evropský sociální fond v ČR EVROPSKÁ UNIE MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tento materiál vznikl jako součást projektu EduCom, který je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem ČR.

Polyoptimalizace technologických procesů v obrábění.

Jan Frinta
Technická univerzita v Liberci

EDUCATION COMPANY

Technologické postupy (přednáška)

Technická univerzita v Liberci a partneři Preciosa, a.s. a TOS Varnsdorf a.s.

TU v Liberci PRECIOSA VARNSDORF TOS

4. POLYOPTIMALIZACE TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ

V současné době stále ještě převládá izolované hodnocení částečných technologických procesů bez ohledu na jejich vzájemné vazby. Tomu také odpovídají i 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. Jako cílové kriterium se tedy volí minimum nákladovostní funkce, přičemž se uvažují pouze ty složky nákladovosti, které závisí na optimalizovaných parametrech, např. v případě obrábění řezných podmínkách. Pro i-tý dílčí proces bude odpovídající nákladovost N_i dána vztahom

$$N_i = c_{o,i}\, t_{s,i} + N_{T,i} \frac{t_{s,i}}{T_i} , \tag{60}$$

kde $c_{o,i}$ je cena 1 min práce dělníka a stroje (Kčs),
$t_{s,i}$ je strojní čas (min),
$N_{T,i}$ jsou náklady na nástroj, vztažené na trvanlivost (Kčs),
T_i je trvanlivost nástroje (min).

Např. pro řezné nástroje lze náklady na nástroj, vztažené na trvanlivost dále rozepsat :

$$N_{T,i} = c_{p,i}\, t_{p,i} + c_{o,i}\, t_{v,i} + \frac{C_i}{p_i} , \tag{61}$$

kde $c_{p,i}$ je cena 1 min práce dělníka a stroje při přeostřování nástroje (Kčs),
$t_{p,i}$ je čas potřebný na přeostření řezného nástroje (min),
$t_{v,i}$ je čas potřebný na výměnu nástroje (min),
C_i je cena nástroje (Kčs),
p_i je počet přeostření.

U řezných destiček, které se nepřeostřují, bude

$$N_{T,i} = N_{s,i} + c_{o,i}\, t_{v,i} + C_{1,i} \tag{62}$$

kde $N_{s,i}$ jsou náklady na seřízení nástroje mimo stroj (Kčs),
$C_{1,i}$ je cena 1 břitu řezné destičky (Kčs).

Nákladovosti vypočtené ze vztahu (60) odpovídající pracovní čas bude

$$t_i = t_{s,i} + t_{v,i} \frac{t_{s,i}}{T_i} . \tag{63}$$

Vztahy (60) a (63) je pak též dána závislost nákladovosti N_i na čase t_i a sice parametricky. Uvažujme např. podélné soustružení, kde

$$t_{s,i} = \frac{L_i}{n_i s_i} . \tag{64}$$

Vo vztahu (64) značí :

l_i délku obráběné plochy (mm),
n_i otáčky vřetene (min^{-1}),
s_i posuv (mm).

Závislost trvanlivosti na řezných podmínkách lze psát vo tvaru

$$T_i = a_{1,i} \, (\pi \, d_i)^{a_{2,i}} \, n_i^{a_{2,i}} \, s_i^{a_{3,i}} \, h_i^{a_{4,i}} \, , \tag{65}$$

kde dále d_i je průměr obráběné plochy (m)

h_i je hloubka řezu (mm)

a $a_{1,i}, a_{2,i}, a_{3,i}, a_{4,i}$ jsou konstanty vzhledem k volenému kritériu opotřebení. Pak

$$N_i = \frac{l_i}{n_i s_i} \left[c_{o,i} + \frac{N_{T,i}}{a_{1,i} (\pi \, d_i)^{a_{2,i}} \, n_i^{a_{2,i}} \, s_i^{a_{3,i}} \, h_i^{a_{4,i}}} \right] , \tag{66}$$

$$t_i = \frac{l_i}{n_i s_i} \left[1 + \frac{t_{v,i}}{a_{1,i} (\pi \, d_i)^{a_{2,i}} \, n_i^{a_{2,i}} \, s_i^{a_{3,i}} \, h_i^{a_{4,i}}} \right] . \tag{67}$$

