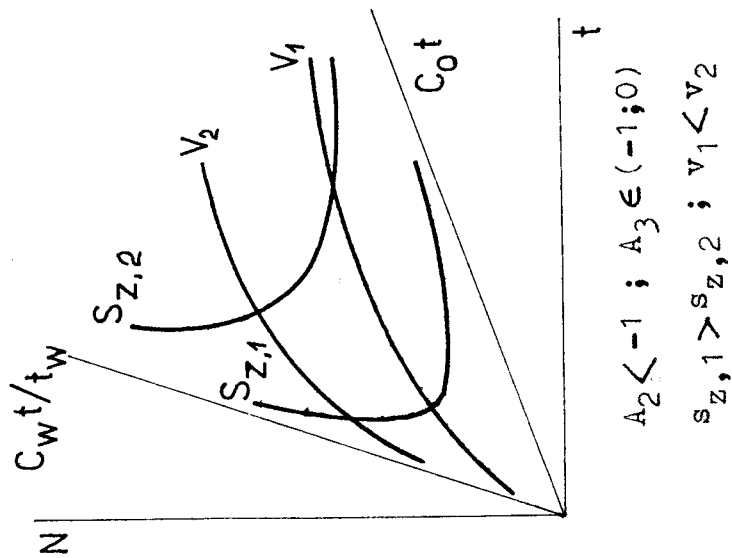
$$A_3 > A_2 ; v_1 < v_2$$

$$A_3 < A_2 ; v_1 > v_2$$

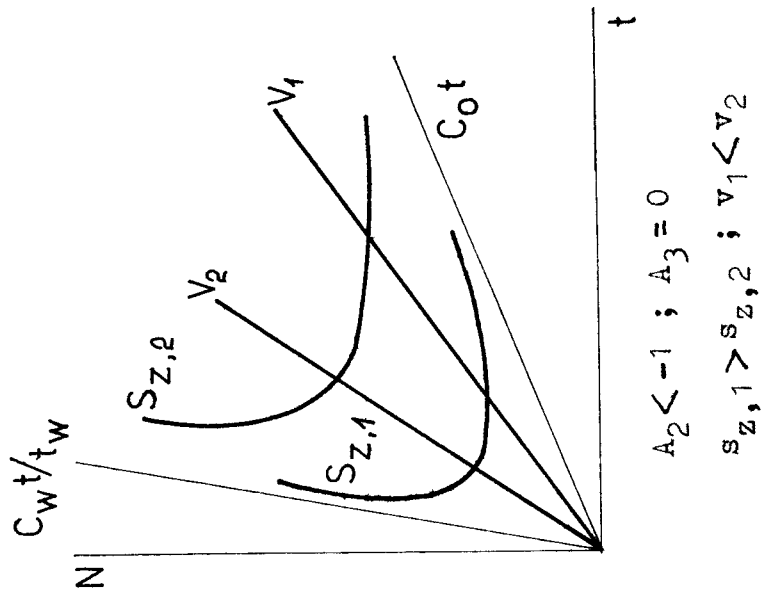
c)



d)



e)



f)

obr. 3

velikostí konstant A_2 a A_3 a jejich vzájemným vztahem /.
 Základní tvary polí přípustných řešení jsou uvedeny na obrázcích 3d až 3f, kdy $A_2 < -1$. Obdobně bychom získali pole přípustných řešení i pro případy, kdy $A_2 = -1$ a $A_2 \in (-1; 0)$. Tyto případy se však v praxi téměř nevyskytují.

4.3 Výkonové omezení, výpočet krouticího momentu na vřetení

Výkonové omezení je dáno výkonem elektromotoru stroje. Při stanovení tohoto omezení vycházíme z výpočtu maximálního krouticího momentu na vřetení M , který nesmí překročit přípustnou hodnotu R_M .

Pro případ soustružení bude:

$$M = 0,5 \cdot F_z \cdot d \quad (24)$$

Tangenciální složku řezné síly F_z lze určit ze vztahu:

$$F_z = C_{pz} \cdot h^{X_{pz}} \cdot s_z^{Y_{pz}} \quad (25)$$

kde C_{pz} , Y_{pz} a X_{pz} jsou konstanty.

Pro případ vrtání bude:

$$F_z = C_{pz} \cdot d^{X_{pz}} \cdot (z \cdot s_z)^{Y_{pz}} \quad (26)$$

a krouticí moment na vřetení

$$M = 0,5 \cdot d \cdot F_z \quad (27)$$

Pro případ frézování rovinné plochy válcovou frézou s přímými zuby se tangenciální složka řezné síly F_z mění s úhlem pootočení frézy φ /viz obr. 4/.

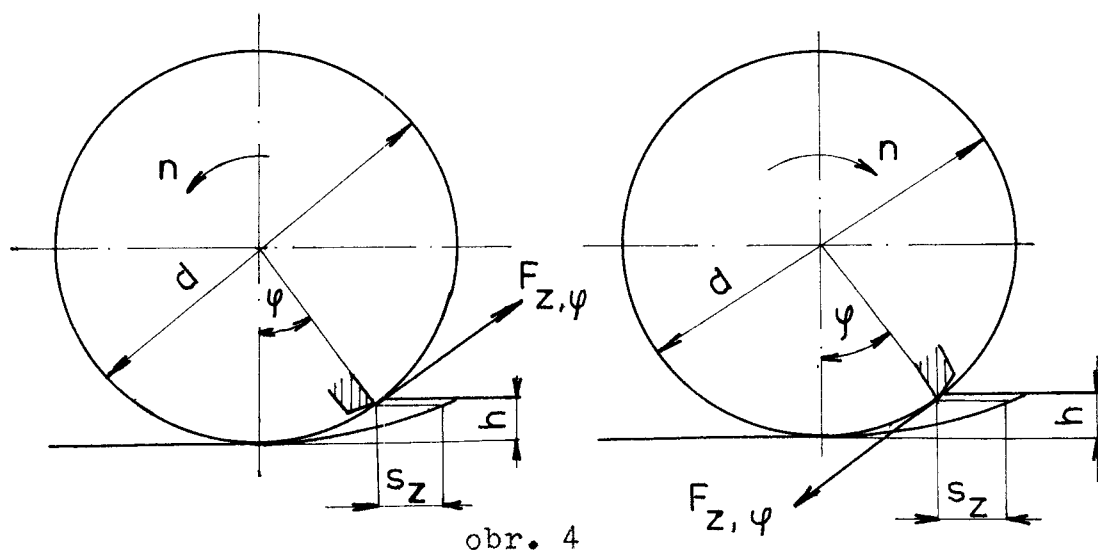
Tangenciální sílu na jeden břit odpovídající úhlu pootočení lze vyjádřit vztahem:

$$F_{z,\varphi} = C_{pz} \cdot b \cdot s_z^{Y_{pz}} \cdot \sin^{Y_{pz}} \varphi \quad (28)$$

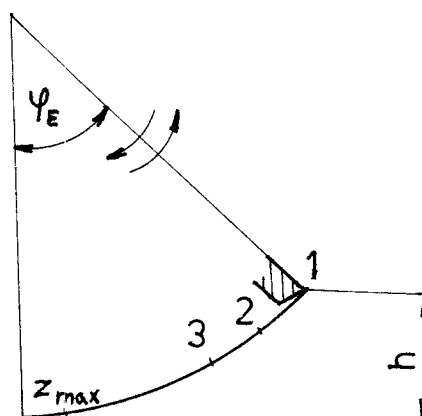
Pro výpočet maximálního krouticího momentu bude celková tangenciální síla, viz obr. 5, rovna:

$$F_z = \sum_{j=1}^{z_{max}} F_{z,\varphi_j} \quad (29)$$

$$\text{kde } \varphi_j = \varphi_1 - (j - 1)\tau, \quad \varphi_1 = \varphi_E \quad (30)$$



obr. 4



obr. 5

Dále platí:

$$\tau = \frac{2 \cdot \pi}{z} \quad (31)$$

$$z_{\max} = \frac{\psi_E}{\tau} + 1 \quad (32)$$

$$\cos \psi_E = 1 - \frac{2h}{d} \quad (33)$$

Ve vztahu (32) se bere z podílu $\frac{\psi_E}{\tau}$ celistvá část čísla.

Potom celková tangenciální síla bude:

$$F_Z = C_{pz} \cdot b \cdot s_z \cdot \sum_{j=1}^{z_{\max}} \sin \psi_{pz} \left[\psi_1 - (j-1)\tau \right] \quad (34)$$

V případě frézování čelní válcovou frézou budeme při výpočtu postupovat stejným způsobem jako v předcházejících případech. To znamená, že si nejdříve vypočteme tangenciální

složku řezné síly a z ní potom podle vztahu (27) maximální krouticí moment. Podrobný postup tohoto výpočtu je uveden v literatuře [1] a [2].

Nyní při znalosti maximálního krouticího momentu na vřetení lze formulovat výkonové omezení ve tvaru:

$$R_p = M \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (35)$$

když pro R_p platí:

$$R_p = P \cdot \eta \quad (36)$$

kde P je příkon stroje a η je účinnost stroje.

4.4 Omezení z hlediska posuvové rychlosti

S tímto omezením počítáme například u frézování, kdy bereme v úvahu maximální a minimální posuvovou rychlost stolu frézky. Při výpočtu vycházíme ze vztahu:

$$v_s = n \cdot s_z \cdot z \quad (37)$$

Čáry $v_{s,max}$ a $v_{s,min}$ jsou rovnoběžné s čarou $\frac{C_w}{t_w} = t$.

4.5 Postup stanovení pole přípustných řešení v N - t závislosti

- spočítáme a zakreslíme čáry $s_{z,min} = konst.$, $s_{z,max} = konst.$
- spočítáme a zakreslíme čáry v_{min} a $v_{max} = konst.$
- spočítáme a zakreslíme čáru výkonového omezení, případně též čáry $v_{s,min}$ a $v_{s,max}$

Výsledné pole přípustných řešení je dáno plochou vymezenou těmito čarami.

5. SESTAVENÍ VSTUPNÍCH DAT VYBRANÝCH PŘÍKLADŮ

5.1 Obecný postup sestavování vstupních dat

Pro výpočet je třeba zadat tzv. vstupní data. Patří sem parametry pro výpočet nákladovosti a časů, parametry pro výpočet trvanlivosti, parametry obrobku a nástroje a dále též počet dílčích procesů. Při polyoptimalizaci je třeba brát zřetel i na omezující podmínky, které jsou dány především technickými možnostmi příslušného obráběcího stroje. Proto jsou vstupními hodnotami i hodnoty omezení posuvů, řezné rychlosti / respektive otáček / a výkonu.

Interval přípustné volby posuvů lze psát ve tvaru:

$$s \in \langle R_{S1} ; R_{S2} \rangle \quad (38)$$

kde R_{S1} může být:

- minimální nastavitelný posuv na daném obráběcím stroji
- minimální přípustná hranice pro posuv s ohledem na tvorbu třísky

a R_{S2} může být:

- maximální nastavitelný posuv na daném obráběcím stroji
- maximální posuv daný předepsanou drsností povrchu
- maximální hranice pro posuv vyplývající ze vztahu požadované přesnosti obrábění a tuhosti soustavy SPID
- maximální hranice pro posuv s ohledem na opotřebení řezného nástroje

Analogicky pak interval přípustné volby otáček bude:

$$n \in \langle R_n ; R_n \rangle \quad (39)$$

kde R_n může být:

- minimální otáčky nastavitelné na daném obráběcím stroji
- minimální přípustná hranice pro otáčky s ohledem na tvorbu třísky

a R_n může být:

- maximální otáčky nastavitelné na daném obráběcím stroji
- maximální přípustná hranice pro otáčky s ohledem na tvorbu třísky

Omezení výkonu vyplývá z toho / viz kapitola 4.3 /, že krouticí moment na vřetení nesmí překročit přípustnou hodnotu a nesmí být překročen maximální výkon elektromotoru obráběcího stroje. Proto se zadávají též parametry pro výpočet tangenciální složky řezné síly a hodnota maximálního výkonu elektromotoru obráběcího stroje / R_p /.

