

Vysoká škola: strojní a textilní

Katedra: obrábění a ekonomiky

Fakulta: strojní

Školní rok: 1977/78

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro Petra Novotného

obor strojírenská technologie

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENSKÁ 5
PSC 461 17

Protože jste splnil..... požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnice ministerstva školství a kultury o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol:

Název tématu: Vyšetřování výchozího povrchu odvalovacích
fréz pomocí číslicového počítače

Pokyny pro vypracování:

- 1/ Politickohospodářský význam diplomové práce
- 2/ Seznámení s teorií navrhování výchozího povrchu odvalovacích fréz pro vybrané tvary obráběné plochy
- 3/ Sestavení vztahů pro výpočet výchozího povrchu odvalovacích fréz celistvých i skládaných s drážkami pří-
mými i ve šroubovici s úhlem čela kladným, nulovým a
záporným
- 4/ Sestavení algoritmu výpočtu, vývojových diagramů a
programu pro počítač.
Návrh formuláře zápisu vstupních a výstupních údajů.
Návod na práci s programem.
- 5/ Odladění programu na vhodných příkladech

Autorka:
Zpracováno:
13. 8. 1978
31. 8. 1978

Rozsah grafických laboratorních prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: asi 60 stran

Seznam odborné literatury: Budínský, B., Kepr, B.: Základy diferenciální geometrie s technickými aplikacemi.
SNTL Praha 1970

Pazour, J.: Vyšetřování výchozího povrchu odvalovacích fréz DP-ST VŠST Liberec, 1976

Vedoucí diplomové práce: Ing. R. Kvapil

Konsultanti: Ing. R. Kvapil, Ing. Vl. Kracík, CSc

Datum zahájení diplomové práce: 10.10.1977

Datum odevzdání diplomové práce: 26.5.1978



Draský
Prof. Ing. Jaroslav Draský, CSc

Vedoucí katedry

Stříž
Doc. RNDr. Bohuslav Stříž, CSc

Děkan

1.2 PROHLÁŠENÍ

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou
práci vypracoval samostatně s použitím uvede-
né literatury.

V Liberci dne 26.května 1978

Novotný Petr
Vlastnoruční podpis

Diplomová práce
VŠST Liberec
fakulta strojní
obor 23 - 07 - 8

Strojírenská technologie
zaměření : obrábění a ekonomika
Katedra obrábění a ekonomiky

VYŠETŘOVÁNÍ VÝCHOZÍHO POVRCHU ODVALOVACÍCH FRÉZ
POMOCÍ ČÍSLICOVÉHO POČÍTAČE

NOVOTNÝ PETR

DP - ST - 1400 / 78

Vedoucí práce : Ing. Robert Kvapil, VSŠT Liberec

Konzultanti : Ing. Robert Kvapil

Ing. Kracík Vl. CSc

Ing. Tišer Jan

Rozsah práce a příloh

1. Počet listů : 84
2. Počet příloh : 6
3. Počet obrázků: 22
4. Počet výkresů: -

DT : 621.914

26. května 1978.

1. VŠEOBECNÁ ČÁST

1.3 PODĚKOVÁNÍ

Dovolte mi, abych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Robertu Kvapilovi za vedení a připomínky a Ing. Vladimíru Kracíkovi, CSc a Ing. Janu Tišerovi za náměty a připomínky při vypracování diplomové práce.

1.4. SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK

θ	nula
A_o^φ	tenzor otočení kolem osy 0 o úhel φ
E	jednotkový tenzor
x_n, y_n, z_n	pravoúhlý souřadnicový systém nástroje
x_2, y_2, z_2	pravoúhlý souřadnicový systém nástroje
x_s, y_s, z_s	pravoúhlý souřadý systém součásti
x_1, y_1, z_1	pravoúhlý souřadý systém součásti
x, y, z	pomocný pravoúhlý souřadnicový systém
O_n, O_s, O	osa nástroje, osa součásti, osa
u, v, x, s, z, t	parametry plochy
S	značení plochy součásti
N	značení plochy nástroje
$\vec{X}, \vec{K}, \vec{O}_B, \vec{r}$	vektory popisující bod na ploše
$\vec{K}_u, \vec{K}_v, \vec{K}_\varphi, \vec{K}_\beta$	derivace vektoru K podle u, v, φ, β
$\vec{O}_n, \vec{O}_s, \vec{O}_0, \vec{f}_0, \vec{e}_1$	jednotkové vektory
$\vec{\omega}_n, \vec{\omega}_s$	vektory úhlových rychlostí otáčení kolem osy nástroje a kolem osy součásti
$\vec{Y}, \vec{R}, \vec{O}_V, \vec{S}, \vec{R}, \vec{P}, \vec{L}$	označení rovin
$\vec{O}_n$	vektor vzdálenosti od osy součásti k povrchu
$\vec{O}_s$	vektor popisující plochu n-hranu
$\vec{O}_n$	vzdálenost mezi osou O_n a O_s
$\vec{O}_s$	bod na obálce
$\vec{P}, \vec{R}$	vektory popisující plochu
$\vec{P}, \vec{R}$	přímka
D	vzdálenost roviny od počátku
$\tilde{f}, M$	matice
$\tilde{f}^{-1}, M^{-1}$	inversní matice
p	převodový poměr
PH	počet hran n-hranu
K_v	valivá kružnice
P_v	valivá přímka příslušící nástroji
R_{vs}	poloměr valivé kružnice součásti
S_2	poloměr vepsané kružnice h-hranu
VER	poloměr frézy
F_2, F_3	plocha součásti, plocha nástroje
$\varphi, \psi, \zeta, \eta, \beta, \alpha$	označení úhlů
$\vec{e}_2, \vec{n}^{orm}$	jednotkové vektory

1.5 O B S A H

	str.
1. VŠEOBECNÁ ČÁST	2
1.1 Zadání	3
1.2 Prohlášení	4
1.3 Poděkování	5
1.4 Seznam použitých značek	6
1.5 Obsah	7
2. ÚVOD	10
2.1 Společensko-politický vývoj	10
2.2 Význam diplomové práce	11
3. STANOVENÍ SDRUŽENÉHO PROFILU ODVALOVACÍCH FRÉZ	12
3.1 Výchozí povrch nástroje, základní pojmy	12
3.2 Rozdělení profilů obráběných odvalovacími frézami	13
3.3 Grafický způsob navrhování profilu odvalovací frézy	13
3.3.1 Metoda kopírování postupných poloh profilu součásti	13
3.3.2 Metoda čáry záběru	14
3.3.3 Grafoanalytický způsob profilování odvalovacích fréz	14
3.4 Analytický způsob profilování odvalovacích fréz	16
3.5 Kinematický princip návrhu profilu odvalovacích fréz	17
3.6 Podmínky vytváření profilu odvalováním	20
3.6.1 Existence výchozího povrchu nástroje	20
3.6.2 Podmínky styku výchozího tělesa nástroje a součásti bez vzájemného pronikání	20

	str.
3.6.3 Vztah mezi vedlejšími úseky nástroje	21
4. TEORIE OBALOVÝCH PLOCH, APLIKACE TENZOROVÉ ANALÝZY NA PROSTOROVÉ PLOCHY	23
4.1 Literární poznatky	23
4.2 Teorie obalových ploch	24
4.3 Tenzor otočení	27
4.4 Odvalovací frézování	31
4.4.1 Obecná formulace úlohy pro odvalovací frézování	31
4.4.2 Návrh výchozího povrchu odvalovací frézy pro zadaný tvar součásti	32
4.4.3 Průsečíky rovin s obálkou	35
4.4.3.1 Řez obálky s obecnou plochou	35
4.4.3.2 Neparametrické vyjádření roviny řezu	36
4.4.3.3 Rovina normálová	37
4.4.3.4 Rovina jdoucí osou nástroje	37
4.4.3.5 Rovina rovnoběžná s osou O_n a jdoucí mimo počátek bodem Q	39
4.4.3.6 Šroubová plocha s tvořící přímkou	40
5. APLIKACE NA VYBRANÉ TVARY OBRÁBĚNÉ PLOCHY	41
5.1 Příklad šestihranu	41
5.2 Příklad jemného drážkování ČSN 014933	44
6. ALGORITMUS VÝPOČTU ŠESTIHRANU	47
6.1 Šestihran s podélným řezem rovnoběžným s osou nástroje a kolmým na osu nástroje	47
6.1.1 Vývojový diagram	51
6.1.2 Tabulka vstupních a výstupních údajů	59
6.1.3 Návod k práci s programem	60
6.2. Algoritmus výpočtu se řezem ve šroubovici	61
6.2.1 Vývojový diagram	64

	str.
6.2.2 Tabulka vstupních a výstupních údajů	75
6.2.3 Návod k práci s programem	76
7. ZÁVĚR	77
8. PŘIPOMÍNKY K ŘEŠENÉ ÚLOZE	79
9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	82
10. PŘÍLOHY	83
10.1 Seznam příloh	84

2. Ú V O D

2.1. Společensko-politický vývoj

V současné etapě rozvinuté socialistické společnosti se klade stále větší důraz na rozvoj vědy, t.j. na rozvoj vědecko-technické revoluce. Je charakteristické, že se výroba stále více stává technologickou aplikací vědy a věda se mění v bezprostřední výrobní sílu. V tomto dialektickém působení výroby a vědy roste stále podíl vědy na výrobním procesu i v životě společnosti. Povede časem k tomu, že věda zaujme vedoucí místo v celém systému společenského vědomí a bude stále více ovlivňovat rozvoj společenského bytí.

Na XV. sjezdu KSČ bylo zdůrazněno, že rozvoj výrobních sil celé společnosti se opírá především o růst průmyslové výroby strojírenství. Strojírenská produkce je pak svou povahou progresivním prvkem rozvoje společenských výrobních sil, nositelkou technického pokroku ve všech odvětvích národního hospodářství. V pátém pětiletém plánu uložil sjezd KSČ strojírenskému odvětví zvýšit výrobu zhruba o 48 až 51% bez požadavku na nárůst pracovních sil. Tuto vyjimečnou funkci strojírenství násobí i skutečnost, že jí připadá rozhodující úloha při rozvíjení vnějších ekonomických vztahů, při tvorbě převážné části prostředků pro dovoz surovin a pro naši účast při jejich získávání ze zahraničí.

Uspokojování neustále rostoucích životních potřeb pracujících cestou zvyšování produkce výroby ve všech jejích oblastech je v našich podmínkách uskutečnitelné jedinou cestou. Zvyšováním produktivity práce, využíváním výsledků vědecko-technického rozvoje. V oblasti obrábění kovů je toto možné realizovat zaváděním nových vysoce výkonných strojů, automatizovaných provozů s vysokou energetickou účinností, spolehlivostí, používáním vysoce výkonných a kvalitních řezných nástrojů a zvyšováním organizace práce pomocí automatisace a mechanizace.

V současné době v souvislosti se zaváděním výpočetní techniky a kvalitativně lepších nástrojů a strojů do výroby, je nutná postupná revize dosud existujících přibližných výpočetních metod navrhování řezných nástrojů a jejich náhrada metodami obecnými, teoreticky velmi přesnými, dovolujícími komplexní řešení navrhování řezných nástrojů.

Pomocí výpočetní techniky a zaváděním nových NC strojů do výroby lze podstatně měnit dosavadní strukturu výroby nástrojů. Konstrukci, výpočet, nakreslení nástroje, pracovní postup obrobení může nahradit samočinný počítač ve spojení s obráběcím NC strojem. Samočinný počítač podle zadání vypočte pomocí naprogramované přesné metody souřadnice budoucího nástroje, sestaví program pro NC stroj a obráběcí NC stroj podle těchto výpočtů nástroj vyrobí.