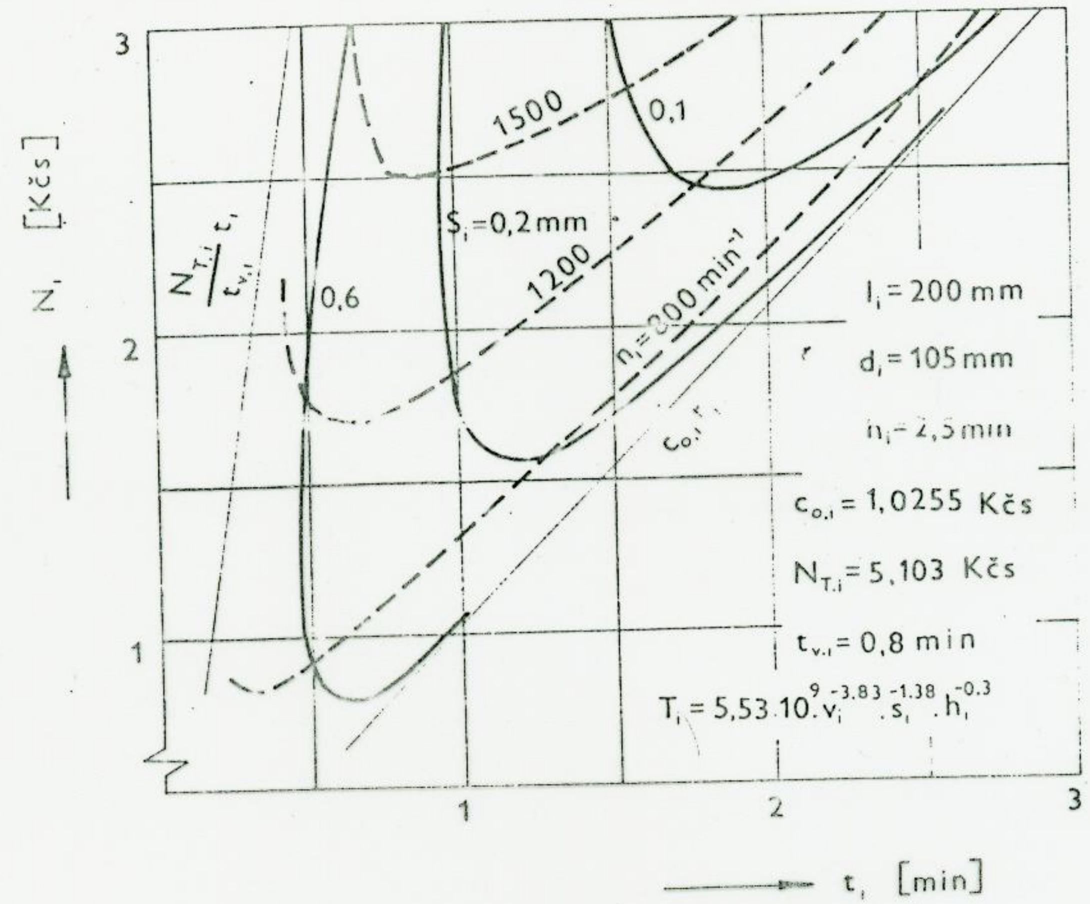
Jako příklad je na obr. 60 nakreslena typická závislost nákladovosti N_i na čase t_i a sice pro podélné soustružení uhlíkové oceli pevnosti 500 - 700 N/mm^2 a hrubování řezným materiálem P15. Plně jsou v poli vymezeném přímkami

$$N_i = c_{o,i} \, t_i \, , \qquad N_i = \frac{N_{T,i}}{t_{v,i}} \, t_i \tag{68}$$

zakresleny tři čáry konstantního posuvu a čárkovaně tři čáry konstantních otáček vřetena (konstantní řezné rychlosti). Čáry konstantní trvanlivosti (T_i = konst.) budou přímky o rovnici

$$N_i = \frac{c_{o,i} \, T_i + N_{T,i}}{T_i + t_{v,i}} \, t_i \, . \tag{69}$$

Jak vyplývá z uvedeného příkladu a ostatně je již běžně známé, tak z hlediska nákladovosti je výhodné volit maximální hodnoty posuvů, dané např. při obrábění načisto předepsanou jakostí obrobené plochy. Je-li tedy s_i dáno a priori, tak absolutnímu minimu nákladovosti, vyplývajícímu ze vztahu



