

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci

nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Obor 23 - 07 - 8 - strojírenská technologie
zaměření o b r á b ě n í a m o n t á ž

OBRÁBĚNÍ SLOŽITÝCH TVAROVÝCH PLOCH S APLIKACÍ

NA KUŽELOVÁ OZUBENÍ SE ZAKŘIVENÝMI ZUBY

616

KOM - OM - XXXX

ALENA HAASOVÁ

Vedoucí práce: Ing. Aleš Průšek

KOM VŠST

Rozsah práce a příloh

Počet stran	: 80
Počet příloh a tabulek:	9
Počet obrázků	: 21
Počet výkresů	: 0
Počet modelů nebo jiných příloh	: 0

2. června 1989

DIPLOMA V OBRÁBĚNÍ

PROFESOR V OBRÁBĚNÍ DLA, USTAV PRO VÝROBU

pro **Klára H a a s o v a**

čas **23 - 07 - B** strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1960 Sb., o národních odborných zkouškách a státních diplomních závěrečných, uděluje toto diplomové práce.

Název tématu: **Obrábění složitých tvarových ploch s aplikací
na kuželové ozubení se zakřivenými zuby.**

Zadání pro vypracování:

1. Rozbor současněho stavu a zadání.
2. Výchozí povrch nástroje a charakter styku.
3. Kinematická schémata obrábění kuželových ozubených kol Gleason a Oerlikon.
4. Průřezy třísek při obrábění uvedených kol.
5. Výpočet řezných sil pomocí měrného řezného odporu.
6. Zhodnocení a závěr.

V 245/198

PROF. DR. J. TROJAN
Jednotlivě katedra
STROJNÍ A STROJNÍ
PŘÍJ. 401 97

Klára H a a s o v a
24. 7. 1980

1. Авторы: Д.И. - Шайголин, У.М. - Шайголин, С.М. - Проектиро-
 вальное конструкторское бюро, Москва, Май 1962

Ing. Alois F r o c k

1. 9. 1988

24. 6. 1989



...the ...

Prof. Dr. Ing. Wladimir F. Brasil, Dr.Sc.

100

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

V Liberci dne 2.června 1989

Alena Haasová

Obsah

	str.
1. Úvod	6
1.1. Seznam zkratek a symbolů	7
2. Teorie navrhování řezných nástrojů	11
3. Povrchy součástí nástroje vytvořené profilem nástroje součástí při rotačních pohybech	15
3.1. Matematický model	15
3.1.1. Tenzor otočení	16
3.1.2. Operace s tenzorem otočení	19
4. Kuželová kola se zakřivenými zuby	23
4.1. Výroba kuželových kol Gleason	27
4.2. Výroba kuželových kol Oerlikon	28
5. Rozbor profilu nástroje a plocha boku zubu	30
5.1. Použité řešení pro určení plochy vytvořené nástrojem při dokončování metodou Gleason	40
5.2. Plocha vytvořená nástrojem při hrubování	43
6. Rovina řezu	44
7. Tvar třísky	46
7.1. Tříska při obrábění metodou Gleason	47
7.2. Tříska při obrábění metodou Oerlikon	48
8. Řezné síly při obrábění	50
8.1. Řezné síly při frézování	57
8.2. Řezné síly při frézování ozubených kol se zakřivenými zuby	61
8.3. Výpočet sil při obrábění metodou Oerlikon a Gleason.	63

	str.
9.Řešení silových poměrů při frézování kuželových kol Gleason	65
9.1.Vývojový diagram pro výpočet řezné síly F_c a odchylky skutečně vyrobeného boku zubu a obálkou zubu (podle LONGA) při dokončování kuželových kol Gleason	66
9.2.Rozdělení výpočtu pro vnitřní a vnější nože frézovací hlavy	69
9.3.Určení řezných rovin	70
9.4.Průsečnice plochy vytvořené nástrojem s řeznou rovinou.	72
9.5.Odchylka vyrobeného boku zubu a obálky boku zubu	73
9.6.Výpočet řezné síly F_c	74
10.Závěr	75
Seznam použité literatury	76
Seznam příloh	79

1. Úvod

Správné uplatnění vědeckotechnického rozvoje v procesu obrábění je jedním z možných zdrojů úspor finančních prostředků a společensky nutné práce. Podstatnou součástí strojírenských výrobků tvoří výroba ozubených kol, jež představuje asi patnáct procent z celkového objemu součástí vyráběných třískovou technologií. Vývoj obráběcích strojů a nástrojů směřuje ke zvyšování produktivity práce, což se projevuje narůstáním řezné rychlosti, posuvu, tedy zvyšováním řezného výkonu. Současně s tím se zvyšují požadavky na kvalitu provedení.

Pro zvýšení trvanlivosti a snížení opotřebení nástrojů musíme zajistit co nejrovnoměrnější namáhání jednotlivých břitů nástroje. Namáhání daného břitu nástroje můžeme zkoumat prostřednictvím velikosti a tvaru odebírané třísky břitem. Odvození vztahu pro stanovení průřezu řezu je možné na základě znalosti trajektorie jednotlivých břitů nástroje. Z průřezu řezu a ze známých měrných řezných odporů je možné stanovit silové poměry při obrábění a na základě toho provést pevnostní kontrolu nástroje.

Diplomová práce řeší tento problém především pro frézování kuželových kol Gleason. V práci jsou rovněž zahrnuty poznatky z oblasti této problematiky týkající se frézování kuželových kol Oerlikon.

1.1. Seznam zkratk a symbolů

Název hodnoty	Symbol	Symbol v programu
Ludolrovo číslo	η	PI
Převod stupně-rad.	-	PREVSR
Jmenovitý poloměr frézovací hlavy [mm]	r_n	RN
Vzdálenost bodu od osy obrobku [mm]	-	RI2, RE2
Vnitřní úhel nože [°]	δ_{im}	ALFAIN
Vnější kuželová vzdálenost [mm]	A_o	AØ
Vnitřní kuželová vzdálenost [mm]	A	A
Úhel počátečního natočení kolébky [°]	φ	TAUPOC
Úhel záběru [°]	ψ	PSI
Úhel patního kuže- le [°]	δ_f	GAMAP
Úhel hlavového kužele [°]	δ_h	GAMAO
Úhlová rychlost obrobku [rad.min ⁻¹]	ω_z	WZ
Úhlová rychlost kolébky [rad.min ⁻¹]	ω_k	WK
Úhlová rychlost frézovací hlavy [rad.min ⁻¹]	ω_f	WF
Vektor počáteč- ního bodu na ostří	$\vec{OA}$	OAIE
Vektor koncové- ho bodu na ostří	$\vec{OB}$	OBIE

Název hodnoty	Symbol	Symbol v programu
Jednotkový vektor osy obrobku	$\bar{o}_Z$	OZ
Jednotkový vektor osy kolébky	$\bar{o}_K$	OK
Jednotkový vektor osy řez.hlavy	$\bar{o}_F$	OF
Obvodová rychlost obrobku [m.min ⁻¹]	v_Z	VZ
Čas na obrobek jedné zubové mezery [s]	t_z	MAXTC
Časová konstanta mezi dvěma noži [s]	-	DELVTC
Počet dělení v časovém intervalu	-	POCMTC
Počet bodů na ostří nástroje	-	POCU1
Krok v intervalu $u \in \langle 0, 1 \rangle$	-	DELUI
Parametr vnitřního nože	-	INTER
Řezná rovina 1	-	TECRO1
Řezná rovina 2	-	TECRO2
Tenzor otočení	$\bar{T}(o_Z, \omega_Z C)$ $\bar{T}(o_K, \omega_K C)$ $\bar{T}(o_F, \omega_F C)$	TOZWZM TOKWK TOFWF
Vektor bodu na ostří	$\bar{K}$	N110
Vektor ve směru hlavního řezného pohybu	$\bar{V}$	ST
Jednotkové vektory řezné roviny	$\bar{v}'$ $\bar{w}^o$	MALEV MALEW

Název hodnoty	Symbol	Symbol v programu
Vektor bodu obálky	$\bar{K}$	KOB
Derivace tenzorů otočení	A^T	ATC
	B^T	BTC
	C^T	CTC
Diadický součin	$\bar{e}e$	DIAL
Jednotkový tenzor	$\bar{E}$	E
Antisymetrické tenzory	$\bar{W}_d(o_Z)$	WOZ
	$\bar{W}_d(o_K)$	WOK
	$\bar{W}_d(o_F)$	WOF
Odhylka od obálky boku zubu	-	VZL
Směrový vektor ostří	$\bar{s}$	N1Ø
Čas pro který je nale- zena 1.řezná rovina	-	TC1
Čas pro který je na- lezena 2.řezná rovina	-	TC2
Průsečík průsečnic ostří nástroje s řeznou rovinou	-	OSR
Vektor bodu ostří pro který je nale- zena řezná rovina	-	N1TAU
Vektor z počátku s.s. do vrcholu kužele vytvořeného prodlouženým ostřím nástroje	$\bar{V}$	V
Měrný řezný odpor	$P_{1.1}$	P11

Název hodnoty	Symbol	Symbol v programu
Opravný koeficient pro výpočet řezné síly	K_{Fc}	KFC
Exponent pro výpočet řezné síly	u	EXPON
Plocha třísky	S	UPL

2. Teorie navrhování řezných nástrojů

Podmínky existence výchozího povrchu nástroje

Teoretické základy navrhování řezných nástrojů vycházejí z těchto předpokladů /25/: soustavy stroj - nástroj - obrobek reprezentuje prvky absolutně tuhé a stroj i nástroj jsou teoreticky přesné. V další fázi se do výpočtu zařadí deformace soustavy a nepřesnost výroby.

Při navrhování řezných nástrojů se nejdříve stanoví výchozí povrch nástroje sdružený s povrchem součásti, a pak se nástroj jako geometrické těleso přemění v řezný nástroj, tj. udělí se mu řezné vlastnosti.

Výchozím povrchem nástroje se rozumí povrch tečný k postupným polohám obrobku při jejich vzájemném pohybu. Povrchy nástroje a součásti mohou být shodné (závitníky, protahovací trny), nebo je povrch nástroje vytvořen jako obalová plocha povrchu součásti (frézy). Výchozí povrch se v tomto případě stýká s obrobeným povrchem podél čáry, která se nazývá charakteristikou. Uvedené způsoby vytváření povrchu závisejí na tom, jaké základní schéma (kinematické) utváření bylo zvoleno.

Kinematické schéma utváření představuje souhrn pohybů nástroje vzhledem k obrobku, jež jsou nutné k vytvoření obrobeného povrchu součásti. Obecně nejsou kinematická schémata obrábění totožná se schématy utváření. Tato je nutné často doplnit příslušnými pohyby. Jestliže se kinematickým schématům obrábění přidají další pomocné pohyby, například zpětný pohyb nástroje, rychloposuv apod., vytvoří se tím reálné kinematické schéma obráběcího stroje. Sovětský autor RODIN /25/

provedl roztrídění kinematických schémat utváření na několik základních typů, z nichž obsahuje několik jednoduchých pohybů. Jde o pohyby přímočaré, točivé a jejich kombinace.

Výchozí povrch nástroje lze vytvořit jen za těchto podmínek /25/. První a nutnou podmínkou vytvoření povrchu součásti je existence výchozího povrchu nástroje sdruženého s obroběným povrchem při daném schématu utváření. Povrch nástroje lze považovat za souhrn charakteristik. Aby vznikl sdružený povrch nástroje, musí být všechny body povrchu součásti v různých okamžicích body charakteristiky.

Pro existenci obalového povrchu nástroje je nutné, aby byla alespoň jednou splněna podmínka, že normály k povrchu součásti jsou ve všech jeho bodech současně nebo v různých okamžicích kolmé k vektoru rychlosti pohybu součásti vzhledem k nástroji. Podmínku lze zapsat jako skalární součin dvou vektorů

$$\bar{n} \cdot \bar{v} = 0 \quad (2.1)$$

kde $\bar{n}$ - vektor normály k povrchu součásti

$\bar{v}$ - vektor rychlosti relativního pohybu povrchu součásti
v bodech charakteristiky

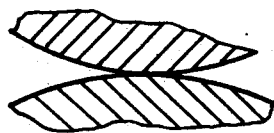
Směr vektoru $\bar{v}$ závisí na přijatém schématu utváření a na rozměrech a tvaru součástky.

Druhou podmínkou vytvoření povrchu součásti při obrábění je podmínka styku výchozího povrchu nástroje a součásti bez vzájemného pronikání. Charakter styku povrchu nástroje je možno vyšetřit pomocí řezů rovinami vedenými body styku. V těchto rovinách se mohou vyskytnout různé druhy styku sdružených profilů. Při dotyku vypuklého profilu s vypuklým nevznikne pronik pro žádný poloměr křivosti (obr.2.1.a). Při dotyku vypuklého

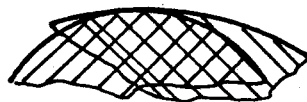
profilu s vydutým (obr.2.1.b,c) pronikání profilů nenastane v případě, že poloměr křivosti vydutého profilu bude větší než poloměr křivosti vypuklého profilu.

U sdružených profilů se mohou vyskytovat i body vratu. Jsou možné dva případy bodu vratu, a to pro vypuklý profil (obr.2.2.) a vydutý profil (obr.2.3.).

Charakter styku povrchu součásti a výchozího povrchu nástroje je možno vyšetřovat jak grafickými metodami, tak analyticky, např. pomocí poloměrů křivosti křivek v určitých rovinách řezu.



a)

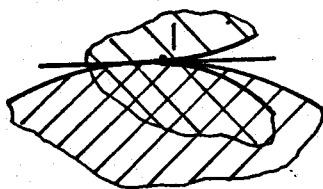


b)

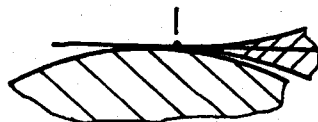


c)

obr. 2.1. [24]

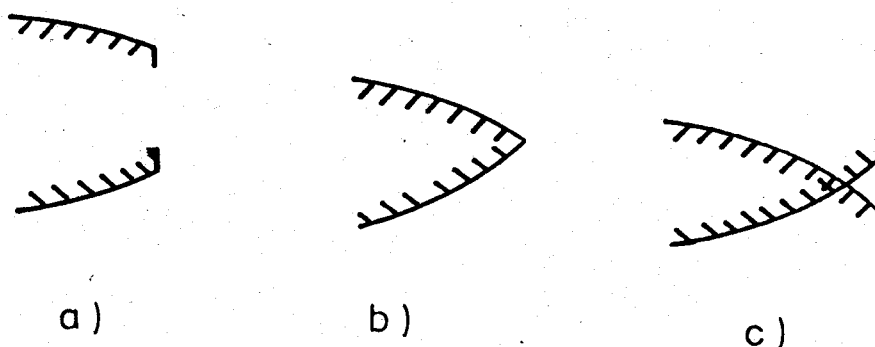


obr. 2.2. [24]



obr.2.3.[24]

Třetí podmínkou vyrobitelnosti je, že se přilehlé úseky povrchu nástroje nesmějí navzájem protínat. Povrchy součástí obráběné řezným nástrojem jsou složeny z celé řady různých ploch. Výchozí povrch nástroje se rovněž musí skládat z celé řady ploch, které korespondují při obrábění s úseky na součásti. Přilehlé úseky výchozího povrchu nástroje mohou zaujímat tyto vzájemné polohy /25/ (obr.2.4.).



obr. 2.4.[24]

- a) úseky povrchů nástroje se navzájem neprotínají a jsou od sebe vzdáleny
- b) mezní body úseků se navzájem protínají
- c) úseky povrchů se navzájem protínají

3. Povrchy součásti (nástroje) vytvořené profilem nástroje (součásti) při rotačních pohybech

Tento problém se týká především obrábění se dvěma závislými rotačními pohyby kolem dvou různoběžných os nebo os mimoběžných: při výrobě kuželových kol s přímými zuby nebo se zakřivenými zuby (Gleason, Oerlikon), broušení atd.

Je-li vytvářena plocha třemi závislými pohyby (při výrobě kola Oerlikon, Klingelnberg) v plynulém způsobu obrábění, bude problém složitější. Všechny tyto problémy se dají řešit použitím tenzoru otočení.

3.1. Matematický model

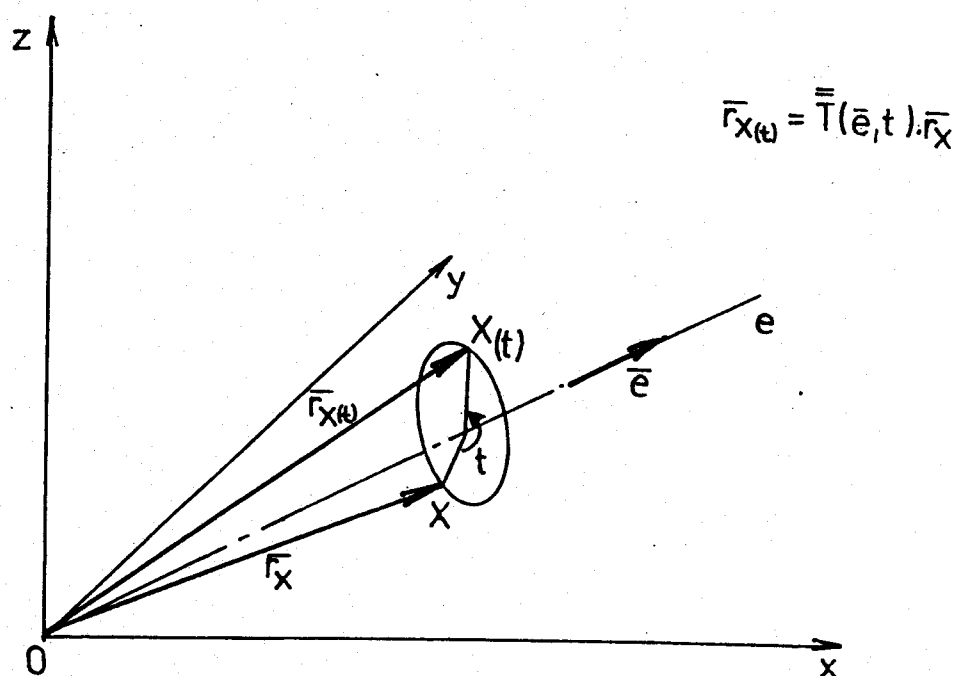
Většina pohybů při obrábění, ať jde o pohyb nástroje či obrobku, jsou pohyby rotační, posuvné nebo jejich kombinace. Trajektorie těchto pohybů nám charakterizují obecné polohy nástroje nebo obrobku.

Je-li předepsaný tvar profilu součásti a je-li známa kinematická vazba daného způsobu obrábění, pak je možno najít profil nástroje, jímž lze vyrobit požadovaný tvar obrobku. Tímto problémem se zabývali autoři v /19/, /16/ a /20/, konkrétně pro odvalovací frézy. Známe-li naopak tvar nástroje, kinematickou vazbu daného způsobu obrábění, můžeme vypočítat plochu obrobku.

3.1.1. Tenzor otočení

Pro svou náročnost a délku si výpočet plochy boku zubu vyžaduje takovou metodu, kterou lze aplikovat na samočinném počítači.

Základem obecného řešení je použití tenzoru otočení, jehož odvození je v /13/. Základní vlastností tenzoru otočení je, že otáčí obecný vektor $\bar{r}_x$ kolem osy $\bar{e}$ dané jednotkovým vektorem $\bar{e}$ o obecný úhel t , aniž se změní velikost tohoto vektoru (obr.3.1.).



obr.3.1.

Tenzor otočení kolem osy e o úhel t má tvar:

$$\bar{T}(\bar{e}, t) = (\bar{E} - (\bar{e}\bar{e}\bar{e})) \cdot \cos t + \bar{W}_e \cdot \sin t + (\bar{e}\bar{e}\bar{e}) \quad (3.1)$$

kde $\bar{E}$ - jednotkový tenzor,

$\bar{e}\bar{e}\bar{e}$ - diadický součin vektorů,

$\bar{W}_e$ - antisymetrický tenzor,

t - úhel otočení.

Antisymetrický tenzor je definován:

$$\bar{W}_e = \begin{vmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & 0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & 0 \end{vmatrix} \quad (3.2)$$

a splňuje podmínky:

1) $w_{ij} = 0$ je-li $i=j$,

2) $w_{ij} = -w_{ji}$ je-li $i \neq j$,

přičemž $w_{21} = e_3$, $w_{13} = e_2$, $w_{32} = e_1$,

kde

e_1, e_2, e_3 - složky vektoru $\bar{e}$.

Jednotkový tenzor $\bar{E}$ je sestaven podle těchto pravidel:

$E_{ij} = 1$ je-li $i=j$,

$E_{ij} = 0$ je-li $i \neq j$.

Diadický součin $\bar{e}\bar{e}\bar{e}$ zapisujeme v maticovém tvaru. Prvky d_{ij} této matice splňují tuto rovnici

$d_{ij} = e_i e_j$, $i = 1, 2, 3$, $j = 1, 2, 3$.

Obecná formulace vlastností tenzoru zní:

Tenzor otočení otáčí danou soustavu kolem dané osy o daný úhel, aniž by se tato soustava při otočení deformovala.

Po dosazení do (3.1) za jednotlivé tenzory a vektory má tenzor otočení tvar:

$$\begin{aligned} \bar{\bar{T}}(\bar{e}, t) = & \left(\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} e_1 e_1 & e_1 e_2 & e_1 e_3 \\ e_2 e_1 & e_2 e_2 & e_2 e_3 \\ e_3 e_1 & e_3 e_2 & e_3 e_3 \end{vmatrix} \right) \cdot \cos t + \\ & + \begin{vmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & 0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & 0 \end{vmatrix} \cdot \sin t + \begin{vmatrix} e_1 e_1 & e_1 e_2 & e_1 e_3 \\ e_2 e_1 & e_2 e_2 & e_2 e_3 \\ e_3 e_1 & e_3 e_2 & e_3 e_3 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

(3.3)

3.1.2. Operace s tenzorem otočení

Jednou z nejdůležitějších operací je derivace tenzoru otočení podle úhlu otočení, kterou definujeme takto:

$$\frac{d(\bar{\bar{T}}(\bar{e}, t))}{dt} = \bar{\bar{W}}_e \cdot \bar{\bar{T}}(\bar{e}, t) \quad (3.4)$$

Důkaz je proveden v práci /11/.

Pro derivaci otočeného polohového vektoru platí:

$$\frac{d(\bar{\bar{T}}(\bar{e}, t) \cdot \bar{x})}{dt} = \bar{\bar{W}}_e \cdot \bar{\bar{T}}(\bar{e}, t) \cdot \bar{x} \quad (3.5)$$

Derivace tenzoru otočení $\bar{\bar{T}}(\bar{e}, c+pt)$ je definována takto /11/

$$\frac{d(\bar{\bar{T}}(\bar{e}, c+pt))}{dt} = p \cdot \bar{\bar{W}}_e \cdot \bar{\bar{T}}(\bar{e}, c+pt) \quad (3.6)$$

kde:

c - konstantní úhel otočení

p - reálné číslo

Tenzor $\bar{\bar{T}}(\bar{e}, c+pt)$ lze rozepsat

$$\bar{\bar{T}}(\bar{e}, c+pt) = \bar{\bar{T}}(\bar{e}, c) \cdot \bar{\bar{T}}(\bar{e}, pt) \quad (3.7)$$

Jestliže jsme pomocí tenzoru otočení vyjádřili soustavu ploch $\bar{X}$ v pevném souřadném systému V, x, y, z , která je tvořena postupnými polohami ostří nástroje vzhledem k nehybnému obrobku, můžeme s použitím podmínky souměrnosti ploch:

$$[\bar{X}_{u_1}, \bar{X}_{u_2}, \bar{X}_{u_3}] = 0 \quad (3.8)$$

vypočítat rovněž plochy obrobku. Přičemž platí, že

$$\begin{aligned} \bar{X}_{u_1} &= \frac{\partial \bar{X}}{\partial u_1} \\ \bar{X}_{u_2} &= \frac{\partial \bar{X}}{\partial u_2} \\ \bar{X}_{u_3} &= \frac{\partial \bar{X}}{\partial u_3} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Další použitý aparát vektorové a tenzorové analýzy je dostatečně znám a je zpracován v /9/ a /2/.

3.2. Obalové plochy vytvořené rotačními pohyby kolem dvou různoběžných os

Jestliže se nástroj (frézovací hlava) otáčí kolem své osy O_3 úhlovou rychlostí ω_3 , vytváří jeho ostří při pohybu plochu /13/

$$\bar{F}_3 = \bar{X}(u^1, u^2) \quad (3.10)$$

Součástí se otáčí kolem osy O_2 , která je různoběžná s osou O_3 , úhlovou rychlostí ω_2 . Jaká bude obálka $\bar{F}_2$?

Podmínka valení $\rho = \frac{\omega_3}{\omega_2}$

Za předpokladu, že plochu $\bar{F}_2$ zastavíme a vyšetřujeme pohyb plochy $\bar{F}_3$ vzhledem k ploše $\bar{F}_2$

označíme: $\bar{o}_3$ - jednotkový vektor osy O_3 ,

$\bar{o}_2$ - jednotkový vektor osy O_2 ,

φ - úhel otočení plochy $\bar{F}_2$.

Pohyb plochy je složen ze dvou částí:

1) Rotační pohyb kolem vlastní osy O_3 o úhel $\rho\varphi$. Jeho tenzor otočení je $\bar{T}(\bar{o}_3, \rho\varphi)$.