Pokud bereme v úvahu též omezení z hlediska posuvové rychlosti, zadáváme ještě její maximální a minimální hodnotu / $v_{s,max}$; $v_{s,min}$ /.

Mimo těchto hodnot je třeba do programu zadat o jakou operaci se jedná. Toto se zadává pomocí číselného kódu, tzv. identifikátoru dílčího procesu, následujícím způsobem:

- 101 - soustružení podélné
- 102 - soustružení čelní
- 103 - soustružení kužele
- 201 - vrtání zplna
- 202 - vrtání předvrtaného otvoru
- 301 - frézování válcovou frézou
- 302 - frézování čelní frézou

Do programu to pak zapisujeme tak, že za slůvko IDEN, což znamená identifikátor dílčího procesu, uvedeme číselné označení příslušné operace.

5.2 Konkrétní zadání vstupních dat vybraných příkladů

Při konkrétním zadání vstupních dat bylo čerpáno z příkladů uvedených v této literatuře:

- Doc. Ing. Vladimír Věchet, CSc: Technologické projekty
- Milan Janda: DP - VŠST Liberec 1982

Minimální a maximální hodnoty posuvů a otáček byly voleny vzhledem k omezení, které je dáno voleným řezným a obráběným materiálem.

5.2.1 Soustružení - sekvence č.1

Počet dílčích procesů: 2

Dílčí proces č.1:

IDEN: 101

$C_o = 1,0255$

$C_w = 5,103$

$t_w = 0,8$

$d = 105$

$L = 200$

$h = 0,5$

$A_1 = 9,85 \cdot 10^{10}$

$A_2 = - 4,54$

$A_3 = - 1,14$

$A_4 = - 0,33$

$C_{pz} = 1710$

$X_{pz} = 1,0$

$Y_{pz} = 0,78$

$R_p = 2400$

$s_{z,min} = 0,2$

$s_{z,max} = 0,5$

$n_{min} = 300$

$n_{max} = 800$

$z = 1$

$d_e = 105$

Dílčí proces č.2:

IDEN: 102

$C_o = 1,0255$

$C_w = 5,103$

$t_w = 0,8$

$d = 104$

$L = 45$

$h = 2$

$A_1 = 9,85 \cdot 10^{10}$

$A_2 = - 4,54$

$A_3 = - 1,14$

$A_4 = - 0,33$

$C_{pz} = 1710$

$X_{pz} = 1,0$

$Y_{pz} = 0,78$

$R_p = 2400$

$s_{z,min} = 0,2$

$s_{z,max} = 0,8$

$n_{min} = 300$

$n_{max} = 800$

$z = 1$

$d_e = 73,636$

5.2.2 Vrtání - sekvence č.2

Počet dílčích procesů: 2

Dílčí proces č.3:

IDEN: 201

$C_o = 0,7$

$C_w = 4,9$

$t_w = 0,5$

$d = 14$

$L = 80$

$A_1 = 63 \cdot 10^3$

$A_2 = - 4,03$

$A_3 = - 2,5$

$C_{pz} = 676$

$X_{pz} = 0,9$

$Y_{pz} = 0,7$

$R_p = 2400$

$s_{z,min} = 0,1$

$s_{z,max} = 0,8$

$n_{min} = 200$

$n_{max} = 800$

$z = 2$

$d_e = 14$

Dílčí proces č.4:

IDEN: 202

$C_o = 0,7$

$C_w = 4,9$

$t_w = 0,5$

$d = 22$

$L = 80$

$h = 4$

$A_1 = 9,85 \cdot 10^8$

$A_2 = - 4,54$

$A_3 = - 1,14$

$A_4 = - 0,33$

$C_{pz} = 1710$

$X_{pz} = 1,0$

$Y_{pz} = 0,78$

$R_p = 2400$

$s_{z,min} = 0,1$

$s_{z,max} = 0,8$

$n_{min} = 100$

$n_{max} = 450$

$z = 2$

$d_e = 22$

5.2.3 Frézování - sekvence č.3

Počet dílčích procesů: 1

Dílčí proces č.5:

IDEN: 301

$C_o = 0,98$

$C_w = 5,1$

$t_w = 1,5$

$d = 50$

$L = 86$

$b = 25$

$e = 4$

$h = 4$

$A_1 = 6,6 \cdot 10^3$

$A_2 = - 2,1$

$A_3 = - 0,5$

$A_4 = - 0,3$

$A_5 = - 0,01$

$A_6 = - 0,72$

$C_{pz} = 1600$

$X_{pz} = 1,0$

$Y_{pz} = 0,72$

$R_p = 3200$

$s_{z,min} = 0,1$

$s_{z,max} = 0,4$

$n_{min} = 20$

$n_{max} = 120$

$v_{s,min} = 40$

$v_{s,max} = 325$

$z = 12$

$d_e = 50$

6. ŘEŠENÍ POLYOPTIMALIZACE S DANOU ČASOVOU RESTRIKČÍ

PRO VYBRANÉ PŘÍKLADY

6.1 Časové restrikce

Časové restrikce podchycují vzájemné vazby mezi dílčími technologickými procesy. Tvaru časové restrikce jsou dále podřízeny i metody polyoptimalizace technologických procesů. Uveďme způsoby sestavení časových restrikcí na jednoduchých příkladech.

Předpokládejme, že součást je hotově opracována v jedné obráběcí operaci, která se skládá z k úseků, vytvořených zásahy jednotlivých nástrojů. Nechť čas na provedení operace je $t_{AC} = k_c \cdot t_A$. Předpokládejme dále, že výroba probíhá v dávkách, přičemž je předem dána a ekonomicky odůvodněna jistá optimální velikost dávky x_d a průběžná doba dávky t_d . Pak tedy:

$$x_d \cdot k_c \cdot t_A = t_d \quad (40)$$

Čas t_A je dán jednak součtem časů t_i / $i = 1, 2, \dots, k$ / vázaných na řezné podmínky a dále úhrnem časů, značených , na řezných podmínkách nezávislých / upnutí, odepnutí, přejíždění suportem atd. /. To znamená, že:

$$t_1 + t_2 + \dots + t_k = \frac{t_d}{x_d \cdot k_c} - \omega \quad (41)$$

Výraz na pravé straně rovnice (41) je pro nás konstantou, kterou označíme t_D a pak časovou restrikci můžeme psát ve tvaru:

$$\sum_{i=1}^k t_i = t_D = \text{konst.} \quad (42)$$

Ke stejné časové restrikci bychom dospěli i v případě, kdy daná operace je zařazena do linky s volným přemísťováním pracovního předmětu, kdy je dán předem takt linky, který

ve vztahu (41) nahrazuje výraz t_d/x_d .

Uvažujme dále, že celý technologický proces je diferenciován do k jednoduchých operací, které se skládají z jednoho úseku, a že výroba probíhá v taktu, který není dán předem, nýbrž jeho optimální velikost je třeba určit. Z toho pak vyplývá velmi jednoduchá časová restrikce ve tvaru:

$$t_1 + \omega_1 = t_2 + \omega_2 = \dots = t_k + \omega_k \quad (43)$$

Pokud se i -tá operace takového procesu skládá z m_i úseků, tak lze psát časovou restrikci ve tvaru:

$$\sum_{j=1}^{m_1} t_{1j} + \omega_1 = \sum_{j=1}^{m_2} t_{2j} + \omega_2 = \dots = \sum_{j=1}^{m_k} t_{kj} + \omega_k \quad (44)$$

Za modifikaci časových restrikcí lze považovat např. i podmínku rovnosti otáček, či shodného cyklu výměny nástrojů. I tyto podmínky vyjadřují vzájemné vazby mezi dílčími technologickými procesy.

Při řešení časových restrikcí budeme volit za řídící veličinu řeznou rychlost, ale i případy, kdy řídící veličinou je posuv, se řeší analogicky. Jestliže řekneme, že pro s_z konst. uvažujeme N jako funkci t , máme tím na mysli případy, kdy $v \leq v_1$, kde v_1 je dáno vztahem (17). Pro $v > v_1$ se nejen zvětšuje čas t , ale současně i náklady N . K podobným závěrům bychom dospěli i v případě, kdy řídící veličinou je posuv.

Řešme tedy nejprve úlohu minimalizace funkce

$$\sum_{i=1}^k N_i(t_i) \rightarrow \min \quad (45)$$

Jednotlivé argumenty jsou vázány omezující podmínkou ve tvaru (42). Z Lagrangeovy metody neurčitých multiplikátorů

vyplývá, že:

$$\frac{d}{dt_1} N_1(t_1) = \frac{d}{dt_2} N_2(t_2) = \dots = \frac{d}{dt_k} N_k(t_k) \quad (46)$$

Další řešení této úlohy je možné provést graficko-početně.

Ve druhém případě, kdy časová restrikce je ve tvaru (43), lze úlohu formulovat následovně:

$$\sum_{i=1}^k N_i(t_n + \omega_n + \omega_i) \rightarrow \min \quad (47)$$

pro libovolné z čísel 1, 2,, k. Z toho tedy plyne, že:

$$\sum_{i=1}^k \frac{d}{dt_i} N_i(t_n + \omega_n + \omega_i) = 0 \quad (48)$$

Tím je dáno t_n a tím i ostatní časy t_i .

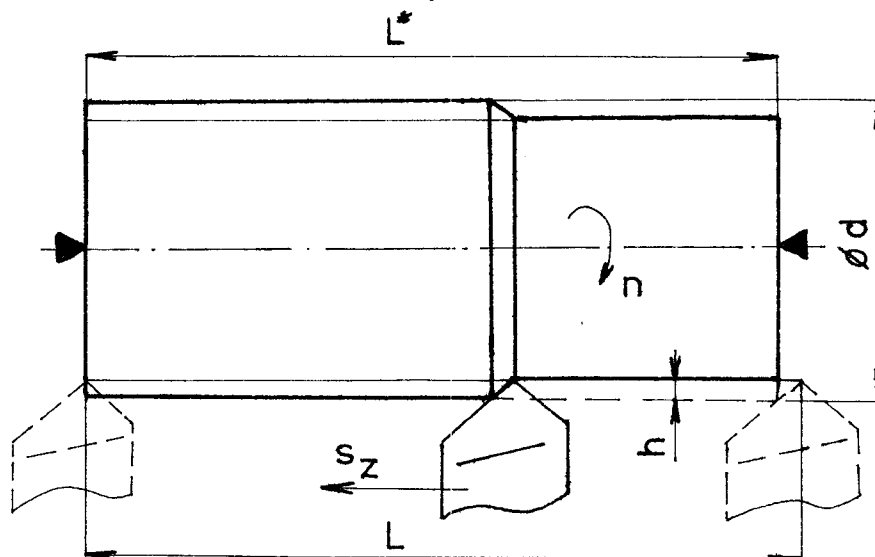
Závěrem této kapitoly bych chtěl podotknout, že se mohou vyskytovat i časové restrikce ve složitějších tvarech, než zde bylo uvedeno.