Mezi nejdůležitější a stále se vyvíjející nástroje patří nástroje pracující odvalovací metodou. Charakteristický představitel této skupiny nástrojů je odvalovací fréza. Z hlediska produktivity a hospodárnosti práce je na jednom z předních míst ve srovnání s ostatními druhy odvalovacích nástrojů. Tato skutečnost vyplývá z toho, že odvalovací fréza a obrobek jsou v procesu řezání prakticky plynule v záběru. Součást se tedy vyrábí plynule.

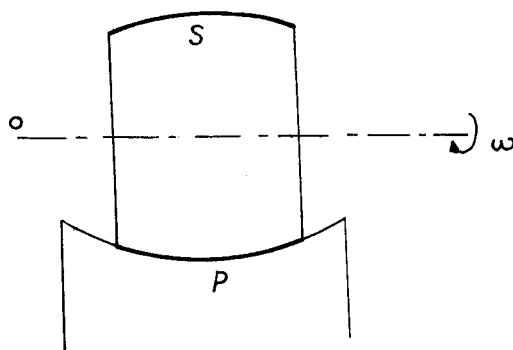
Zkoumanou oblastí odvalovacího frézování je stále problematika určování výchozího povrchu odvalovací frézy. Proto jsem na základě předešlé diplomové práce s. Pazoura aplikoval na samočinném počítači výpočet výchozího povrchu frézy pomocí tenzorové analýzy. Jako příklad jsem si zvolil elementární rovinné obrábění plochy. Význam diplomové práce spatřuji v tom, že je malým přispěním k poznání nových možných výrobních metod, mechanisaci a automatisaci výroby nástrojů. Tímto i tato práce přispívá k postupné změně obsahu lidské práce, postavení člověka ve výrobě a jeho přesouvání do fáze řídicí a kontrolní.

3. STANOVENÍ SDRUŽENÉHO PROFILU ODVALOVACÍCH FRÉZ

3.1. Výchozí povrch nástroje, základní pojmy

Při obrábění odebírá ostří nástroje z obrobku třísky. Vytváří tím plochu obrobku. Tvar obrobené součásti je potom určen tvarem a rozměry řezné části nástroje i jeho pohybem vzhledem k obrobku. Aby se vytvořila požadovaná plocha, musí být ostří rozloženo na povrchu, který se při obrobení stýká s daným povrchem obrobené součásti. Potom můžeme řezný nástroj považovat za těleso s t.zv. výchozím povrchem, jemuž byly dány různé vlastnosti sdružené s obrobenou plochou součásti.

Výchozí povrch nástroje je povrch, na kterém se nachází profilující část nebo části ostří řezného nástroje. Při návrhu řezného nástroje se tedy nejdříve stanoví výchozí povrch nástroje P jako povrch sdružený s povrchem součásti S a pak se tento povrch přemění v řezný nástroj (obr.1.).



Obr.1.

Při obrábění mechanismus obráběcího stroje uděluje pohyby nástroji i obrobku. Hovoříme o t.zv. principiálních kinematických schemech obrábění, které znázorňují pohyby nutné k realizaci povrchu součásti na stroji. Jsou založena na principu sčítání dvou základních typů pohybu. Translačního a rotačního /7/. Lze tak

vytvořit osm základních schemat obrábění.

Kinematická schemata vytváření povrchu ukazují souhrn pohybů nástroje vzhledem k obrobku, jež jsou nutné k vytvoření povrchu součásti. Při tom je jedno jakou kombinací pohybu obrobku a nástroje dosáhneme výsledného relativního pohybu /8/. Kinematická schemata utváření musí zahrnovat pohyby povrchu součásti vzhledem k nástroji. V obecném případě nejsou kinematická schemata utváření totožná se základními kinematickými schematy obrábění, která mohou být složitější.

3.2 Rozdělení profilů obráběných odvalovacími frézami

Obráběné profily můžeme rozdělit do dvou skupin.

1/ Neevolventní profily

2/ Evolventní profily

K charakteristickým obrobkům první skupiny patří hlavně drážkové hřídele, rohatková kolečka, h-hrany, řetězová kola atd. Největšího použití u druhé skupiny má odvalovací fréza ve výrobě nejrůznějších druhů ozubení. Odvalovací metodu lze použít na obrábění kuželových kol s rovnými a šikmými zuby, kuželových kol se zakřivenými zuby, globoidních šnekových soukolí atd.

3.3 Grafický způsob navrhování profilu odvalovací frézy

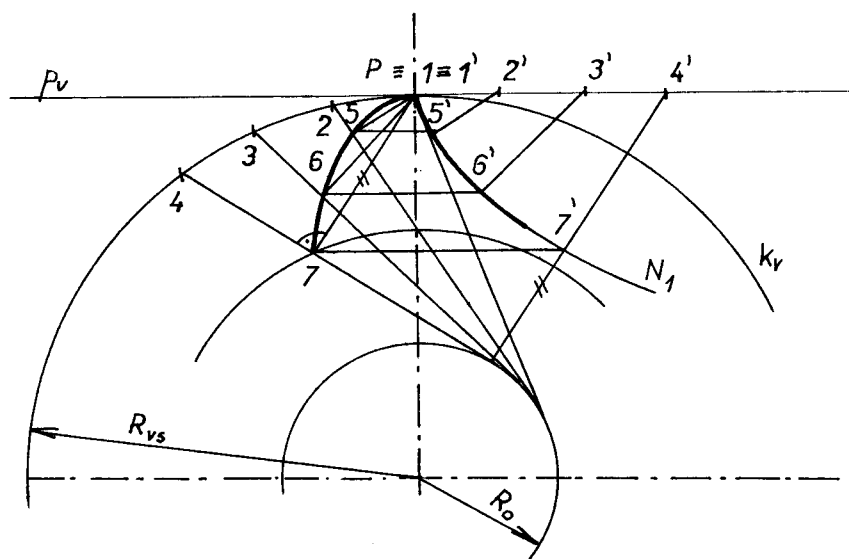
3.3.1 Metoda kopírování postupných poloh profilu součásti.

Pro vytvoření profilu frézy je nutné znát předem žádaný profil obráběné součásti a poloměr valivé kružnice součásti. Princip této metody spočívá v záznamu postupných poloh profilu součásti při odvalování její valicí kružnice po nehybné valicí přince frézy/5/. Sestrojíme-li obálku ke všem polohám profilu součásti, dostaneme hledaný profil odvalovací frézy. Tato metoda je použitelná na př. při určování profilu odvalovacích fréz na obrábění drážkových hřídelů. Výsledkem je pro-

fil frézy v normálním řezu, čili profilu hřebene sdruženého s obráběnou součástí.

3.3.2 Metoda čáry záběru

Při určování profilu odvalovací frézy na drážkové hřídele lze použít též vlastností společných normál. Společná normála ke sdruženým profilům musí v okamžiku jejich dotyku procházet pólem záběru. Dráha záběru je geometrické místo pat kolmic spuštěných z valivého bodu na daný pootočený profil./5/ Při grafickém profilování si na výkrese sestrojíme valící kružnici součásti k_v a valící přímku p_v spojenou s nástrojem. V procesu obrábění se tato valící přímka pohybuje postupným přímočarým pohybem a součást spojená s valící kružnicí se otáčí kolem své osy (Obr.2.).



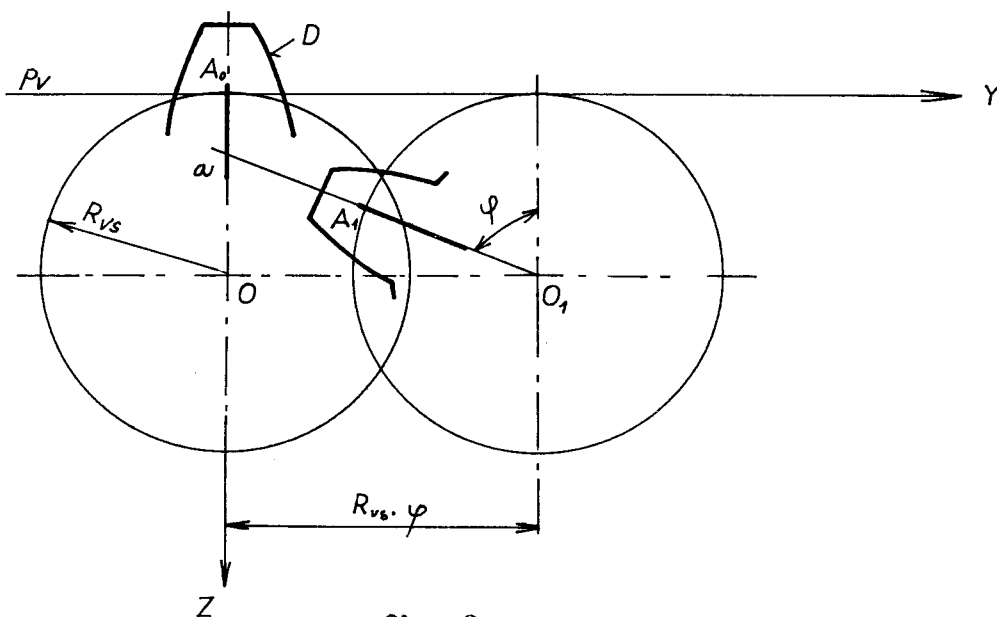
Obr.2.

Princip této metody je vidět z obrázku.

3.3.3 Grafoanalytický způsob profilování odvalovacích fréz

Princip spočívá v nakreslení postupných ploch profilu součásti systému souřadnic ZY spojených s nástrojem

a sestrojením obálky k těmto polohám /5/. Jestli-že se valící kružnice (Obr.3) valila po valící přímce bez klouzání,



Obr.3.

pak vzdálenost OO_1 mezi středy obou následujících poloh valící kružnice bude rovna

$$\overline{OO_1} = R_{vs} \cdot \varphi$$

kde φ - úhel pootočení v radiánech.

Souřadnice bodu A_1 ve zvoleném časovém okamžiku budou

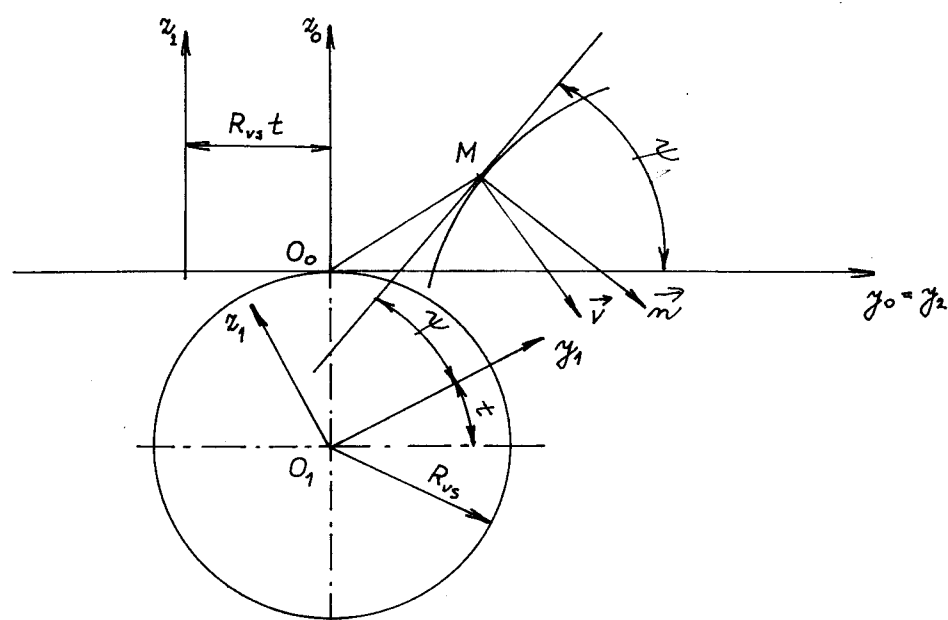
$$z = R_{vs} (1 - \cos \varphi)$$

$$y = R_{vs} (\varphi - \sin \varphi)$$

Při grafoanalytickém profilování se podle těchto vztahů vypočítají souřadnice z_1, y_1 postupných i -tých poloh základního paprsku $\underline{a}$, odpovídajících zvoleným úhlům pootočení φ_i . Na výkrese se nakreslí postupné polohy paprsku $\underline{a}$, které jsou charakterizované veličinami z_i, y_i, φ_i . Známe-li polohu tohoto paprsku, pak podle šablony sestrojíme postupné polohy profilu součásti a k nim příslušnou obálku, která bude hledaným profilem nástroje.