2) Rotační pohyb kolem osy O_2 při zastavené $\bar{F}_2$, pootočené o úhel φ . Tenzor otočení $\bar{T}(\bar{o}_2, \varphi)$.

Plochu nástroje v obecné poloze lze popsat takto:

$$\bar{K}_n = \bar{T}(\bar{o}_2, \varphi) \cdot \bar{T}(\bar{o}_3, \rho\varphi) \cdot \bar{X}(u^1, u^2) \quad (3.11)$$

V tomto případě φ zastupuje parametr u^3 z rovnice plochy

$$\bar{X} = \bar{X}(u^1, u^2, u^3)$$

Musí platit podle (3.8)

$$[\bar{K}_\varphi, \bar{K}_{u^1}, \bar{K}_{u^2}] = 0 \quad (3.12)$$

Řešením soustavy rovnic (3.11) a (3.12) dostaneme rovnici o-
bálky součásti. Podle (3.9):

$$\begin{aligned}\bar{K}_\psi &= \frac{\partial \bar{K}}{\partial \psi} = \bar{\sigma}_2 \times \bar{T}(\bar{\sigma}_2, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_3, p\psi) \cdot \bar{X}(u^1, u^2) + \\ &+ \bar{T}(\bar{\sigma}_2, \psi) \cdot p \cdot \bar{\sigma}_3 \times \bar{T}(\bar{\sigma}_3, p\psi) \cdot \bar{X}(u^1, u^2) = \\ &= \bar{W}_e(\bar{\sigma}_2) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_2, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_3, p\psi) \cdot \bar{X}(u^1, u^2) + p \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_2, \psi) \cdot \bar{\sigma}_3 \times \bar{T}(\bar{\sigma}_3, p\psi) \cdot \bar{X}(u^1, u^2)\end{aligned}\quad (3.13)$$

Po úpravě:

$$\bar{K}_\psi = \bar{W}_e((\bar{\sigma}_2) + p \bar{T}(\bar{\sigma}_2, \psi) \bar{\sigma}_3) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_2, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_3, p\psi) \cdot \bar{X}(u^1, u^2) \quad (3.14)$$

$$\text{Neboli: } \bar{K}_\psi = \bar{T}(\psi) \cdot \bar{X}(u^1, u^2) \quad (3.15)$$

kde

$$\bar{T}(\psi) = \bar{W}_e(\bar{\sigma}_2 + p \bar{T}(\bar{\sigma}_2, \psi) \bar{\sigma}_3) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_2, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_3, p\psi) \quad (3.16)$$

$$\bar{K}_{u^i} = \bar{T}(\bar{\sigma}_2, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_3, p\psi) \cdot \frac{\partial \bar{X}}{\partial u^i} \quad (3.17)$$

Z rovnic (3.12), (3.16), (3.17) dostaneme

$$\det[\bar{T}(\bar{\sigma}_2, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_3, p\psi) \frac{\partial \bar{X}}{\partial u^1}; \bar{T}(\bar{\sigma}_2, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_3, p\psi) \frac{\partial \bar{X}}{\partial u^2}; \bar{T}(\psi) \cdot \bar{X}(u^1, u^2)] = 0 \quad (3.18)$$

Z (3.18) vyjádříme $u^1 = u^1(u^2, \varphi)$ a dosadíme do rovnice (3.11). Dostaneme rovnici obálky

$$\bar{K} = \bar{T}(\bar{o}_2, \varphi) \cdot \bar{T}(\bar{o}_3, p\varphi) \cdot \bar{X}(u^1(u^2, \varphi), u^2) \quad (3.19)$$

4. Kuželová kola se zakřivenými zuby

Kuželových kol se zakřivenými zuby se používá při různoběžných osách a při větších nárocích na ozubení. Zakřivené zuby mají proti přímým zubům řadu výhod (tichost chodu, větší únosnost, produktivnější způsob výroby), pro které se jim dává zpravidla přednost.

Jednotlivé odvalovací výrobní způsoby kuželových kol se zakřivenými zuby se rozdělují podle tzv. řídicí křivky (průsečnice roztečné roviny základního plochého kola se zubními boky) na:

- a) metodu Gleason - řídicí křivkou je kružnice
- b) metodu Oerlikon - řídicí křivkou je prodloužená epicykloida
- c) metodu Klingelnberg - řídicí křivkou je evolventa

Kromě uvedených odvalovacích způsobů výroby lze uvedenými metodami vyrábět i tzv. soukolí "poloodvalovaná".

Metoda Gleason

Obráběcí stroje na výrobu tohoto ozubení vyrábějí zejména tyto firmy /3/: Gleason-USA, Modul VEB-NDR, Enims-SSSR. V příloze 1 jsou hlavní údaje těchto strojů, důležité pro posouzení výrobních možností.

Soukolí s ozubením Gleason mají nejčastěji zuby se snižující se výškou. Důvodem je odstranění nerovnoměrné tloušťky zubu po jeho délce, jež je důsledkem kruhového tvaru řídících křivek.

Poloodvalovaná soukolí typu Gleason-Formate. Talířové kolo je vyrobeno bez odvalu, pouhým zápichem nebo kruhovým protažením. Při výrobě pastorku kolébka stroje představuje nástrojové kolo identické s již vyrobeným talířem. Je to metoda velmi produktivní, vyžaduje však složitý výpočet seřízení stroje a soukolí je velmi citlivé na přesnou montáž. Metoda je vhodná především pro sériovou výrobu.

Zerol je kuželové soukolí typu Gleason, u něhož úhel sklonu zubu ve středu ozubení je nulový nebo malý. Důvodem použití tohoto ozubení bývá snaha zmenšit axiální síly v ložiskách. Helixform - v podstatě metoda Formate, zde však nástroj koná při výrobě pastorku šroubový pohyb kolem své osy. Metoda je vhodná pro sériovou výrobu.

V příloze 2 jsou uvedeny základní vzorce pro výpočet rozměrů soukolí. Jsou zpracovány podle literatury firmy Gleason.

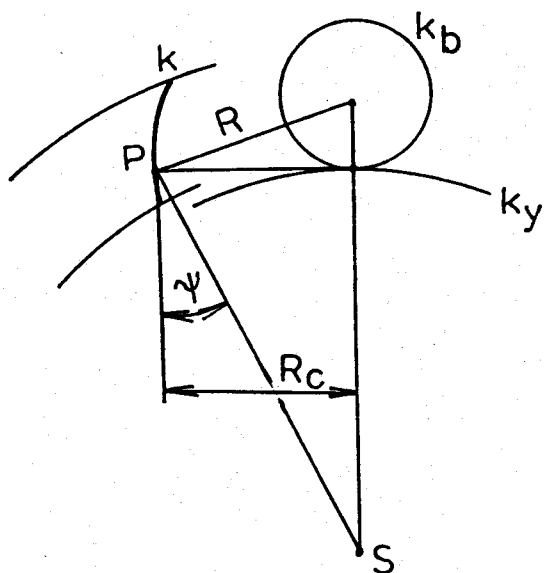
Metoda Oerlikon

Obráběcí stroje /3/ a jejich výrobní rozsahy jsou uvedeny v příloze 3.

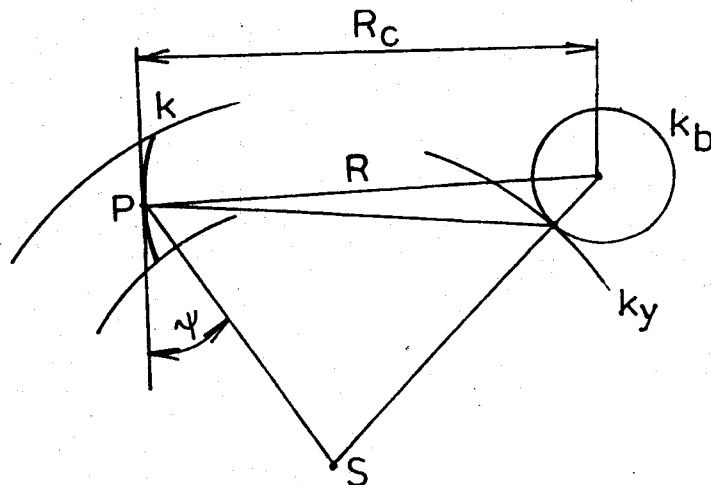
Ozubená kola s ozubením Oerlikon mají zuby s konstantní výškou. Ozubení tohoto typu je možno počítat v současné době podle tří výpočtových metod:

a) Ozubení N - situace v roztečné rovině plochého kola je znázorněna na obr.4.1. Používá se pro úhel sklonu zubu 29° - 30° . Základní vzorce pro výpočet tohoto ozubení jsou v příloze 4.

Za základ je v tomto přehledu vzat případ výroby univerzální hlavou.



obr. 4.1. [3]



obr. 4.2. [3]

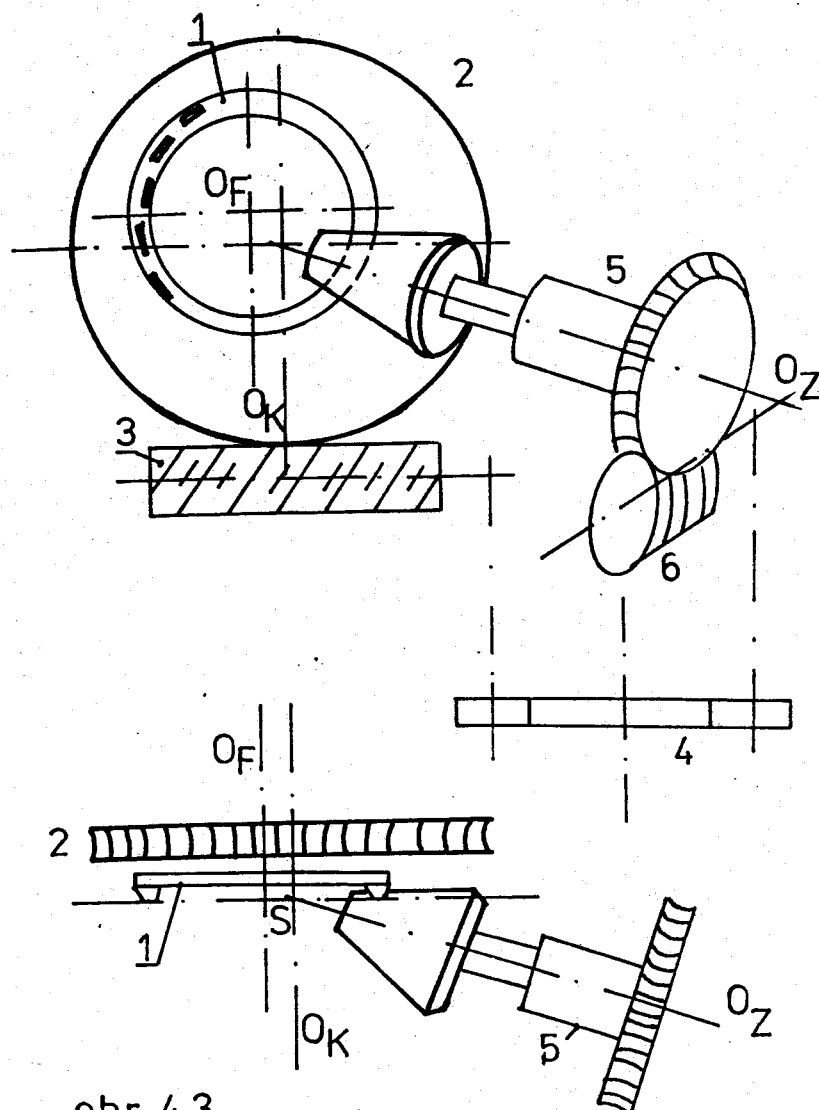
- b) Ozubení G - geometrické poměry jsou znázorněny na obr.4.2. Úhel sklonu zubu zde prakticky není omezen. Je možno vyrábět i ozubená kola s nulovým úhlem sklonu zubu (tzv. ozubení 0 - analogie Zerol).

I pro toto ozubení platí vztahy z přílohy 5 s přihlédnutím k uvedené poznámce.

- c) Ozubení Spiroflex - Výroba soukolí s tímto ozubením předpokládá použití strojů Spiromatic 1-3, které mají možnost naklonění osy nástroje, nutného k dosažení podélné modifikace, a použití, z hlediska broušení, seřízení a využití materiálu velmi výhodných hlav F N.

4.1. Výroba kuželových kol Gleason

Zjednodušené schéma je na obr.4.3.



obr.4.3.

Frézovací hlava 1 se otáčí kolem osy O_F , která je výstředně uložena v kolébce 2. Kolébka se při frézování natáčí kolem osy O_K šnekovým soukolím 3 přes posuvové převody 4. Obrobek je upnut ve vřetenu 5, jímž otáčí šnekový převod 6, spojený převodem 4 s převodem na kolébku. Vrchol kužele obrobku prochází bodem S, ležícím na ose O_K a v rovině břítů frézovací hlavy. Osa vřetene je v této rovině skloněná o úhel patního kužele kola. Jednotlivé zubové mezery se frézují dě-

lícím způsobem. Nožová hlava po vyfrézování jedné zubové mezery vyjede ^{ze} ~~do~~ záběru a kolo se pootočí o jednu zubovou rozteč. Zpravidla se ozubené kolo frézuje nadvakrát. Zubová mezera se napřed hrubuje zvláštní frézovací hlavou, která má střídavě za sebou tři různě uspořádané nože. První nůž frézuje střed zubové mezery, druhý levý bok a třetí pravý bok zubu, oba s určitým přídávkem. Při hrubování talířového kola pracuje nástroj zapichovacím způsobem, kolébka s frézovací hlavou a obrobek se neotáčejí. Konečný tvar zubové mezery se vytvoří na stejném stroji jinou frézovací hlavou. Při práci se otáčí kolébka i obrobek, čímž se dosáhne odvalování nožů frézovací hlavy po vytvořeném zubu frézovaného kola. Frézuje se rovněž zub po zubu dělícím způsobem.

Nože frézovací hlavy mají lichoběžníkový profil, který odpovídá profilu zubu základního kola.

4.2. Výroba kuželových kol Oerlikon

Způsob výroby kuželových kol Oerlikon je založen na principu odvalování zubů frézovací hlavy, které představují zuby myšleného společného základního kola. Na rozdíl od způsobu Gleason je pracovní cyklus nepřetržitý. Průměty křivek zubů do základní roviny jsou částí prodloužených epicykloid. Zubové mezery se obrábějí frézovací hlavou, jejíž nože jsou spojeny do tří až jedenácti skupin. V každé skupině jsou zpravidla tři nože lichoběžníkového profilu pro předřezávání, řezání levého a pravého boku zubu. Tyto skupiny nožů jsou uspořádány ve frézovací hlavě tak, aby každá tvořila část samostatné spi-

rály. Každá skupina je částí jiné spirály, aproto prochází jedna skupina nožů první zubovou mezerou, druhá skupina druhou a třetí skupina třetí mezerou atd. Kinematika celého procesu, kterou dosahujeme odvalování, se skládá z točivého pohybu frézovací hlavy, točivého pohybu obráběného kola a z točivého pohybu kolébky, v níž je výstředně uložena frézovací hlava. Její osa otáčení je totožná s osou základního kola. Tálířová kola se frézují zapichovacím způsobem.

Ze závěrů práce /21/, která se zabývá srovnáním, volbou optimálního způsobu výroby i uvažovanou produkcí vyplývá, že způsob Oerlikon spojuje výhody metody Klingelnberg (výpočet a seřízení stroje) s metodou Gleason (nožová hlava, jakost obrobeneé plochy), má však i řadu nevýhod, zejména v pracnosti seřizování víceskupinových nožových hlav.

Při použití univerzálních hlav je způsob Oerlikon zvláště výhodný pro kusovou a malosériovou výrobu.

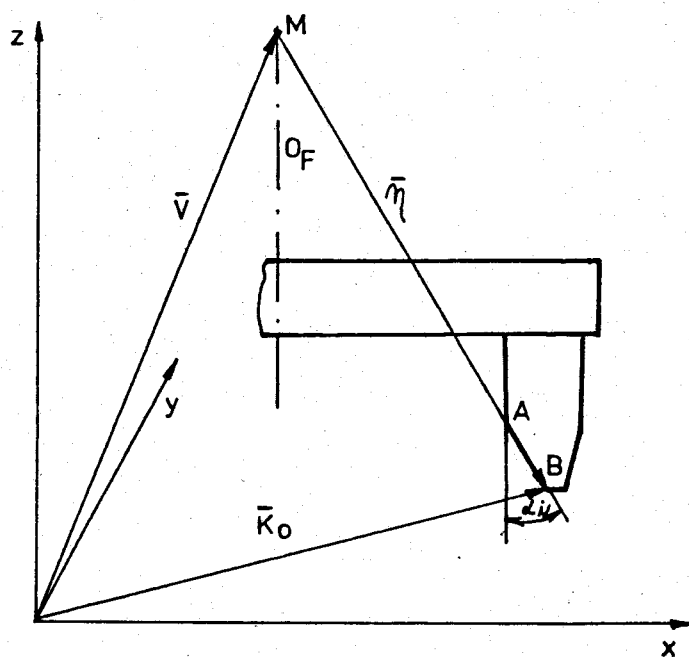
Standardní Gleason se snižujícími zuby má podle /21/ řadu předností, z nichž uvádím např.:

- Velký rozsah vyráběných kol - umožňuje jejich použití pro nejrůznější průmyslová odvětví, jako automobily, letadla, obráběcí stroje apod.
- Možnost racionálního využití jak v hromadné a sériové výrobě, tak i v malosériové a kusové výrobě.
- Možnost broušení kol po tepelném zpracování.

Mezi nevýhody metody Gleason patří:

- Složitý a velmi pracný výpočet.
- Potřeba několika hlav pro běžnou výrobu (hrubovací a dokončovací hlavy).

Při výrobě kola Gleason má kužel ostří osu totožnou s osou frézovací hlavy (obr.5.1.).



obr. 5.1. [13]

Proto prodloužené ostří AB protíná osu O_F v bodě M. Jestliže parametr u^1 leží na AB, potom plocha kužele nástroje vytvořená ostřím má rovnici podle LONGA /13/:

Plocha kužele ostří má v systému souřadnic rovnici

$$\bar{K}_0 = u^1 \cdot \bar{T}(\bar{o}_F, u^2) \cdot \bar{\eta} + \bar{V} \quad (5.2)$$

kde u^2 - je úhel pootočení kužele nástroje z počáteční polohy na začátku výroby zubu do polohy při dokončení jednoho boku zubu,

$\bar{V}$ - je vektor od počátku souřadnic k vrcholu kužele vytvořeného rotací prodlouženého ostří nože frézovací hlavy,

$\bar{\eta}$ - je vektor od vrcholu kužele ostří nože frézovací hlavy ke zvolenému bodu na ostří.

Podle rovnice (3.10) máme plochu nástroje:

$$\bar{K} = \bar{T}(\bar{o}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{o}_K, p\psi) (\bar{V} + u^1 \bar{T}(\bar{o}_F, u^2)) = \bar{T}(\bar{o}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{o}_K, p\psi) \bar{K}_0 \quad (5.3)$$

kde

$$\bar{K}_0 = u^1 \bar{T}(\bar{o}_F, u^2) + \bar{V}$$

u^1 je parametr podél řezné hrany AB a splňuje podmínku

$$0 \leq u^1 \leq 1 \quad (5.4)$$

Pokud $u^1 > 1$, potom se obrábění koná špičkou nože.

$\bar{o}_Z$ - jednotkový vektor osy součásti,

$\bar{o}_K$ - jednotkový vektor osy kolébky,

$\bar{o}_F$ - jednotkový vektor osy frézy.

Podmínka valení

$$[\bar{K}_{u1}, \bar{K}_{u2}, \bar{K}_{\psi}] = 0 \quad (5.5)$$

$$\bar{K}_{u1} = \frac{\partial \bar{K}}{\partial u_1} = \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u_2) \bar{\eta} \quad (5.6)$$

$$\bar{K}_{u2} = \frac{\partial \bar{K}}{\partial u_2} = u_1 \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \cdot \bar{W}_e(\bar{\sigma}_F) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u_2) \bar{\eta} \quad (5.7)$$

$$\bar{K}_{\psi} = \frac{\partial \bar{K}}{\partial \psi} = \bar{W}_e(\bar{\sigma}_Z + p \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{\sigma}_K) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \cdot \bar{K}_0 \quad (5.8)$$

Dosadíme rovnice (5.6), (5.7), (5.8) do (5.5) a dostaneme:

$$\begin{aligned} & (\bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u_2) \bar{\eta} \times u_1 \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \cdot \bar{W}_e(\bar{\sigma}_F) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u_2) \bar{\eta}) \cdot \\ & \cdot \bar{W}_e(\bar{\sigma}_Z + p \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{\sigma}_K) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \cdot \bar{K}_0 = 0 \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} & (\bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u_2) \bar{\eta} \times u_1 \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \cdot \bar{W}_e(\bar{\sigma}_F) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u_2) \bar{\eta}) \cdot \\ & \cdot \bar{W}_e(\bar{\sigma}_Z + p \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{\sigma}_K) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \cdot \bar{V} + \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u_2) \bar{\eta} \times \\ & \times u_1 \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \cdot \bar{W}_e(\bar{\sigma}_F) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u_2) \bar{\eta} \cdot \bar{W}_e(\bar{\sigma}_Z + p \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \bar{\sigma}_K) \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \cdot \\ & \cdot \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \cdot u_1 \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u_2) \bar{\eta} = 0 \end{aligned} \quad (5.10)$$

Po vyloučení u^1 :

$$u^1 = - \frac{(\bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u^2) \bar{\eta}) \times \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \bar{W}_e(\bar{\sigma}_F) \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u^2) \bar{\eta})}{(\bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u^2) \bar{\eta}) \times \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \bar{W}_e(\bar{\sigma}_F) \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u^2) \bar{\eta})} \cdot \frac{\bar{W}_e(\bar{\sigma}_Z + p \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{\sigma}_K) \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \bar{V}}{\bar{W}_e(\bar{\sigma}_Z + p \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{\sigma}_K) \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u^2) \bar{\eta}} \quad (5.11)$$

$$u^1 = - \frac{\det[\bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u^2) \bar{\eta}; \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \bar{W}_e(\bar{\sigma}_F) \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u^2) \bar{\eta}]}{\det[\bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u^2) \bar{\eta}; \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \bar{W}_e(\bar{\sigma}_F) \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u^2) \bar{\eta}]} \cdot \frac{\bar{W}_e(\bar{\sigma}_Z + p \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{\sigma}_K) \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \bar{V}}{\bar{W}_e(\bar{\sigma}_Z + p \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{\sigma}_K) \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u^2) \bar{\eta}} \quad (5.12)$$

Rovnici (5.12) lze stručně psát:

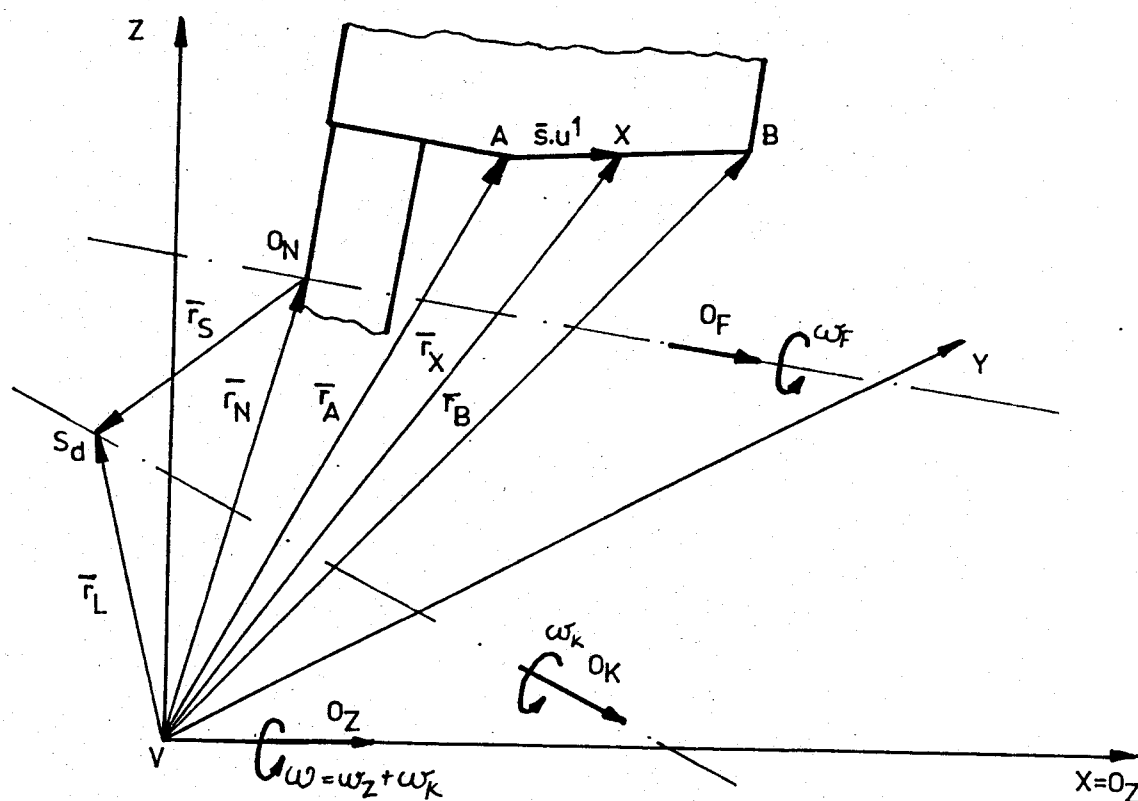
$$u^1 = u^1(\psi, u^2) \quad (5.13)$$

Dosazením (5.11) resp. (5.12) do (5.3) najdeme:

$$\bar{K}' = \bar{T}(\bar{\sigma}_Z, \psi) \bar{T}(\bar{\sigma}_K, p\psi) (\bar{V} + u^1(\psi, u^2) \bar{T}(\bar{\sigma}_F, u^2) \bar{\eta}) \quad (5.14)$$

Rozbor profilu nástroje a plocha boku zubu pro kolo Oerlikon

Zvolme si pravotočivý souřadný systém $x-y-z$ s počátkem souřadnic ve vrcholu V roztečného kužele obrobku. Osu x ztotožníme s osou součásti, osa z nechť leží v rovině kolébky a je kolmá na osu x . Osa y je pak kolmá na rovinu $x-z$ (obr.5.2.). Dále předpokládejme, že nástroj (tj. frézovací nůž) má přímkové ostří a špička nástroje má poloměr zaoblení $r=0$.



obr.5.2. [22]

Definujme si převody:

$$p_1 = \frac{\omega_Z}{\omega_F} \quad (5.15)$$

$$q_1 = \frac{\omega_K}{\omega_V} \quad (5.16)$$

Předpokládejme, že unašeč ${}^0_N\bar{S}_d$ (kolébka) je pevný, pak platí:

$$\omega_V = 0, \quad \omega_K = 0$$

Vektorová rovnice ostří nástroje v základní poloze je:

$$\bar{r}_X = \bar{r}_A + \bar{s} \cdot u^1$$

kde $\bar{r}_X$ je vektor libovolného bodu X na ostří AB vzhledem k počátku souřadnic V,

$\bar{r}_A$ je polohový vektor počátečního bodu A ostří nástroje vzhledem k počátku souřadnic V,

$\bar{s}$ je směrový vektor řezné části AB a platí, že:

$$\bar{s} = \bar{r}_B - \bar{r}_A$$

u^1 je parametr na ostří AB a musí pro reálné obrábění

splňovat podmínku $u^1 \in \langle 0;1 \rangle$.