6.2 Vlastní řešení polyoptimalizace vybraných příkladů

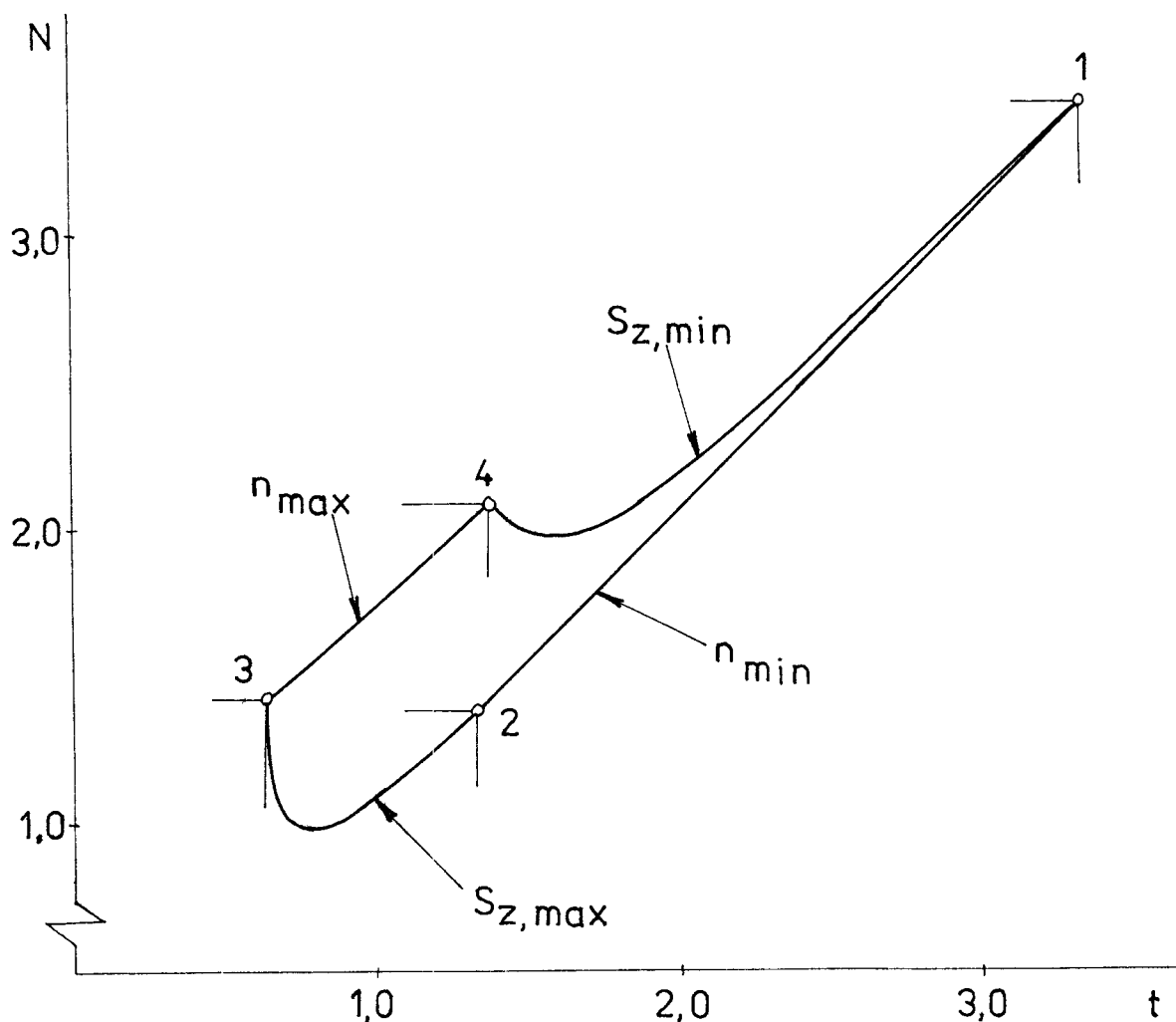
6.2.1 Sekvence č.1

Sekvence č.1 se skládá ze dvou dílčích procesů.

Prvním dílčím procesem je podélné soustružení / IDEN: 101 / s řezným materiálem P01, viz obr. 6 .



obr. 6



obr. 7

Vstupní hodnoty pro polyoptimalizaci byly uvedeny v kapitole 5.2.1

Mezi trvanlivostí a řeznými podmínkami platí vztah:

$$T = 9,85 \cdot 10^{10} \cdot (\pi \cdot d_e)^{-4,54} \cdot s_z^{-1,14} \cdot h^{-0,33}$$

Výkonové omezení je dáno ve tvaru:

$$R_p = F_z \cdot v$$

Tangenciální složka řezné síly se vypočte dle vztahu:

$$F_z = 1710 \cdot h \cdot s_z^{0,78}$$

Vypočtené hodnoty pro čáru $s_{z,min} = \text{konst.}$ jsou uvedeny v tabulce 1, pro čáru $s_{z,max} = \text{konst.}$ v tabulce 2, pro čáru $n_{min} = \text{konst.}$ v tabulce 3, pro čáru $n_{max} = \text{konst.}$ v tabulce 4.

Tab. 1

n	300	400	500	600	700	800
t	3,337	2,511	2,024	1,710	1,508	1,377
N	3,443	2,633	2,204	2,001	1,970	2,092

Tab. 2

n	300	400	500	600	700	800
t	1,338	1,012	0,827	0,720	0,661	0,644
N	1,396	1,105	0,995	1,017	1,159	1,434

Tab. 3

s_z	0,2	0,3	0,4	0,5
t	3,337	2,226	1,671	1,338
N	3,443	2,306	1,737	1,396

Tab. 4

s_z	0,2	0,3	0,4	0,5
t	1,377	0,968	0,765	0,644
N	2,092	1,712	1,533	1,434

Vypočtené hodnoty pro výkonovou restrikci jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5

n	1000	900	700
s_z	0,422	0,567	0,607
t	0,785	0,615	0,522
N	2,467	1,825	1,037

Výkonová restrikce nebude překročena, a proto není její průběh v grafu zakreslen.

Extrémům pro čáru $s_{z,max} = 0,5$ odpovídají časy t a náklady N,

které jsou: $t_m = 0,644$

$N_m = 1,430$

$t_1 = 0,790$

$N_1 = 0,996$

Vypočtené hodnoty pro derivaci $\frac{dH}{dt}$ jsou v tabulkách 6 a 7.

Tab. 6

s_z	0,2	0,3	0,45	0,5
t	3,337	2,226	1,486	1,338
$\frac{dH}{dt}$	1,0246	1,0240	1,02326	1,0230

Tab. 7

n	300	400	500	600	601	789,826
t	1,338	1,012	0,827	0,7188	0,718	0,644
$\frac{dH}{dt}$	0,9610	0,7800	0,2887	-1,0237	-1,0453	-143,416

Graf je zakreslen na obr. 7. Souřadnice průsečíků jednotlivých čar jsou:

bod 1: $t = 3,337$

$N = 3,443$

bod 3: $t = 0,644$

$N = 1,434$

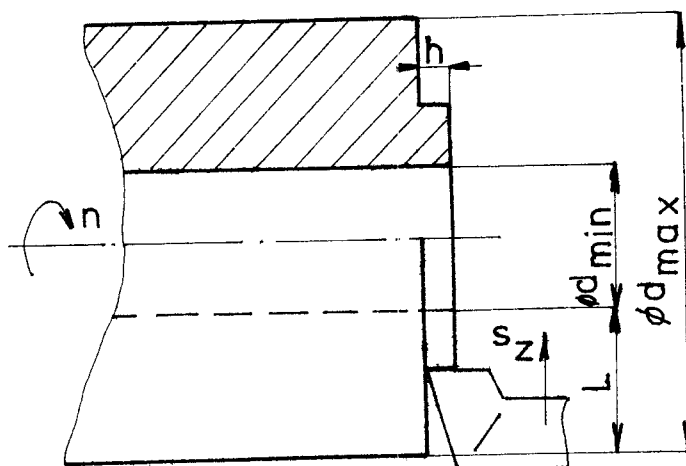
bod 2: $t = 1,338$

$N = 1,396$

bod 4: $t = 1,373$

$N = 2,092$

Druhým dílčím procesem je čelní soustružení /IDEN: 102/ s řezným materiálem P01, viz obr. 8.



obr. 8

Vstupní hodnoty pro polyoptimalizaci byly uvedeny v kapitole 5.2.1

Mezi trvanlivostí a řeznými podmínkami platí vztah:

$$T = 9,85 \cdot 10^{10} \cdot (\pi \cdot d_e)^{-4,54} \cdot n^{-4,54} \cdot s_z^{-1,14} \cdot h^{-0,33}$$

Výkonové omezení je dáno ve tvaru:

$$R_p = F_z \cdot v$$

Tangenciální složka řezné síly se vypočte dle vztahu:

$$F_z = 1710 \cdot h \cdot s_z^{0,78}$$

Vypočtené hodnoty pro čáru $s_{z,min} = 0,2$ jsou uvedeny v tabulce 8, pro čáru $s_{z,max} = 0,8$ v tabulce 9, pro čáru $n_{min} = 300$ v tabulce 10, pro čáru $n_{max} = 800$ v tabulce 11.

Tab. 8

n	300	400	500	600	700	800
t	0,750	0,563	0,452	0,378	0,327	0,290
N	0,771	0,582	0,472	0,405	0,365	0,346

Tab. 9

n	300	400	500	600	700	800
t	0,188	0,142	0,115	0,098	0,087	0,081
N	0,194	0,150	0,129	0,121	0,126	0,142

Tab. 10

s_z	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8
t	0,750	0,500	0,300	0,215	0,188
N	0,771	0,515	0,310	0,222	0,194

Tab. 11

s_z	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8
t	0,290	0,197	0,123	0,091	0,081
N	0,346	0,253	0,181	0,151	0,142

Hodnoty $s_{z,max}$ a n_{max} nelze použít, neboť by byla překročena výkonová restrikce, a proto v grafu nejsou zakresleny čáry příslušející těmto hodnotám.

Vypočtené hodnoty pro výkonovou restrikci jsou uvedeny v tabulce 12.

Tab. 12

s_z	0,2	0,3385	0,4	0,6	0,8
n	452,220	300,000	263,360	191,953	153,371
t	0,499	0,4435	0,427	0,391	0,367
N	0,518	0,4564	0,439	0,401	0,376

Vypočtené hodnoty pro derivaci $\frac{dH}{dt}$ jsou uvedeny v tabulce 13.