3.4 Analytický způsob profilování odvalovacích fréz

Pohyby, které koná obrobek a nástroj v procesu obrábění, pokládáme za známé. Odpovídající pohyby profilů nástroje a součásti převedeme na odvalování bez skluzu valicí kružnice součásti po valicí přímce nástroje. Celý proces je možno popsat podle obr.4. Zvolíme systém souřadnic y_1z_1 spojený s profilem součásti, systém y_2z_2 spojený s profilem nástroje a systém nepohyblivý, daný souřadnicemi y_0z_0 .



Obr.4.

Mezi jednotlivými souřadnými systémy můžeme napsat transformační vztahy:

$$1/ \ y_0z_0 \longrightarrow y_2z_2 : z_2 = z_0$$

$$y_2 = y_0 + R_{vs}t$$

$$2/ \ y_1z_1 \longrightarrow y_0z_0 : z_0 = y_1 \sin t + z_1 \cos t - R_{vs}$$

$$y_0 = y_1 \cos t - z_1 \sin t$$

$$3/ \quad y_1 z_1 \longrightarrow y_2 z_2 : \quad z_2 = y_1 \sin t + z_1 \cos t - R_{vs} \\ y_2 = y_1 \cos t - z_1 \sin t + R_{vs} t$$

Na profilu součásti vezmeme libovolný bod M se souřadnicemi $y_1 z_1$. Úhel mezi tečnou k profilu a osou y_1 označíme ψ . Na začátku bude tečna k profilu součásti v bodě M svírat úhel ψ též s osou y_0 , neboť y_0 je rovnoběžné s y_1 . V libovolném následujícím okamžiku, kdy se souřadnicový systém $y_1 z_1$ otočí o úhel t okolo počátku souřadnic O_1 , tečna k profilu součásti v bodě M bude svírat s osou y_0 úhel $\psi_1 = \psi + t$.

$$\text{Rovnice styku} \quad \vec{n} \cdot \vec{v} = 0 \quad (3.1)$$

vyjadřuje skutečnost, že vektor normály $\vec{n}$ k povrchu součásti S je kolmý k vektoru rychlosti $\vec{v}$ při pohybu povrchu S vzhledem k povrchu N /5/. Tvar normály $\vec{n}$ k profilu součásti S v bodě M.

$$\vec{n} = \vec{j} \operatorname{tg} (\psi + t) - \vec{k} \quad (3.2)$$

$\vec{j}, \vec{k}$ jednotkové vektory os y, z .

Vektor V můžeme zapsat

$$\vec{v} = \vec{j} z_0 - \vec{k} y_0 \quad (3.3)$$

Rovnice styku pro tento případ bude po dosazení (3.2), (3.3) do rovnice (3.1) ve tvaru

$$z_0 \operatorname{tg} (\psi + t) + y_0 = 0$$

odtud

$$\operatorname{tg} (\psi + t) = \frac{y_0}{z_0} \quad \text{dosadíme za } y_0, z_0 \text{ z transformačních vztahů č.2.}$$

Společným řešením rovnice profilu součástí a vztahů transformačních se určí hledaný povrch nástroje.

3.5. Kinematický princip návrhu profilu odvalovacích fréz

Metoda vychází z podmínky rovnic styku $\vec{u} \cdot \vec{v} = 0$ a svým pojetím by mohla být zařazena k analytickým způsobům profilování.

Určování obálky povrchů /6/, konajících složený pohyb, nezávisí na složkách pohybu, při kterém povrch zůstává totožný sám se sebou. Na př.:

- obálka válcového povrchu nezávisí na libovolném posuvném přímočarém pohybu rovnoběžném s vytvářenou plochou.
- obálka rotačního povrchu nezávisí na libovolném otáčení kolem osy rotace.
- obálka šroubového povrchu nezávisí na šroubovém pohybu, který má totožnou osu a parametr.

Toho lze užít a složený pohyb povrchu rozložit na takové dvě složky, že pro jednu z nich zůstává povrch ztotožněn sám se sebou. Charakteristika závisí jen na druhém pohybu a vyhledání povrchu se zjednodušuje.

Po nalezení N je nutné určit charakteristiku povrchu P_p . Tato charakteristika je podle kinematické teorie obálek takové geometrické místo bodů povrchu P_p , ve kterých normály jsou současně normálami šneku. Výchozí povrch nástroje dostaneme, jestliže hledané tvořící čáře (charakteristice) udělíme šroubový pohyb s parametrem h . Tento vzájemný pohyb povrchů N a S charakterizuje základní profilující pohyb výchozího šneku frézy. Na něm jsou postaveny kinematické převody obráběcích odvalovacích strojů. (Obr.5).

$$\overline{AB} = R_{vs} + R_{vn} \quad (3.4)$$

$$\vec{v}_n = R_{vn} \vec{\omega}_n \quad \vec{v}_s = R_{vs} \vec{\omega}_s \quad (3.5)$$

$\vec{v}_n$ - rychlost bodu P na val. válci

$\vec{v}_s$ - rychlost bodu P příslušící kolu

Pohyb pomocného povrchu P_p je určen rychlostí $\vec{v}_p$ ve směru normálovém ke sklonu zubů NN .

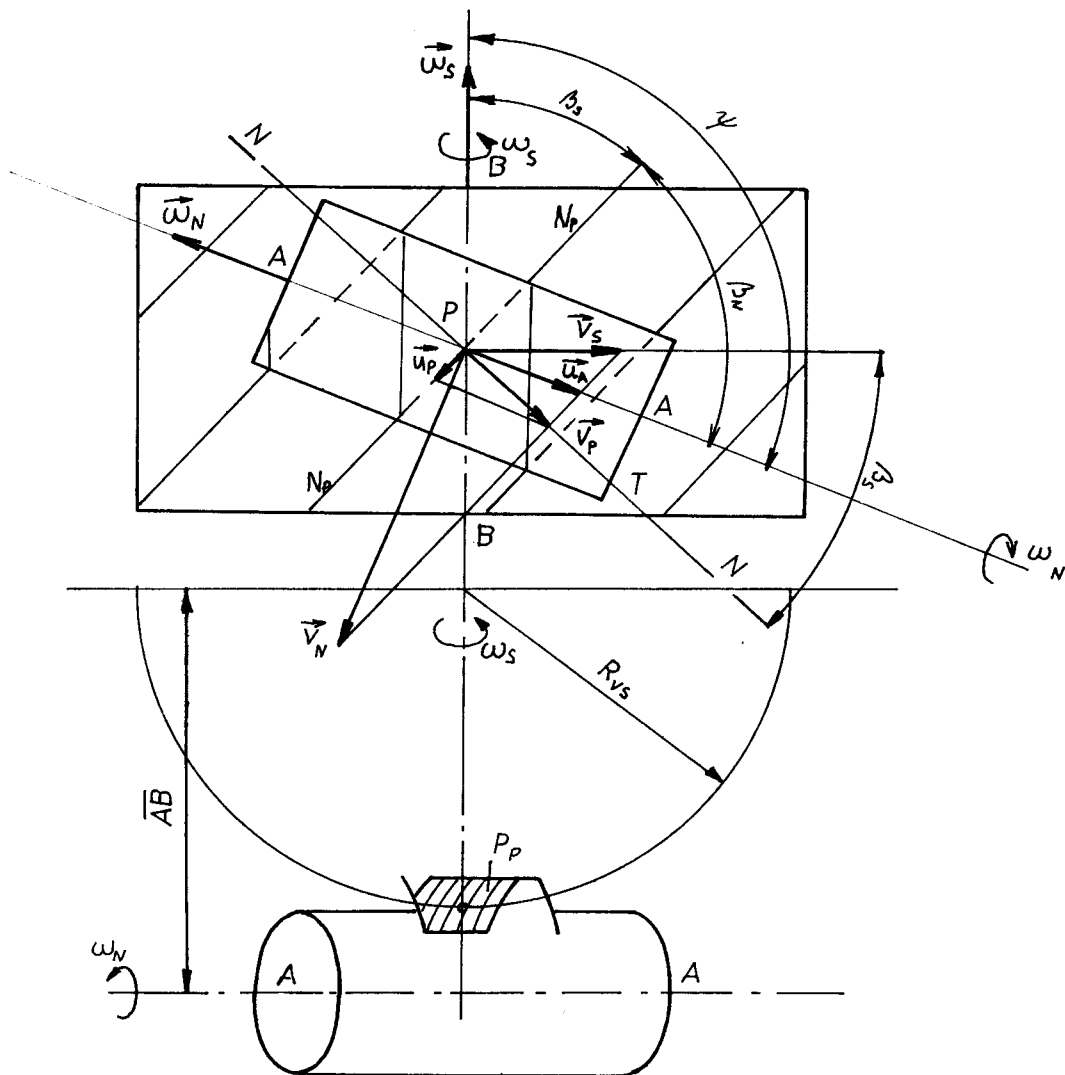
Průměty vektorů $\vec{v}_n$, $\vec{v}_s$ na směr $\vec{v}_p$ musí být shodné.

$$\vec{v}_p = R_{vn} \vec{\omega}_n \cos \beta_n = R_{vs} \vec{\omega}_s \cos \beta_s \quad (3.6)$$

Vektor $\vec{v}_p$ rozložíme na dvě složky:

$$1. \vec{u}_a = \frac{\vec{v}_p}{\sin \beta_n} \quad \vec{u}_a - \text{má směr totožný se směrem osy AA}$$

$$2. \vec{u}_p = \vec{v}_p \cotg \beta_n \quad \vec{u}_p - \text{má směr totožný s tvořící čarou } N_p N_p \text{ povrchu } P_p$$



Obr.5.

Obálka válcového povrchu P_p nezávisí na postupném přímočarém pohybu $\vec{u}_p$, který je rovnoběžný s tvořící čarou, proto jej nebudeme brát v úvahu. Zbývají dva kolineární vektory $(-\vec{\omega}_n, \vec{u}_a)$ tvoří tzv. kinematický šroub, který vytvoří sdružený povrch nástroje.

Parametr šroubového pohybu

$$h = \frac{u_s}{\omega_n} = \frac{\vec{v}_p}{\sin \beta_n \omega_n} = \frac{R_{vn} \vec{\omega}_n \cos \beta_n}{\sin \beta_n \vec{\omega}_n} = R_{vn} \cotg \beta_n \quad (3.7)$$

Pro nalezení N je nutné určit charakteristiku povrchu P_p . Tato charakteristika je podle kinematické teorie obálek takové geometrické místo bodů povrchu P_p , ve

kterých normály jsou současně normálami šneku. Výchozí povrch nástroje dostaneme, jestliže hledané tvořící čáře (charakteristice) udělíme šroubový pohyb s parametrem h (rovnice 3.7). Tento vzájemný pohyb povrchů N a S charakterizuje základní profilující pohyb výchozího šneku frézy, na kterém jsou postaveny kinematické převody obráběcích odvalovacích strojů.

3.6 Podmínky vytváření profilu odvalováním

3.6.1. Existence výchozího povrchu nástroje

Podle první podmínky /5/ je nutné, aby ke všem bodům profilu součásti existovaly sdružené body profilu nástroje a postupně s nimi přišly do styku. Musí být dodrženy tři základní předpoklady:

- 1/ Sdružené profily mají v dotykovém bodě společnou tečnu a normálu
- 2/ Společná normála k oběma sdruženým profilům prochází v bodě dotyku profilů neměnným bodem - polem odvalování, který je bodem dotyku valivé kružnice součásti s valivou přímkou nástroje.
- 3/ Normály k danému profilu součásti musí protínat valivou kružnici součásti a musí plynule měnit svou polohu.