Obr. 60

$$\frac{dN_i}{dt_i} = \frac{dN_i}{dn_i} \; \frac{1}{\frac{dt_i}{dn_i}} = 0 \; , \qquad (70)$$

budou odpovídat otáčky

$$n_{i,opt} = \left[- \frac{N_{T,i}\,(a_{2,i} + 1)}{c_{o,i}(\pi d_i)^{a_{1,i}}\; a_{1,i}\; s_i^{a_{3,i}}\; h_i^{a_{4,i}}} \right]^{1/a_{2,i}} , \qquad (71)$$

kde $a_{2,i} < -1$.

Charakter křivek při s_i = konst. a n_i = konst. velmi závisí na velikosti exponentů ve vztahu (65). Zatímco $a_{2,i}$ bývá menší než -1, bývá často $a_{3,i} > -1$. Pro $a_{3,i} < -1$ mají čáry n_i = konst. stejný charakter jako čáry s_i = konst. Pro $a_{3,i}$ = -1 budou čáry n_i = konst. přímky rovnoběžné s přímkou

$N_i = c_{0,i}\, t_i$. Pro $a_{3,i} \in (-1,0)$ bude závislost N_i na t_i při n_i = konst. monotonně rostoucí funkcí.

Předpokládejme dále, že technologický proces se skládá z n dílčích procesů, rozhodující bude nákladovost procesu jako celku :

$$\sum_{i=1}^{n} N_i(t_i) \longrightarrow \min. \qquad (72)$$

Přitom však argumenty t_i mohou být vázány omezujícími podmínkami. Tak např. předpokládejme, že nějaká operace se skládá z n úseků, že je dána velikost dávky a průběžná doba dávky a tím i čas jednotkový s přirážkou času směnového t_{AC}. Z toho vyplývá časová restrikce ve tvaru konstantního součtu časů :

$$\sum_{i=1}^{n} t_i = t_D = \text{konst.}\ , \qquad (73)$$

kde konstanta t_D je rozdíl času t_{AC} a časů nezávislých na optimalizovaných parametrech.

Při výrobě v taktu lze psát časovou restrikci ve tvaru

$$t_1 + t_1^* = t_2 + t_2^* = \ldots. = t_n + t_n^*\ , \qquad (74)$$

kde t_i^* ($i = 1,2, \ldots ,n$) jsou konstanty a je možné je chápat i jako tu část času t_{AC}, která nezávisí na optimalizovaných parametrech.

Volme dále jeden parametr jako řídicí veličinu. U obráběcích operací to bývá zpravidla řezná rychlost, ovšem i případy, kdy řídicí veličinou je např. posuv, se řeší analogicky. Jestliže řekneme, že pro s_i = konst. uvažujme N_i jako funkci t_i, máme tím na mysli případy, kdy

$$n_i = n_{i,mez} \leqq \left[- \frac{t_{v,i}\,(a_{2,i}+1)}{a_{1,i}\,(\pi\, d_i)^{a_{2,i}}\, s_i^{a_{3,i}}\, h_i^{a_{4,i}}} \right]^{1/a_{2,i}} \qquad (75)$$

což vyplývá ze vztahu

$$\frac{dN_i(t_i)}{dt_i} \longrightarrow \infty \tag{76}$$

při s_i = konst. Pro

$$n_i > n_{i,mez} \tag{77}$$

se nejen zvětšuje čas t_i, ale současně i náklady N_i.

K analogickým závěrům bychom dospěli i v případě, kdy řídící veličinou je posuv pro $a_{3,i} < -1$.

Řešme tedy nejprve úlohu minimalizace funkce (72), přičemž jednotlivé argumenty jsou vázány omezující podmínkou (73).

Z Lagrangeovy metody neurčitých multiplikátorů vyplývá, že

$$\frac{dN_1(t_1)}{dt_1} = \frac{dN_2(t_2)}{dt_n} = \dots = \frac{dN_n(t_n)}{dt_n} \tag{78}$$

Další řešení této úlohy je možné provést graficko-početně.