Předpokládejme, že úhel pootočení frézovací hlavy od základní polohy je u , potom úhel pootočení součásti je $(p_1 \cdot u)$.

Bod X ostří vektoru $\overline{O_N X}$ vykoná trajektorii podle /22/:

$$\bar{T}_{FZ} = \bar{T}(\bar{o}_F, u)(\bar{r}_A + \bar{s}u^1 - \bar{r}_N) \quad (5.17)$$

kde $\bar{r}_N$ je vektor od počátku souřadnic k bodu O_N , který leží na ose O_F frézovací hlavy.

Trajektorie bodu X vztažená nyní k souřadnicím x-y-z je vyjádřena:

$$\bar{T}_Z = \bar{T}(\bar{o}_F, u)(\bar{r}_A + \bar{s}u^1 - \bar{r}_N) + \bar{r}_N$$

Tatáž trajektorie bodu svázaná s otáčením obrobku pak má tvar:

$$\bar{K}_Z = \bar{T}(\bar{o}_Z, p_1 u)(\bar{T}(\bar{o}_F, u)\bar{T}_Z) \quad (5.18)$$

Uvolníme-li nyní kolébku, potom:

$$\omega_K \neq 0 ; \omega_V \neq 0$$

Povrch nástroje $\bar{K}_Z$ bude s obrobkem konat valivý pohyb. Označíme-li si úhel natočení součásti při valení v , potom úhel pootočení kolébky je $(q_1 \cdot v)$.

Plocha $\bar{K}_Z$ se otočí kolem osy kolébky, která změnila však již svoji polohu do polohy O'_K :

$$\bar{o}'_K = \bar{T}(\bar{o}_{Z,p_1u})\bar{o}_K$$

Pak dostaneme:

$$\bar{K}_K = \bar{T}(\bar{o}_K, q_1 \cdot v) \bar{K}_Z - \bar{T}(\bar{o}_{Z,p_1u})\bar{r}_L + \bar{T}(\bar{o}_{Z,p_1u})\bar{r}_L \quad (5.19)$$

kde $\bar{r}_L$ je polohový vektor bodu S_d , ležícího na ose kolébky.

Po otočení K_K kolem obráběné součásti má rovnice soustavy ploch K_Z tvar:

$$\bar{K} = \bar{T}(\bar{o}_{Z,v})(\bar{T}(\bar{o}'_K, q_1 \cdot v)\bar{K}_Z - \bar{T}(\bar{o}_{Z,p_1u})\bar{r}_L) + \bar{T}(\bar{o}_{Z,p_1u})\bar{r}_L \quad (5.20)$$

Po dosazení (5.17) do (5.19):

$$\bar{K} = \bar{T}(\bar{o}_{Z,v})(\bar{T}(\bar{o}'_K, q_1 \cdot v)(\bar{T}(\bar{o}_{Z,p_1u})\bar{r}_Z - \bar{T}(\bar{o}_{Z,p_1u})\bar{r}_L) + \bar{T}(\bar{o}_{Z,p_1u})\bar{r}_L) \quad (5.21)$$

Rovnice (5.21) je rovnicí bodu ostří nástroje v obecné poloze.

Určení plochy boku zubu

Podmínka pro určení obalové plochy k soustavě ploch K, popsaných rovnicí (5.21), zní:

$$[K_U, K_V, K_U] = 0 \quad (5.22)$$

Po vyřešení jednotlivých parciálních derivací a po úpravě a dosazení do (5.21), dostaneme rovnici plochy boku zubu P:

$$\begin{aligned} \bar{P} = & \bar{T}(\bar{o}_Z, v) (\bar{T}(\bar{o}_K, q_1 v) (\bar{T}(\bar{o}_Z, p_1 u) (\bar{T}(\bar{o}_F, u) (\bar{r}_A + \bar{s} \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} - \bar{r}_N) + \\ & + \bar{r}_N) - \bar{T}(\bar{o}_Z, p_1 u) \bar{r}_L) + \bar{T}(\bar{o}_Z, p_1 u) \bar{r}_L) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{P} = & \bar{T}(\bar{o}_Z, v) (\bar{T}(\bar{o}_K, q_1 v) (\bar{T}(\bar{o}_Z, p_1 u) (\bar{T}(\bar{o}_F, u) (\bar{r}_A + \bar{s} u^1(u v) - \bar{r}_N) + \bar{r}_N) - \\ & - \bar{T}(\bar{o}_Z, p_1 u) \bar{r}_L) + \bar{T}(\bar{o}_Z, p_1 u) \bar{r}_L) \end{aligned} \quad (5.23)$$

Odvození rovnice je provedeno v práci /22/.

V práci /22/ je rovněž odvozena rovnice boku zubu při vzájemném svázání všech pohybů při obrábění.

Rovnice plochy nástroje, která se valí kolem obráběné

součástí s tenzorem otočení $\bar{T}(\bar{o}_Z, \varphi)$ má tvar:

$$\bar{K} = \bar{T}(\bar{o}_Z, \varphi) (\bar{r}_L + \bar{T}(\bar{o}_K, q(2k\tilde{\gamma} + \varphi)) (\bar{r}_N + \bar{T}(\bar{o}_F, p(2k\tilde{\gamma} + \varphi)) \bar{T}(\bar{o}_F, -p2k\tilde{\gamma})) \cdot (\bar{r}_A + \bar{s}.u^1 - \bar{r}_N) - \bar{r}_L)) \quad (5.24)$$

Pro výpočet obalové plochy platí podmínka:

$$[\bar{K}_u^1, \bar{K}_\varphi, \bar{K}_{k+1} - \bar{K}_k] = 0 \quad (5.25)$$

Z této rovnice určíme:

$$u^1 = u^1(k, \varphi) \quad (5.26)$$

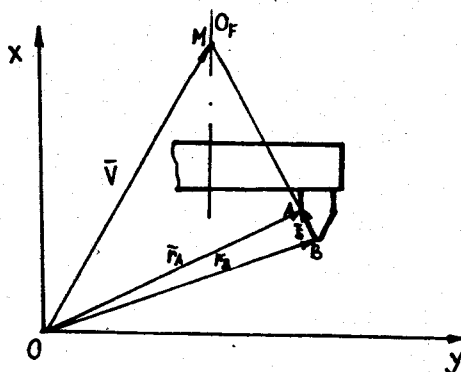
Po dosazení (5.26) do (5.24) dostaneme souřadnici boku zubu kola Oerlikon.

$$\bar{P} = \bar{T}(\bar{o}_Z, \varphi) (\bar{r}_L + \bar{T}(\bar{o}_K, q(2k\tilde{\gamma} + \varphi)) (\bar{r}_N + \bar{T}(\bar{o}_F, p\varphi - 2km\tilde{\gamma})) (\bar{r}_A + \bar{s}.u^1(k, \varphi) - \bar{r}_N) - \bar{r}_L)) \quad (5.27)$$

Přičemž rovnice (5.23) popisuje plochu teoretickou a rovnice (5.27) popisuje plochu skutečně vyrobenou.

5.1. Použité řešení pro určení plochy vytvořené nástrojem při dokončování (hlazení) metodou Gleason

Směr ostří nástroje je v souřadném systému $x-y-z$ dán rozdílem vektorů z počátku systému $x-y-z$ do bodů na počátku a na konci ostří nástroje (obr.5.3.).



obr. 5.3.

Přitom předpokládáme, že nástroj má přímkové ostří a špička nástroje má poloměr zaoblení $r=0$. Toto zjednodušení můžeme provést proto, že bok zubu je vytvářen především ostřím nástroje. Vliv špičky nástroje je výrazný pouze při řešení problematiky podřezávání zubů při obrábění. Při výpočtu průřezu třísek se budeme zabývat takovým soukolím, které je reálné z výrobního hlediska, tzn. u kterého nedochází k podřezávání, a potom je možno považovat špičku nástroje za ostrou.

Rovnice ostří tedy zní:

$$\bar{s} = \bar{r}_A - \bar{r}_B \quad (5.28)$$

Jestliže tuto plochu vztáhneme k souřadnému systému x-y-z, počátek systému bude průsečíkem osy O_K a O_Z . Osa x je totožná s osou kolébky, osa y je kolmá na osu x a leží v rovině x- O_Z , tj. prochází patou zubu. Osa z je kolmá na rovinu x-y a tvoří s osami x,y pravotočivý systém. Potom bude mít plocha vytvořená nástrojem rovnici:

$$\bar{K}_D = \bar{r}_B + u^1 \bar{s} \quad (5.29)$$

To platí za předpokladu:

$$\omega_F = 0$$

$$\omega_K = 0$$

$$\omega_Z = 0$$

Platí: C - čas v průběhu obrábění,

u^1 - parametr na ostří nástroje, $0 \leq u^1 \leq 1$,

F - index pro nástroj,

K - index pro kolébku,

Z - index pro obrobek (kuželové kolo).

Budeme-li postupně uvádět nástroj, kolébku a obrobek do pohybu, bude mít plocha nástrojem vytvořená rovnice:

$$\omega_F \neq 0$$

$$\bar{K}_F = \bar{V} + \bar{T}(\bar{o}_F, \omega_F C) \cdot (K_D = \bar{V}) \quad (5.30)$$

$$\omega_K \neq 0$$

$$\bar{K}_K = \bar{T}(\bar{o}_K, \omega_K C) \cdot \bar{K}_F \quad (5.31)$$

$$\omega_Z \neq 0$$

$$\begin{aligned} \bar{K} = & \bar{T}(\bar{o}_Z, \omega_Z C) \cdot \bar{T}(\bar{o}_K, \omega_K C) \cdot (\bar{V} + \bar{T}(\bar{o}_F, \omega_F C) \cdot (\bar{r}_B + \bar{s}u^1 - \bar{V})) - \\ & - v_Z \cdot C \cdot \bar{o}_Z \end{aligned} \quad (5.32)$$

kde $\bar{V}$ - vektor od počátku souř. systému k vrcholu kužele, vytvořeného rotací prodlouženého ostří nože frézovací hlavy.

Plocha K je plocha vytvořená nástrojem při dokončování kuželových kol způsobem Gleason.

5.2. Plocha vytvořená nástrojem při hrubování

Plochu vytvořenou při hrubování kuželových kol Gleason lze popsat podobným způsobem jako plochu při dokončování.

V průběhu hrubování se otáčí pouze nástroj (frézovací hlava) a obrobek koná posuvný pohyb do řezu. Platí tedy:

$$\omega_K = 0$$

$$\omega_Z = 0$$

Směr ostří je opět určen rozdílem $\bar{A}_h$, $\bar{B}_h$

$$\bar{s}_h = \bar{A}_h - \bar{B}_h \quad (5.34)$$

Plocha v souřadném systému x-y-z, který je stejný jako u dokončování, má rovnici:

$$\bar{K}_{H1} = \bar{B}_h + \bar{s}_h \cdot u^1 \quad (5.35)$$

Při respektování pohybů nástroje a obrobku bude mít výsledná plocha rovnici:

$$\bar{K}_H = \bar{V}_h + \bar{T}(\bar{\omega}_F, \omega_F C) (\bar{K}_{H1} - \bar{V}_h) - v_Z \cdot C \cdot \bar{o}_Z \quad (5.3)$$

6. Rovina řezu

Rovina kolmá na hlavní řezný pohyb

Rovinu kolmou na hlavní řezný pohyb určuje rovnice:

$$(\bar{X} - \bar{R}_r) \cdot \bar{v} = 0 \quad (6.1)$$

kde $\bar{X}$ - libovolný bod roviny,

$\bar{v}$ - vektor ve směru hlavního řezného pohybu,

$\bar{R}_r$ - definovaný bod roviny.

Určení vektoru $\bar{v}$

Vektor $\bar{v}$ se určí jako derivace plochy vytvořené nástrojem podle času.

$$\bar{v} = \frac{dK}{dt} \quad (6.2)$$

Pokud:

$$AT = \bar{T}(\bar{o}_{Z_I} \omega'_Z \cdot C)$$

$$BT = \bar{T}(\bar{o}_{K_I} \omega'_K \cdot C)$$

$$CT = \bar{T}(\bar{o}_{F_I} \omega'_F \cdot C)$$

pak

$$AT' = -\omega_Z \cdot W_e(\delta_Z) \cdot AT$$

$$BT' = \omega_K \cdot W_e(\delta_K) \cdot BT$$

$$CT' = \omega_F \cdot W_e(\delta_F) \cdot CT$$

Vektor $\bar{v}$ má po úpravě rovnici:

$$\begin{aligned} \bar{v} = & AT' \cdot BT \cdot \bar{V} + AT' \cdot BT \cdot CT \cdot \bar{r}_B + AT' \cdot BT \cdot CT \cdot u^1 \cdot \bar{r}_A - AT' \cdot BT \cdot CT \cdot u^1 \cdot \bar{r}_B - \\ & - AT' \cdot BT \cdot CT \cdot \bar{V} + AT \cdot BT' \cdot \bar{V} + AT \cdot BT' \cdot CT \cdot \bar{r}_B + AT \cdot BT' \cdot CT \cdot u^1 \cdot \bar{r}_A - \\ & - AT \cdot BT' \cdot CT \cdot u^1 \cdot \bar{r}_B - AT \cdot BT' \cdot CT \cdot \bar{V} + AT \cdot BT \cdot CT' \cdot \bar{r}_B + AT \cdot BT \cdot CT' \cdot u^1 \cdot \bar{r}_A - \\ & - AT \cdot BT \cdot CT' \cdot u^1 \cdot \bar{r}_B - AT \cdot BT \cdot CT' \cdot \bar{V} - v_Z \cdot \delta_Z \end{aligned} \quad (6.3)$$

7. Tvar třísky

Součástí komplexního přístupu k řešení problémů konstrukce součástí i nástrojů musí být studium tvarů a průřezů třísek při obrábění.

Řešením problematiky tvaru třísek při obrábění čelních ozubených kol odvalovacím frézováním se zabývaly např. práce /14/, /7/ a /10/. Některými otázkami výpočtu průřezu třísek se také zabývala Technische Hochschule v Aachenu /28/. Všechny tyto práce dávají pouze informaci o množství odebírané třísky. Není v nich přesně určen tvar a velikost odebírané třísky. Třísky, které vznikají při obrábění kuželových kol, mají poměrně složité a komplikované tvary. Výpočtem průřezu třísky při frézování soukolí Oerlikon se zabývá práce /22/.

Východiskem řešení je sestavení rovnic popisujících trajektorie jednotlivých břitů nástroje, plochu boku zubu a řezových rovin, ve kterých zkoumáme odebíranou třísku v libovolném okamžiku obrábění. Výsledky řešení jasně a přehledně definují danou třísku z hlediska tvaru i průřezu. V práci /22/ je vytvořena metodika výpočtu průřezu třísky a naznačen způsob výpočtu řezných sil.

7.1. Tříska při obrábění metodou Gleason

Průřez třísky-hrubovací nůž

Pro určení tvaru odebírané třísky je nutné zvolit si vhodnou řeznou rovinu. S ohledem na další způsob zpracování získaných hodnot je za řeznou rovinu zvolena rovina kolmá na směr hlavního řezného pohybu. Její rovnice je vyjádřena vztahem (6.1).

Je třeba zjistit průsečnice řezné roviny (6.1) s plochou nástroje (5.3) resp. (5.32) během obrábění jedné zubové mezery.

Průřez třísky-vnitřní a vnější nůž

Pro určení průřezu třísky vznikajícímu během obrábění těmito noži použijeme řeznou rovinu (6.1). Tvar třísky vymezení průsečnicí plochy nástroje, řezné roviny a průsečnicí plochy boku zubu vytvořeného při hrubování.

7.2. Třísky při obrábění Oerlikon

Třísky, které vznikají při obrábění kuželových kol Oerlikon, mají poměrně složité a komplikované tvary, což je způsobeno několika příčinami:

- jedná se o odvalovací obrábění,
- vyrábí se kuželové ozubení,
- zubová mezera není vytvářena jedním nožem,
- zuby nejsou přímkové.

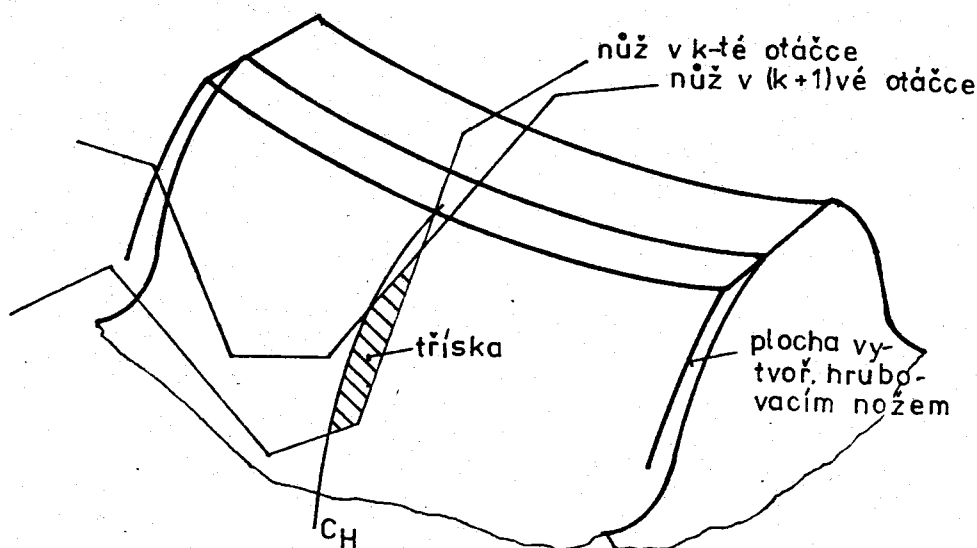
Určení průřezu třísky-hrubovací nůž

Základem řešení tvaru třísek, odebíraných hrubovacím nožem, je výpočet průsečnic drah jednotlivých bodů ostří nožů s vhodně zvolenou řezovou rovinou. V práci /22/ je provedeno odvození rovnice roviny procházející osou frézovací hlavy a v obecné poloze je tato rovina řezu označena Y.

Pro výpočet průřezu třísky musíme zjistit průsečnice roviny Y, procházející osou frézovací hlavy s plochou nástroje a boku zubu. Obecné řešení výpočtu průsečnic je provedeno v /22/. Tvar třísky se bude měnit v závislosti na seřízení hrubovacího nože, ale také na tom, kde tvar třísky budeme zkoumat.

Průřez třísky-vnitřní nůž

Tvar a velikost třísky zkoumáme rovněž v rovině Y. Tvar třísky nám potom v rovině Y vymeží průsečnice l_k plochy K nástroje s rovinou Y pro k-tou a l_{k+1} pro k+1-ní otáčku obrobku a průsečnice c_H plochy boku zubu, vytvořeného hrubovacím nožem, s rovinou Y (obr.7.1.)



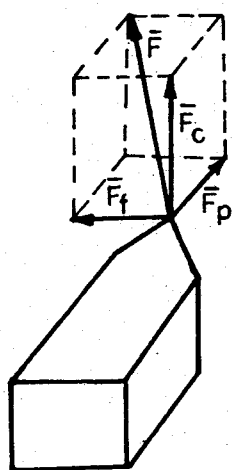
obr. 7.1. [22]

Řešení průřezu třísek pro vnější nůž je ekvivalentní jako pro nůž vnitřní.

8. Řezné síly při obrábění

Aby docházelo k oddělování třísky, jak uvádí /5/, musí na nástroj působit řezná síla jako tvůrce energie potřebné pro uskutečnění procesu obrábění.

Při vnikání břitu nástroje do materiálu klade tento odpor, který musí být překonán řeznou silou. Tím vzniknou aktivní složky řezné síly, které se přímo podílejí na tvorbě a odvedení třísky z místa řezu. Současně se však vytvoří podmínky pro vznik pasivních sil, které tento proces doprovázejí. Aktivní síly působí na čele nástroje, síly pasivní na jeho hřbet. Tyto síly promítáme do tří vzájemně kolmých os (obr.8.1.).



F_c - hlavní složka, působící ve směru hlavního pohybu

F_f - posuvová složka, ve směru osy obrobku

F_p - přísmuvová složka, ve směru radiálním vzhledem k obrobku

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [\text{N}]$$

obr. 8.1. [18]

Z hlediska potřeb praxe je nutno stanovit velikost jednotlivých složek a tím i celkové síly obrábění. To lze provést v zásadě dvojím způsobem a to buď měřením, nebo výpočtem.

Jednoduchý je způsob výpočtu z měrné řezné síly p . Měrnou řeznou sílu lze stanovit buď z tabulek, nebo z doplňkových vzorců sestavených Přikrylem, Zvorykinem nebo Kienzlem.

$$\text{PŘIKRYL : } p = \tilde{c}_{pt}^{x_1} \cdot a^{-x_2} \cdot \delta^{x_3} \cdot 60^{-x_3} \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{ZVORYKIN: } p = \frac{c}{a^u} \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{KIENZLE : } p = p_{1.1} \cdot a^{-u} \quad [\text{MPa}]$$

Z nichž je nejjednodušší a nejpřesnější výpočet podle Kienzleho:

$$p = p_{1.1} a^{-u} \quad [\text{MPa}] \quad (8.1)$$

kde $p_{1.1}$ - měrná řezná síla připadající na průřez třísky

$$s \cdot a = 1.1 = 1 \text{ mm}^2,$$

a - tloušťka odřezávané vrstvy,

u - exponent zjištěný experimentálně.

Výše uvedená rovnice platí, pokud se dá znázornit závislost mezi měrnou řeznou silou p a tloušťkou a /29/ v semilogaritmických souřadnicích lineárně (obr.8.2.). S klesající tloušťkou třísky měrná řezná síla p progresivně roste, protože nástroje méně řezou a více škrabou. To spotřebuje velkou část vynaložené práce. Platí to zvláště u velmi jemného opracování, kde spotřeba práce na jednotku objemu třísek při hlazení a broušení dělá mnohonásobek ve srovnání se soustružením (obr.8.3.). Závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti a úhlu čela je zřejmá z obr.8.4. a 8.5. Vliv průřezu třísky na měrnou řeznou sílu ukazuje obr.8.6.