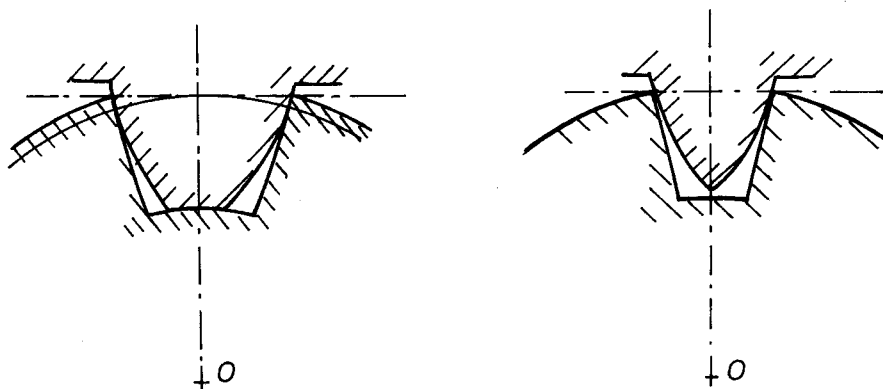
3.6.2 Podmínka styku výchozího tělesa nástroje a součásti bez vzájemného pronikání

U odvalování ozubeného kola a hřebene dochází k odvalování nebo styku dvou vypouklých povrchů až do bodu zvratu. Dál dochází k vnitřnímu styku (podřezání) profilu (obr.6).

F - poloha koncového bodu na čáře záběru vůči bodu zvratu I.

Je-li bod F nad I (bodem zvratu) nedojde k podřezání a naopak.

zmenšuje hranice správného oborbení profilu. Přejchodové křivky se vytvářejí v těch místech profilu součásti, které nemají odpovídající sdružené body na skutečné řezné hraně nástroje. Je nutné přihlížet k tomu, aby přechodové křivky nepřesahovaly přípustné meze z hlediska využitelnosti součásti.



Obr.7.

4. TEORIE OBALOVÝCH PLOCH, APLIKACE TENZOROVÉ ANALÝZY NA PROSTOROVÉ PLOCHY

Podle předchozích kapitol, které zkoumají sdružené povrchy a jejich vlastnosti je zřejmé, že tyto povrchy v prostoru (a tedy profily v rovině) jsou vzájemně se obalující plochy (křivky) vznikající při vzájemném relativním pohybu nástroje a součásti při obrábění. Ukažme si některé poznatky a vlastnosti z nich vyplývající, jež se budou dále používat a z nichž se vychází při obecném navrhování výchozího povrchu odvalovací frézy.

4.1 Literární poznatky

Vektorový prostor - v našem případě budeme používat obyčejný Euklidovský trojrozměrný prostor, uspořádané trojce reálných čísel. Vektor označíme jako

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$$

Pro vektory jsou definovány základní vztahy a zákony /3/. Skalární součin dvou vektorů označíme

$$|\vec{a}| |\vec{b}| \cos \varphi = \vec{a} \cdot \vec{b}$$

a v souřadnicích pravoúhlých

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3$$

Symbolický zápis vektorového součinu budeme zapisovat takto

$$\vec{w} = \vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix}$$

Podobně smíšený vektorový součin

$$\vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c}) = \det [\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

Rovnými závorkami nebo hranatými závorkami a zkratkou

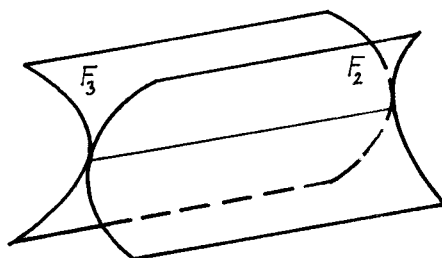
det budeme označovat determinant.

Matici pak označíme hranatými závorkami bez zkratky det a nebo dvojími rovnými závorkami.

$$[\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}] = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

4.2 Teorie obalových ploch

Při obrábění si lze představit nástroje a součásti jako plochy (křivky), které se navzájem obalují. Toho lze využít při obecném navrhování výchozího povrchu odvalovací frézy /1/. Nechť plocha F_3 na obr.8. je plochou nástroje a plocha F_2 nechť je plochou součásti.



Obr.8.

Uvažujeme dále jednoparametrický systém ploch

$$\vec{X} = \vec{X}(u, v, \alpha) \quad (4.1)$$

kde pro každé pevné α představuje (4.1) plochu (nazveme ji α plochu) a kde u, v jsou obecně křivočaré souřadnice. Ve speciálním případě, kdy se jedná o pohyb pevné plochy udává parametr α okamžitou polohu plochy. Rozepíšeme-li (4.1) do složek, máme:

$$\begin{aligned} x &= x(u, v; \alpha) \\ y &= y(u, v; \alpha) \\ z &= z(u, v; \alpha) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Předpokládáme, že dané funkce (4.2) jsou dostatečně hladké. Konkrétně uvažujeme existenci spojitých partiálních derivací do třetího řádu podle u, v, α na nějaké trojrozměrné oblasti D .

Je-li u, α pevné, potom (4.1) představuje křivku (v je proměnné), kterou nazveme (u, α) - křivka. Podobně definujeme (v, α) - křivky a (u, v) - křivky. Jedná-li se o pohyb plochy, dává (u, v) - křivka pohyb bodu (u, v) .

Požadujeme dále, aby křivočarý souřadý systém byl regulární. To znamená, aby se žádná (u, α) - křivka nedotýkala (v, α) - křivky. Formálně zapsáno: $h(T) = 2$ pro $(u, v, \alpha) \in D$ kde

$$T = \begin{vmatrix} x_u & y_u & z_u \\ x_v & y_v & z_v \end{vmatrix}$$

vektory $\vec{X}_u = (x_u, y_u, z_u)$ a $\vec{X}_v = (x_v, y_v, z_v)$

určují tečnou rovinu α - plochy.

Bod obalové plochy systému ploch (4.1) (stručně obálky), je takový bod, v němž tečna (u, v) - křivky leží v tečné rovině plochy a tedy

$$\det [\vec{X}_u, \vec{X}_v, \vec{X}_\alpha] = 0 \quad (4.3)$$

Jinými slovy pro dvě polohy plochy F_2 předpokládejme, že jsou soumезné, a protínají se v nějaké průsečnici. Libovolný bod na této průsečnici nechť má souřadnice (u, v, α) na ploše α .

Současne je bodem plochy $\alpha + d\alpha$. Potom tento bod má vzhledem k ploše $\alpha + d\alpha$ parametry $(u + du, v + dv, \alpha + d\alpha)$ /1/. Podmínka, aby bod ležel současně v soumезných plochách je

$$\vec{X}(u, v; \alpha) = \vec{X}(u + du, v + dv; \alpha + d\alpha)$$

neboli

$$\vec{X}_u du + \vec{X}_v dv + \vec{X}_\alpha d\alpha = 0$$

odtud vyplývá, že tři vektory $\vec{X}_u, \vec{X}_v, \vec{X}_\alpha$ jsou komplanární a proto smíšený součin (determinant tří vektorů) bude roven nule (4.3)

$$\vec{X}_u (\vec{X}_v \times \vec{X}_\alpha) = \det [\vec{X}_u, \vec{X}_v, \vec{X}_\alpha] = 0 \quad (4.4)$$

Rovnice (4.3) je rovnicí tří proměnných. Tato rovnice nemusí být ovšem splněna pro žádné $(u, v; \alpha) \in D$. Potom obálka systému neexistuje. Je-li $(u, v, \alpha) \in D$ řešením rovnice (4.3), lze z (4.3) vyjádřit jednu ze tří pro-

měnných pomocí zbylých dvou a dosadit do (4.1). Tím dostaneme obálku jakožto vektorovou funkci dvou parametrů. Vyjádříme-li například z (4.3) $u = v(v, \alpha)$, je vyjádření obalové plochy

$$\vec{OB} = \vec{X}(u(v, \alpha), v; \alpha) \quad (4.5)$$

Pro pevné α (proměnné v) dává (4.5) křivku, kterou nazýváme α -charakteristikou. α -charakteristika leží v α -ploše a představuje množinu bodů dotyku α -plochy s obálkou, nebo řečeno z druhé strany je průsečnou křivkou dvou soumězných ploch. Odtud například vyplývá, že v případě pohybu roviny jsou α -charakteristiky přímkami a obálka je plocha přímková rozvinutelná (rozvinutelná plocha je plocha přímková, kde ve všech bodech přímky je společná tečná rovina).

Na jiném příkladu si ukážeme platnost vztahu (4.3) /2/. Předpokládejme, že v bodech obálky platí:

$$\alpha = \alpha(u, v) \quad (4.6)$$

Nyní se obálka určí z rovnic (4.6) a 4.1) s nezávisle proměnnými u, v . Parciálně derivujeme (4.1) podle parametrů u, v s použitím vztahu (4.6) /4/.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{X}}{\partial u} &= \vec{X}_u + \vec{X}_\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial u} \\ \frac{\partial \vec{X}}{\partial v} &= \vec{X}_v + \vec{X}_\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial v} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$\frac{\partial \vec{X}}{\partial u}$ je parciální derivace podle nezávisle proměnné u při $v = \text{konst.}$, při čemž argument α závisí na u podle vztahu (4.6).

Jetliže se v bodě (u, v) obálka dotýká povrchu soustavy (4.1), kde platí vztah (4.6), pak oba vektory (4.7) jsou tečnami k obálce a musí ležet v tečné rovině soustavy (4.1). Tedy budou kolmé k její normále

$$\vec{N} = \vec{X}_u \times \vec{X}_v$$

Pravoúhlost vektorů je vyjádřena skalárním součinem vektoru $\vec{N}$ a vektoru tečny z rovnice (4.7) platí:

$$\left(\vec{X}_u + \vec{X}_\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial u} \right) \cdot \left(\vec{X}_u \times \vec{X}_v \right) = 0$$

$$(\vec{X}_v + \vec{X}_u \frac{\partial \alpha}{\partial v}) (\vec{X}_u \times \vec{X}_v) = 0$$

neboli smíšený součin

$$\det / \vec{X}_u + \vec{X}_u \frac{\partial \alpha}{\partial u}, \vec{X}_u, \vec{X}_v / = \det / \vec{X}_u, \vec{X}_u, \vec{X}_v / \frac{\partial \alpha}{\partial u} = 0$$

$$\det / \vec{X}_v + \vec{X}_u \frac{\partial \alpha}{\partial v}, \vec{X}_u, \vec{X}_v / = \det / \vec{X}_u, \vec{X}_u, \vec{X}_v / \frac{\partial \alpha}{\partial v} = 0$$

Z toho vyplývá, již odvozený vztah v rovnici (4.4).