Tab. 13

s_z	0,3385	0,3	0,2
t	0,4435	0,500	0,750
$\frac{dH}{dt}$	1,02499	1,02506	1,02522

Graf je zakreslen na obr. 9. Souřadnice průsečíků jednotlivých čar jsou:

bod 1: $t = 0,750$

$N = 0,771$

bod 2: $t = 0,4435$

$N = 0,4564$

bod 3: $t = 0,499$

$N = 0,518$

Pro tuto první sekvenci je časová restrikce dána ve tvaru:

ru:

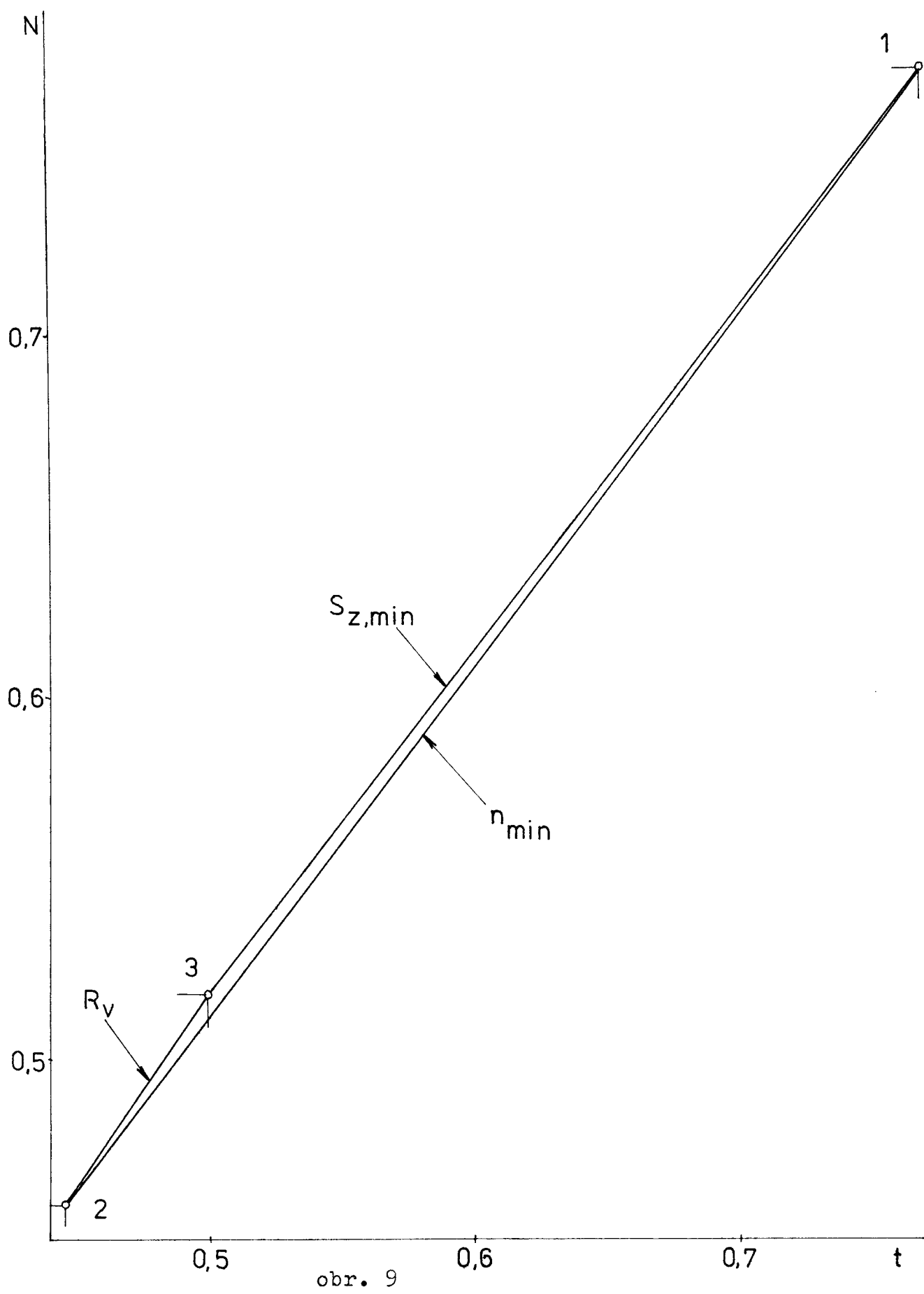
$$t_1 + \omega_1 = t_2 + \omega_2$$

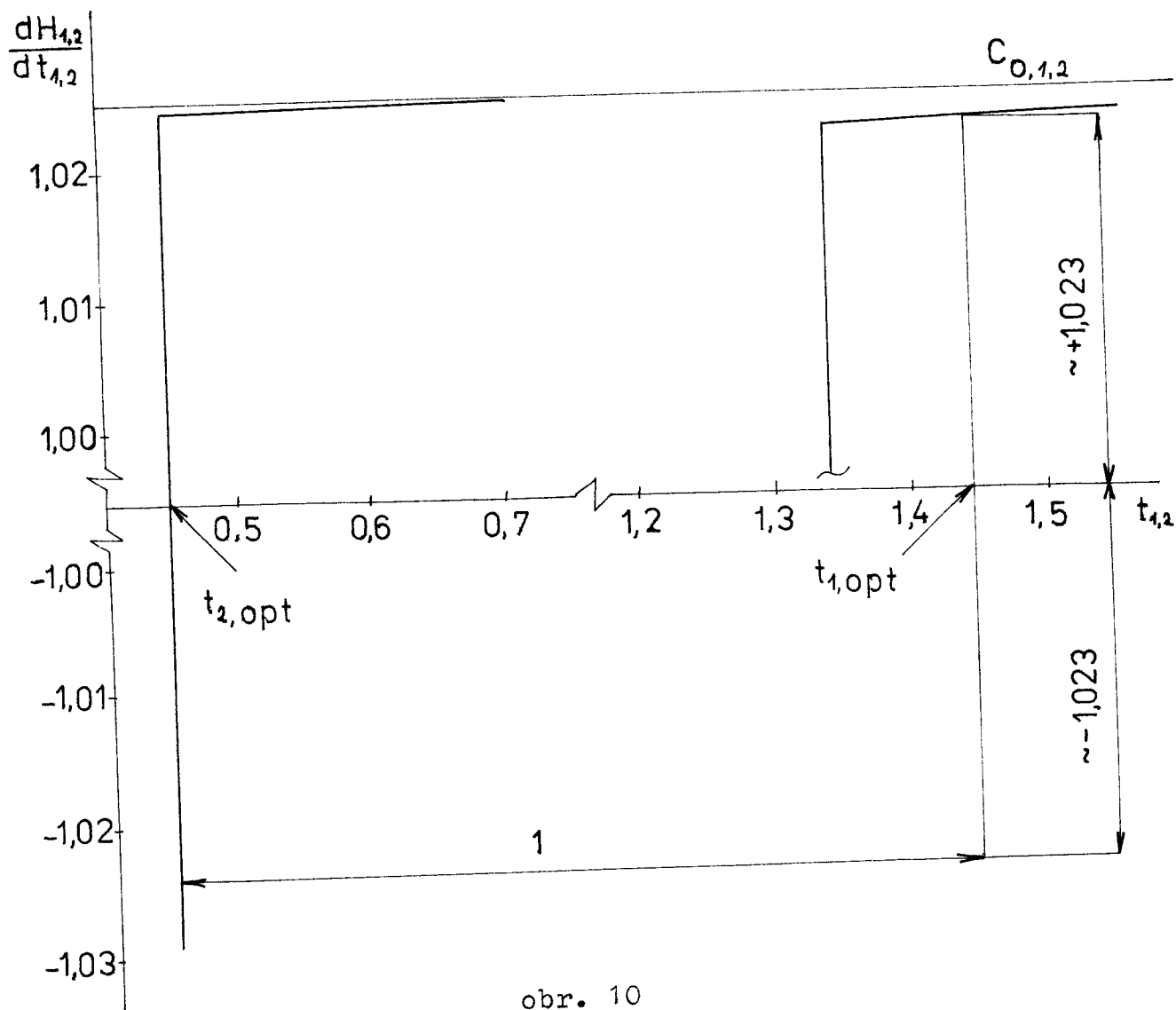
kde $\omega_1 = 4$ a $\omega_2 = 5$

Odečtené optimální hodnoty pracovních časů z grafu na obr. 10 jsou:

$$t_{1,opt} = 1,4435$$

$$t_{2,opt} = 0,4435$$





obr. 10

Skutečné hodnoty optimálních pracovních časů jsou uvedeny v příloze 1. Zde jsou též uvedeny i odpovídající řezné podmínky.

6.2.2 Sekvence č.2

Sekvence č.2 se skládá ze dvou dílčích procesů.

Prvním dílčím procesem je vrtání zplna /IDEN: 201/ šroubovitým vrtákem; obráběný materiál je uhlíková ocel

$\sigma_{pt} = 750$ [MPa] /viz obr. 11/.

Vstupní hodnoty pro polyoptimalizaci byly uvedeny v kapitole 5.2.2

Mezi trvanlivostí a řeznými podmínkami platí vztah:

$$T = 63 \cdot 10^3 \cdot (\pi \cdot d_e)^{-4,03} \cdot n^{-4,03} \cdot s_z^{-2,5} \cdot z^{-2,5}$$

Výkonové omezení je dáno ve tvaru:

$$R_p = F_z \cdot v$$

Tangenciální složka řezné síly se vypočte dle vztahu:

$$F_z = 676 \cdot d^{0,9} \cdot (z \cdot s_z)^{0,7}$$

Vypočtené hodnoty pro čáru $s_{z,min} = 0,1$ jsou uvedeny v tabulce 14, pro čáru $s_{z,max} = 0,8$ v tabulce 15, pro čáru $n_{min} = 200$ v tabulce 16, pro čáru $n_{max} = 800$ v tabulce 17.

Tab. 14

n	200	300	400	600	700	800
t	2,002	1,339	1,005	0,717	0,652	0,621
N	1,418	0,994	0,845	0,963	1,192	1,536

Tab. 15

n	200	300	400	800
t	0,291	0,307	0,461	2,802
N	0,577	1,492	3,380	26,89

Tab. 16

s_z	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
t	2,002	1,005	0,515	0,360	0,291
N	1,418	0,750	0,492	0,494	0,577

Tab. 17

s_z	0,1	0,2	0,8
t	0,621	0,592	2,802
N	1,536	3,530	26,89

Vypočtené hodnoty pro výkonovou restriktci jsou uvedeny v tabulce 18.

Tab. 18

n	200	300	400	500	600	800
s_z	1,595	0,893	0,590	0,430	0,330	0,220
t	0,240	0,315	0,384	0,447	0,510	0,620
N	1,220	1,730	2,220	2,690	3,160	4,030

Extrémům pro čáru $s_{z,\max} = 0,8$ odpovídají časy t a náklady N,

které jsou: $t_m = 0,280$ $t_l = 0,414$

$N_m = 0,830$ $N_l = 0,377$

Extrémům pro čáru $n_{\min} = 200$ odpovídají časy t a náklady N,

které jsou: $t_m = 0,238$ $t_l = 0,429$

$N_m = 1,033$ $N_l = 0,478$

Vypočtené hodnoty pro derivaci $\frac{dH}{dt}$ jsou v tabulkách 19 a 20.