Pro řeznou sílu dostaneme podle Kienzleho /4/

$$F_C = b \cdot a^{1-u} \cdot p_{11} \quad [N] \quad (8.2)$$

V této rovnici je měrná řezná síla

$$p = \frac{p_{11}}{a^u} \quad [MPa] \quad (8.3)$$

po úpravě

$$F_C = b \cdot a \cdot p \quad [N] \quad (8.4)$$

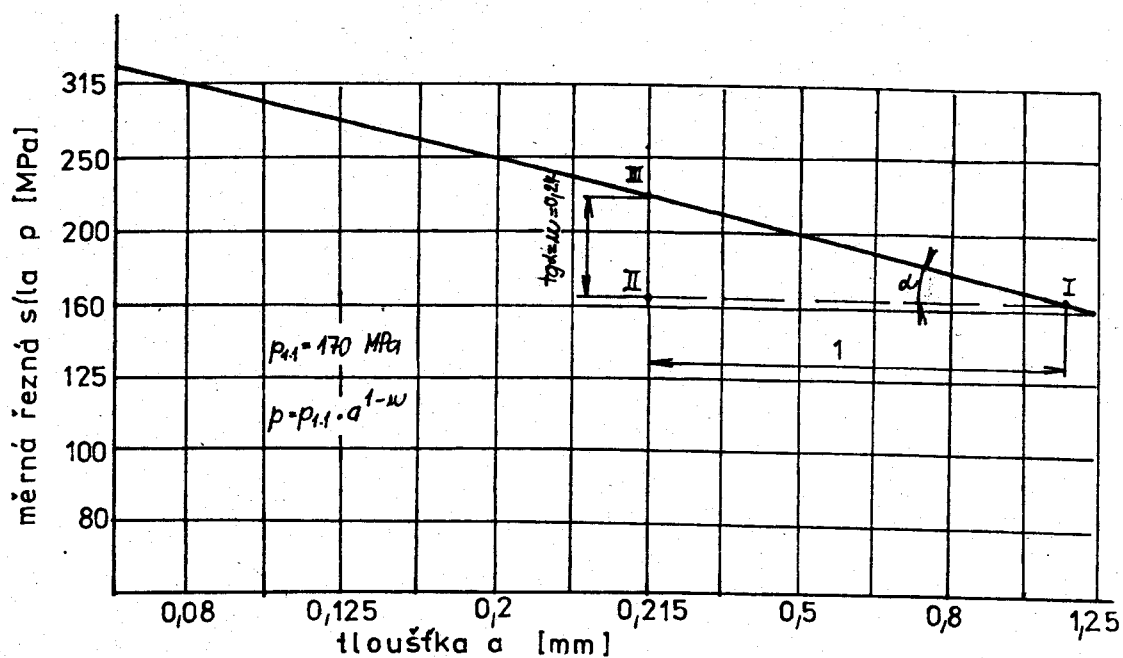
kde b - šířka třísky

a - tloušťka třísky

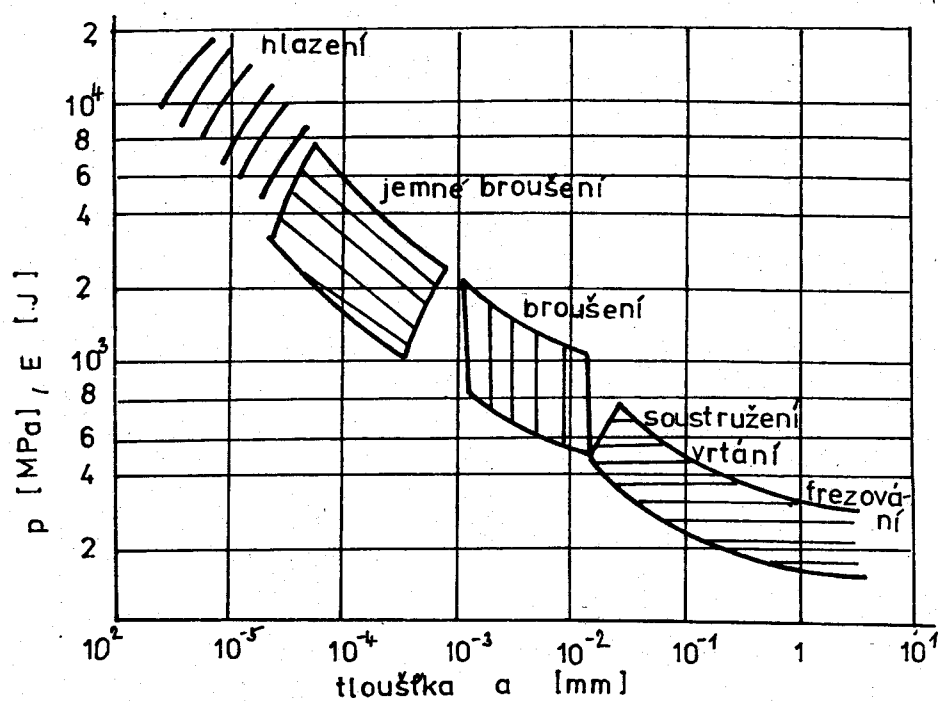
Měrná řezná síla je ovlivňována celou řadou činitelů.

Podle Kienzleho /4/ je to 15 veličin. Z praktické stránky je důležitých 10 veličin, které je třeba zahrnout do výpočtu řezné síly. Jsou to:

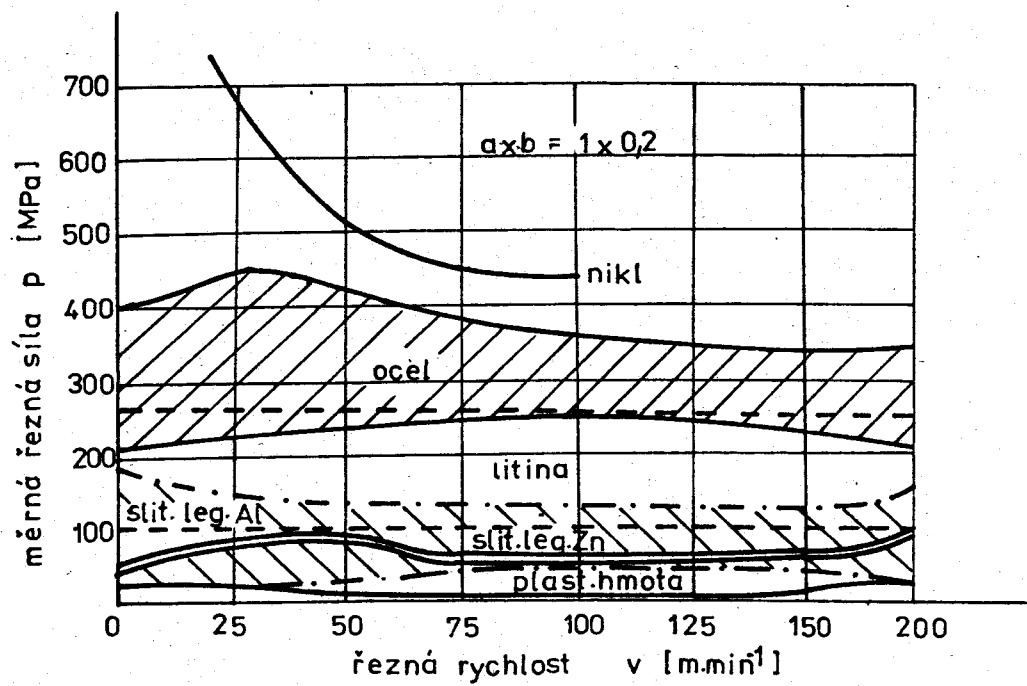
- 1) materiál,
- 2) posuv resp. tloušťka třísky,
- 3) hloubka řezu resp. šířka třísky,
- 4) tvar průřezu třísky,
- 5) úhel čela,
- 6) úhel nastavení,
- 7) řezná rychlost,
- 8) řezný materiál,
- 9) chlazení a mazání,
- 10) otupení ostří.



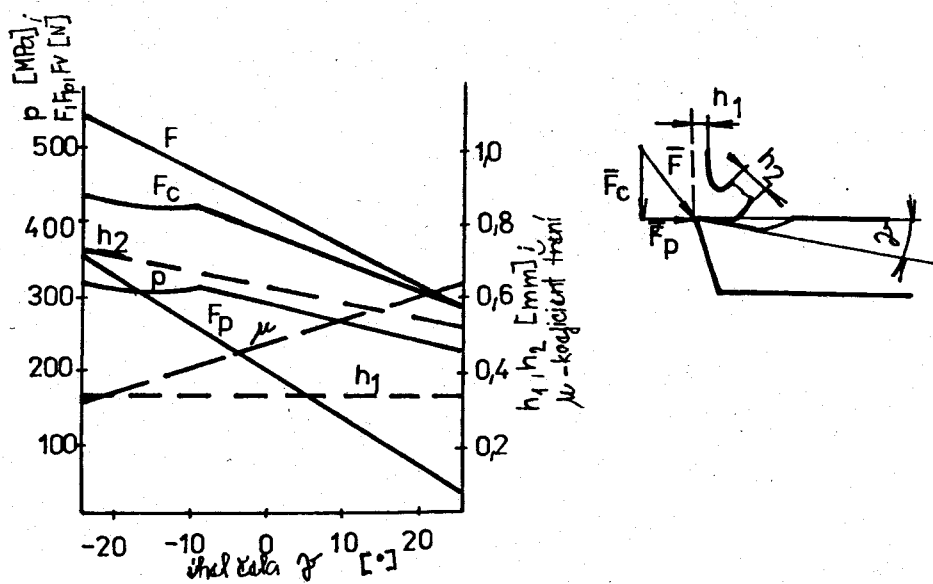
obr. 8.2. [29]



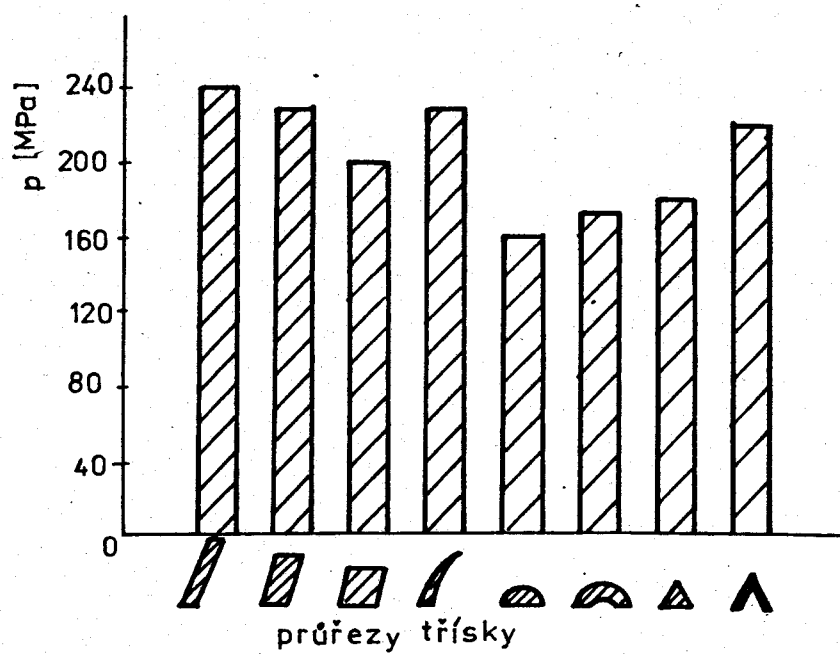
obr. 8.3. [29]



obr. 8.4. [29]



obr. 8.5. [29]



obr. 8.6.[29]

8.1. Řezné síly při frézování

Jednotlivé zuby frézy, které jsou v záběru při frézování, odebírají různě veliký průřez třísky, takže i řezná síla, připadající na jeden zub, je různě veliká. Výsledná síla pak závisí nejen na počtu zubů v záběru, ale i na okamžité poloze zubů frézy vůči obrobku /30/.

Pro válcové frézování platí podle /30/ pro velikost tangenciální síly F_v působící na jeden zub.

$$F_c = p \cdot S = p \cdot B_f \cdot s_z \cdot \sin \psi_F \quad [N] \quad (8.5)$$

p - měrný řezný odpor /MPa/

B_f - šířka frézované plochy /mm/

S - průřez odřezávané vrstvy /mm²/

Celková síla potřebná pro překonání točivého momentu frézy je

$$F_c = c_{F_c} \cdot B_f \cdot s_z^x \sum_1^{z'} \sin^x \psi_{Fi} \quad [N] \quad (8.6)$$

přičemž

$$z' = \frac{\psi_{\max} \cdot z}{2\pi}$$

Točivý moment všech zubů v záběru je

$$M = c_{F_C} \cdot 0,5 \cdot D \cdot B_f \cdot s_z^x \cdot \sum_1^z \sin^x \psi_{Fi} \quad [Nm] , \quad (8.7)$$

c_{F_V} - konstanta,

x - exponent.

Při čelním frézování se určí velikost tangenciální složky řezné síly jako

$$F_{c\psi_F} = p \cdot S_{\psi_F} = p \cdot h \cdot s_z \cdot \sin \psi_F \quad [N] , \quad (8.8)$$

po dosazení vztahu

$$p = \frac{c}{a_u} ,$$

za předpokladu

$$x = 1 - u ,$$

platí

$$F_{c\psi_F} = c_{F_C} \cdot h^y \cdot s_z^x \cdot \sin^x \psi_F \quad [N] , \quad (8.9)$$

dále

$$F_C = c_{F_C} h^y s_Z^x \sum_1^{Z'} \sin^x \psi_F [N], \quad (8.10)$$

přičemž

$$Z' = \frac{\psi_F \cdot Z}{2\pi}.$$

Ostatní složky řezné síly lze také stanovit z experimentálně zjištěných vztahů, z jejich poměru k síle F_v . Tento poměr sil závisí na tom, zda jde o symetrické nebo nesymetrické frézování.

Pro symetrické frézování platí

$$\begin{aligned} F_y &= (0,85 \div 0,95) F_C, \\ F_H &= (0,30 \div 0,40) F_C, \\ F_f &= (0,50 \div 0,55) F_C. \end{aligned} \quad (8.11)$$

Při nesymetrickém frézování protisměrném

$$\begin{aligned} F_y &= (0,45 \div 0,70) F_C, \\ F_H &= (0,60 \div 0,90) F_C, \\ F_f &= (0,50 \div 0,55) F_C. \end{aligned} \quad (8.12)$$

Při nesymetrickém frézování souměrném

$$\begin{aligned} F_y &= (0,90 \div 1,00) F_c , \\ F_H &= (0,15 \div 0,30) F_c , \\ F_f &= (0,50 \div 0,55) F_c . \end{aligned} \quad (8.13)$$

Vliv řezných podmínek na velikost tangenciální složky řezné síly je z části vyjádřen exponenty x a y v rovnicích (8.9) a (8.10). Jedná se o vliv posuvu, tloušťky řezu a hloubky řezu. Vliv řezné rychlosti a úhlu řezu je obdobný jako u soustružení. Pro výpočet výsledné tangenciální řezné síly F_v a řezného výkonu P_{ef} se rovněž používá empirických vzorců odvozených z dynamometrických měření:

$$F_c = c_{F_c} \cdot h^{x_1} \cdot B_f^{x_2} \cdot z \cdot s_z^{x_3} \cdot D^{x_4} \quad [N], \quad (8.14)$$

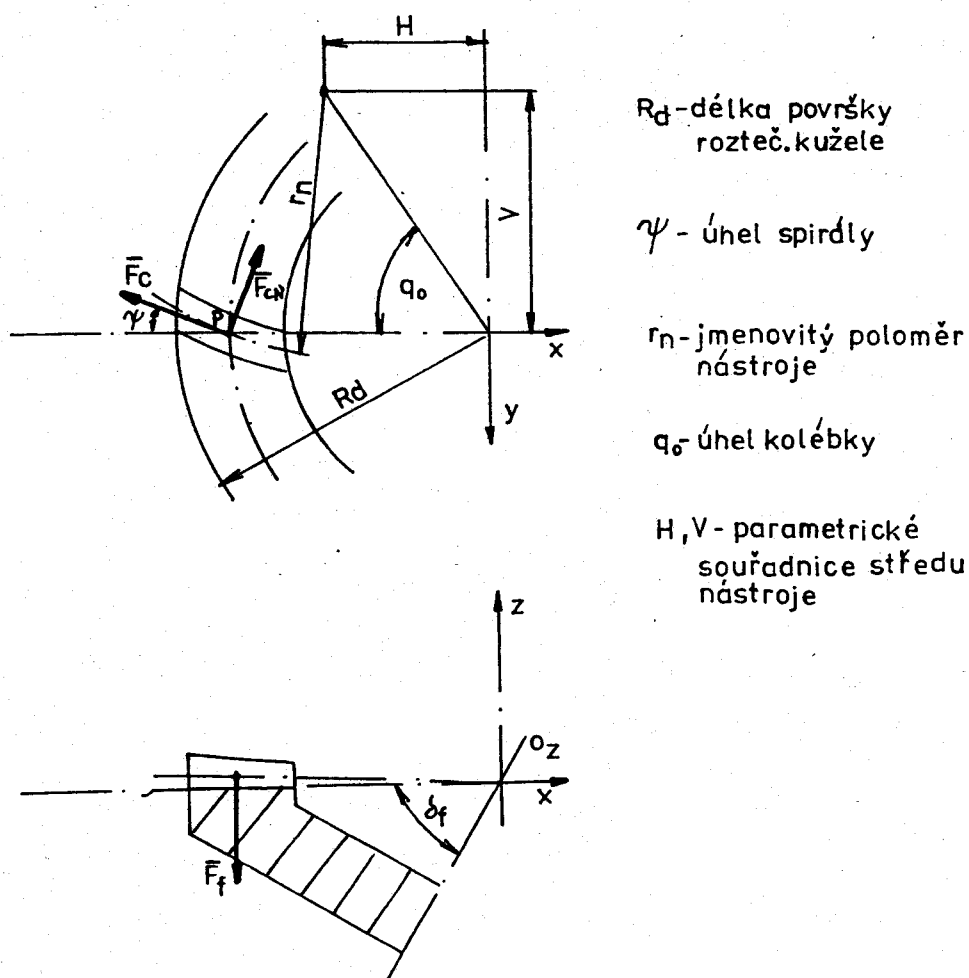
$$P_{ef} = c_p \cdot h^{y_1} \cdot B_f^{y_2} \cdot z \cdot s_z^{y_3} \cdot D^{y_4} \quad [kW]. \quad (8.15)$$

Existuje množství rovnic, které byly získány empiricky. Dosud se nepodařilo nalézt obecný silový zákon, který by platil pro všechny procesy.

Kienzleho vztah je nejúčelnější i z hlediska praxe. Jeho hodnoty pro měrnou řeznou sílu se dají použít nejen pro soustružení, ale i pro ostatní třískové technologie, když bereme v úvahu zvláštnosti těchto technologií.

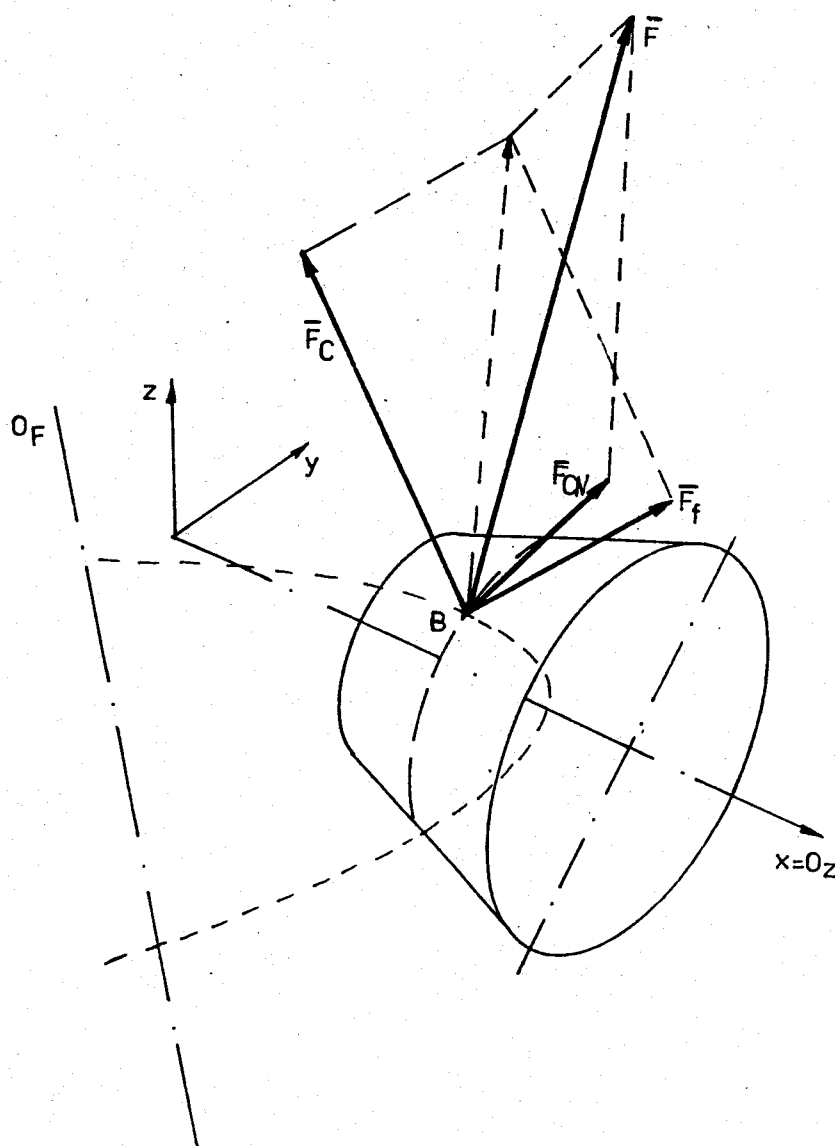
8.3. Řezné síly při frézování ozubených kol se zakřivenými zuby

Při frézování ozubeného kola Gleason odřezává materiál současně několik nožů, a proto je výsledná řezná síla F součtem sil působících na jednotlivé zuby. Poloha složek řezné síly ve směru vektoru rychlosti hlavního řezného pohybu a vektoru rychlosti posuvu je zřejmá z obr.8.7. Složka F_{CN} leží ve směru kolmém na pracovní boční rovinu.



obr. 8.7. [1]

Řezná síla při obrábění ozubených kol Oerlikon je podle /22/ vyjádřena pomocí tří složek, jejichž poloha je určena pohyby při obrábění. Do směru hlavního řezného pohybu je položena složka síly F_C , která je hlavní. V ose, která je určena vektorem posuvné rychlosti, leží složka F_f , kterou označujeme za posuvovou. Zbývající složka řezné síly je kolmá na F_C a F_f a označujeme ji F_{CN} (obr.8.8.).



obr. 8.8. [22]

8.4. Výpočet sil při obrábění metodou Oerlikon a Gleason

Při výpočtu se opět vyjde ze vztahu:

$$F = p \cdot a \cdot b \cdot K_F \quad , \quad (8.16)$$

kde p - je měrný řezný odpor;

$$p = \frac{p_{11}}{a^u} \quad ,$$

b - je šířka třísky ,

a - je tloušťka třísky ,

K_F - je opravný koeficient .

V práci /22/ je odvozen vztah pro výpočet síly na elementu plochy třísky:

$$F = p_{11} \cdot K_F \cdot \Delta b^u \cdot \sum_{i=1}^n S_i^{1-u} \quad (8.17)$$

Výpočet síly F_C provedeme pomocí vztahu (8.17), průřez třísky budeme zjišťovat v rovině kolmé na F_C . Rovnice této roviny je rovněž v práci /22/ odvozena a zní:

$$\bar{v}^0(\bar{X} - \bar{K}_B) = 0 \quad , \quad (8.18)$$

kde $\bar{v}^\circ$ - jednotkový vektor určující směr normály roviny kolmé na hlavní řezný pohyb

$\bar{X}$ - libovolný bod roviny

$\bar{K}_B$ - polohový vektor bodu B ostří nástroje

Pro sílu F_C tedy platí:

$$F_C = K_{FC} \cdot p_{1.1} \cdot \Delta b^u \cdot \sum_{i=1}^n S_i^{1-u} \quad (8.19)$$

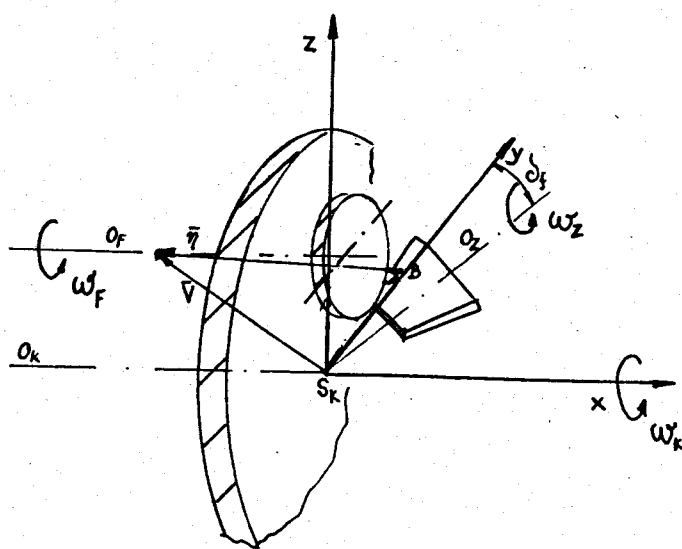
Analogicky lze zjišťovat i velikost sil v ostatních směrech (obr. 8.8.).

Pro výpočet síly F_C při obrábění metodou Gleason vyjdeme ze vztahu (8.19). Rovnice řezné roviny potřebné pro určení průřezu třísky je dána vztahem (6.1).