Důkazem správnosti je předpoklad $\det / \vec{X}_u, \vec{X}_v, \vec{X}_u / \neq 0$

Z toho by potom vyplývalo, že

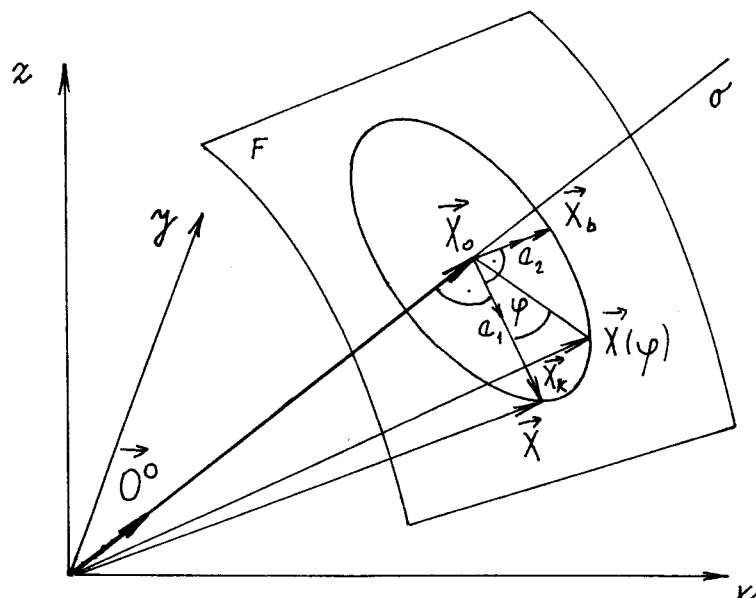
$$\frac{\partial \alpha}{\partial u} = 0; \quad \frac{\partial \alpha}{\partial v} = 0, \text{ nebo že } \alpha = \text{konstanta !}$$

To nevyhovuje rovnici soustavy ploch a proto musí platit vztah (4.4). Při volbě vyjádření toho kterého parametru na dalších dvou se řídíme obtížností matematického vyjádření.

4.3 Tenzor otočení

Při obrábění je nezbytné znát tvar obrobeného povrchu jako výsledek práce řezných částí nástroje. Většina pohybu při obrobení jsou pohyby rotační a posuvné, nebo jejich kombinace. Trajektorie těchto pohybů nám charakterizují obecné plochy nástroje nebo obrobku. Je-li předepsaný tvar profilu součásti a je-li známa kinematika obrábění, pak lze najít profil nástroje jímž můžeme vyrobit požadovaný tvar obrobku a nebo naopak. Základem obecného řešení je tenzor otočení, který má universální charakter /2/.

Mějme plochu (nástroje nebo součásti) F (obr.9) na níž je libovolný bod X s radiusvektorem $\vec{X}$, který se otáčí v soustavě souřadnic x, y, z kolem osy O . Úhel pootočení vektoru v rovině kolmé na osu otáčení je φ , jednotkový vektor ve směru osy otáčení nechť je $\vec{O}^0$, pootočený vektor $\vec{X}$ označme $\vec{X}(\varphi)$. Vektor $\vec{X}$ rozložíme do dvou složek, do osy O - složka $\vec{X}_0$ a do směru kolmého na osu O - složka $\vec{X}_k$. Vektor $\vec{X}_k$ leží v rovině, ve které leží při otáčení koncový bod radius vektoru $\vec{X}$ a zároveň je kolmý na vektor $\vec{X}_k$. Jednotkový vektor $\vec{e}_1$ si můžeme označit $(\vec{X}_k)^0$.



Obr. 9.

ρ - velikost vektoru $\rho = |\vec{X}_k|$

potom lze odvodit

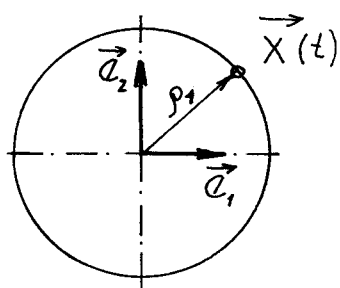
$$\vec{X}_b = \vec{X} \times \vec{O}^0 = \vec{X}_k \times \vec{O}^0 = \rho \cdot \vec{e}_2 \quad (4.8)$$

$$\vec{X}_k = \rho \vec{e}_1 \quad (4.9)$$

$$\vec{X} = \vec{X}(x_1, x_2, x_3)$$

$$\vec{O}^0 = \vec{O}^0(o_1, o_2, o_3)$$

Pro kružnici platí (obr.10).



$$\vec{X}(t) = (\vec{e}_1 \cos t + \vec{e}_2 \sin t) \rho_1$$

$$|\vec{X}(t)|^2 = \rho_1^2$$

ρ_1 - poloměr

Obr. 10.

Vektor pootočený zapíšeme jako součet dílčích vektorů

$$\vec{X}(\varphi) = \rho (\vec{e}_1 \cos \varphi + \vec{e}_2 \sin \varphi) + \vec{X}_0 \quad (4.10)$$

Rovnoběžný vektor s osou $O, \vec{X}_0$ si vyjádříme jako průmět vektoru $\vec{X}$ do osy O a ten je vynásobený jednotkovým vektorem $\vec{O}^0$.

$$\vec{X}_0 = \vec{0}^0 \otimes \vec{0}^0 \cdot \vec{X} \quad (4.11)$$

kde $\vec{0}^0 \otimes \vec{0}^0$ představuje dyadový součin vektoru $\vec{0}^0$ (t. zv. tenzorové násobení).

Vektor $\vec{X}_k$ pak můžeme vyjádřit jako rozdíl vektoru $\vec{X}$ a $\vec{X}_0$

$$\begin{aligned} \vec{X}_k &= \vec{X} - \vec{X}_0 = \vec{X} - \vec{0}^0 \otimes \vec{0}^0 \cdot \vec{X} = \\ &= \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{pmatrix} (o_1, o_2, o_3) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \\ &= \left[E - \begin{pmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{pmatrix} (o_1, o_2, o_3) \right] \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.12)$$

E je jednotkový tenzor (tenzor identity)

$$E_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{je-li } i = j \\ 0 & \text{je-li } i \neq j \end{cases}$$

Nyní můžeme rozepsat vztah (4.12)

$$\begin{aligned} \vec{X}_0 &= \begin{pmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{pmatrix} (o_1, o_2, o_3) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} o_1 o_1 & o_1 o_2 & o_1 o_3 \\ o_2 o_1 & o_2 o_2 & o_2 o_3 \\ o_3 o_1 & o_3 o_2 & o_3 o_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.13)$$

a také vztah (4.8)

$$\vec{X}_b = \vec{0}^0 \times \vec{X} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ o_1 & o_2 & o_3 \\ x_1 & x_2 & x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_2 x_3 - o_3 x_2 \\ o_3 x_1 - o_1 x_3 \\ o_1 x_2 - o_2 x_1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \theta & o_3 & o_2 \\ o_3 & \theta & -o_1 \\ -o_2 & o_1 & \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = R_{(o)} \cdot \vec{X} \quad (4.14)$$

$R_{(o)}$ je antisymetrický tenzor definovaný

$$R_{(o)} = \begin{bmatrix} \theta & -o_3 & o_2 \\ o_3 & \theta & -o_1 \\ -o_2 & o_1 & \theta \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$R_{(o)}$ splňuje podmínky:

$$1) a_{ij} = -a_{ji}$$

$$2) a_{ii} = \theta$$

Přepíšeme rovnici (4.10) pro potočený vektor $X(\varphi)$ viz vztahy (4.9 a (4.8), (4.14), (4.12), (4.11) a upravíme.

$$\begin{aligned} \vec{X}(\varphi) &= \vec{X}_k \cos \varphi + \vec{0}^o \times \vec{X} \sin \varphi + \vec{X}_o = \\ &= (\vec{X} - \vec{0}^o \otimes \vec{0}^o \cdot \vec{X}) \cos \varphi + R_{(o)} \vec{X} \sin \varphi + \vec{0}^o \otimes \vec{0}^o \cdot \vec{X} = \\ &= [(\mathbf{E} - \vec{0}^o \otimes \vec{0}^o) \cos \varphi + R_{(o)} \sin \varphi + \vec{0}^o \otimes \vec{0}^o] \vec{X} = A_o^\varphi \vec{X} \end{aligned} \quad (4.16)$$

A_o^φ - je tenzor otočení vektoru $\vec{X}$ okolo osy 0 o úhel φ . Velikost vektoru $\vec{X}$ se při otáčení nemění.

Vlastnosti tenzoru otočení

$$A_o^\varphi = (\mathbf{E} - \vec{0}^o \otimes \vec{0}^o) \cos \varphi + R_{(o)} \sin \varphi + \vec{0}^o \otimes \vec{0}^o \quad (4.17)$$

Provedeme první derivaci podle φ

$$\frac{dA_o^\varphi}{d\varphi} \bigg/ \varphi = \theta = R_{(o)} \quad (4.18)$$

$$\frac{dA_o}{d\varphi} = R_{(o)} A_o$$

K tenzoru otočení lze dojít také na základě řešení diferenciální rovnice. Otáčeli-li se bod $X = X(\varphi)$ kolem osy o, máme

$$\frac{d}{d\varphi} \vec{X}(\varphi) = \vec{0} \times \vec{X}(\varphi) = R_{(o)} \vec{X}(\varphi) \quad (4.19)$$

Řešení této rovnice je obdobně jako v jednorozměrném případě.

$$X(\varphi) = e^{R_{(0)}\varphi} \vec{X}(\theta); \text{ odtud} \\ A_0\varphi = e^{R_{(0)}\varphi}, \text{ kde obecně} \quad (4.20)$$

$$e^B = E + \frac{B}{1!} + \frac{B^2}{2!} + \dots$$

Odtud také vidíme

$$\left(e^{R_{(0)}\varphi} \right)' = R_{(0)} e^{R_{(0)}\varphi} = R_{(0)} A_0 \varphi$$

Zřejmě také platí, že tenzory reciproké a transponované jsou si rovny

$$(A_0^\varphi)^{-1} = (A_0^\varphi)^* = A_0^{-\varphi} \quad (4.21)$$

Pro otáčení kolem téže osy lze psát

$$A_0^t A_0^\varphi = A_0^{t+\varphi} \quad (4.22)$$

Podle vztahu (4.14) pak můžeme psát

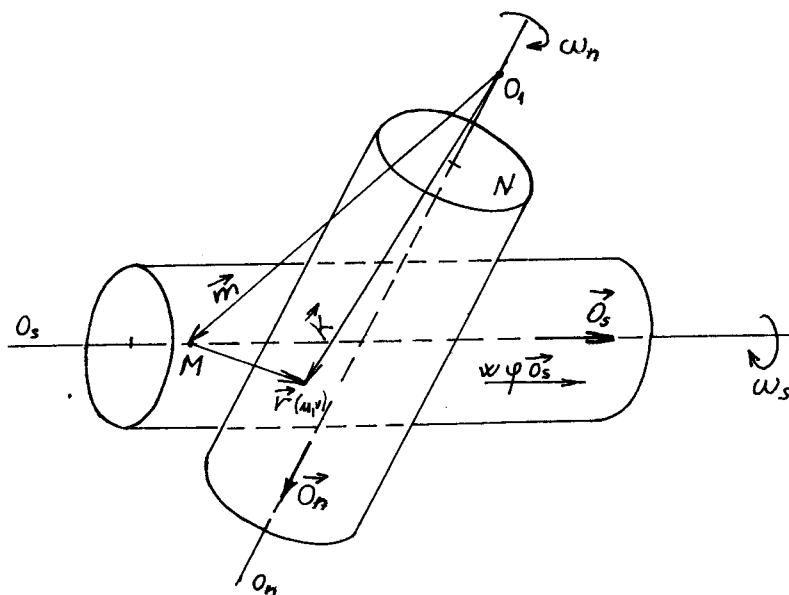
$$\frac{d}{d\varphi} A_0^{(c+p\varphi)} = p R_{(0)} A_0^{(c+p\varphi)} \quad (4.23)$$

4.4 Odvalovací frézování

4.4.1 Obecná formulace úkoly pro odvalovací frézování

Vycházíme z poznatků o odvalovacím způsobu frézování. Představme si obrobek s nástrojem jako vzájemně závislý pohyb dvou členů, které se po sobě odvalují (obr.11).