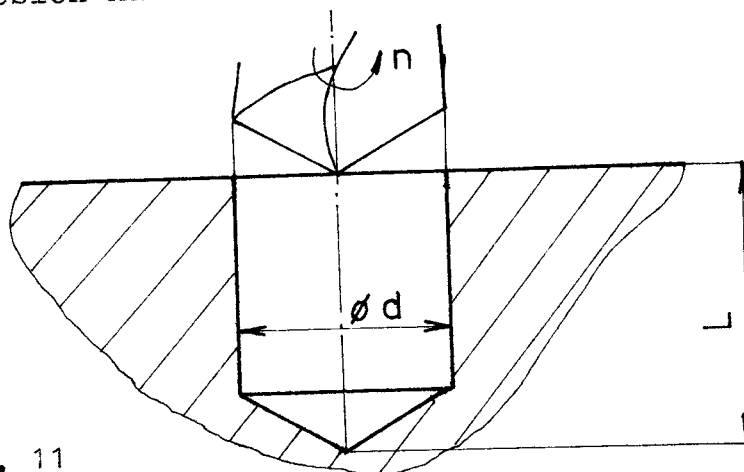
Tab. 19

s_z	0,1	0,15	0,18	0,2	0,4	0,6	0,8
t	2,002	1,337	1,115	1,005	0,515	0,360	0,291
$\frac{dH}{dt}$	0,688	0,666	0,646	0,629	0,286	-0,541	-0,275

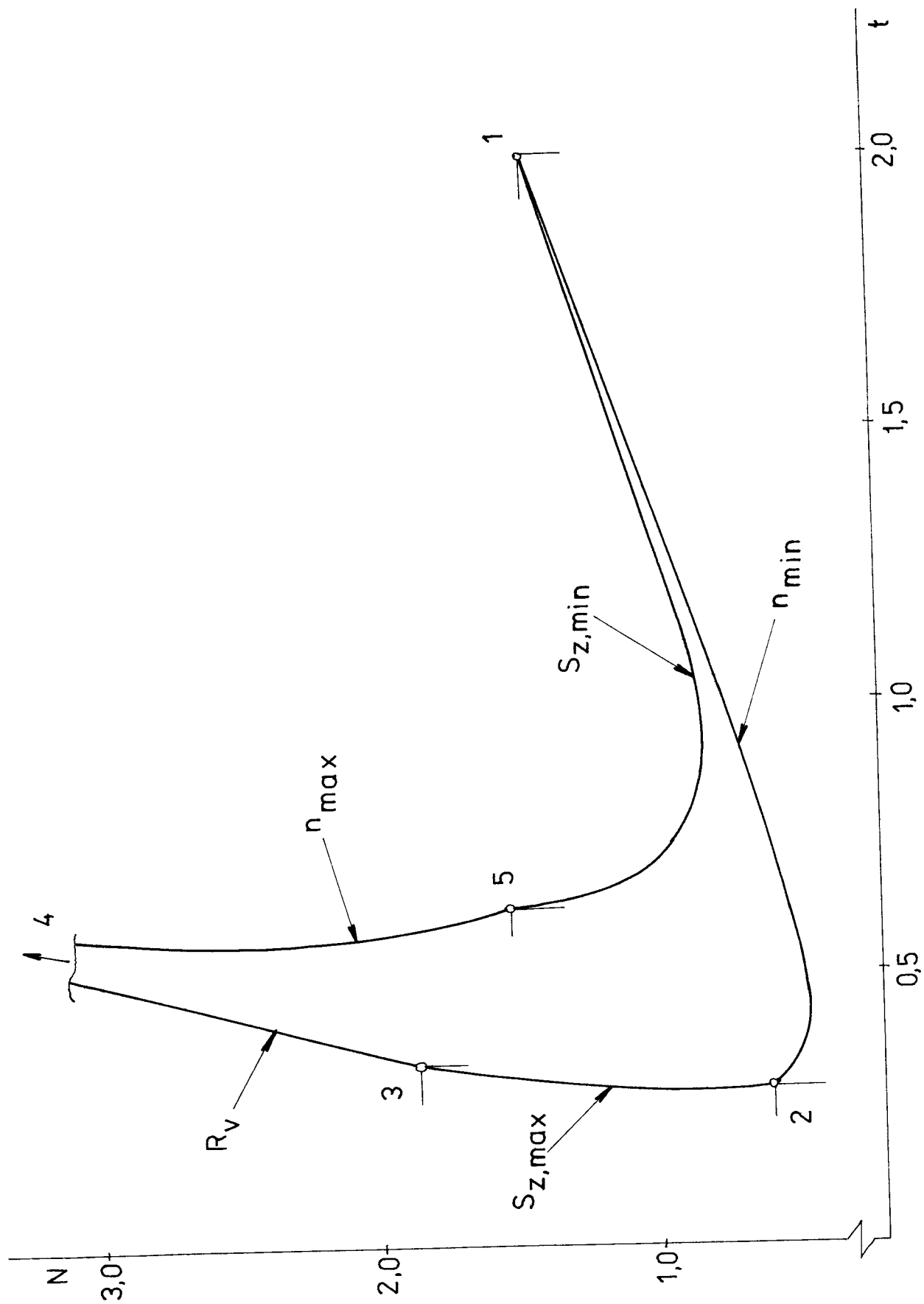
Tab. 20

n	200	220
t	0,291	0,282
$\frac{dH}{dt}$	-8,315	-23,99

Graf je zakreslen na obr. 12.



obr. 11



obr. 12

Souřadnice průsečíků jednotlivých čar jsou:

bod 1: $t = 2,002$

$N = 1,418$

bod 3: $t = 0,360$

$N = 1,800$

bod 5: $t = 0,621$

$N = 1,536$

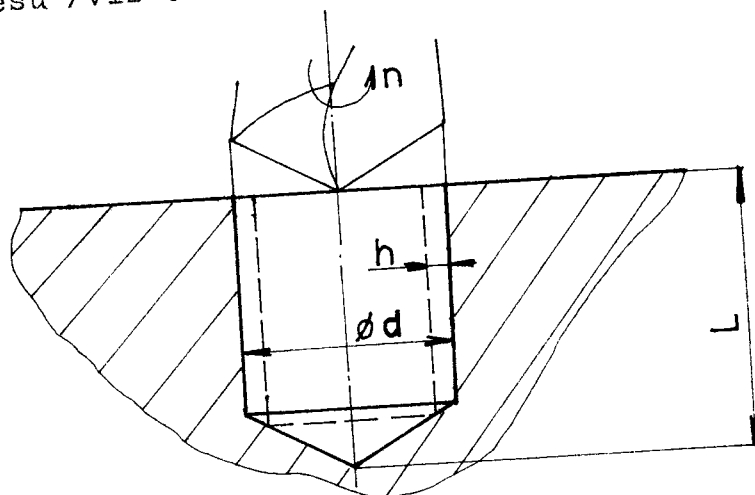
bod 2: $t = 0,291$

$N = 0,577$

bod 4: $t = 0,620$

$N = 4,030$

Druhým dílčím procesem je vrtání tohoto předvrtaného otvoru. Nástroj i obráběný materiál je stejný jako v prvním dílčím procesu /viz obr.13/.



obr. 13

Vstupní hodnoty pro polyoptimalizaci byly uvedeny v kapitole 5.2.2 /IDEN: 202/.

Mezi trvanlivostí a řeznými podmínkami platí vztah:

$$T = 9,85 \cdot 10^8 \cdot (\pi \cdot d_e)^{-4,54} \cdot s_z^{-1,14} \cdot h^{-0,33}$$

Výkonové omezení je dáno ve tvaru:

$$R_p = F_z \cdot v$$

Tangenciální složka řezné síly se vypočte dle vztahu:

$$F_z = 1710 \cdot h \cdot s_z^{0,78}$$

Vypočtené hodnoty pro čáru $s_{z,min} = 0,1$ jsou uvedeny v tabulce 21, pro čáru $s_{z,max} = 0,8$ v tabulce 22, pro čáru

$n_{\min} = 100$ v tabulce 23, pro čáru $n_{\max} = 450$ v tabulce 24.

Tab. 21

n	100	200	300	400	450
t	4,000	2,000	1,333	1,000	0,889
N	2,800	1,400	0,934	0,702	0,625

Tab. 22

n	100	200	300	400	450
t	0,500	0,250	0,168	0,125	0,112
N	0,350	0,175	0,118	0 090	0,082

Tab. 23

s_z	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8
t	4,000	2,667	2,000	1,334	0,800	0,571	0,500
N	2,800	1,867	1,400	0,933	0,560	0,400	0,350

Tab. 25

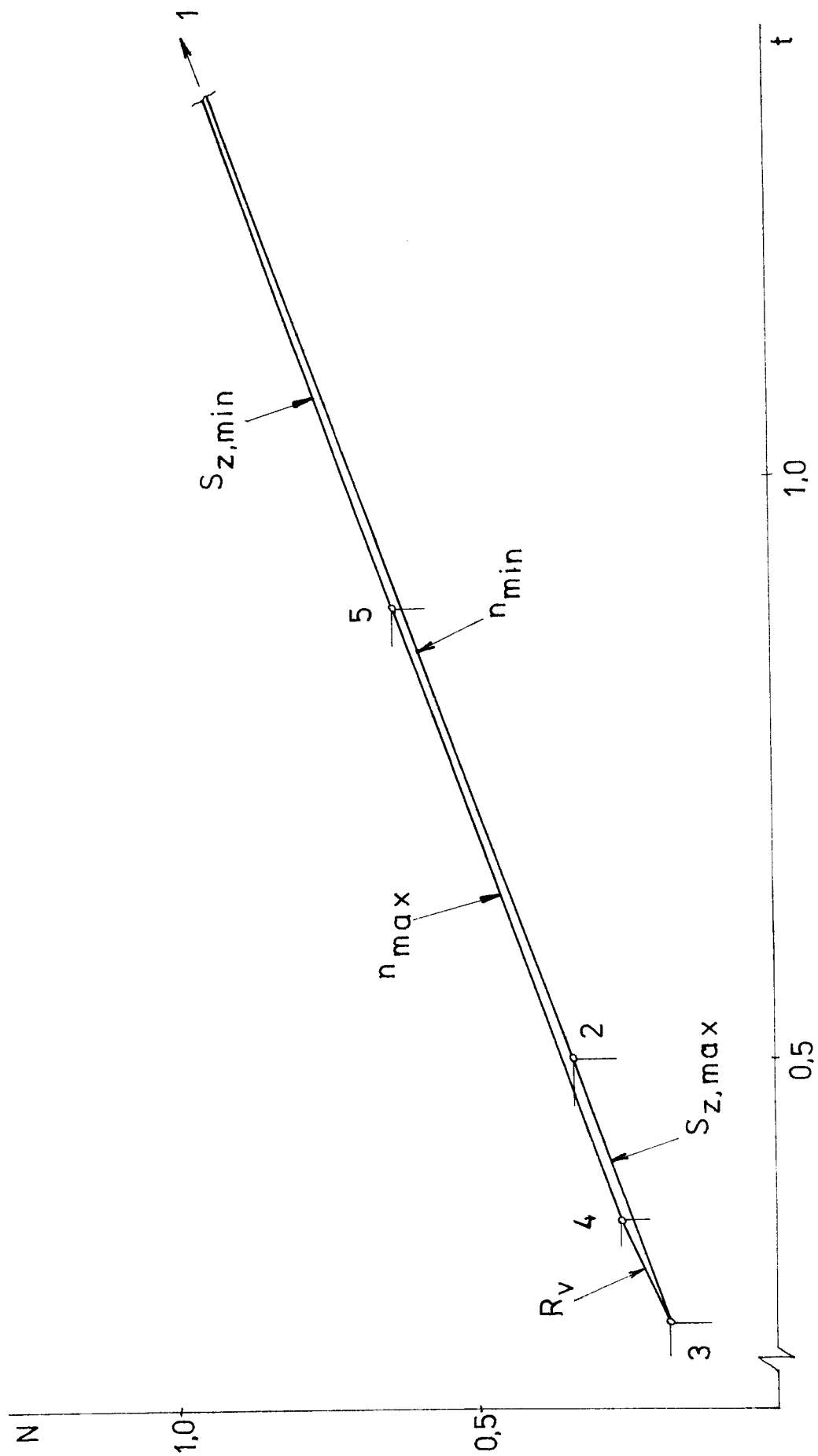
s_z	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8
t	0,889	0,593	0,448	0,297	0,178	0,128	0,112
N	0,625	0,418	0,315	0,211	0,128	0,093	0,082

Vypočtené hodnoty pro výkonovou restrikcí jsou uvedeny v tabulce 26.