9. Řešení silových poměrů při frézování kuželových kol Gleason

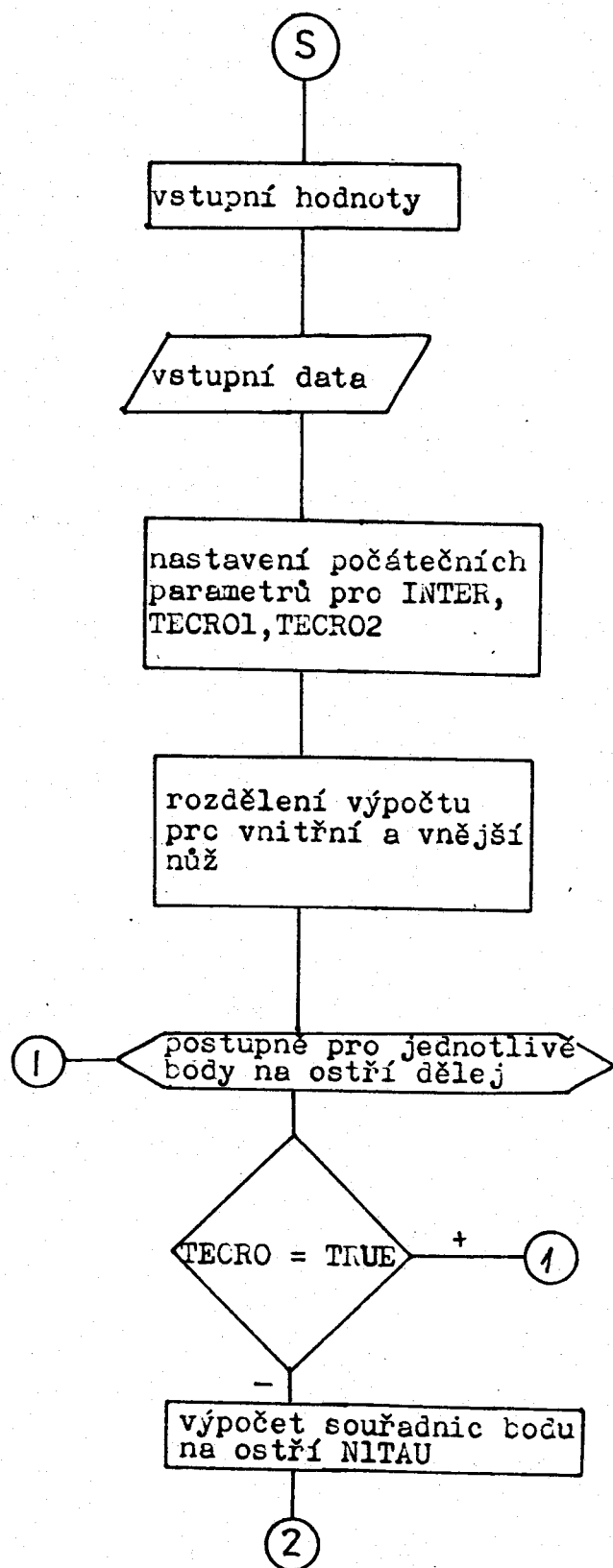
Velikost síly působící na kuželové kolo byla zjišťována při výrobě talířového kola T 148. Talířové kolo se vyrábí metodou SPREAD-BLADE oboustranná. Pastorek T 148 se vyrábí metodou FIXED-SETTING pevné seřízení-jednostranná. V n.p. Praga Hrádek nad Nisou byly zjištěny pro toto soukolí údaje v příl. 5, 6, 7, 8.

Při řešení uvažujeme schéma obrábění podle obr. 9.1.



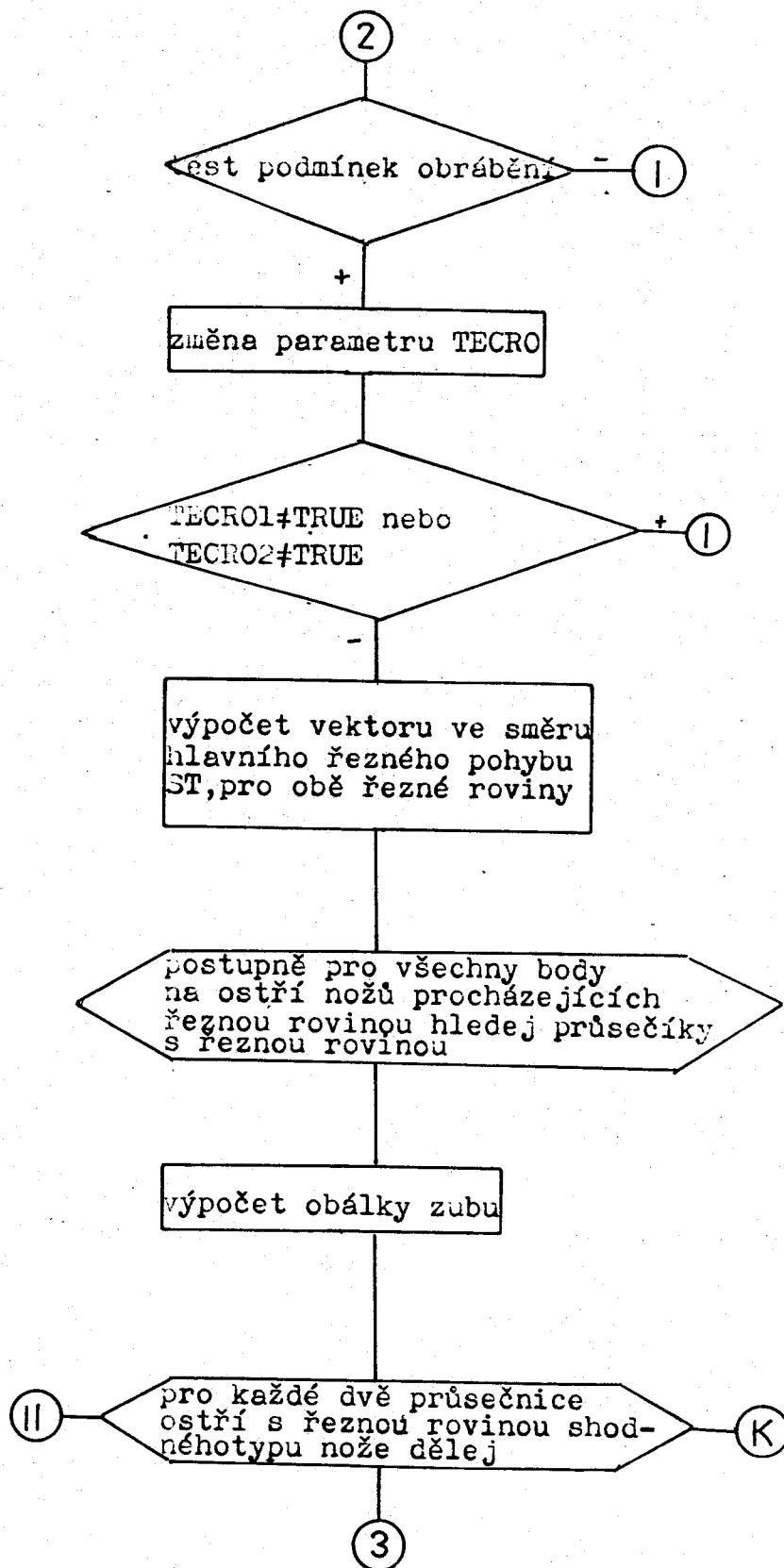
obr. 9.1. [13]

9.1. Vývojový diagram pro výpočet řezné síly F_c a odchylky skutečně vyrobeného boku zubu a obálky zubu (podle LONGA) při dokončování kuželových kol Gleason



kap. 9.2.

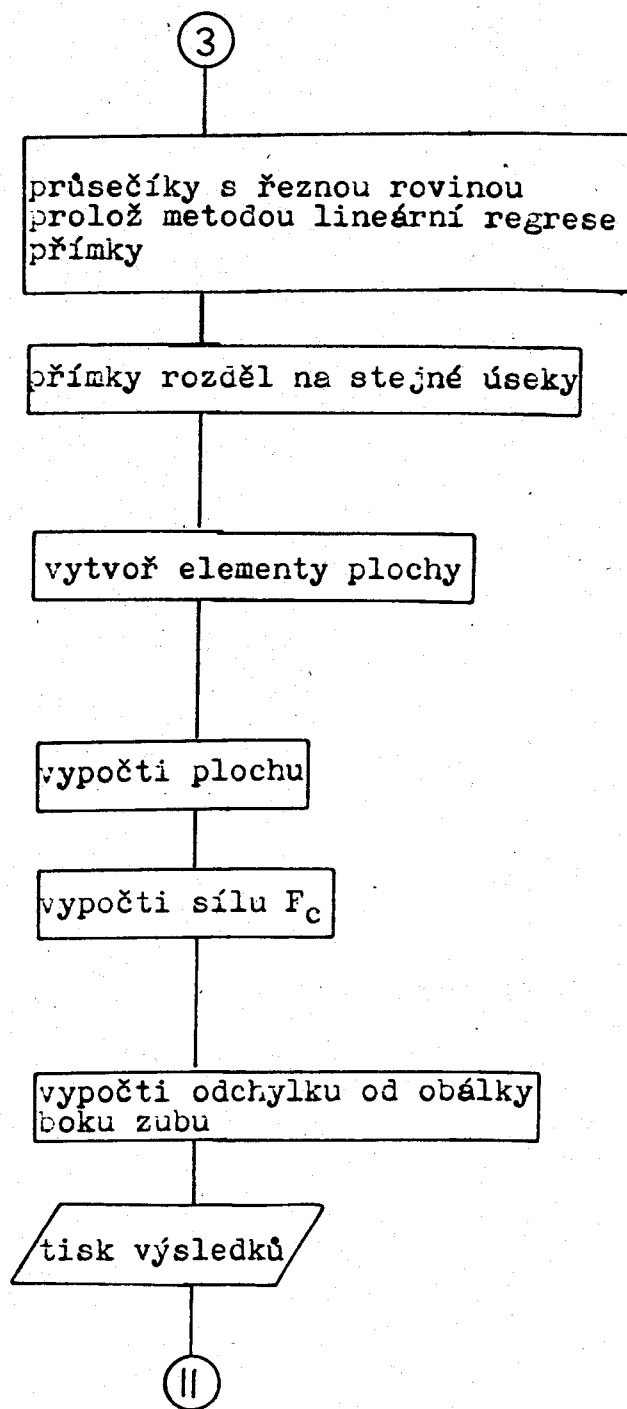
kap. 9.3.



kap.9.4.

kap.9.5.

kap.9.6.



V programu (příl.9) jsou výpočty rozděleny pro vnitřní a vnější nůž tak, jak postupně prochází řeznými rovinami. Přitom jsou respektovány rozdíly, které mezi výpočty pro vnitřní a vnější nůž vznikají.

V této kapitole pro zjednodušení a větší přehlednost byly uvedeny pouze základní postupy při jednotlivých výpočtech. Podrobněji jsou rozebrány v následujících kapitolách a zřejmě jsou z programu (příl.9).

9.2. Rozdělení výpočtu pro vnitřní a vnější nože frézovací hlavy

Při dokončování talířového kuželového kola T 148 frézovací hlavou Duplex 28 nožů, mohou být najednou v záběru maximálně dva nože. Jeden vnitřní a jeden vnější. Proto jsou pro výpočet průřezu třísky zvoleny dvě řezné roviny. V každém okamžiku je tedy v záběru "dvojice" nožů. Každé takové "dvojici" je přiřazen index NUZ. Dále je nutné rozlišit vnitřní a vnější nůž "dvojice". V počátečním kroku předpokládáme, že do první řezné roviny přichází vnitřní a do druhé vnější nůž. Vnitřnímu noži je přiřazen index $II=1$ a vnějšímu $IE=2$. V dalším kroku se změní nejprve index NUZ. Vnitřní nůž přejde do druhé roviny $II=2$. Do první roviny přijde vnější nůž $IE=1$ atd.

Změna indexů probíhá po krocích během obrábění jedné zubové mezery.

V (příl.9) je tato část označena P.I.

9.3. Určení řezných rovin

Pomocí podprogramů pro výpočet vektorů $\vec{V}$ (VYPV), tenzorů $\vec{T}_Z(\omega_Z C)$, $\vec{T}_K(\omega_K C)$, $\vec{T}_F(\omega_F C)(T)$ vytvoříme podmínky pro výpočet souřadnic na ostří nástroje, podle rovnice (5.32), (VYPN1). Poloha bodu na ostří je určena parametrem u^1 . Pro body na ostří v intervalu $u^1 \in \langle 0, 1 \rangle$ hledáme souřadnice a zároveň testujeme podmínky nutné pro obrábění. Vektor bodu ostří podle rovnice (5.32) má souřadnice $K(1), K(2), K(3)$. Musí:

- a) ležet uvnitř obrobku
- b) prořínat bok zubu vytvořený hrubováním

ad a) Na povrchu obrobku si zvolíme dva body, jejichž vzájemná vzdálenost odpovídá vzdálenosti dvou sousedních nožů frézovací hlavy. Jeden z bodů leží na vnějším věnci. Ze známých geometrických parametrů (příl. 5) určíme vzdálenost těchto bodů od osy obrobku O_Z .

RI2 - vzdálenost prvního bodu od O_Z

RE2 - vzdálenost druhého bodu od O_Z

Dále nalezneme vzdálenost (ASKAL) bodu na ostří od osy O_Z .

Aby bod ostří ležel uvnitř obrobku musí platit:

- pro první rovinu $ASKAL < RI2$

- pro druhou rovinu $ASKAL < RE2$

ad b) Vyhrubovaný bok zubu odpovídá tvaru hrubovacího nástroje.

Ve dvou řezných rovinách je tato plocha navzájem pootočena, zároveň se pootáčí i během obrábění.

V rovině $x - z$ podle schématu obrábění (obr. 9.1.) platí pro vyhrubovanou plochu rovnice

$$Z = (\operatorname{tg} 14,5 + C/0,1.0,095)(K(1)-12,18) \quad (9.1)$$

kde - pro vnitřní nůž
+ pro vnější nůž

$C/0,1.0,095$ - představuje pootočení plochy během obrábění
 $K(1)$ - x souřadnice bodu na ostří nástroje v první rovině

Upozorňuji na to, že v programu (příl. 9) platí $Z \equiv Y$.

Při otáčení během obrábění se mění nejen směrnice přímky, představující vyhrubovanou plochu v rovině $x - z$, ale i q (průsečík s osou z). Jestliže známe bod o souřadnicích $/x, 0/$ který leží na přímce, mění se q podle vztahu $q = -k \cdot x$, kde k je směrnice přímky a $x = 12,18$.

Ve druhé řezné rovině je vyhrubovaná plocha v počátečním okamžiku vůči ploše v první rovině pootočená o úhel $\xi = 12,8^\circ$. Pootočení odpovídá posunutí řezných rovin. Platí

$$Z' = (\operatorname{tg} 14,5 + 12,8 + C/0,1.0,095)(K'(1) + 21,06) \quad (9.2)$$

kde $K'(1)$ - x souřadnice bodu na ostří nástroje ve druhé rovině
21,06 - konstanta představující x souřadnici bodu ležícího na přímce $/x, 0/$

Aby bod ostří protínal tuto plochu v rovině $x - z$ přímku musí platit :

- pro první rovinu $K(3) \geq Z$

- pro druhou rovinu $K'(3) \leq Z'$

> - pro vnitřní nůž

< - pro vnější nůž

Pokud jsou splněny alespoň pro jeden z dvojice noží podmínky a, b - jsou nalezeny parametry řezné roviny. Hledání ukončíme v okamžiku, kdy jsou nalezeny parametry pro obě roviny. Známe pak

souřadnice bodu ostří, pro který jsou splněny podmínky a, b a čas (TC1, TC2). V programu označeno P.II.

Určíme vektory (VYST) ve směru hlavního řezného pohybu pro obě roviny podle rovnice (6.3). V programu P.III.

9.4 Průsečnice plochy vytvořené nástrojem s řeznou rovinou

Z předcházející kapitoly máme určeny parametry řezných rovin. Pro další body na ostří nástroje z intervalu $u^1 \in \langle 0, 1 \rangle$,

$C \in \langle 0, T_{c_n} \rangle$, hledáme průsečíky s řeznými rovinami podle (6.1) (VYPXY). T_{c_n} je čas, ve kterém projde řeznou rovinou jeden nůž. V programu je tato část označena P.IV.

Určíme souřadnice bodu na ostří pro dané u^1 a hledáme minimální hodnotu z výrazu

$$(\bar{K}(u^1, C) - \bar{K}(u^1, TC)) \bar{v} = 0 \quad (9.3)$$

pro interval $C \in \langle 0, T_{c_n} \rangle$. Nalezená hodnota představuje průsečík ostří s řeznou rovinou.

Souřadnice průsečíku v rovině řezné určíme

$$X = \bar{K}(u^1, C) \cdot \bar{v}^0$$

$$Z = \bar{K}(u^1, C) \cdot \bar{w}^0$$

kde $\bar{v}^0$, $\bar{w}^0$ jsou jednotkové vektory roviny kolmé na hlavní řezný pohyb a platí pro ně: $\bar{v}^0 = \frac{\bar{V}'}{|\bar{V}'|}$, $\bar{v}^0 \cdot \bar{v} = 0$

$$\bar{w}^0 = \frac{\bar{W}}{|\bar{W}|}, \quad \bar{w}^0 \cdot \bar{v} = 0$$

Takto nalezneme průsečíky všech bodů na ostří nástroje. Průsečíky tvoří průsečnici plochy nástroje s řeznou rovinou. Pro určení průřezu třísky je nutné zjistit jaká část průsečnice se podílí na tvorbě třísky.

Pro jednotlivé průsečíky musí platit

$$K(3) \geq Z$$

kde

> - pro vnitřní nůž

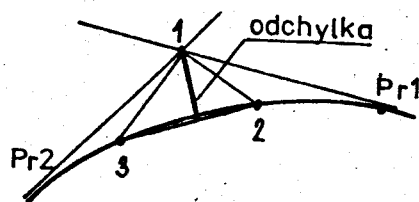
< - pro vnější nůž,

aby se aktivně podílely na tvorbě třísky.

9.5 Odchylka vyrobeného boku zubu a obálky boku zubu

Podle LONGA (5.14) zjistíme souřadnice obálky boku zubu (BODOB) , vytvořené během obrábění jedné zubové mezery . V programu část P.V. Mezi obálkou a skutečnými průsečnicemi nástroje s řeznou rovinou existuje odchylka, jejíž velikost je závislá na rychlosti obrábění. Odchylku představuje vzdálenost mezi průsečíkem dvou následujících průsečnic a obálkou .

Tuto vzdálenost zjišťujeme tak, že postupně hledáme vzdálenosti mezi průsečíkem dvou průsečnic (nalezení průsečíku je vysvětleno v kap 9.5.) a body obálky (VZDOB). Hledáme dvě nejmenší hodnoty. Pomocí takto na lezených dvou bodů obálky sestrojíme trojúhelník (obr. 9.2.) a vypočítáme jeho výšku. Nalezená výška trojúhelníka je hledanou odchylkou .



obr.9.2.

9.6. Výpočet řezné síly F_c

Pro zjištění řezné síly je nejprve nutné určit plochu třísky. průřez třísky určují vždy dvě následující průsečnice téhož typu nože, vnitřního nebo vnějšího. Z výpočtu v kapitole 9.3. známe průsečíky, jež určují průsečnici plochy nástroje s řeznou rovinou a podílejí se aktivně na tvorbě třísky. Metodou lineární regrese (LINREG) proložíme těmito body přímkou. Výpočet je opět rozdělen pro dvě řezné roviny. Najdeme průsečík dvou průsečnic (PRUSEC). Průsečík je koncovým bodem průřezu. Jako první aktivní bod pro určení průřezu třísky zvolíme bod, který ještě není uvnitř plné plochy obrobku, ale je nejbližše vyhrubované ploše při vzdálenosti mezi body na ostrí nástroje při zvoleném kroku v intervalu $u^1 \in (0,1)$. Chyba, která tím vznikne, je při dostatečně malém kroku zanedbatelná.

Části takto omezených průsečnic tvořících třísku rozdělíme pomocí soustředných kružnic (KRUZPR) s konstantním přírůstkem poloměru na určitý počet bodů, od sebe stejně vzdálených. Spojením čtyř odpovídajících bodů vytvoříme element třísky, jehož plochu spočítáme (PLOCHA).

Velikost síly je závislá na ^utlošťce třísky. Vyjdeme-li pro výpočet síly ze vztahu (8.19), můžeme pro výpočet síly použít plochu třísky, kterou tvoří součet ploch elementů třísky.

Na závěr vytiskneme velikost síly F_c a velikost odpovídající odchylky vždy pro obě řezné roviny.

Závěrečná část programu je označena P.VI. Názvy v závorkách označují vždy tu část programu, která se konkrétně vztahuje k popsanému problému.

10. Závěr

V diplomové práci byly v úvodní teoretické části (kap.2. - 8.) zpracovány otázky týkající se obrábění tvarově složitých ploch se zaměřením na průřez třísky a síly vznikající při obrábění kuželových kol se zakřivenými zuby.

V další části byly vytvořeny algoritmy pro výpočet průřezu třísky, síly ve směru hlavního rezného pohybu a algoritmus pro zjištění odchylky skutečně vyrobeného boku zubu a obálky boku zubu při dokončování kuželových kol Gleason. Podle algoritmu byl sestaven vývojový diagram (kap. 9.1.) a program (příl. 9).

Program zpracovaný v jazyce FORTRAN 77 byl formálně odladěn na počítači SM 1420 ve Výzkumném ústavu pro hnědé uhlí v Mostě. Vzhledem k tomu, že problematika řešená v diplomové práci vyžaduje poměrně složité matematické aplikace a programové řešení je náročné jak věcně, tak časově, nebylo možné v době vymezené ke zpracování diplomové práce odladit program na konkrétním případě. Pro dořešení automatizovaného výpočtu řezných sil a odchylky obrábění a jeho uplatnění v praxi bude potřebné provést odladění programu pro konkrétní vstupní údaje. Výsledky výpočtu umožní volit vhodné řezné podmínky se zřetelem na optimální namáhání nožů frézovací hlavy a požadovanou přesnost boku zubu.

Použitá literatura

- /1/ ALI EL-CHEIKH YOUSSEF: Měření řezných sil při frézování ozubených kol Gleason. (Diplom.práce). Liberec 1984-VŠST. Fakulta strojní.
- /2/ BUDINSKÝ, B.-KEPR, B.: Základy diferenciální geometrie s technickými aplikacemi. 1.vyd. Praha. 1970.
- /3/ ČERNOCH, S.: Strojně technická příručka, 13.vyd., Praha SNTL, 1977.
- /4/ DEGNER, LUTZE, SMEJKAL: Spanenge Formung, VEB Verlag Technik Berlín, 1987.
- /5/ DRÁB, V.: Technologie I, skriptum VŠST Liberec, Liberec 1979.
- /6/ EDER, E.: Berechnung S Verfahren zur Schnittkraftbestimmung bei Fräsanbliten. "Maschinenmark". 1984. 90. No 95, 2 307-2 309.
- /7/ KARPÍŠKOVÁ, M.: Záběrové pole a tříska při odvalovacím frézování. (Diplom.práce). Liberec 1976-VŠST. Fakulta strojní.
- /8/ KIENZLE, O.-VIKTOR, H.: Spez, Schnittkräfte bei der Metallbearbeitung, Werkstattstechn. u. masch.-Bau 47(1957).
- /9/ KILČEVSKIJ, N.A.: Základy tenzorového počtu. 1.vyd. Praha. 1956.
- /10/ KLUBÍČKOVÁ, M.: Analytické určení průřezu třísky při odvalovacím frézování. (Diplom.práce). Liberec 1977-VŠST. Fakulta strojní.
- /11/ KVAPIL, R.: Konstrukční a technologické parametry odvalovacích fréz. (Kandidát.pr.). Liberec 1979-VŠST. Fakulta strojní.

- /12/ LITVIN, F.L.: Opredelenije ischodnych parametrov i korektur dla nich pri narezanii koničeskich koles s krugovymi zubjami. Vsb. "Teoria peredač v mašinach", Izd.-vo "Mašinostrojenie" 1966.
- /13/ LONG, B.T.: Obecná teorie vytváření povrchových ploch součástí obráběním s aplikacemi na prostorová ozubení pomocí samočinného počítače. (Disertační práce). Liberec 1977-VŠST. Fakulta strojní.
- /14/ MITROVIĆ, R.: Sile rezanja pri odvalnom glodanju, 1. vyd., Kragujevac, 1974.
- /15/ NAKAYMA, K.: Chip control in metal cutting. "Bull. Jap. Soc. Precis. Eng.", 1984, No 2, 97-103.
- /16/ NOVOTNÝ, P.: Výpočet výchozího povrchu odvalovací frézy na číslicovém počítači. (Diplom. pr.). Liberec 1978-VŠST. Fakulta strojní.
- /17/ OANCEA, N.-CONSTANTIN, E.: Etude comparative du chargement des dents des fraises h lico dales-module. An. Univ. Galati. Mec. si constr. mas, 1986, 4 No 5, 25-31.
- /18/ PAPEŽ, K.: Měření řezných sil při soustružení. 1971. Strojírenství. Roč. 21. Č 12. Str. 739-746.
- /19/ PAVLÍČEK, J.: Výchozí povrch odvalovacích fréz pro profily s kruhovými oblouky. (Diplom. pr.). Liberec 1981-VŠST. Fakulta strojní.
- /20/ PAZOUR, I.: Vyšetřování výchozího povrchu odvalovacích fréz. (Diplom. pr.). Liberec 1977-VŠST. Fakulta strojní.
- /21/ PROCHÁZKA, J.: Technicko-ekonomické porovnání zkl. metod výroby kuželových kol se zakřivenými zuby-Gleason Helixform, Oerlikon, Klingelnsberg, Sb. přednášek z Celostátní konference o nových směrech v konstr., nástrojích,

výr. a měř.ozub. kol,III.část, str.95,1969.