Při tom oba členy soustavy (v našem případě válce) se otáčejí kolem svých os O_s, O_n . Osy jsou mimoběžné. Vezmeme vektor $\vec{m}$ jako polohový vektor bodu M, ležícího na ose válce součásti S, vzhledem k pevně zvolenému bodu O_n na ose válce nástroje N. Zastavíme pohyb nástroje a necháme pohybovat součást vzhledem k nehybnému nástroji s tím, že součást přejímá všechny pohyby dosud vykonávané nástrojem. Označme plochu



Obr.11.

povrchu obrobku vektorem (symbolem) $\vec{K}$. Nyní napíšeme vztah, který bude vyjadřovat celou soustavu těchto povrchů při vykonávání příslušných pohybů vzhledem k bodu Q .

$$\vec{K} = A_{On}^{\varphi} (\vec{m} + A_{Os}^{p\varphi} \vec{r}(u, v) + w\varphi \vec{o}_s) \quad (4.24)$$

A_{On}^{φ} - tenzor otočení kolem osy nástroje

$A_{Os}^{p\varphi}$ - tenzor otočení kolem osy součásti

p - poměr úhlových rychlostí součásti a nástroje

$$p = \frac{\omega_s}{\omega_n}$$

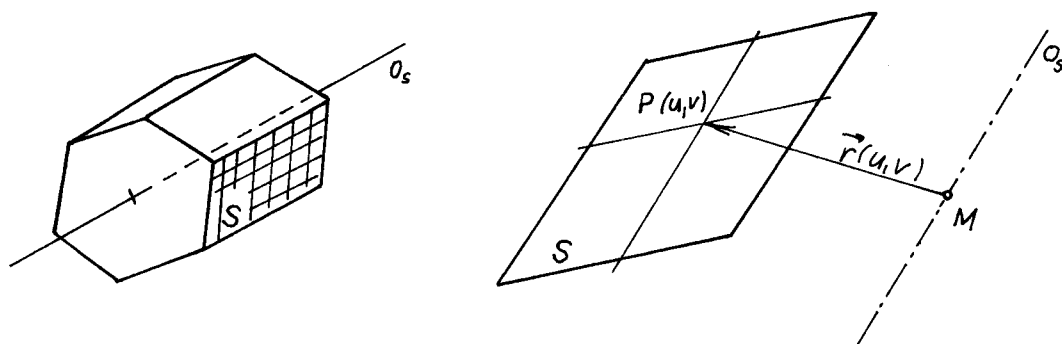
$\vec{r}(u, v)$ - parametrické vyjádření plochy povrchu součásti vzhledem k bodu M

w - charakterizuje posunutí součásti ve směru osy os

4.4.2 Návrh výchozího povrchu odvalovací frézy pro zadaný tvar součásti.

Příklad pro aplikaci výchozího povrchu odvalovací frézy si zvolíme rovinnou plochu, která se jeví jako

nejjednodušší tvar vhodný pro obrábění. Vezměme si plochu stěny pravidelného n-bokého hranolu (obr.12).



Obr.12

Obrobená plocha součásti S je určena parametry u, v . Bod P, který leží na ploše S je popsán dvěma pevnými hodnotami u, v vzhledem k nějakému pevně zvolenému bodu M na ose součásti. Vyjádření plochy S:

$$\vec{r}(u, v) = \vec{\rho} + u\vec{q} + v\vec{O_s} \quad (4.25)$$

dosadíme do rovnice (4.24)

$$\vec{K} = A_{On}^{\varphi} (m + A_{Os}^{\varphi} (\vec{\rho} + u\vec{q} + v\vec{O_s}) + w\varphi\vec{O_s}) \quad (4.26)$$

Rovnice (4.26) vyjadřuje plochu povrchu součásti při libovolném jejím pootočení kolem os O_n , O_s a posunutí kolem osy O_s .

Vyjádříme si obálku parametrické soustavy ploch (4.26), která bude představovat teoretický výchozí povrch odvalovací frézy.

Podmínka odvalení

$$\det [\vec{K}_n, \vec{K}_v, \vec{K}_\varphi] = 0 \quad (4.27)$$

Vyjádříme jednotlivé parciální derivace výrazu (4.26) podle u, v, φ .

$$\vec{K}_u = A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{\varphi} \vec{q} = \vec{C}_1 \quad (4.28)$$

$$\vec{K}_v = A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{\varphi} \vec{Os} = A_{On}^{\varphi} \vec{Os} = \vec{C}_2 \quad (4.29)$$

Rozepíšeme rovnici (4.26)

$$\vec{K} = A_{On}^{\varphi} \vec{m} + A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{\varphi} (\vec{\rho} + u\vec{q} + v\vec{Os}) + A_{On}^{\varphi} w\vec{Os} \quad (4.30)$$

Potom derivace podle φ

$$\vec{K}_{\varphi} = R_{(On)} A_{On}^{\varphi} \vec{m} + R_{(On)} + pR (A_{On}^{\varphi} \vec{Os}) A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{\varphi} (\vec{\rho} + u\vec{q} + v\vec{Os}) + [R_{(On)}\varphi + E] A_{On}^{\varphi} w\vec{Os}$$

Provedeme substituci

$$\vec{a} = A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{\varphi}$$

$$\vec{b} = [R_{(On)} + pR (A_{On}^{\varphi} \vec{Os})]$$

$$\vec{C}_3 = R_{(On)} A_{On}^{\varphi} \vec{m} + [R_{(On)}\varphi + E] A_{On}^{\varphi} w\vec{Os} + \vec{b} \vec{a} \vec{\rho} \quad (4.32)$$

$$\vec{C}_4 = \vec{a} \vec{q} \quad (4.33)$$

$$\vec{C}_5 = \vec{a} \cdot \vec{Os} \quad (4.34)$$

$$\vec{K}_{\varphi} = \vec{C}_3 + u\vec{C}_4 + v\vec{C}_5 \quad (4.35)$$

Dosadíme do rovnice (4.4)

$$\det / \vec{C}_1, \vec{C}_2, \vec{C}_3 + u\vec{C}_4 + v\vec{C}_5 / = 0$$

smíšený součin rozepíšeme

$$\det / \vec{C}_1, \vec{C}_2, \vec{C}_3 / + u \det / \vec{C}_1, \vec{C}_2, \vec{C}_4 / + v \det / \vec{C}_1, \vec{C}_2, \vec{C}_5 / = 0 \quad (4.36)$$

Vyjádříme závislost parametru u na parametru v

$$u = - \frac{\det / \vec{C}_1, \vec{C}_2, \vec{C}_3 / + v \det / \vec{C}_1, \vec{C}_2, \vec{C}_5 /}{\det / \vec{C}_1, \vec{C}_2, \vec{C}_4 /} \quad (4.37)$$

zjednodušeně

$$u = A(\varphi) + vB(\varphi) \quad (4.38)$$

Dosazením do rovnice (4.26) za parametr u, získáme rovnici obálky, kterou můžeme zjednodušeně zapsat

$$\vec{OB} = \vec{AK}(\varphi) + v\vec{BN}(\varphi) \quad (4.39)$$

Nebo změnou vyjádření závislosti parametru v na u z rovnice (4.36).

$$\vec{OB} = \vec{U}_{(\varphi)} + u\vec{V}_{(\varphi)} \quad (4.40)$$

Poznámka: pro pevné φ dostáváme přímku, která je charakteristikou hledané obalové plochy (která je nutně plochou rozvinutelnou, viz kapitola 4.2).

4.4.3 Průsečíky rovin s obálkou

Pro vyjádření tvaru ostří nástroje je třeba naši obálku protnout takovou rovinou, která by zahrnovala i část geometrie nástroje, které ovlivňují tvar ostří (drážka, přímá šroubová, úhel čela).

4.4.3.1 Řez obálky s obecnou plochou

Vyjádříme si obecně parametricky plochu

$$\vec{Y} = \vec{Y}(s, z) \quad (4.41)$$

vyjádření obálky

$$\vec{OB} = \vec{U}_{(\varphi)} + u\vec{V}_{(\varphi)} \quad (4.42)$$

hledáme-li průsečík obálky s rovinou, pak musí platit

$$\vec{U}_{(\varphi)} + u\vec{V}_{(\varphi)} = \vec{Y}(s, z) \quad (4.43)$$

Speciálně bude-li naše plocha rovinou

$$\vec{Y} = \vec{Q} + \vec{P}s + \vec{R}z \quad (4.44)$$

$$\vec{U}_{(\varphi)} + u\vec{V}_{(\varphi)} = \vec{Q} + \vec{P}s + \vec{R}z \quad (4.45)$$

dostáváme systém 3 lineárních rovnic pro tři neznámé u, s, z .

$$\vec{P}s + \vec{R}z - u\vec{V}_{(\varphi)} = \vec{U}_{(\varphi)} - \vec{Q} \quad (4.46)$$

Označíme matici

$$M = [\vec{P}, \vec{R}, -\vec{V}_{(\varphi)}] \quad (4.47)$$

úpravou dostaneme

$$\begin{pmatrix} s \\ z \\ u \end{pmatrix} = M^{-1} (\vec{U}_{(\varphi)} - \vec{Q}) \quad (4.48)$$

kde s, z, u jsou hledané parametry rovnic (4.19), (4.21). Dosazením do rovnic (4.42) nebo (4.44) získáme průsečík roviny s φ -charakteristikou obálky.

4.4.3.2 Neparametrické vyjádření roviny řezu

Je-li rovina dána rovnící (neparametricky) (obr.13)

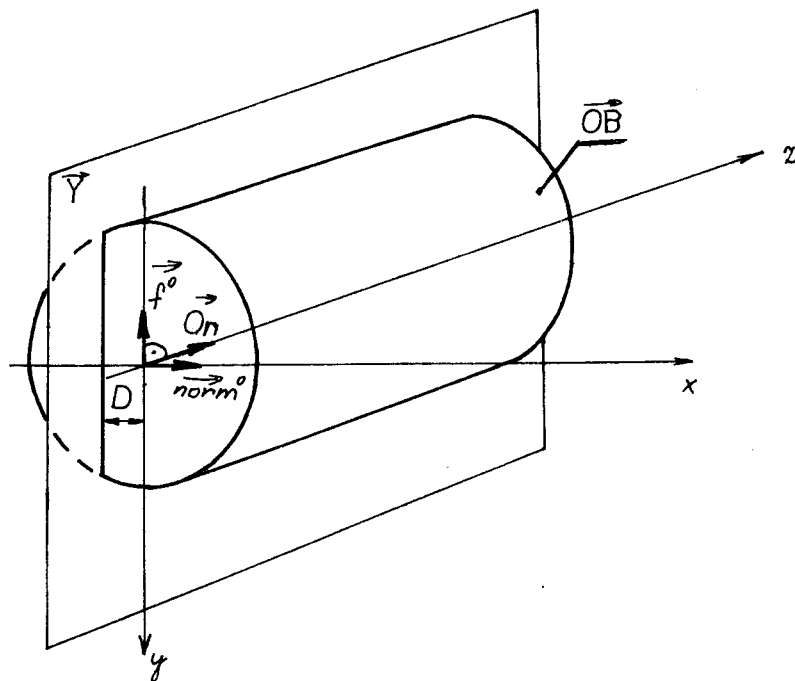
$$\vec{Y} \cdot \vec{\text{norm}}^0 = D \quad (4.49)$$

na př. je-li

$$\vec{\text{norm}}^0 = \vec{O_n} \times \vec{f}^0 \quad (4.50)$$

$\vec{O_n}$ - jednotkový vektor osy nástroje

$\vec{f}^0$ - vektor libovolně zvolený (jednotkový, kolný k $\vec{O_n}$)



Obr.13.