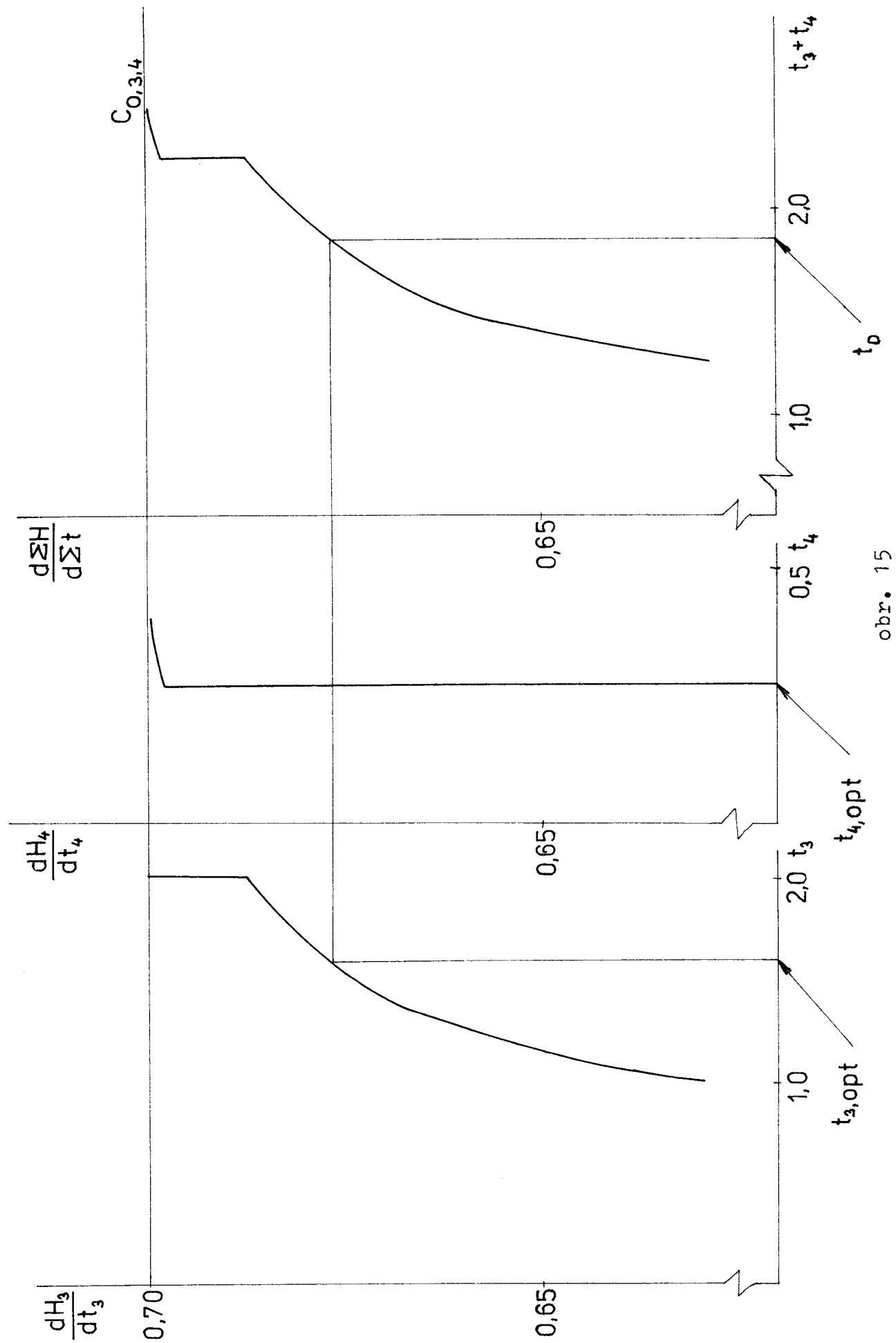
Tab. 26

n	181,256	261,52	450
s_z	0,8	0,5	0,249
t	0,276	0,306	0,357
N	0,193	0,215	0,253

Vypočtené hodnoty pro derivaci $\frac{dH}{dt}$ jsou uvedeny v tabulce 27.
Graf je zakreslen na obrázku 14.



obr. 14



obr. 15

Tab. 27

n	181,256	150	100
t	0,276	0,333	0,500
$\frac{dH}{dt}$	0,698	0,699	0,699

Souřadnice průsečíků jednotlivých čar jsou:

bod 1:	$t = 4,000$	bod 2:	$t = 0,500$
	$N = 2,800$		$N = 0,350$
bod 3:	$t = 0,276$	bod 4:	$t = 0,306$
	$N = 0,193$		$N = 0,215$
bod 5:	$t = 0,889$		
	$N = 0,625$		

Pro tuto druhou sekvenci je časová restrikce dána ve tvaru:

$$t_3 + t_4 = t_D$$

kde $t_D = 1,85$

Odečtené optimální hodnoty pracovních časů z grafu na obr. 15 jsou:

$$t_{3,opt} = 1,574$$

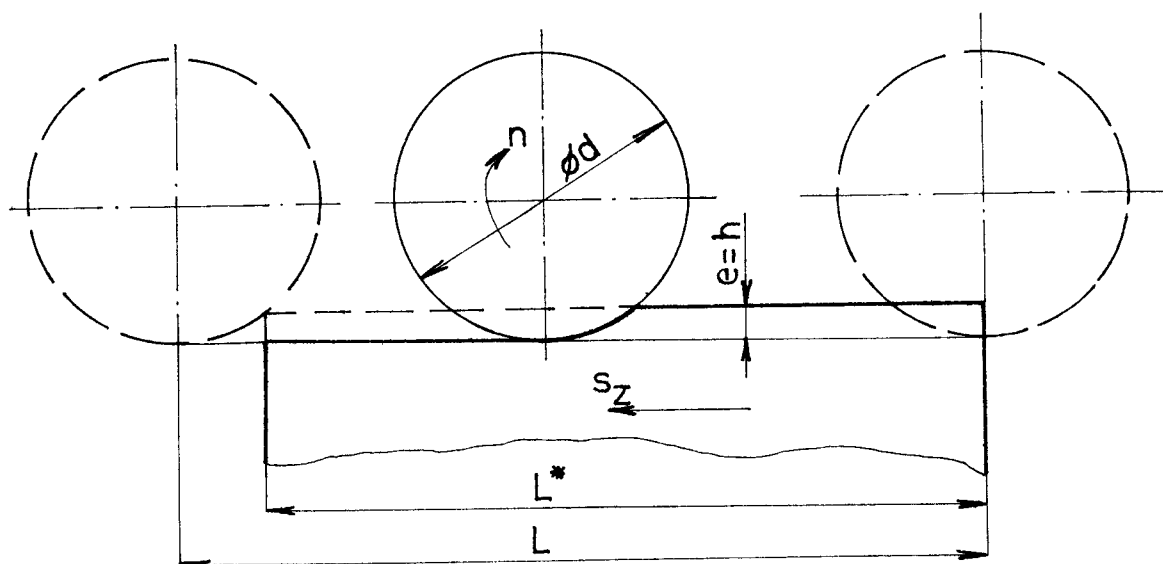
$$t_{4,opt} = 0,276$$

Skutečné hodnoty optimálních pracovních časů a jim odpovídajících řezných podmínek a nákladovostí jsou uvedeny v příloze 2.

6.2.3 Sekvence č.3

Sekvence č.3 se skládá z jednoho dílčího procesu, kterým je frézování rovinné plochy válcovou frézou s přímými zuby. Obráběný materiál je uhlíková ocel $\sigma_{pt} = 750$ [MPa].

/viz obr. 16/



obr. 16

Vstupní hodnoty pro polyoptimalizaci byly uvedeny v kapitole 5.2.3 /IDEN: 301/.

Mezi trvanlivostí a řeznými podmínkami platí vztah (6).

Výkonové omezení je dáno ve tvaru:

$$R_p = F_z \cdot v$$

Tangenciální složka řezné síly se vypočte dle vztahu (34).

Vypočtené hodnoty pro čáru $s_{z,\min} = 0,1$ jsou uvedeny v tabulce 28, pro čáru $s_{z,\max} = 0,4$ v tabulce 29, pro čáru $n_{\min} = 20$ v tabulce 30, pro čáru $n_{\max} = 120$ v tabulce 31.

Vypočtené hodnoty pro výkonovou restrikcí jsou uvedeny v tabulce 32.

Tab. 28

n	20	30	40	50	60	80	100	120
t	3,585	2,391	1,795	1,437	1,199	0,903	0,726	0,608
N	3,517	2,349	1,767	1,419	1,188	0,901	0,732	0,622

Tab. 29

n	20	30	40	50	60	80	100	120
t	0,897	0,598	0,450	0,360	0,301	0,227	0,184	0,155
N	0,880	0,589	0,444	0,358	0,301	0,231	0,191	0,165

Tab. 30

s_z	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
t	3,585	2,390	1,793	1,195	0,897
N	3,517	2,345	1,759	1,174	0,880

Tab. 31

s_z	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
t	0,608	0,407	0,306	0,205	0,155
N	0,622	0,420	0,319	0,216	0,165

Tab. 32

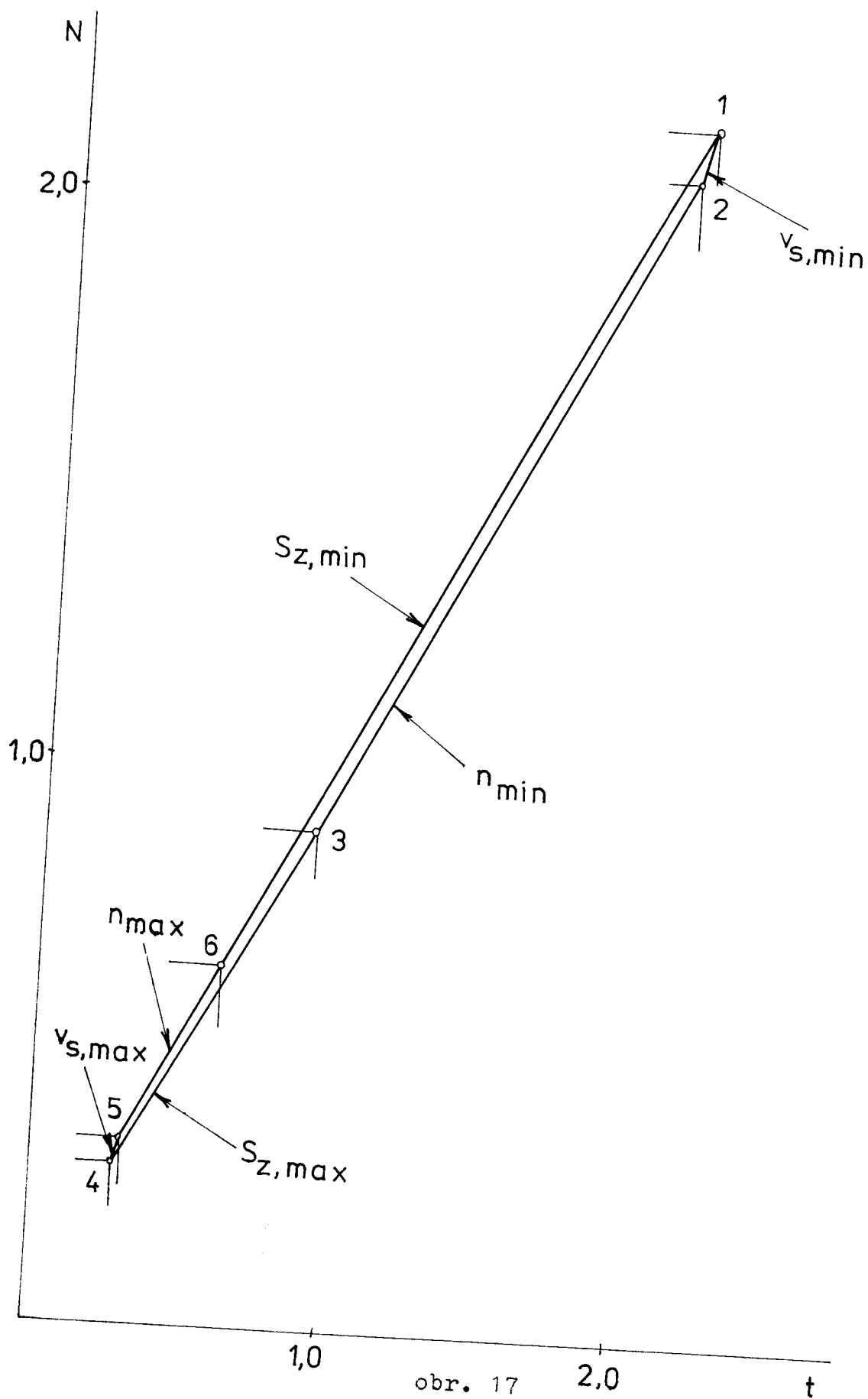
n	77,833	95,746	120
s_z	0,40	0,30	0,219
t	0,234	0,254	0,280
N	0,237	0,261	0,292

Vypočtené hodnoty pro omezení z hlediska posuvové rychlosti stolu frézky jsou:

pro $v_{s,min} = 40$: $s_z = 0,1$
 $n = 33,333$
 $t = 2,152$
 $N = 2,116$

pro $v_{s,max} = 325$: $s_z = 0,4$
 $n = 67,708$
 $t = 0,2675$
 $N = 0,269$

Vypočtené hodnoty pro derivaci $\frac{dH}{dt}$ jsou v tabulkách 33 a 34.