- /22/ PRŮŠEK,A.: Průřezy třísek při frézování soukolí Oerlikon.(Diplom.práce).Liberec 1980-VŠST.Fakulta strojní.
- /23/ RADZEVICH,S.P.: Sposob obrabotki slozhnykh povërchnostěj. Dneprodzerž.in.-t.A.S.133 1617, Opubl. v B.I.,1987, No31.
- /24/ RODIN,P.R.: Základy teorie navrhování řezných nástrojů. Praha,SNTL/SVTL 1963.
- /25/ RODIN,P.R.: Osnovy formoobrazovaniya povërchnostěj rezaniyem.Kijev,Višša škola 1977.
- /26/ SILKIN,B.P.-STROŠKOV,V.V.: Obrabotka koničeskikh koles dvuchstoronimi zuboreznymi golovkami."Mašinostroitel". 1985.No 9,25.
- /27/ SMOLNIKOV,N.J.-NAROŽNICH,A.A.: K voprosu teoretičeskogo opredelenija sil dejstvujuščich v procese nesvobodnogo rezaniya.Volgogr.Politechn.in.-t.9.sv.,Volgograd,1987.
- /28/ SULZER,G.: Bestimmung der Spannungsgurschnitte beim Wälzfräzen,Ind.-Anz.,1974 96.No 12.
- /29/ VIEREGGE,G.: Zehspannung der Eisenwerkstoffe,2.vyd., Verlagstahleisen M.B.H.,Düsseldorf,1970.
- /30/ VIGNER,M.-PŘIKRYL,Z.: Obrábění,1.vyd.,Praha SNTL,1984.

Seznam příloh :

1. Stroje na výrobu ozubení Gleason
2. Výpočet základních rozměrů ozubení Gleason
3. Stroje na výrobu eloidního ozubení
4. Výpočet základních rozměrů ozubení Oerlikon
5. Geometrické parametry ozubení
6. Řezné podmínky pro dokončování talířového kola Gleason
a pastorku T 148
7. Hrubovací hlava Triplex pro talířové kolo T 148
8. Dokončovací hlava Duplex pro talířové kolo T 148
9. Program pro dokončování kuželových kol Gleason

Diplomová práce byla vypracována v souladu se zadáním a po dohodě s vedoucím diplomové práce s. ing. Alešem Průškem. Pokládám za milou povinnost vyslovit poděkování vedoucímu diplomové práce za cenné připomínky a odborné rady ke způsobu zpracování a náplni práce.

Dále děkuji s. ing. V. Kracíkovi, CSc. z KTK VŠST Liberec za konzultace při zpracování matematických aplikací v teoretické části diplomové práce, s. Wittekovi z n.p. PRAGA Hrádek nad Nisou za ochotu a pomoc při shromažďování podkladů pro diplomovou práci a s. ing. J. Stočesovi, CSc. z VÚHU Most za pomoc při zpracování programu.

Alena Slavová

p ř í l . 1 . Stroje na výrobu ozubení Gleason / 3 /

Země	U.S A ⁺					
Typ stroje	3	106 108	8	112	No 11	15
Max.průměr rozteč. kružnice/max.a min. p pro $\gamma = 30^\circ$	81/1:1 112,5/1:4	152/1:1 216/1:10	203/1:1 279/1:6	267/1:3 267/1:10	394/1:1 330/1:8	325/1:1 455/1:8
Max.a min. délka površky zubů kužele	57 0	131	143 0	165 133	165	228
Max.čelní modul	2,1	6,35	6,35	10,2	7,25	10
Max.šířka ozubení	16	32	38	41	44	44
Max.a min.počet zubů	80 8	175 5	60 7	150 20	75 30	100 5

Země	USA ⁺			SSSR			NDR
Typ stroje	No16 H	116 118	No 26 No 28	523 A	525	528 C	ZFWKKW
Max.průměr roz- teč.k./max.a min.p pro $\gamma = 30^\circ$	323/1:1 457/1:10	324/1:1 559/1:12	591/1:1 838/1:10	81/1:1 113/1:4	350/1:1 500/1:10	600/1:1 800/1:10	323/1:1 457/1:1
Max.a min.délka površky zubů kužele	230 0	230 0	419 0	57 0	225 0	420 0	230 0
Max.čelní modul	10	12,7	16,9	2,5	10	15	10
Max.šířka ozu- bení	65	70	102	16	65	100	65
Max.a min.počet zubů	100 5	150 5	200 5	80 8	110 5	100 4	100 5

+ Na strojích zakončených číslicí 3 je možno vyrábět Formate.

	Pastorek	Kplo
Zvolené hodnoty		
Počet zubů	z_1	z_2
Čelní modul	m_t	
Šířka ozubení	$b < 10 m_t$	
Úhel sklonu zubu	γ	
Hloubka záběru	$h_k = 1,7 m_t$	
Výška zubu	$h = 1,888 m_t$	
Roztečný průměr na vnějš. konci	$D_1 = z_1 m_t$	$D_2 = z_2 m_t$
Roztečný úhel	$tg \delta_1 = \frac{z_1}{z_2}$	$\delta_2 = 90^\circ - \delta_1$
Vnější kuželová vzdálenost	$R_d = \frac{D_2}{2 \sin \delta_2}$	
Obvodová rozteč na vnějš. konci	$t_t = m_t \pi$	
Výška hlavy	$h_{a1} = h_k - h_{a2}$	$h_{a2} = m_t \left(0,46 + \frac{0,39}{(z_1/z_2)^2} \right)$
Výška paty	$h_{f1} = h - h_{a1}$	$h_{f2} = h - h_{a2}$
Hlavová vůle	$c_a = h - h_k$	
Úhel paty	$tg \nu_{f1} = h_{f1} / R_d$	$tg \nu_{f2} = h_{f2} / R_d$
Hlavový úhel	$\delta_{a1} = \delta_1 + \nu_{f1}$	$\delta_{a2} = \delta_2 + \nu_{f2}$
Patní úhel	$\delta_{f1} = \delta_1 - \nu_{f1}$	$\delta_{f2} = \delta_2 - \nu_{f2}$
Hlavový průměr na vnějš. konci	$D_{a1} = D_1 + 2 h_{a1} \cos \delta_1$	$D_{a2} = D_2 + 2 h_{a2} \cos \delta_2$
Vzdál. vrcholu rozteč. kužele a nejvzd. bodu ozub.	$k_1 = \frac{D_2}{2} - h_{a1} \sin \delta_1$	$k_2 = \frac{D_1}{2} - h_{a2} \sin \delta_2$
Součinitel záběru krokem	ϵ_k	
Součinitel záběru profilu	ϵ_p	

p ř í l . 3 .Stroje na výrobu eloidního ozubení / 3 /

	[mm]	Spiromatic1	Spiromatic2	Spiromatic3
Max.průměr roztečné kružnice		350	540	700
Max.a min.délka površky rozteč. kužele		175	280 60	330
Max.a min.čelní modul		3 ÷ 10	2,75 ÷ 13,6	5 ÷ 15,5

p ř í l . 4 . Výpočet zákl. rozměrů ozubení Oerlikon / 3 /

Volené hodnoty	Pastorek	Kolo
Počet zubů	z_1	z_2
Čelní modul	m_t	
Úhel sklonu zubu ve výpočtovém bodě	ψ	
Roztečný průměr	$D_1 = m_t z_1$	$D_2 = m_t z_2$
Počet zubů plochého kola	$z_d = \sqrt{z_1^2 + z_2^2}$	
Roztečný úhel	$\sin \delta_1 = z_1 / z_d$	$\sin \delta_2 = z_2 / z_d$
Vnější kuželová vzdálenost	$R_d = D_2 / 2 \sin \delta_2$	
Šířka ozubení	$b \sim 0,28 R_d$	
Výpočtová kuželová vzdálenost	$R_{ds} = R_d - 0,415 b$	
Vnitřní kuželová vzdálenost	$R_i = R_d - b$	
Normální modul ve výpočtovém bodě	$m_p = 2(R_d / z_d) \cos \psi$	
Nekorigovaná výška hlavy	$h_a = m_p$	
Nekorigovaná výška paty	$h_f = 1,15 h_a + 0,35$	
Max. výška paty zubu pastorku	$h_{f'} = R_i \operatorname{tg} \delta_1 \frac{\sin^2 \delta_1}{\cos^2 \psi} + 0,75 r_{kw}$	
Korigovaná výška hlavy	$h_{a1} = h_a + x m$	$h_{a2} = h_a - x m$
Korigovaná výška paty	$h_{f1} = h_f - x m$	$h_{f2} = h_f + x m$
Korekce	$x m = h_f - h_{f'}$	
Součinitel záběru profilu	ϵ_p	
Součinitel záběru krokem	ϵ_k	

p ř í l . 5 . Geometrické parametry ozubení

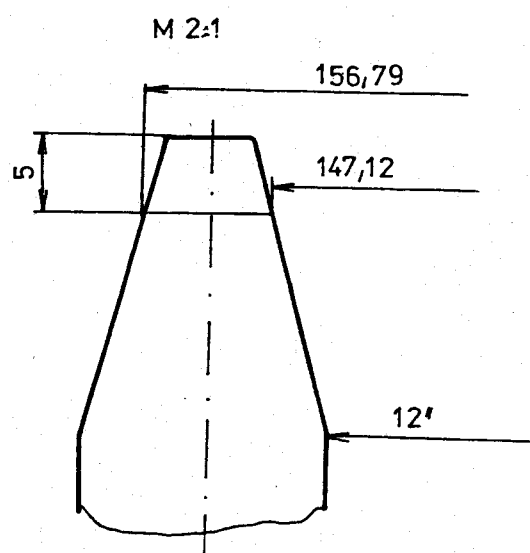
	Pastorek	Kolo
Počet zubů	$z_1 = 13$	$z_2 = 44$
Vnější čelní modul	$m_t = 9,0$	
Šířka ozubení	$b = 47$	
Hloubka záběru zubů	$h_k = 15,3$	
Celková hloubka z.	$h = 16,99$	
Úhel záběru	$\alpha = 14^\circ 30'$	
Roztečný průměr	$D_1 = 117$	$D_2 = 396$
Úhel roztečného kužele	$\delta_1 = 16^\circ 28'$	$\delta_2 = 73^\circ 32'$
Vnější kuželová vzdálenost	$R_d = 206,46$	
Hlava zubu	$h_{a1} = 10,89$	$h_{a2} = 4,41$
Pata zubu	$h_{f1} = 6,10$	$h_{f2} = 12,58$
Hlavová vůle	$c_a = 1,69$	
Úhel paty zubu	$\gamma'_{f1} = 1^\circ 41'$	$\gamma'_{f2} = 3^\circ 29'$
Úhel hlavového kužele	$\delta_{a1} = 19^\circ 29'$	$\delta_{a2} = 74^\circ 45'$
Úhel patního kužele	$\delta_{f1} = 14^\circ 47'$	$\delta_{f2} = 70^\circ 03'$
Vnější hlavový průměr	$D_{a1} = 137,9$	$D_{a2} = 398,5$
Vzdálenost hrany	$H_{x1} = 194,91$	$H_{x2} = 54,27$
Úhel spirály	$\gamma\psi = 28^\circ 50'$	$\gamma\psi = 28^\circ 50'$
Úhel os	$\xi = 90^\circ$	
Smysl spirály	(levý) pravý	(pravý) levý

p ř í l . 6 . Řezné podmínky pro dokončování talířového kola a pastorku Gleason T 148

Řezné podmínky	Kolo		Pastorek	
	hrubování	hlazení	hrubování	hlazení
i	44	44	13	13
v [m.min ⁻¹]	34	43	38	43
n [ot.min ⁻¹]	35,5	45	40	45
t [s.zub.mezeř ⁻¹]	28	36	65	65
Použité stroje				
	ZFKK500x10	ZFTKK 500x10	ENIMS 528	ZFTKK 500x10

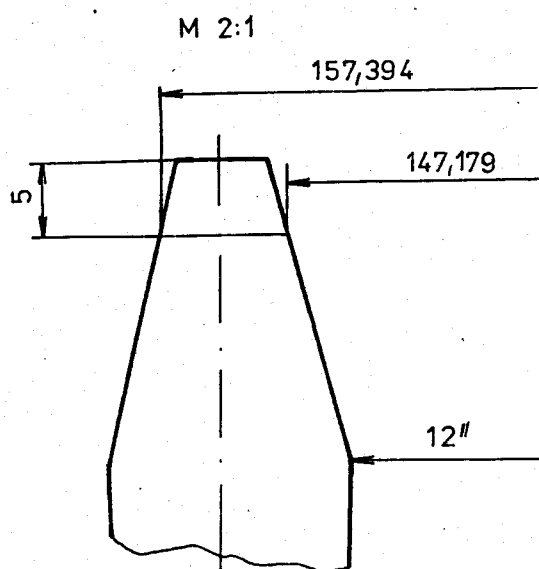
p ř í l . 7 . Hrubovací hlava Triplex pro talíř.kolo T148

Počet nožů	36
Střední rozpichovací	18
Vnitřní	9
Vnější	9
Umenovitý průměr	12
Označení nožů	44°30' - N - 450'

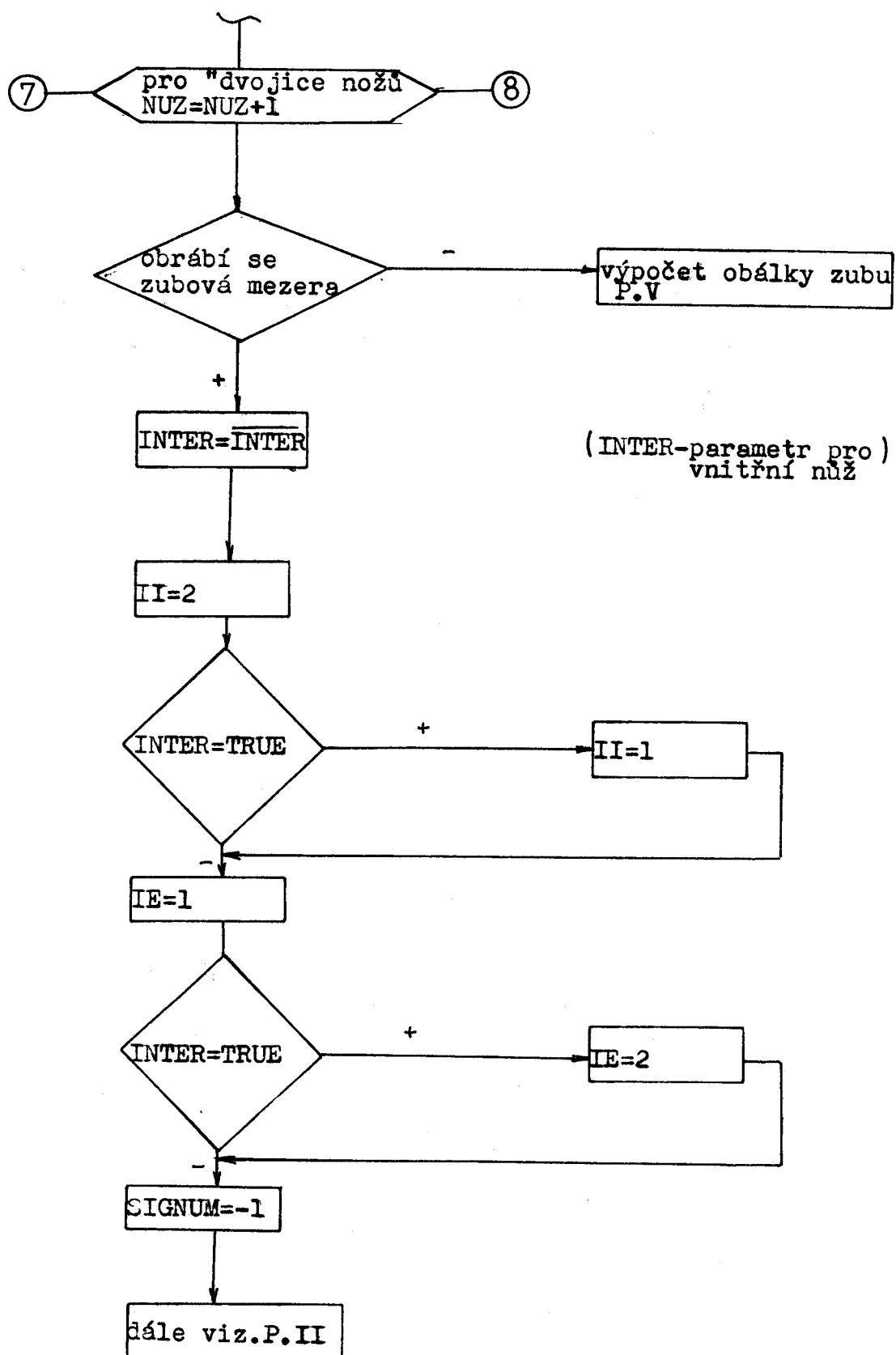


p ř í l . 8 . Dokončovací hlava Duplex pro talíř.kolo T148

Počet nožů	28
Vnitřní	14
Vnější	14
Jmenovitý průměr	12 "
Označení nožů	1430'x1½-M

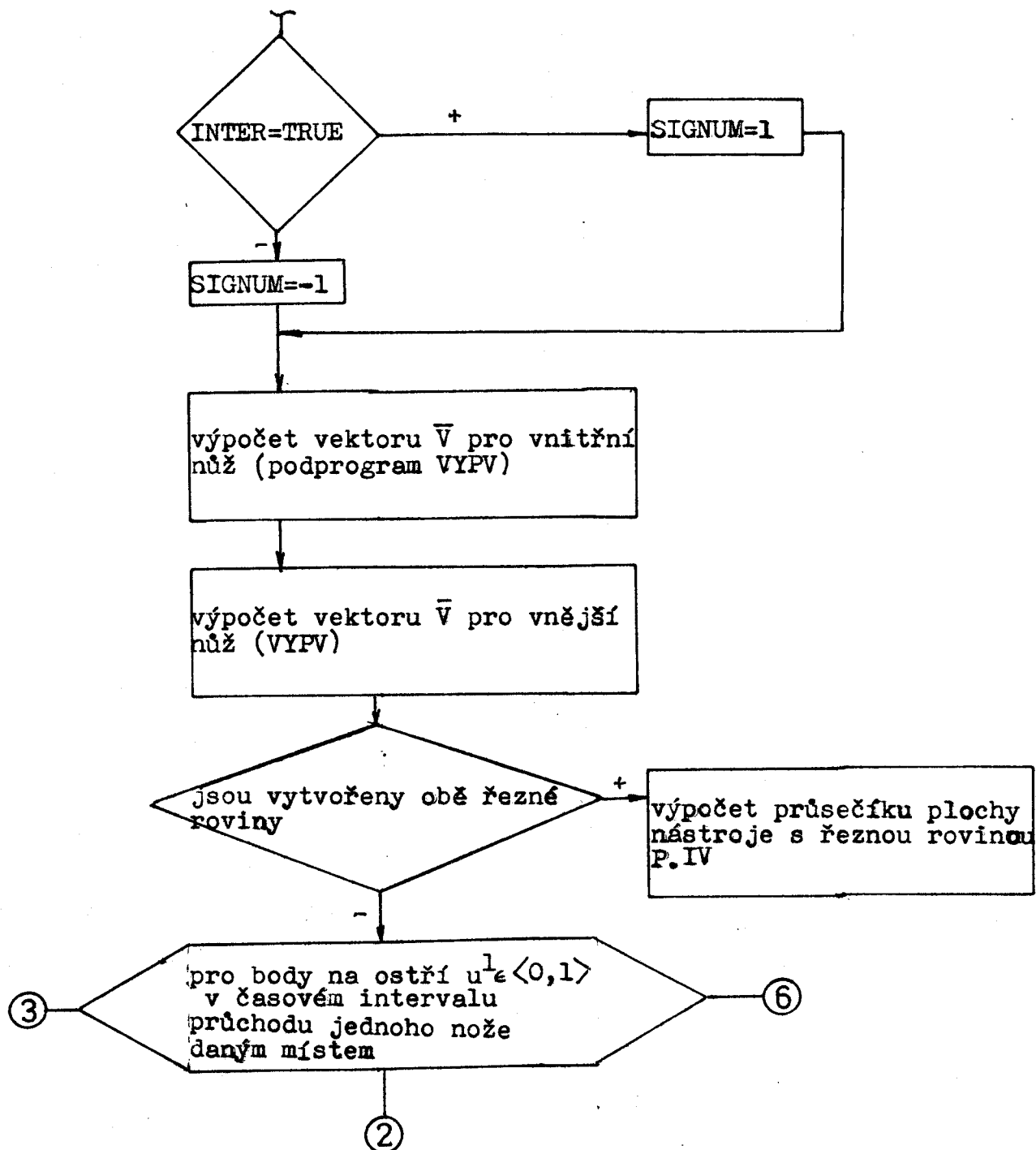


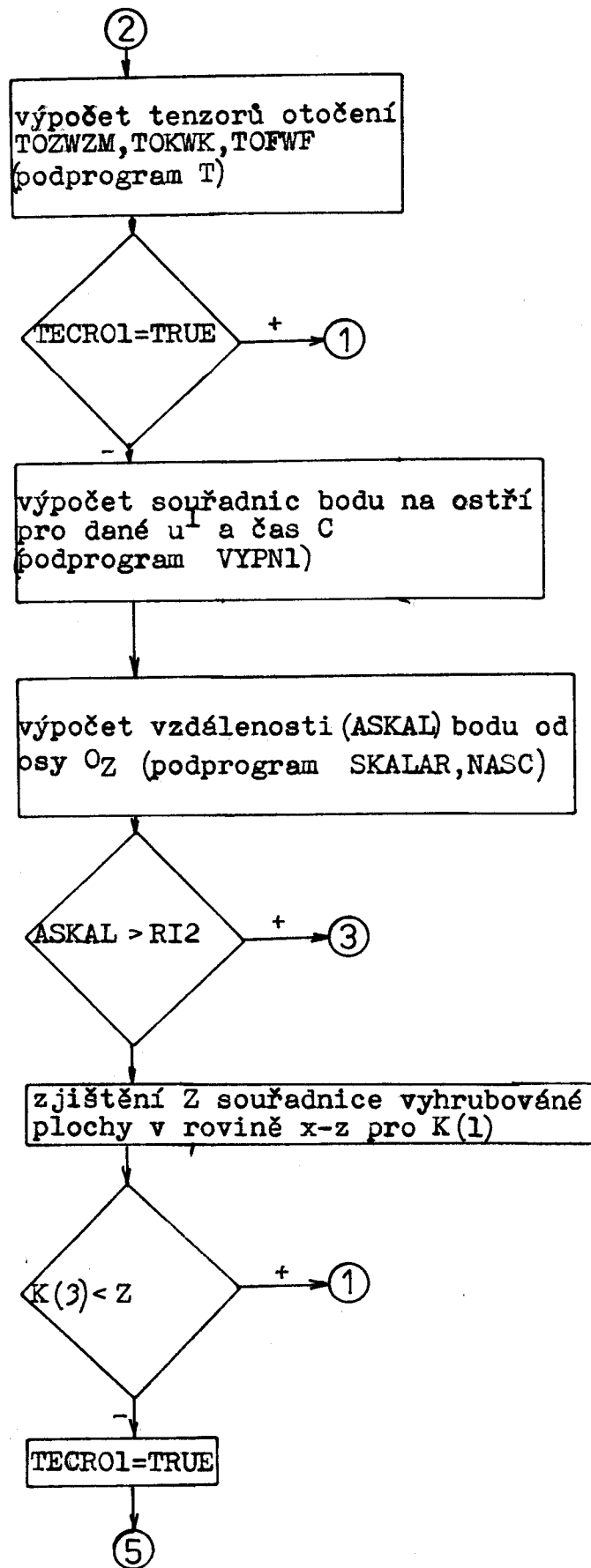
p ř í l . 9a. Vývojový diagram části programu P.I