Ve druhém případě, kdy časová restrikce je ve tvaru (74), lze úlohu formulovat následovně :

$$\sum_{i=1}^{n} N_i(t_k + t_k^* - t_i^*) \longrightarrow \min. \tag{79}$$

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

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{d}{dt_k} N_i(t_k + t_k^* - t_i^*) = 0. \tag{80}$$

Příklad 1

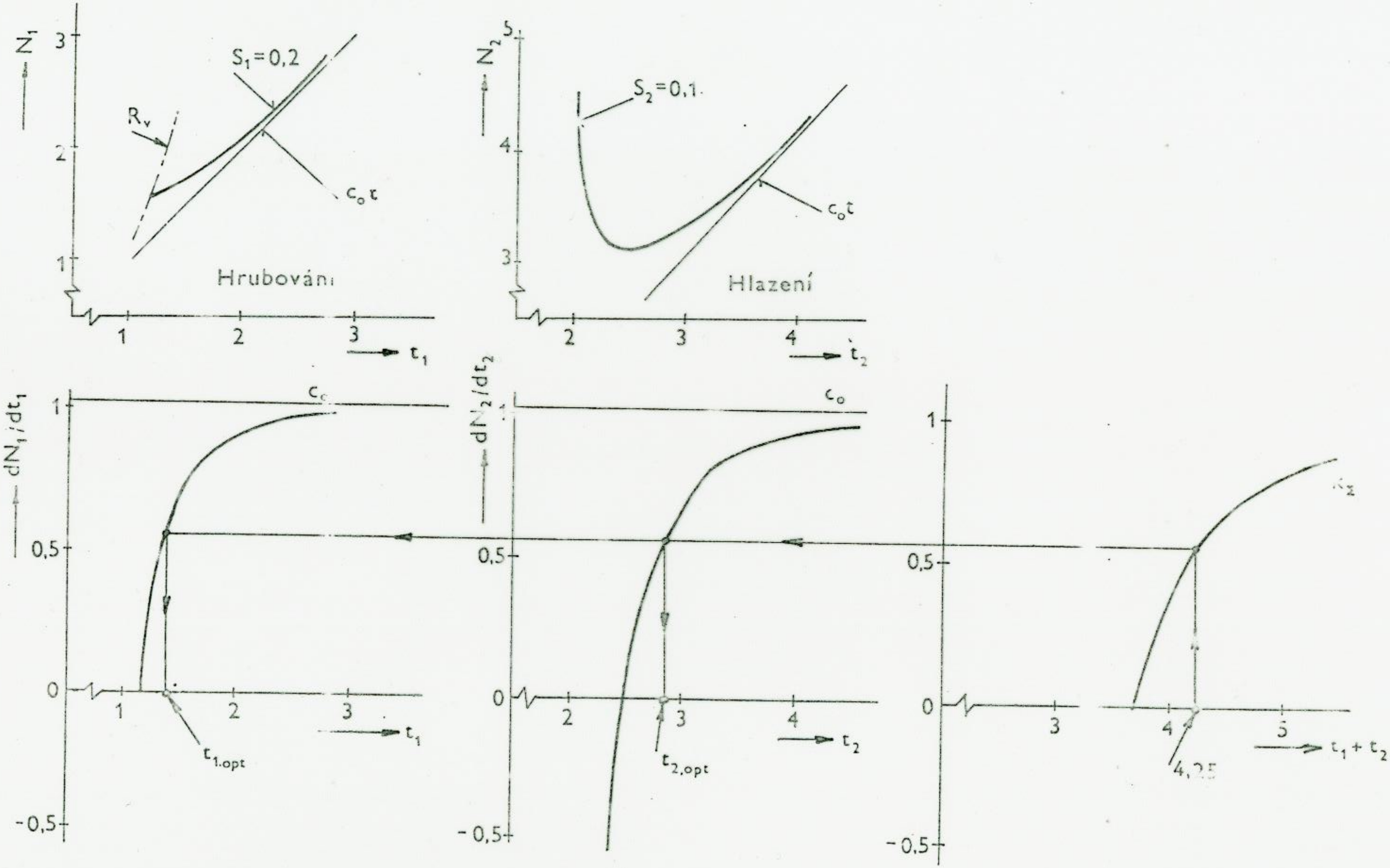
Nechť operace se skládá ze dvou úseků. První úsek je podélné soustružení a sice hrubování řezným materiálem P15 s těmito vstupními hodnotami pro polyoptimalizaci :