D - je vzdálenost od počátku. Hledáme-li průsečík
 s - charakteristikou obálky, pak dosadíme do (4.49)
 (4.42)

$$\vec{Y} = \vec{OB} \quad (4.51)$$

$$(\vec{U}(\varphi) + u\vec{V}(\varphi)) \vec{\text{norm}}^0 = D \quad (4.52)$$

odtud

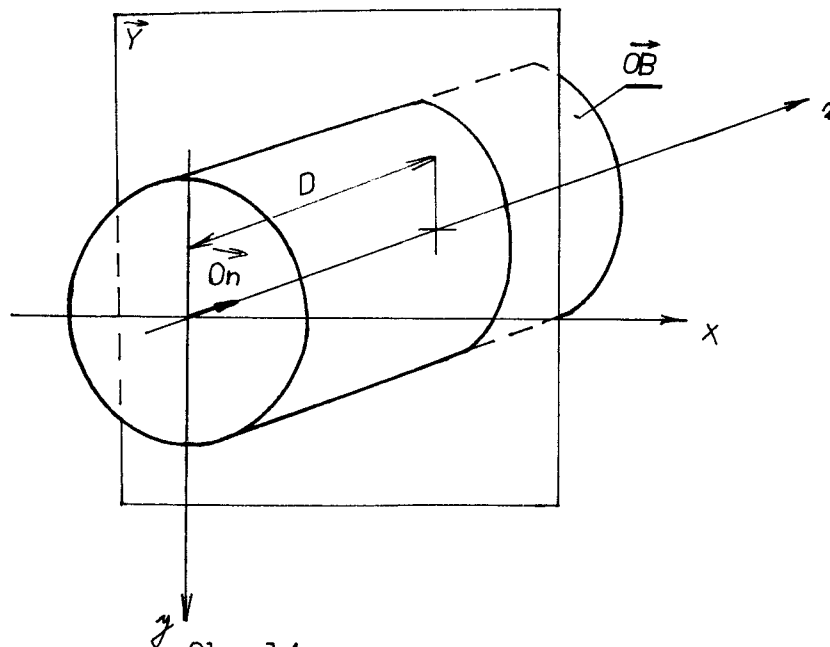
$$\vec{U}(\varphi) \vec{\text{norm}}^0 + u\vec{V}(\varphi) \vec{\text{norm}}^0 = D \quad (4.53)$$

$$u = \frac{D - \vec{U}(\varphi) \vec{\text{norm}}^0}{\vec{V}(\varphi) \vec{\text{norm}}^0} \quad (4.54)$$

dosazením do rovnice $\vec{OB}$ (4.42) získáme hledaný průsečík
 s φ - charakteristikou obálky.

4.4.3.3 Rovina normálová

Rovina kolmá k ose nástroje (obr.14)



$$\vec{Y} \cdot \vec{O_n} = D \quad (4.55)$$

D - vzdálenost od počátku

$\vec{O_n}$ - jednotkový vektor osy nástroje

průsečík obálky s rovinou

$$(\vec{U}_{(\varphi)} + u\vec{V}_{(\varphi)})\vec{O_n} = D$$

$$\vec{U}_{(\varphi)} \vec{O_n} + u \vec{V}_{(\varphi)} \vec{O_n} = D$$

$$u = \frac{D - \vec{U}_{(\varphi)} \vec{O_n}}{\vec{V}_{(\varphi)} \vec{O_n}} \quad (4.56)$$

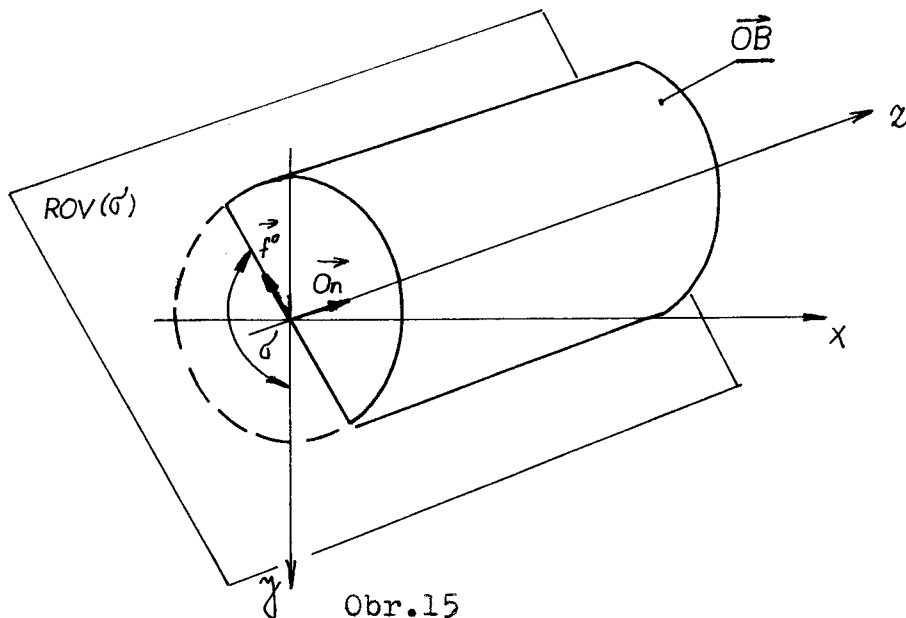
Dosazením do rovnice obálky (4.42) získáme průsečík s normálnou rovinou.

4.4.3.4 Rovina jdoucí osou nástroje (obr.15)

$$ROV(\sigma) = \vec{P_s} + \vec{R_z} \quad (4.57)$$

$$ROV(\sigma) = s\vec{O_n} + zA_{O_n}^{\sigma} \vec{f}^o \quad (4.58)$$

$\vec{f}^o$ - jednotkový vektor na ose y



Dále již známou úpravou

$$s\vec{O_n} + zA_{On}^{\sim} \vec{f^0} - u\vec{V}_{(\varphi)} = \vec{U}_{(\varphi)} \quad (4.59)$$

sestavíme matici

$$M = [\vec{O_n}, A_{On}^{\sim} \vec{f^0}, -\vec{V}_{(\varphi)}] \quad (4.60)$$

řešení tří lineárních rovnic

$$\begin{pmatrix} s \\ z \\ u \end{pmatrix} = M^{-1} \vec{U}_{(\varphi)} \quad (4.61)$$

Dosazením do rovnice obálky, nebo roviny, získáme průsečík roviny s obálkou.

Jiná varianta pro rovinu jdoucí osou nástroje.

$$\vec{norm}^0 = \vec{O_n} \times \vec{f^0} \quad (4.62)$$

v obecné poloze

$$A_{On}^{\sim} (\vec{O_n} \times \vec{f^0}) = \vec{O_n} \times A_{On}^{\sim} \vec{f^0} = \vec{norm}(\sigma) \quad (4.63)$$

Rovnice roviny

$$\vec{Y} \vec{norm}(\sigma) = -\theta \quad (4.64)$$

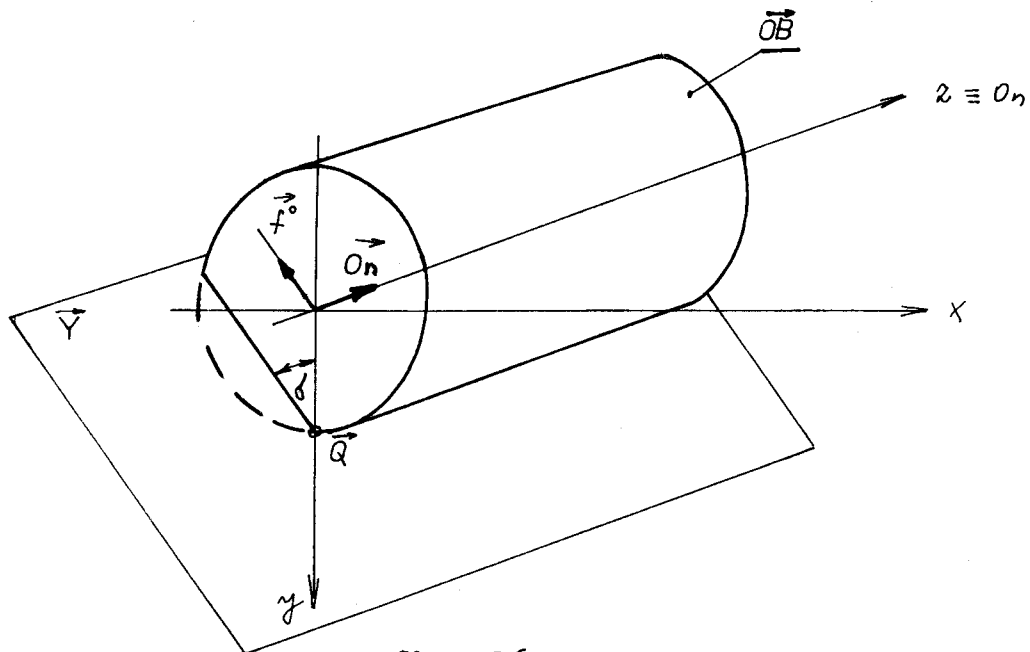
průsečík

$$(\vec{U}_{(\varphi)} + u\vec{V}_{(\varphi)}) \cdot \vec{norm}(\sigma) = -\theta$$

$$n = - \frac{\vec{U}_{(\varphi)} \cdot \vec{norm}(\sigma)}{\vec{V}_{(\varphi)} \cdot \vec{norm}(\sigma)}$$

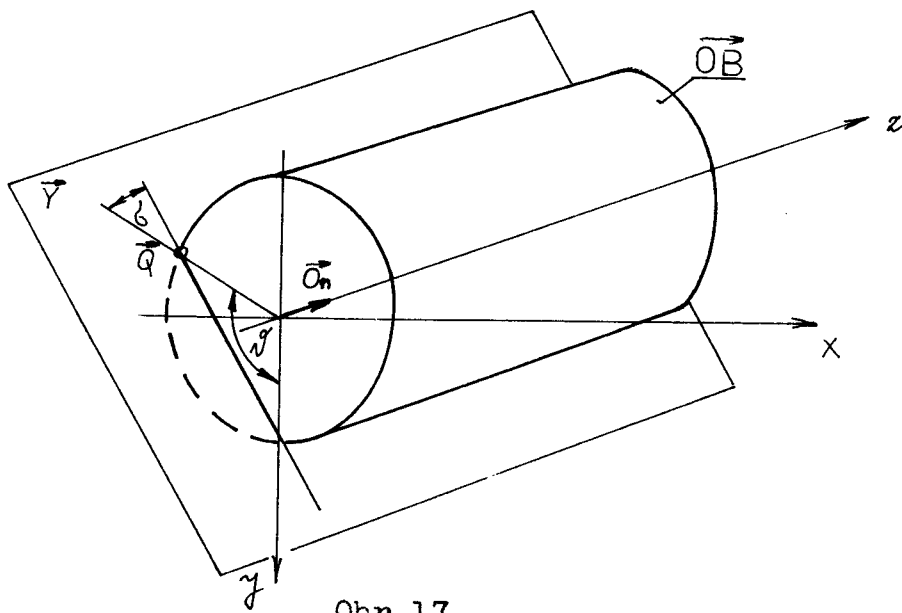
získáme dosazením do rovnice obálky(4.42)

4.4.3.5 Rovina rovnoběžná s osou O_n a jdoucí mimo počátek bodem Q
je znázorněna na obr.16



Obr. 16.

Obecně (4.44) $\vec{Y} = \vec{Q} + \vec{P}s + \vec{R}z$
 $\vec{Y} = \vec{Q} + s\vec{O}_n + z A_{O_n} \vec{f}^0$ (4.65)
 $\vec{f}^0$ - leží na ose y s opačnou orientací
 Průsečík řešíme obdobně viz kapitola 4.4.3.4
 V obecné poloze otočené kolem osy O_n (obr.17)



Obr.17.

$$\vec{Y} = A_{On}^{\psi}(\vec{Q} + s\vec{On} + zA_{On}^{\phi}\vec{f}^0) \quad (4.66)$$

Rovnice pro nalezení průsečíku řešíme obdobně jako v kapitole 4.4.3.4.