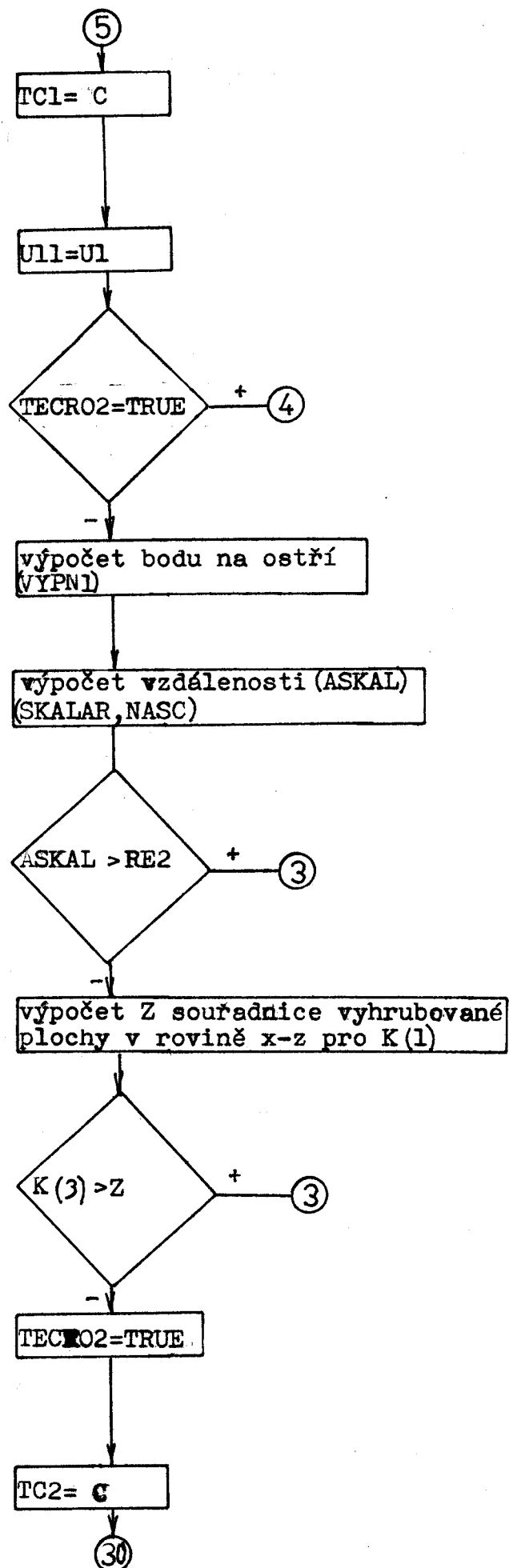


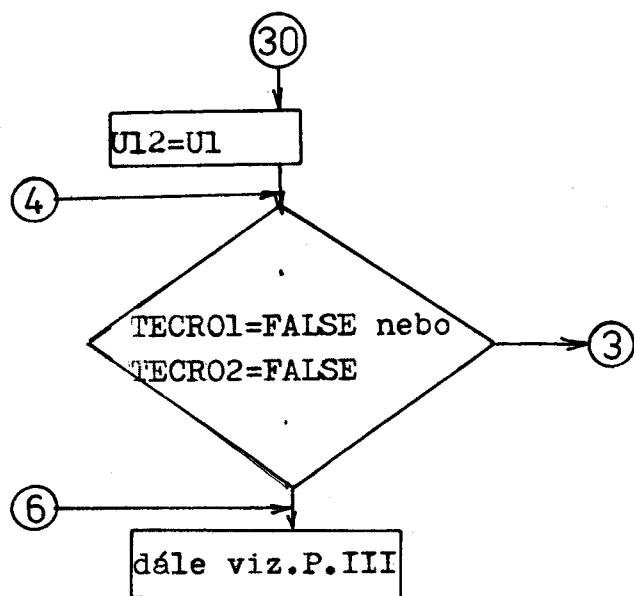
p ř í l . 9b.Vývojový diagram části programu P.II

Vektor $\bar{V}$ z počátku souřadného systému do vrcholu kužele vytvořeného prodlouženým ostřím nástroje používaný při výpočtu má souřadnice $\bar{V} = (r_n \cdot \cotg \psi, \sqrt{A - r_n \cdot \sin \psi} + r_n^2 \cdot \cos^2 \psi \cdot \cos \tau, \sqrt{A - r_n \cdot \sin \psi} + r_n^2 \cdot \cos^2 \psi \cdot \sin \tau) / 13 /$

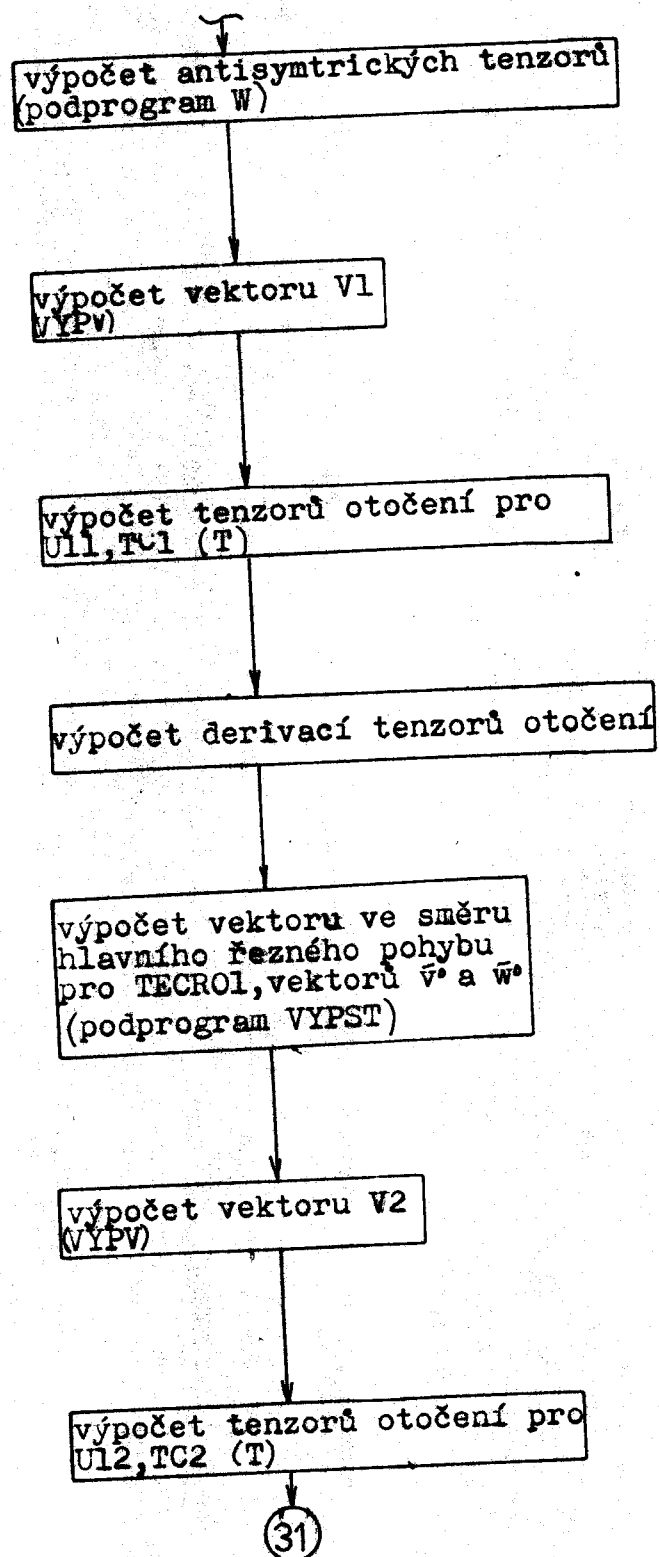








p ř í l . 9c. Vývojový diagram části programu P.III



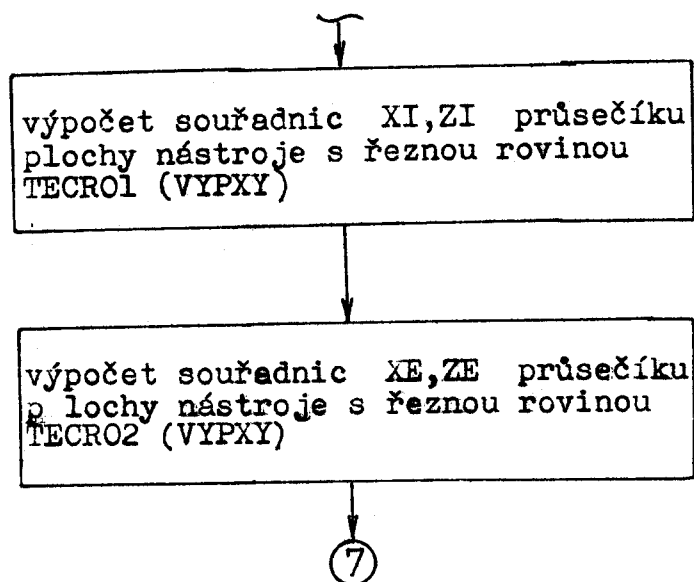
31

derivace tenzorů otočení

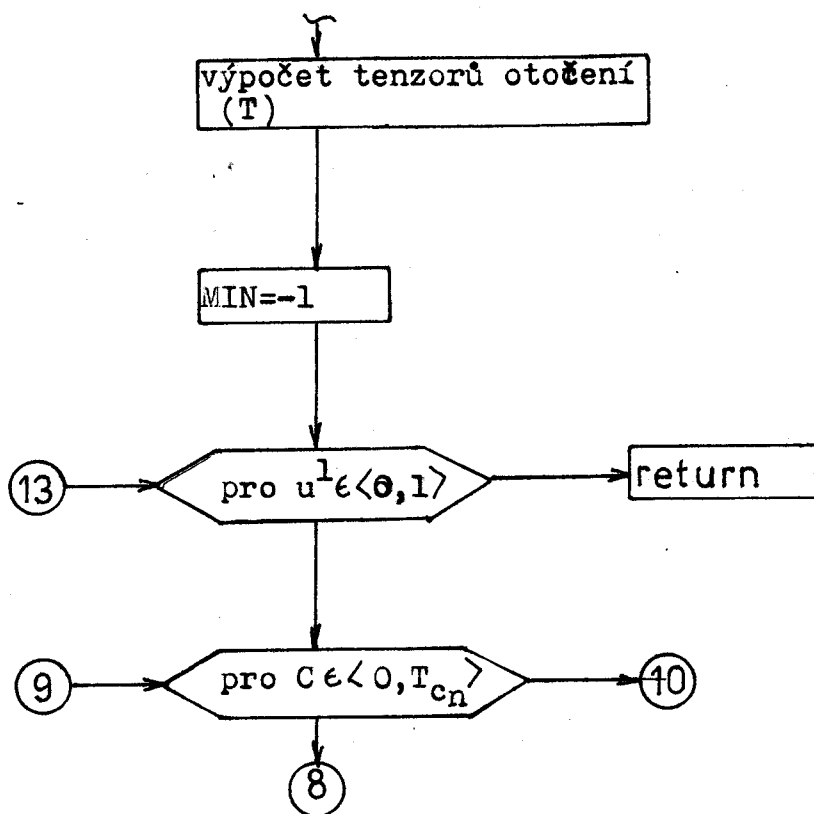
výpočet vektoru ve směru hlavního
řezného pohybu pro TECRO2, vektory
 $\vec{v}$ a $\vec{w}$ (VYPST)

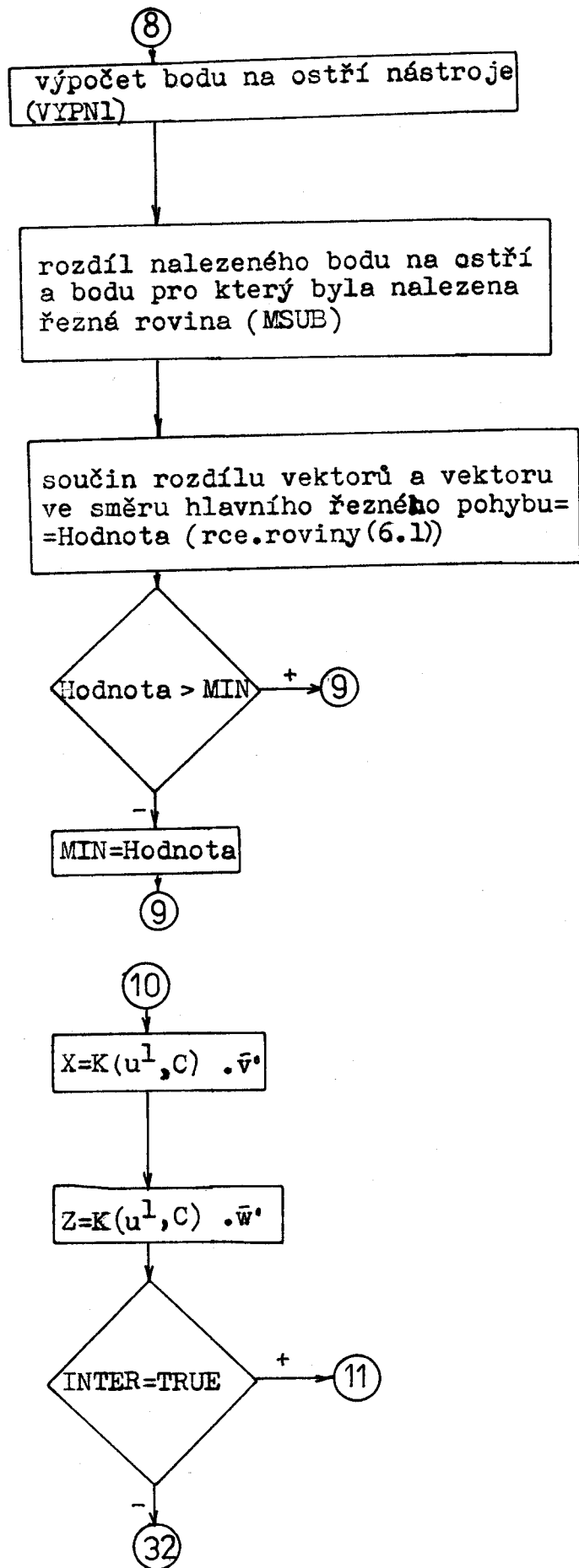
dále viz P.IV

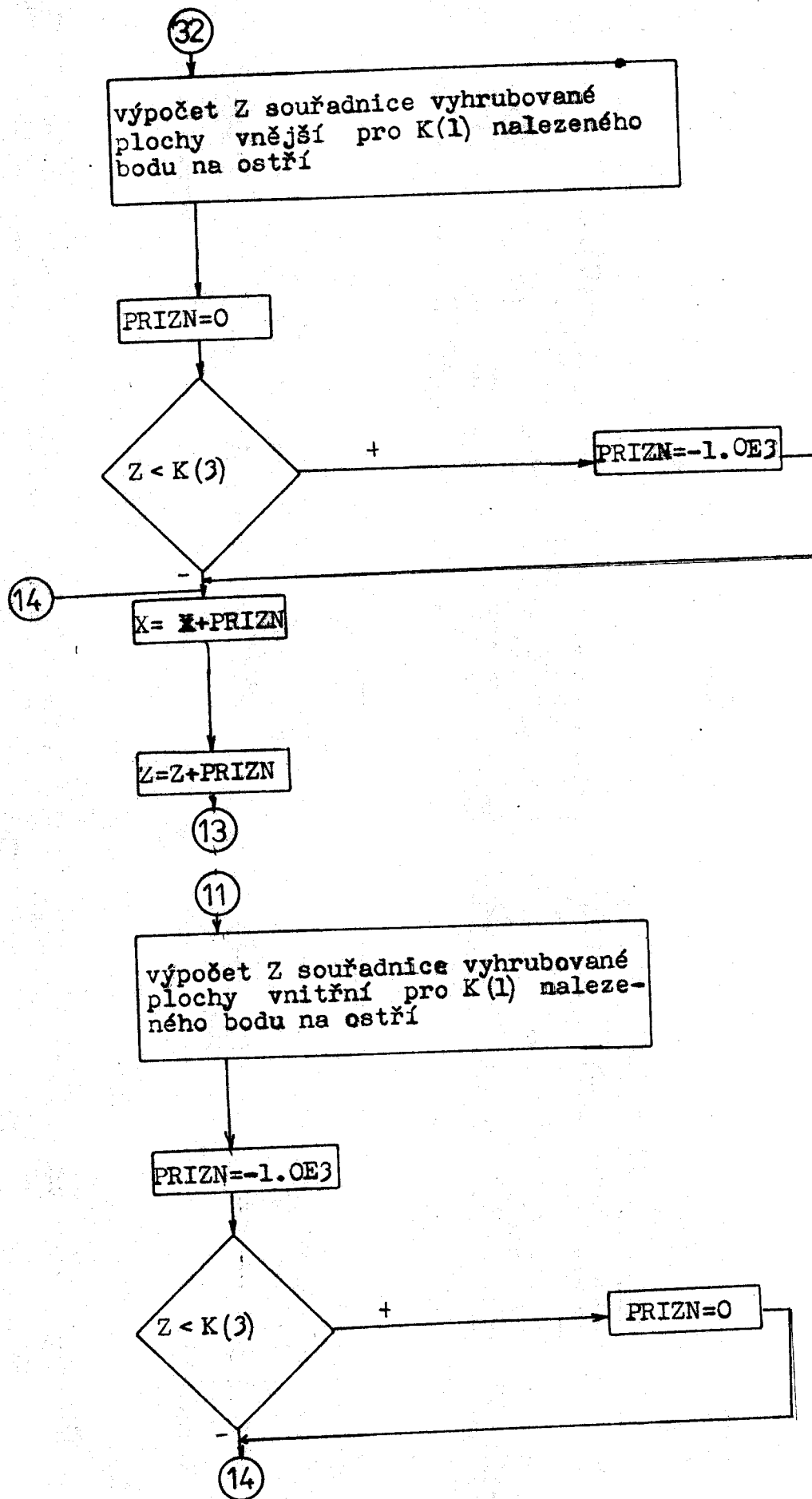
p ř í l . 9d.Vývojový diagram části programu P.IV



podprogram VYPXY





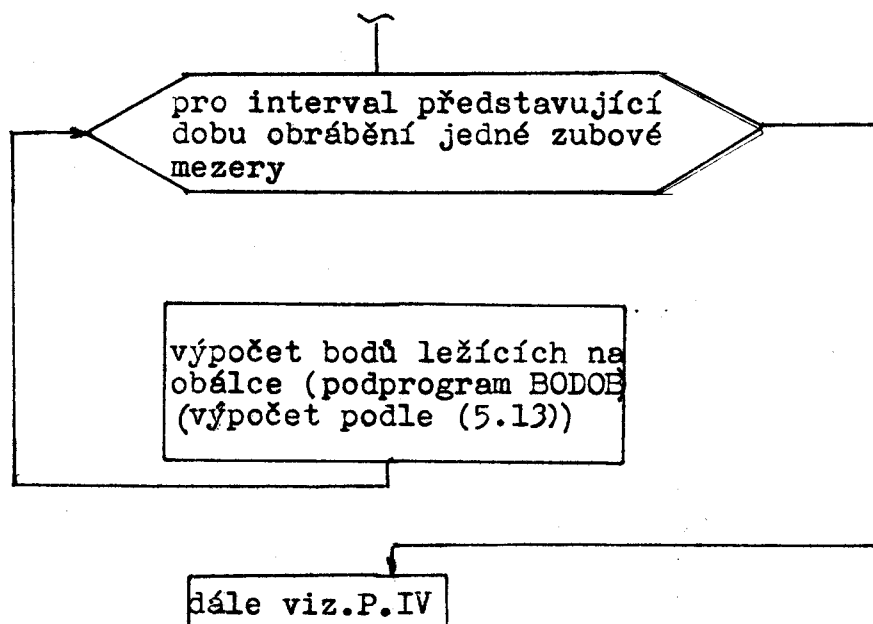


p ř í l . 9e. Vývojový diagram části programu P.V

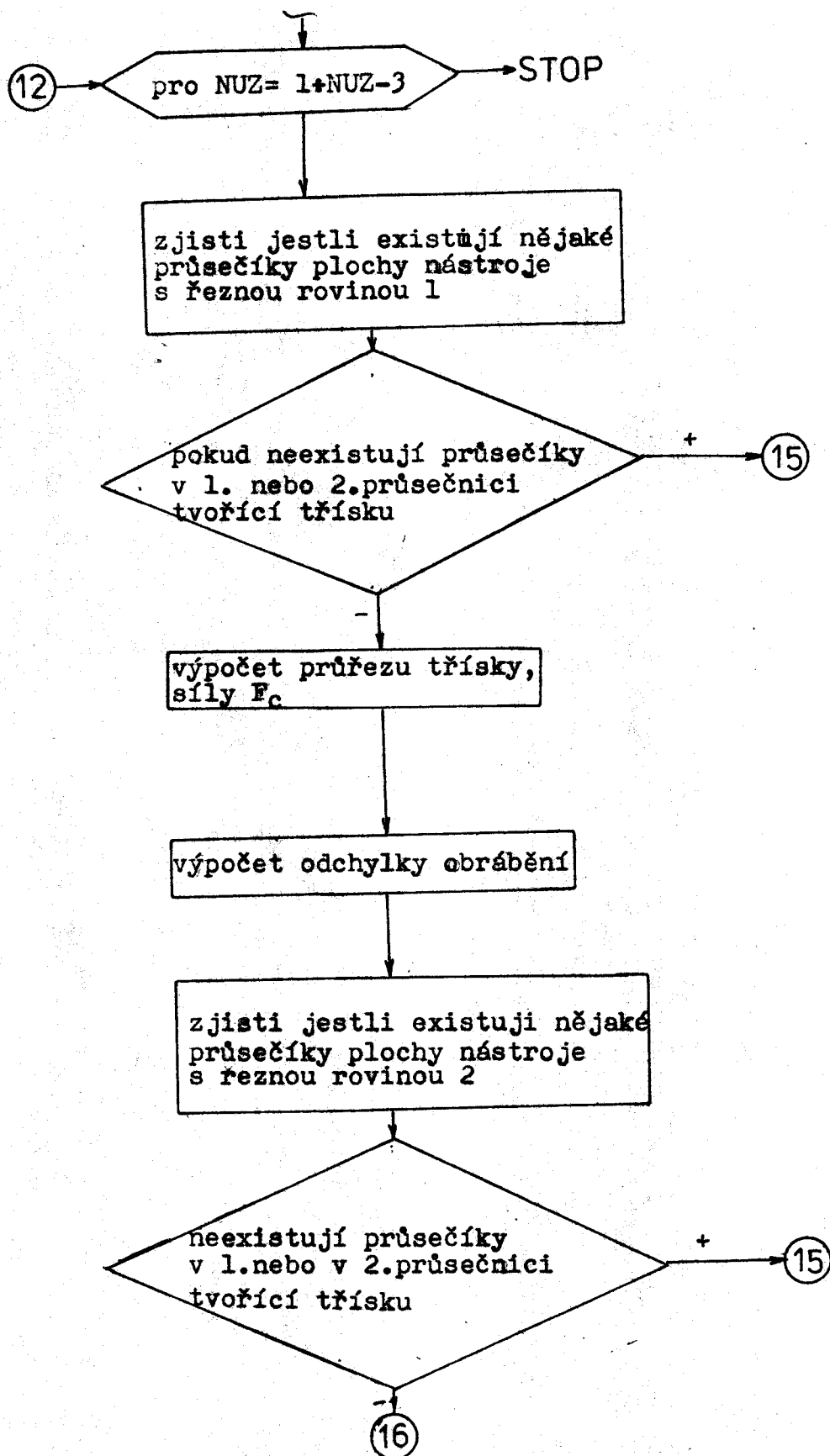
Při výpočtu je použit vektor $\vec{\eta} = (-r_n \cdot \cot g \alpha_{in},$

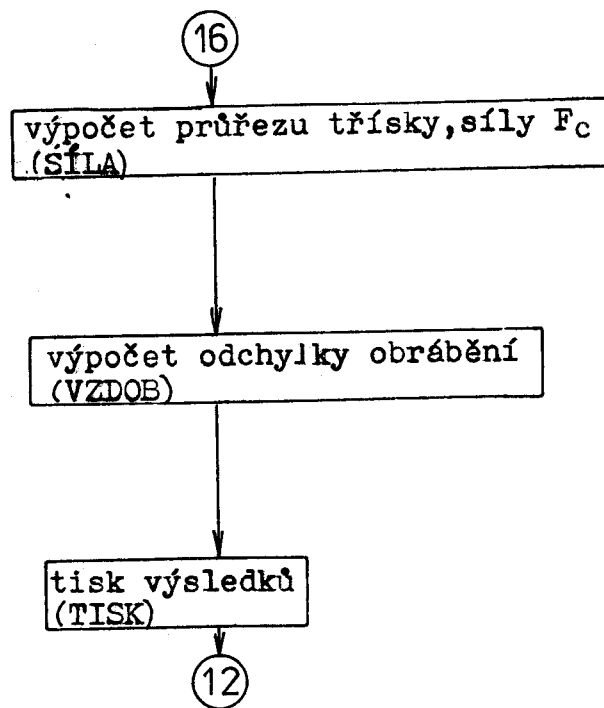
$$A_0 - \sqrt{(A - r_n \cdot \sin \psi)^2 + r_n^2 \cdot \cos^2 \psi} \cdot \cos \zeta, -\sqrt{(A - r_n \cdot \sin \psi)^2 + r_n^2 \cdot \cos^2 \psi} \cdot \sin \zeta)$$