$c_{c,1}$ = 1,255 Kčs , l_1 = 200 mm ,

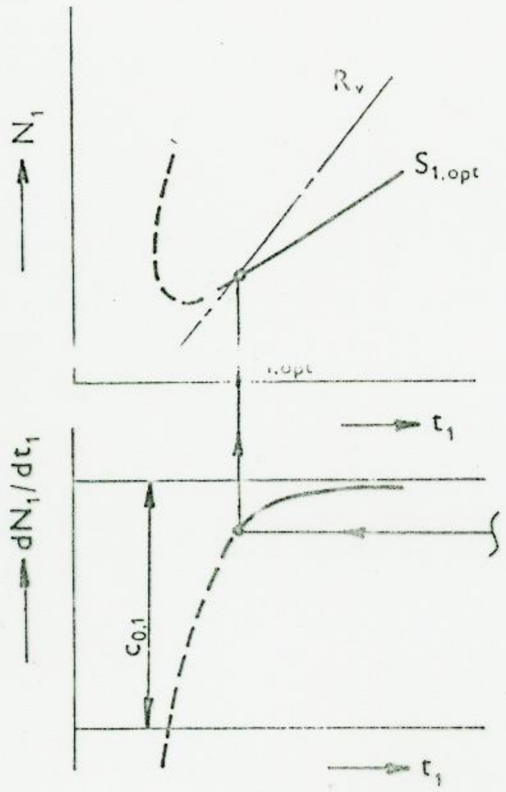
$N_{T,1}$ = 5,103 Kčs , d_1 = 105 mm ,

$t_{v,1}$ = 0,8 min , h_1 = 2,5 mm .

Obr. 61



N1
S1=0,2
Rv
c0t
Hrubování
t1
N2
S2=0,1
c0t
Hlazení
t2
dN1/dt1
c0
t1.opt
dN2/dt2
c0
t2,opt
t1 + t2



Obr. 62

Příklad 2

Předpokládejme nyní, že oba úseky předcházejícího příkladu jsou samostatnými operacemi a že je dána časová restrikce ve tvaru