Tab. 33

s_z	0,4	0,3	0,166
t	0,897	1,195	2,152
$\frac{dH}{dt}$	0,980	0,980	0,980

Tab. 34

n	77,833	60	50	30	20
t	0,234	0,301	0,360	0,598	0,897
$\frac{dH}{dt}$	0,940	0,957	0,964	0,975	0,978

Graf je zakreslen na obr. 17. Souřadnice průsečíků jednotlivých čar jsou:

bod 1: $t = 2,153$

$N = 2,116$

bod 3: $t = 0,897$

$N = 0,880$

bod 5: $t = 0,300$

$N = 0,318$

bod 2: $t = 2,950$

$N = 2,050$

bod 4: $t = 0,2675$

$N = 0,2691$

bod 6: $t = 0,608$

$N = 0,622$

Průběh výkonové restrikce není zakreslen, neboť výkonová hranice nebude překročena / výkon je dostatečně velký /. Přesné hodnoty jsou uvedeny v příloze 3.

6.2.4 Řešení časové restrikce mezi sekvencemi

Časová restrikce pro tento případ je dána ve tvaru:

$$t_1 + t_2 + \omega_1 = t_3 + t_4 + \omega_2 = t_5 + \omega_3$$

$$\text{kde } \omega_1 = 1, \omega_2 = 2, \omega_3 = 1,5$$

Výsledky jsou zpracovány v příloze 3.

Příslušné grafy jsou nakresleny na obrázcích 18 až 21.

Při řešení této úlohy pomocí počítače bylo použito tzv. aproximace hrany minimálního nákladu. Hodnoty pracovních časů, které jsme takto získali se však poněkud liší od optimálních, neboť pro ně není splněna podmínka dle vztahu (48).

Pro získání skutečných optimálních pracovních časů je třeba celé řešení posunout směrem k nižším časům. Při této úpravě se však téměř nezmění hodnota celkových nákladů, a proto je možné uvedenou metodu použít.

Výsledky řešení při použití aproximace hrany minimálního nákladu jsou:

$$t_{D,1} = 1,688$$

$$t_{D,2} = 0,688$$

$$t_{D,3} = 1,188$$

z toho vyplývá, že:

$$t_{1,opt} = 1,2445$$

$$t_{2,opt} = 0,4435$$

$$t_{3,opt} = 0,412$$

$$t_{4,opt} = 0,276$$

$$t_{5,opt} = 1,188$$

Výsledky řešení splňující podmínku dle vztahu (48) jsou:

$$t'_{D,1} = 1,567$$

$$t'_{D,2} = 0,567$$

$$t'_{D,3} = 1,067$$

z toho vyplývá, že:

$$t'_{1,opt} = 1,1235$$

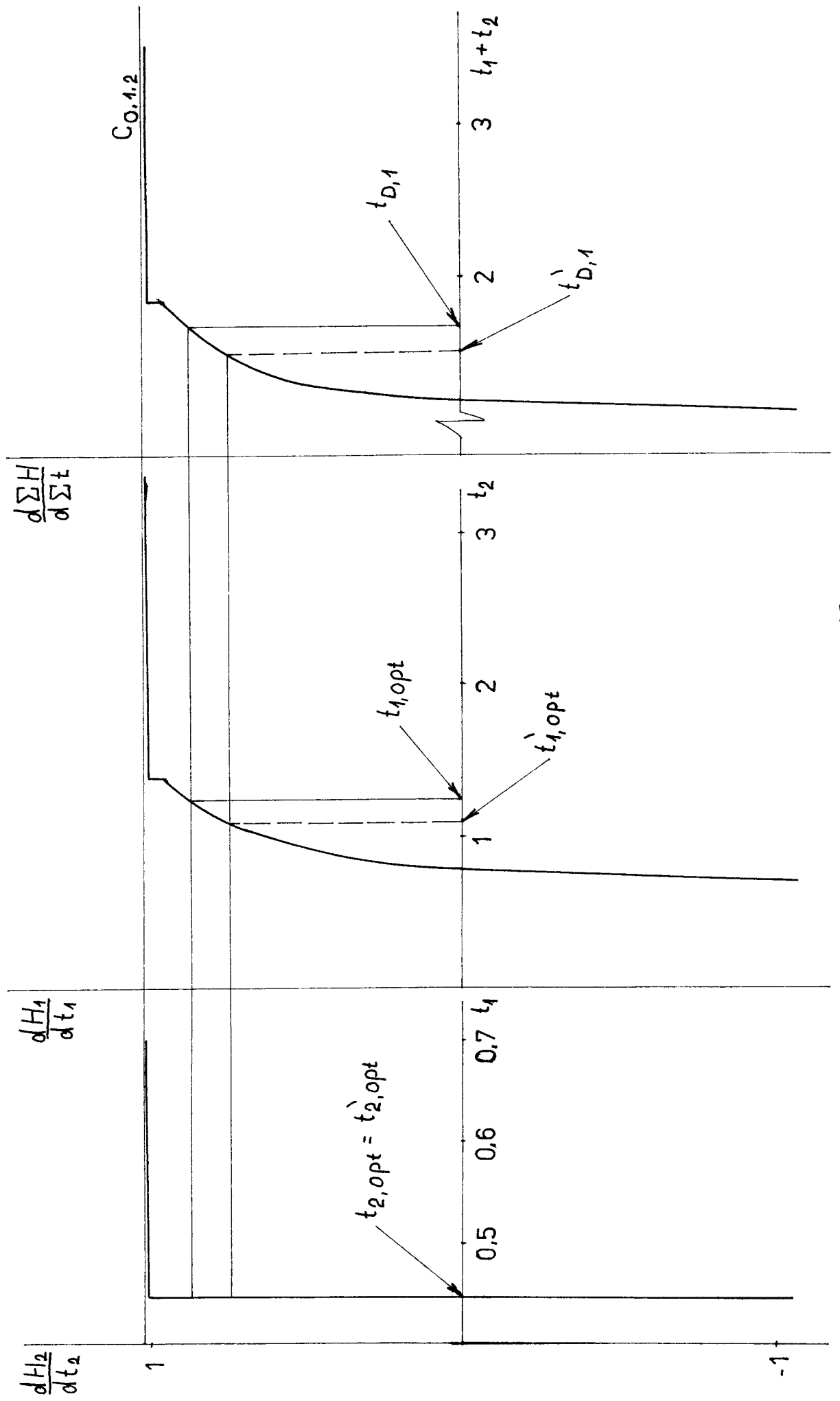
$$t'_{2,opt} = 0,4435$$

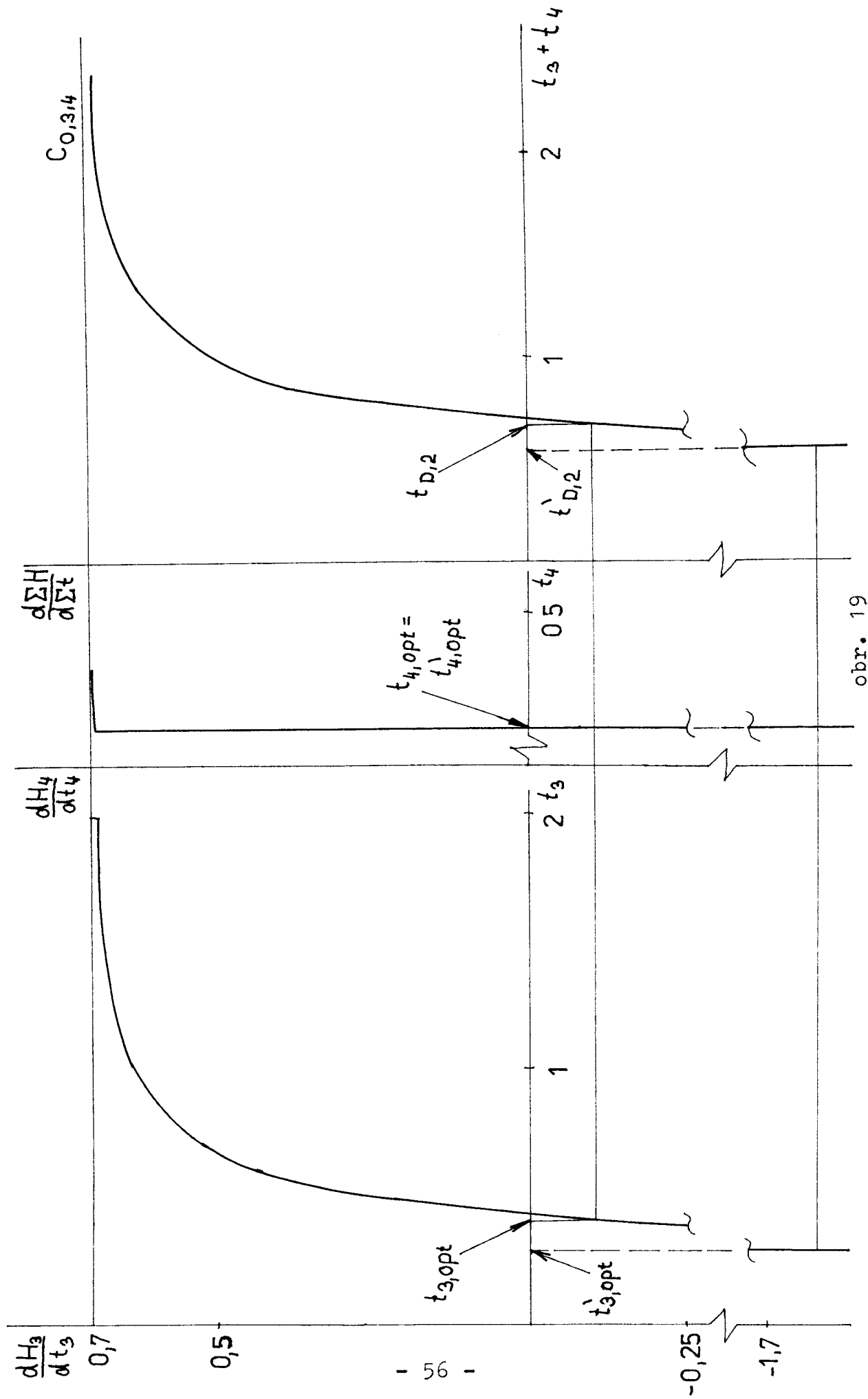
$$t'_{3,opt} = 0,291$$

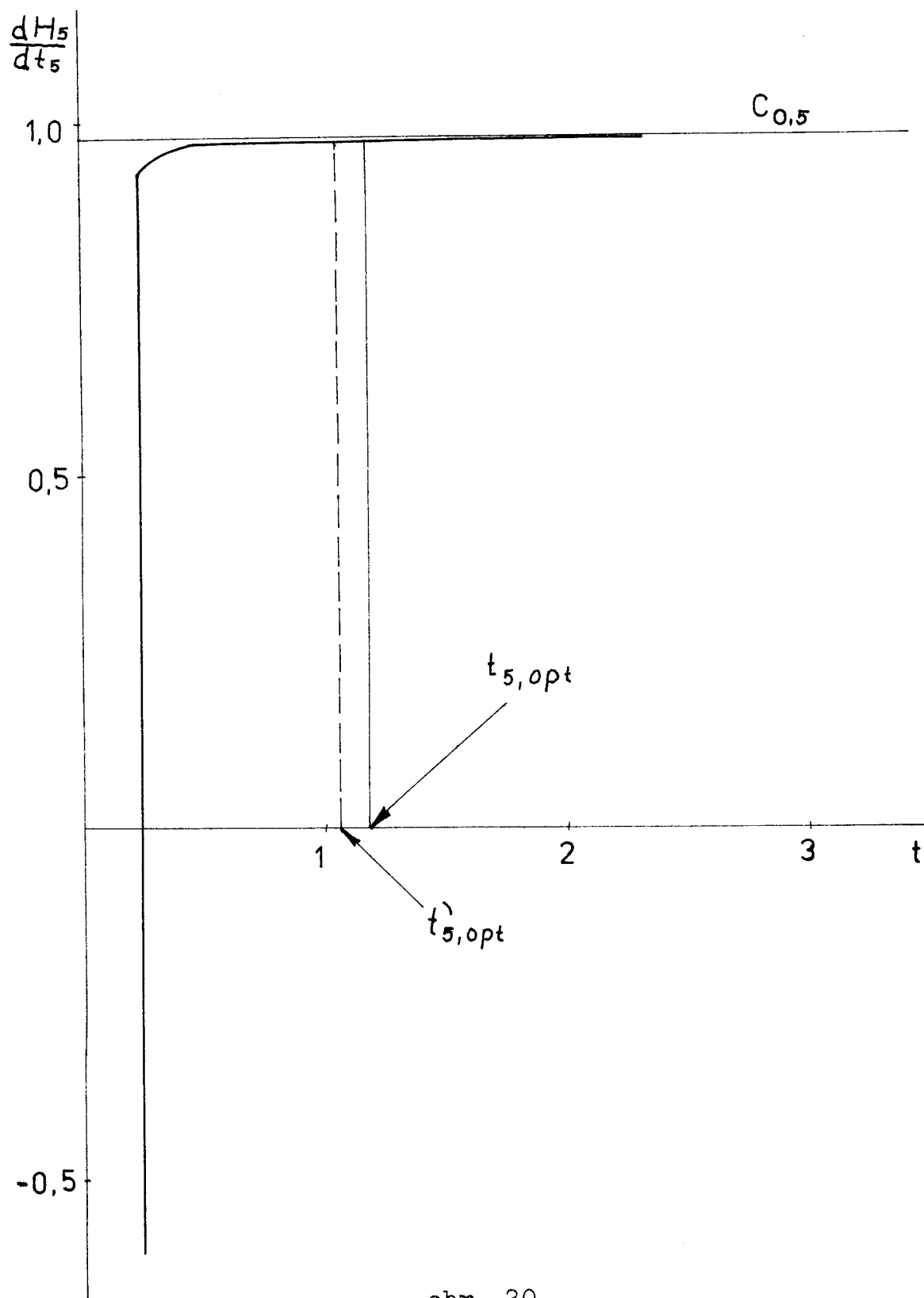
$$t'_{4,opt} = 0,276$$

$$t'_{5,opt} = 1,067$$

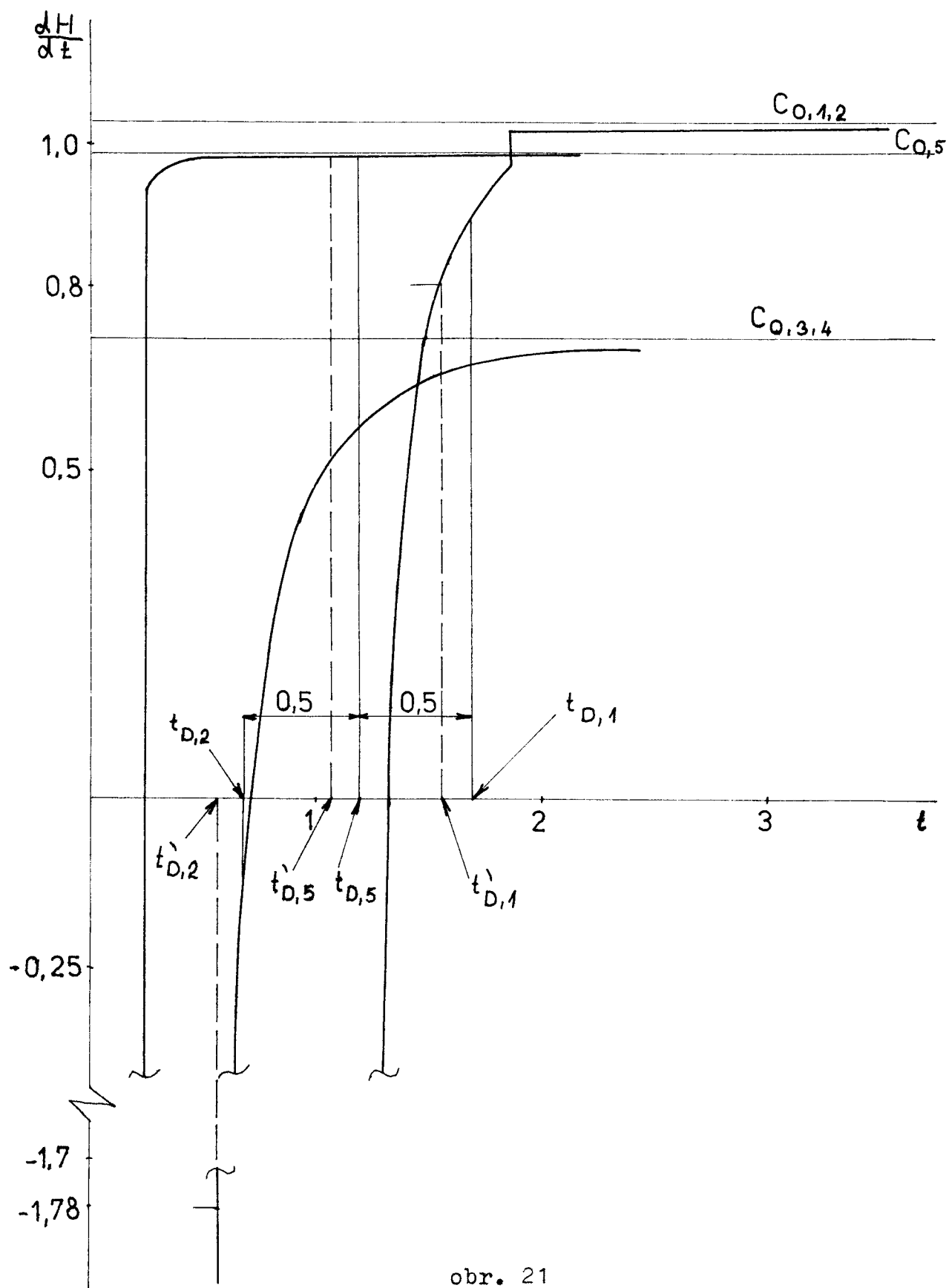
Tato úloha je zpracována v příloze 3.







obr. 20



obr. 21

7. ZÁVĚR

Na rozdíl od optimalizace dílčích technologických procesů je při polyoptimalizaci brán technologický proces jako celek včetně vazeb mezi dílčími technologickými procesy.

Jako cílové kritérium polyoptimalizace se volí minimum nákladovosti celého technologického procesu, vázané dále restrikcemi, které vyplývají z výrobně-technických a ekonomických podmínek. Tyto restrikce mohou mít různou podobu. Rovněž se mohou vyskytovat i různé řídicí veličiny.

Celý technologický proces se nemusí skládat jen z obráběcích operací, ale mohou se vyskytovat i jiné technologie / např. tváření, tepelné zpracování atd. /, které je nutné vzít v úvahu. Proto sestavení zcela obecného algoritmu výpočtu, který by pokrýval všechny možné případy, není prakticky proveditelné. Celá problematika polyoptimalizace se tedy rozčlenila na částečné úlohy, přičemž hlavním kritériem tohoto členění je tvar časové restrikce, která postihuje vzájemné vazby mezi dílčími technologickými procesy.

Náplní této diplomové práce bylo spočítat a zakreslit pole přípustných řešení v $N - t$ závislosti a řešení polyoptimalizace u vybraných příkladů pro různé tvary časové restrikce.

Výpočet optimálních řezných podmínek byl prováděn pro sekvence soustružení, vrtání a frézování. Výpočet časové restrikce se prováděl nejprve pro každou sekvenci samostatně a potom pro všechny sekvence dohromady. Z výsledků je vidět, že při řešení všech sekvencí jako celku vyšly jiné optimální podmínky než při řešení každé sekvence zvlášť, což plně dokazuje tvrzení, že při řešení polyoptimalizace je třeba brát technologický proces jako celek.

Závěrem bych chtěl upozornit, že hodnoty vstupních dat byly voleny a měly pouze ověřit správnost algoritmu výpočtu. Pro konkrétní případy je třeba volit tyto vstupní parametry co nejpřesněji, zejména pak parametry trvanlivosti, které mají výrazný vliv na průběh závislosti nákladovosti N na pracovním čase t .

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- /1/ Jacobs, H.J.: Funktionspapier zur technologischen Prozessoptimierung in der spanenden Teilefertigung. Informationen der TU Dresden, Reg. - Nr. 14 - 22 - 79
- /2/ Jacobs, H.J.: Fertigungsorganisatorische Restriktionen der mathematischen Prozessoptimierung in der Teilefertigung. Informationen der TU Dresden, Reg. - Nr. 14 - 18 - 75
- /3/ Jacobs, H.J.: Lösungsbeispiele und Darstellungsgrundlagen zur Polyoptimierung der spanenden Teilefertigung. Informationen der TU Dresden, Reg. - Nr. 14 - 29 - 76
- /4/ Jacobs, H.J.: Umdrucke für Vorlesung und Übung. Lehrveranstaltung „Technologische Optimierung“. TU Dresden
- /5/ Jacobs, H.J. - Meszaros, I.: Zur Lösung von Optimalproblemen in der Fertigungsgestaltung spanenden Prozesse mittels Lagrangeschen Multiplikators. Informationen der TU Dresden, Reg. - Nr. 14 - 17 - 79
- /6/ Věchet, V. : Technologické projekty.
VŠST Liberec, 1982
- /7/ Věchet, V. : Polyoptimalizace obáběcích procesů.
Zpráva F - 2421/041, Liberec, 1982
- /8/ Janda, M. : Polyoptimalizace obráběcích procesů s taktem pomocí číslicového počítače.
DP - VŠST Liberec, 1982
- /9/ Přikryl, Z. - Musílková, R.: Teorie obrábění.
SNTL, Praha 1971