/13/

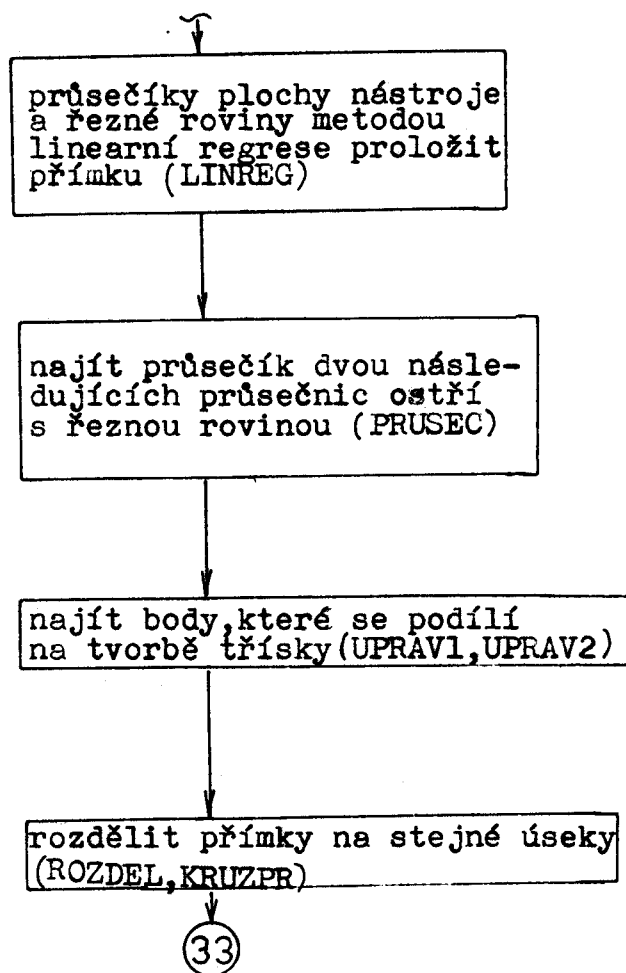


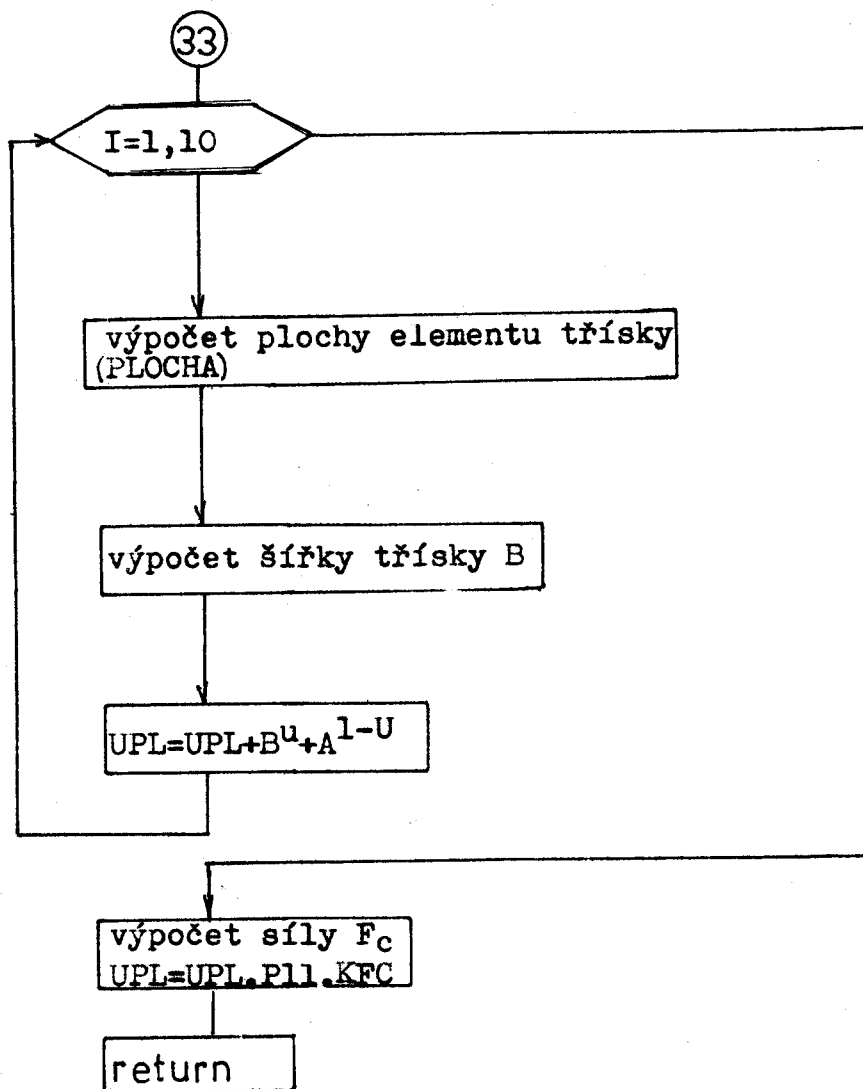
p ř í l . 9f. Vývojový diagram části programu P.VI



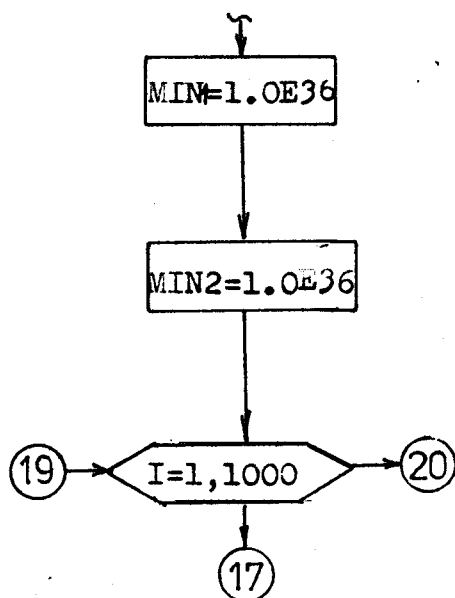


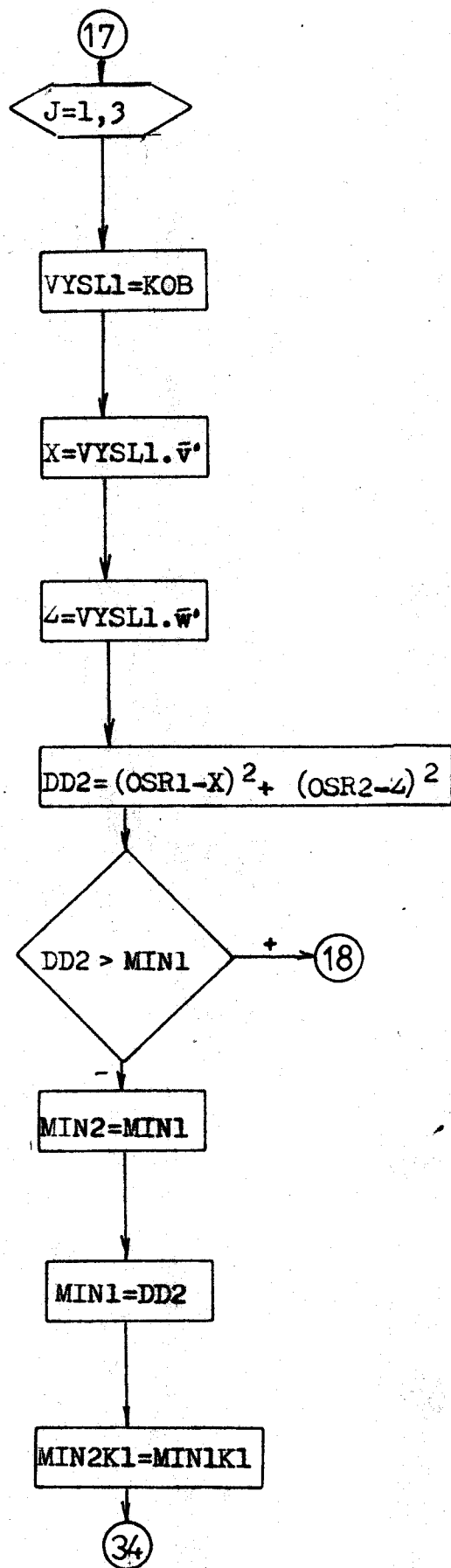
podprogram_SILA

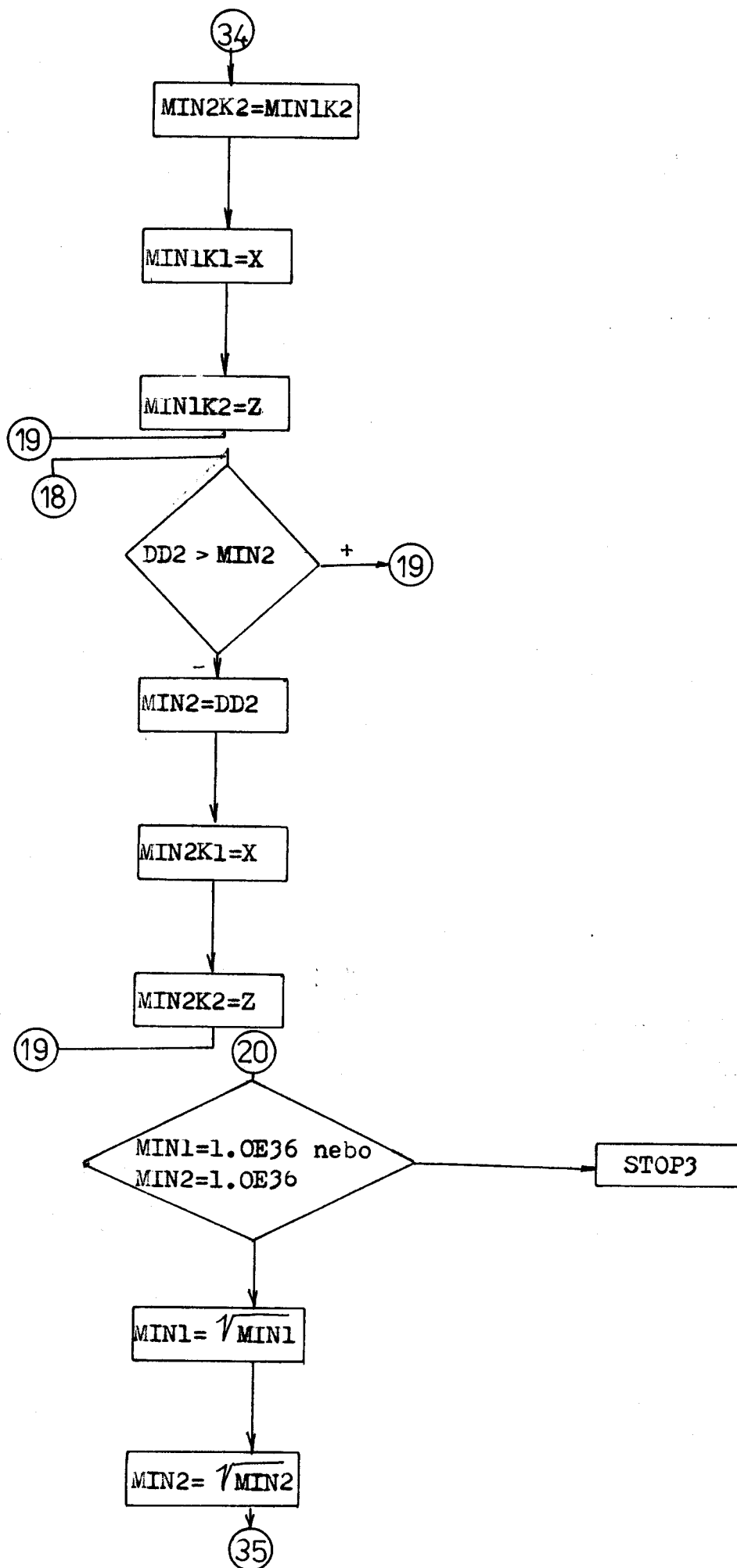




podprogram_VZDOB







35

$$\text{MIN3} = \sqrt{(\text{MIN1K1} - \text{MIN2K1})^2 + (\text{MIN1K2} - \text{MIN2K2})^2}$$

$$S = \text{MIN1} + \text{MIN2} + \text{MIN3} / 2$$

$$P = \sqrt{S \cdot (S - \text{MIN1}) \cdot (S - \text{MIN2}) \cdot (S - \text{MIN3})}$$

$$\text{VZD} = 2 \cdot P / \text{MIN3}$$

return

```
C      PROGRAM PRO DOKONCOVANI KUZELOVYCH KOL GLEASON
C*****
C
C      REALISUJE ALGORITMUS NAVRZENY V DIPLOMOVE PRACI
C
C      AUTOR : ALENA HAASOVA
C
C      DATUM VYTVORENI : 5/1989
C
C      JAZYK FORTRAN 77  RSX-11M
C      (NAVIC PROTI NORME FORTRAN 4 VYUZIT POUZE PRIKAZ VIRTUAL)
C
C      NEVYZADUJE ZADNE DALSI PROGRAMOVE MODULY
```

```
C-----
C      DEKLARACE
0001      INTEGER NUZ,I,J,II,IE,POCU1,SIGNUM,MAXNUZ,IX
0002      LOGICAL INTER,TECRO1,TECRO2,TEST,PLNA
0003      REAL U1,PI,PREVSR,RN,ALFAIN,A,A0,TAUPOC,TAU,GAMAP,GAMA0,WZ,WK
      + ,WF,TC1,TC2,U11,U12,DELTAT,KFC,P11,VZD1,VZD2,OSR1,OSR2,
      + VZ,VF,DELVTC,DELMTC,POCMT,TC,POMOC,PSI,ASKAL,VTC,
0004      + MAXTC,DELU1,RE2,RI2,YI,VYI,YE,VYE,UPL1,UPL2,EXPON,POMOC2
0005      REAL TG,VZDAL
      REAL OAIE(3,2),OBIE(3,2),N10(3),U1N10(3),OF(3),OK(3),
      + OZ(3),VYSL1(3),VYSL2(3),VYSL3(3),POM1(3,3),POM2(3,3),
      + TOFWF(3,3),V1(3),V2(3),
      + TOZWZM(3,3),TOKWK(3,3),WOZ(3,3),WOK(3,3),ST(3),ATC(3,3),
      + BTC(3,3),CTC(3,3),AT(3,3),BT(3,3),CT(3,3),X,
0006      + Y,KOB1,KOB2
      REAL N1TCUI(3),N1TCUE(3),N1TAUI(3),N1TAUE(3),STI(3),STE(3),
      + MALEVI(3),MALEVE(3),MALEWI(3),MALEWE(3),
0007      + VP1X(11),VP1Y(11),VP2X(11),VP2Y(11)
0008      VIRTUAL X(2,1300,11),Y(2,1300,11),KOB1(3,1000),KOB2(3,1000)
      EQUIVALENCE (TOZWZM,AT),(TOKWK,BT),(TOFWF,CT)
```

```
C      POCATECNI NASTAVENI PROMENNYCH
C 1...INTER
C 2...EXTER
0009      OPEN(UNIT=6,NAME='SY:LP.ZUB',STATUS='NEW')
0010      WRITE(5,5)
0011      5      FORMAT(' VLOZ HODNOTY OMEGAF[RAD/MIN],KFC,P11[MPA],U  ',
      + '(ODDEL CARKAMI, UKONCI <CR>)' )
0012      READ(5,6)WF,KFC,P11,EXPON
0013      6      FORMAT(4F15.0)
0014      PI=3.14159
0015      PREVSR=PI/180
0016      RN=152.4
0017      RI2=153.8**2
0018      RE2=188.9**2
0019      ALFAIN=15.75*PREVSR
0020      A=182.96
0021      A0=206.46
0022      TAUPOC=46.35
0023      PSI=28.5*PREVSR
0024      GAMAP=70.05*PREVSR
0025      GAMA0=74.75*PREVSR
0026      WZ=57.81/60.
```

```
0027      WK=55.5/60.
0028      WF=WF/60.
0029      OAIE(1,1)=48
0030      OAIE(2,1)=144.8
0031      OAIE(3,1)=0
0032      OBIE(1,1)=68
0033      OBIE(2,1)=144.8
0034      OBIE(3,1)=-0.27
0035      OAIE(1,2)=68
0036      OAIE(2,2)=109.46
0037      OAIE(3,2)=-7.89
0038      OBIE(1,2)=47.78
0039      OBIE(2,2)=109.46
0040      OBIE(3,2)=-13.59
0041      OZ(1)=SIN(GAMAP)
0042      OZ(2)=COS(GAMAP)
0043      OZ(3)=0
0044      DO 30 I=1,3
0045      OF(I)=0
0046      OK(I)=0
0047      OF(1)=1
0048      OK(1)=1
0049      VZ=23/60.
0050      VF=43/60.
0051      MAXTC=56.
0052      DELVTC=(0.81+1.92)*PREVSR
0053      24*0.08=1.92 ==>
0054      DELMTC=0.08*PREVSR
0055      POCMTC=25
0056      POCU1=11
0057      DELU1=0.1
0058      DO 20 I=1,2
0059      DO 20 NUZ=1,1300
0060      DO 20 J=1,POCU1
0061      X(I,NUZ,J)=-1.0E6
0062      Y(I,NUZ,J)=-1.0E6
0063      TC=-DELVTC
0064      INTER=.FALSE.
0065      TECRO1=.FALSE.
0066      TECRO2=.FALSE.
0067
0068      NALEZENI SOURADNIC X,Y NA PRUSECNICICH PRO JEDNOTLIVE NOZE
0069      DO 100 NUZ=1,1300
0070      TC=TC+DELVTC
0071      IF(TC.GE.MAXTC)GOTO 101
0072      INTER=.NOT. INTER
0073      II=2
0074      IF(INTER)II=1
0075      IE=1
0076      IF(INTER)IE=2
0077      SIGNUM=-1
0078      IF(INTER)SIGNUM=1
0079      CALL VYPV(PREVSR,TAUPOC,TC,RN,ALFAIN,A,PSI,II,V1)
0080      CALL VYPV(PREVSR,TAUPOC,TC,RN,ALFAIN,A,PSI,IE,V2)
0081      IF(TECRO1.AND.TECRO2)GOTO 150
0082
0083      ZACATEK HLEDANI TECNYCH ROVIN 1,2
0084      VTC=TC
0085      DO 70 I=1,POCU1-1
0086      U1=DELU1*I
```

```
0082 DO 70 J=0,POCMTC-1
0083 TC=VTC+J*DELMTC
0084 CALL T (OZ,-WZ*TC,TOZWZM)
0085 CALL T (OK,WK*TC,TOKWK)
0086 CALL T (OF,WF*TC,TOFWF)
0087 IF(TECRO1)GOTO 35
0088 CALL VYPN1(TC,U1,N1TAUI,OAIE(1,II),OBIE(1,II),N10,U1N10,VYSL1,
+ VYSL2,
+ V1,TOFWF,TOKWK,TOZWZM,OZ,VZ)
C PODMINKY
0089 CALL SKALAR(N1TAUI,OZ,ASKAL)
0090 CALL NASC(OZ,VYSL1,3,1,ASKAL)
0091 ASKAL=(VYSL1(1)-N1TAUI(1))*2+(VYSL1(3)-N1TAUI(3))*2
0092 IF(ASKAL.GE.RI2)GOTO 70
0093 YI=(TG((-14.5*SIGNUM+TC/0.1*0.095)*PREVSR)*(N1TAUI(1)-
+ (12.18*SIGNUM)))*SIGNUM
0094 VYI=N1TAUI(3)*SIGNUM
0095 IF(YI.GE.VYI)GOTO 35
0096 TECRO1=.TRUE.
0097 TC1=TC
0098 U11=U1
0099 35 IF(TECRO2)GOTO 36
0100 CALL VYPN1(TC+2.71*PREVSR,U1,N1TAUE,OAIE(1,IE),OBIE(1,IE),N10,U1N10,
+ VYSL1,
+ VYSL2,V2,TOFWF,TOKWK,TOZWZM,OZ,VZ)
0101 CALL SKALAR(N1TAUE,OZ,ASKAL)
0102 CALL NASC(OZ,VYSL1,3,1,ASKAL)
0103 ASKAL=(VYSL1(1)-N1TAUE(1))*2+(VYSL1(3)-N1TAUE(3))*2
0104 IF(ASKAL.GE.RE2)GOTO 70
0105 YE=(TG(((14.5+12.8)*SIGNUM+TC/0.1*0.095)*PREVSR)*(N1TAUE(1)+
+ (21.06*SIGNUM)))*SIGNUM
0106 VYE=N1TAUE(3)*SIGNUM
0107 IF(YE.LE.VYE)GOTO 70
0108 TECRO2=.TRUE.
0109 TC2=TC
0110 U12=U1
0111 36 IF(.NOT.TECRO1 .OR. .NOT.TECRO2)GOTO 70
0112 GOTO 120
0113 70 CONTINUE
0114 TC=VTC
0115 GOTO 100
0116 120 CALL W(OZ,WOZ)
0117 CALL W(OK,WOK)
0118 CALL W(OF,WOF)
0119 CALL VYPV(PREVSR,TAUPOC,TC1,RN,ALFAIN,A,PSI,II,V1)
0120 CALL T (OZ,-WZ*TC1*PREVSR,TOZWZM)
0121 CALL T (OK,WK*TC1*PREVSR,TOKWK)
0122 CALL T (OF,WF*TC1*PREVSR,TOFWF)
C CAROVANE
0123 CALL MPRDB(WOZ,AT,POM1,3,3,3)
0124 CALL NASC(POM1,ATC,3,3,-WZ)
0125 CALL MPRDB(WOK,BT,POM1,3,3,3,)
0126 CALL NASC(POM1,BTC,3,3,WK)
0127 CALL MPRDB(WOF,CT,POM1,3,3,3,)
0128 CALL NASC(POM1,CTC,3,3,WF)
C
0129 CALL VYPST(OZ,OK,OF,WOZ,WOK,WOF,AT,ATC,BT,BTC,CT,CTC,VYSL1,
+ VYSL2,VYSL3,
+ POM1,POM2,V1,U11,WF,WZ,WK,VZ,MALEVI,MALEWI,OAIE(1,II),
+ OBIE(1,II),STI)
```

```
C
0130 CALL VYPV(PREVS,TAUPOC,TC2,RN,ALFAIN,A,PSI,IE,V2)
0131 CALL T(OZ,-WZ*TC2*PREVS,TOZWZM)
0132 CALL T(OK,WK*TC2*PREVS,TOKWK)
0133 CALL T(OF,W*TC2*PREVS,TOFWF)
C
0134 CALL MPRDB(WOZ,AT,POM1,3,3,3)
0135 CALL NASC(POM1,ATC,3,3,-WZ)
0136 CALL MPRDB(WOK,BT,POM1,3,3,3,)
0137 CALL NASC(POM1,BTC,3,3,WK)
0138 CALL MPRDB(WOF,CT,POM1,3,3,3,)
0139 CALL NASC(POM1,CTC,3,3,W*F)
0140 CALL VYPST(OZ,OK,OF,WOZ,WOK,WOF,AT,ATC,BT,BTC,CT,CTC,VYSL1,
+ VYSL2,VYSL3,
+ POM1,POM2,V2,U12,W*F,WZ,WK,VZ,MALEVE,MALEWE,OAIE(1,IE),
+ OBIE(1,IE),STE)
TC=-TC1
DELTAT=TC1-TC2
KONEC HLEDANI TECNYCH ROVIN
C
C
C
C
143 150 VLASTNI HLEDANI SOURADNIC X,Y NA PRUSECNICI PRO DANY NUZ
+ CALL VYPXY(II,TC,NITCUI,NITAU,STI,MALEVI,MALEWI,OAIE(1,II),
+ OBIE(1,II),N10,U1N10,VYSL1,VYSL2,V1,TOFWF,TOKWK,TOZWZM,OZ,X,Y,
+ VZ,WZ,WK,W*F,
+ DELU1,POCU1,U1,DELMTC,NUZ,PREVS,0.0,TAUPOC,RN,ALFAIN,A,PSI)
144 P.IV CALL VYPXY(IE,TC+2.71*PREVS-DELTAT,NITCUE,NITAU,STE,MALEVE,MALEWE,
+ OAIE(1,IE),
+ OBIE(1,IE),N10,U1N10,VYSL1,VYSL2,V2,TOFWF,TOKWK,TOZWZM,OZ,X,Y,
+ VZ,WZ,WK,W*F,
+ DELU1,POCU1,U1,DELMTC,NUZ,PREVS,12.8,TAUPOC,RN,ALFAIN,A,PSI)
145 100 CONTINUE
146 101 CONTINUE
C
C
C
47 VYPOCET OBALKY ZUBU
48 DO 180 I=1,1000
49 TC=TC1+(MAXTC-TC1)*(I-1)/1000
+ CALL BODOB(OZ,OF,OK,WZ,W*F,WK,TC,PREVS,TAUPOC,RN,ALFAIN,
+ A,A0,PSI,VYSL1,VYSL2,VYSL3,POM1,POM2,POM3,WOF,WOK,WOZ,
+ 1,V1,KOB1,I)
P.V TC=TC2+(MAXTC-TC2)*(I-1)/1000
+ CALL BODOB(OZ,OF,OK,WZ,W*F,WK,TC,PREVS,TAUPOC,RN,ALFAIN,
+ A,A0,PSI,VYSL1,VYSL2,VYSL3,POM1,POM2,POM3,WOF,WOK,WOZ,
+ 2,V2,KOB2,I)
180 CONTINUE
C
C
C
3 VYPOCET SILY ZE ZNAMYCH PRUSECNIC
4 MAXNUZ=NUZ-1
5 DO 300 NUZ=1,(MAXNUZ-2)
6 UPL1=0
7 UPL2=0
8 CALL VMOVE2(X,Y,1,NUZ,POCU1,VP1X,VP1Y)
9 CALL VMOVE2(X,Y,1,NUZ+2,POCU1,VP2X,VP2Y)
+ IF(.NOT. PLNA(VP1X,VP1Y,POCU1).OR. .NOT.PLNA(VP2X,VP2Y,POCU1))
+ GOTO 300
+ CALL SILA(KFC,P11,POCU1,VP1X,VP1Y,VP2X,VP2Y,UPL1,EXPON,
+ OSR1,OSR2)
+ CALL VZDOB(KOB1,OSR1,OSR2,VYSL1,MALEVI,MALEWI,VZD1)
CALL VMOVE2(X,Y,2,NUZ,POCU1,VP1X,VP1Y)
```

```
0163      CALL VMOVE2(X,Y,2,NUZ+2,POCU1,VP2X,VP2Y)
0164      IF(.NOT. PLNA(VP1X,VP1Y,POCU1).OR. .NOT.PLNA(VP2X,VP2Y,POCU1)
+      GOTO 300
0165      CALL SILA(KFC,P11,POCU1,VP1X,VP1Y,VP2X,VP2Y,UPL2,EXPON,
+      OSR1,OSR2)
0166      CALL VZDOB(KOB2,OSR1,OSR2,VYSL1,MALEVE,MALEWE,VZD2)
0167      CALL TISK(NUZ,UPL1,UPL2,VZD1,VZD2)
0168      CONTINUE
0169      STOP
0170      END
```

300