$$t_1 + 1{,}81 = t_2 + 1{,}12 \quad (\text{min})$$

a dále $s_2 \leq 0{,}15$ mm

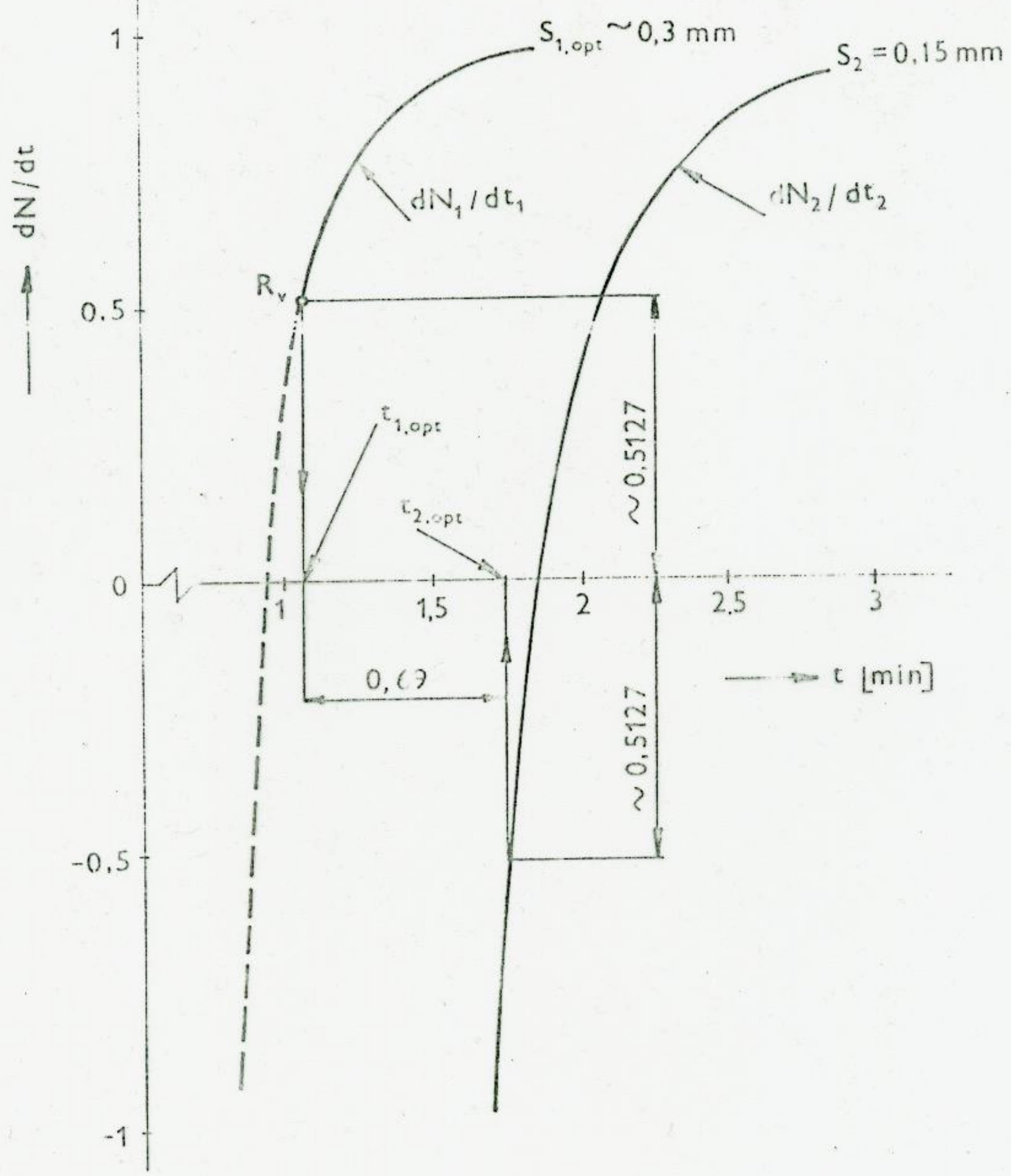
Vstupní hodnoty pro polyoptimalizaci jsou stejné jako v předcházejícím příkladě.

Řešení tohoto příkladu je znázorněno na obr. 63, kde bod R_v znázorňuje výkonové omezení, specifikované v příkladě 1. Přibližně pak dostáváme :

$$\tilde{s}_{1,opt} \doteq 0{,}3 \text{ mm} \quad ;$$
$$\tilde{t}_{1,opt} \doteq 1{,}05 \text{ min} \quad ;$$
$$\tilde{n}_{1,opt} \doteq 651 \text{ min}^{-1} \quad ;$$
$$s_2 = 0{,}15 \text{ mm} \quad ;$$
$$\tilde{t}_{2,opt} \doteq 1{,}74 \text{ min} \quad ;$$
$$\tilde{n}_{2,opt} \doteq 813 \text{ min}^{-1} .$$

Princip polyoptimalizace pracovních procesů byl demonstrován na velmi jednoduchých příkladech. V jiných případech mohou být časové restrikce ve složitějších tvarech, než byly uvedeny. Tak např. když se celý proces skládá z n operací a i - tá operace z m_i úseků a výroba má být v taktu, lze časovou restrikci psát ve tvaru

$$\sum_{j=1}^{m_1} t_{1j} + t_1^* = \sum_{j=1}^{m_2} t_{2j} + t_2^* = \ldots = \sum_{j=1}^{m_n} t_{nj} + t_n^* . \quad (61)$$



Obr. 63

Při obrábění na vícevřetenových automatech, kdy na různých vřetenech se provádí různé úseky operace a vřetena se otáčí shodnými otáčkami, bude jako vedlejší podmínka i rovnost otáček. Dále lze uvažovat i další vedlejší podmínky, jako je rozsah nastavitelných otáček a posuvů, omezení dané tuhostí stroje apod.

Jak také vyplývá z uvedených příkladů, je graficko-početní řešení velmi zdlouhavé, a proto je výhodné řešit tyto úlohy