4.4.3.6 Šroubová plocha s tvořící přímkou

$$\text{Mějme přímku } \overrightarrow{PR} = \vec{Q} + t\vec{N} \quad (4.67)$$

t - parametr

$\vec{N}$ - směrnice

$\vec{Q}$ - bod

Směrnice přímky si vyjádříme $\vec{N} = A_{On}^{\gamma} \vec{Q}$

Šroubová plocha vznikne pohybem tvořící přímky, jejím šroubováním kolem osy rovnoběžné s osou On ve vzdálenosti Q od počátku.

$$\overrightarrow{SRPL} = A_{On}^{\psi} \overrightarrow{PR} + C\psi\vec{On} = A_{On}^{\psi}(\vec{Q} + t\vec{N}) + C\psi\vec{On} \quad (4.68)$$

$$C = \frac{h}{2\pi} \quad (4.69)$$

C - jednotkový posun kolem osy On

h - stoupání šroubovice

$C\psi\vec{On}$ - posun ve směru osy On při pootočení o úhel ψ

A_{On}^{ψ} - tenzor otočení kolem osy On o úhel ψ

Plocha v obecné poloze bude mít tvar (při otočení kolem osy On úhel ψ)

$$\overrightarrow{SRPL} = A_{On}^{\psi} A_{On}^{\gamma}(\vec{Q} + t\vec{N}) + C\psi\vec{On} = A_{On}^{\psi+\gamma}(\vec{Q} + t\vec{N}) + C\psi\vec{On} \quad (4.70)$$

Hledáme průsečík obálky (4.42) se šroubovou plochou

$$\begin{aligned} \vec{U}(\varphi) + u\vec{V}(\varphi) &= \overrightarrow{SRPL} \\ \vec{U}(\varphi) + n\vec{V}(\varphi) &= A_{On}^{\psi} A_{On}^{\gamma}(\vec{Q} + t\vec{N}) + C\psi\vec{On} \end{aligned} \quad (4.71)$$

Dostaneme rovnici o třech neznámých u, t, ψ .

Rovnici lze řešit Newtonovou metodou /15/ /16/.

Aproximace pro $k+1$ krok je dána vztahem

$$\vec{X}_{k+1} = \vec{X}_k - \tilde{f}^{-1}(\vec{X}_k) \tilde{f}(\vec{X}_k) \quad (4.72)$$

$\tilde{f}(\vec{X}_k)$ - funkce v k -tém kroku

$\tilde{f}^{-1}(\vec{X}_k)$ - derivace a inverze funkce v k -tém kroku

$\vec{X}_k$ - bod blízko řešení

V našem případě je $\vec{f}(\vec{x})$ vektorová funkce vektorového argumentu

$$\vec{f}(\vec{x}) = \begin{pmatrix} f_1(x_1, x_2, x_3) \\ f_2(x_1, x_2, x_3) \\ f_3(x_1, x_2, x_3) \end{pmatrix}$$

Její derivací

$$f_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \quad \text{vznikne matice}$$

$$\tilde{f} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix}$$

Pro řešení je důležitý odhad prvního kroku, aby funkce konvergovala. Položíme rovnici (4.71) rovnou nule a provedeme parciální derivace podle u, t, ψ .

$$\frac{\partial}{\partial u} = -\vec{V}(\varphi) \quad \text{I}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = A_{On}^{\psi} A_{On}^{\psi} \vec{N} \quad \text{II}$$

$$\frac{\partial}{\partial \psi} = R_{(On)} A_{On}^{\psi} A_{On}^{\psi} (t \vec{N} + \vec{Q}) + C \vec{On} \quad \text{III}$$

Sestavíme matici $\tilde{f} = \text{I, II, III/}$

aproximace pro $k + 1$ krok

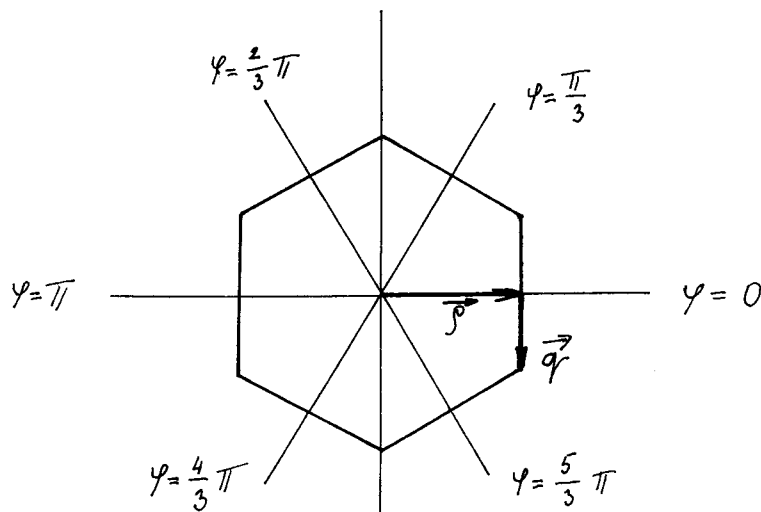
$$\begin{pmatrix} v \\ t \\ \psi \end{pmatrix}_{k+1} = \begin{pmatrix} v \\ t \\ \psi \end{pmatrix}_k - \tilde{f}_k^{-1} \begin{pmatrix} -u \vec{V}(\varphi) + t A_{On}^{\psi} A_{On}^{\psi} \vec{N} + A_{On}^{\psi} A_{On}^{\psi} \vec{Q} - \vec{U}(\varphi) + C \psi \vec{On} \end{pmatrix} \quad (4.73)$$

Aproximaci provedeme na požadovaný počet míst. Výsledný parametr u dosadíme do rovnice obálky, nebo parametry t, ψ do rovnice šroubové plochy a dostaneme hledaný průsečík.

5. APLIKACE NA VYBRANÉ TVARY OBRÁBĚNÉ PLOCHY.

5.1. Příklad šestihranu

Parametrické vyjádření plochy (obr.18).



Obr.18.

Podmínka pro parametr u $-1 \leq u \leq 1$
 pro výšku šestihranu $0 \leq v \leq h$
 $|\vec{\rho}| = \rho$

h - výška šestihranu

ρ - poloměr vepsané kružnice

1) plocha $\varphi = 0$: $\vec{\rho} + u\vec{q} + v\vec{0s}$

2) plocha $\varphi = \frac{\pi}{3}$: $A_{0s}^{\frac{\pi}{3}} (\vec{\rho} + u\vec{q} + v\vec{0s})$

3) plocha $\varphi = \frac{2\pi}{3}$: $A_{0s}^{\frac{2\pi}{3}} (\vec{\rho} + u\vec{q} + v\vec{0s})$

4) plocha $\varphi = \pi$: $A_{0s}^{\pi} (\vec{\rho} + u\vec{q} + v\vec{0s})$

4) plocha $\varphi = \frac{4\pi}{3}$: $A_{0s}^{\frac{4\pi}{3}} (\vec{\rho} + u\vec{q} + v\vec{0s})$

6) plocha $\varphi = \frac{5\pi}{3}$: $A_{0s}^{\frac{5\pi}{3}} (\vec{\rho} + u\vec{q} + v\vec{0s})$

V dalším výpočtu vynecháme z rovnice (4.26) posunutí součásti ve směru osy $0s$, protože nemá vliv na obálku (při posuvu přechází stěna šestihranu sama v sebe.)

Rovnice (4.26) pak bude mít tvar :

$$\vec{K}(u, v, \varphi) = A_{0n}^{\varphi} \vec{m} + A_{0n}^{\varphi} A_{0s}^{\varphi} (\vec{\rho} + u\vec{q} + v\vec{0s}) \quad (5.1)$$

Parciální derivace:

$$\vec{K}_u = A_{0n}^{\varphi} A_{0s}^{\varphi} \vec{q} \quad (5.2)$$

$$\vec{K}_v = A_{0n}^{\varphi} \vec{0s} \quad (5.3)$$

$$\vec{K}_{\varphi} = R_{(0n)} A_{0n}^{\varphi} \vec{m} + [R_{(0n)} + R_{(0n)} A_{0n}^{\varphi} A_{0s}^{\varphi}] A_{0n}^{\varphi} A_{0s}^{\varphi} (\vec{q} + u\vec{q} + v\vec{0s}) \quad (5.4)$$

Zavedeme substituci :

$$C(\varphi) = R_{(On)} + pR_{(A_{On}^{\varphi} \vec{Os})} \quad (5.5)$$

$$\vec{a} = R_{(On)} A_{On}^{\varphi} \vec{m} + C(\varphi) A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{\varphi} \vec{\rho} \quad (5.6)$$

$$\vec{b} = C(\varphi) A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{\varphi} \vec{q} \quad (5.7)$$

$$\vec{c} = C(\varphi) A_{On}^{\varphi} \vec{Os} \quad (5.8)$$

Rovnice (5.6), (5.7), (5.8) dosadíme do rovnice (5.4).

$$\vec{K}_{\varphi} = \vec{a} + u\vec{b} + v\vec{c} \quad (5.9)$$

Do rovnice (4.27), podmínky pro odvalení dosadíme (5.9)

$$\det / \vec{K}_u, \vec{K}_v, \vec{a} + u\vec{b} + v\vec{c} / = 0 \quad (5.10)$$

což je smíšený součin, který můžeme rozepsat

$$\det / \vec{K}_u, \vec{K}_v, \vec{a} / + u \det / \vec{K}_u, \vec{K}_v, \vec{b} / + v \det / \vec{K}_u, \vec{K}_v, \vec{c} / = 0$$

z toho vyjádříme závislost parametru v na parametru u

$$v = - \frac{\det / \vec{K}_u, \vec{K}_v, \vec{a} / + u \det / \vec{K}_u, \vec{K}_v, \vec{b} /}{\det / \vec{K}_u, \vec{K}_v, \vec{c} /} \quad (5.11)$$

Můžeme ji přepsat do tvaru

$$v = \alpha(\varphi) + \beta(\varphi) u \quad (5.12)$$

Dosazením rovnice (5.12) do (5.1) dostaneme rovnici obálky

$$OB = A_{On}^{\varphi} \vec{m} + A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{\varphi} (\vec{\rho} + \alpha(\varphi) \vec{Os} + u(\vec{q} + \beta(\varphi) \vec{Os})) \quad (5.13)$$

nebo

$$OB = A_{On}^{\varphi} \vec{m} + A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{\varphi} (\vec{\rho} + \alpha(\varphi) \vec{Os}) + u A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{\varphi} (\vec{q} + \beta(\varphi) \vec{Os}) \quad (5.14)$$

zjednodušeně

$$OB = \vec{U}(\varphi) + u \vec{V}(\varphi) \quad (5.15)$$

$$\vec{U}(\varphi) = A_{On}^{\varphi} + A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{\varphi} (\vec{\rho} + \alpha(\varphi) \vec{Os}) \quad (5.16)$$

$$\vec{V}(\varphi) = A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{\varphi} (\vec{q} + \beta(\varphi) \vec{Os})$$

Tím je vyřešena obálka řezného nástroje. Pro přímou drážku zubů s různým úhlem γ použijeme odvozeného vztahu (4.66). Zaměníme pouze σ za μ (úhel čela).

γ - vyjadřuje polohu břitu na obvodu obálky a nepřímopak počet zubů. Najdeme průsečík obálky s rovinou

$$\vec{U}(\varphi) + u\vec{V}(\varphi) = A_{On}^{\varphi} \vec{Q} + s A_{On}^{\varphi} \vec{On} + z A_{On}^{\varphi} \vec{f}^0 \quad (5.17)$$

$\vec{f}^0$ leží na ose y má opačnou orientaci

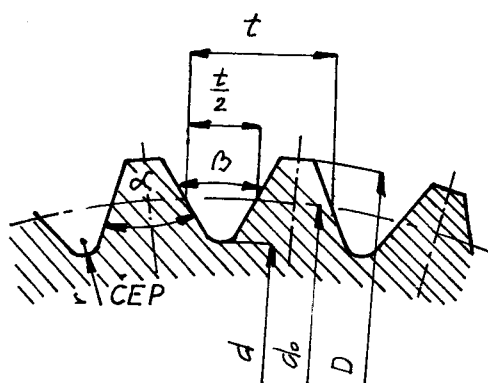
$$M = \begin{pmatrix} \vec{0}_n & A_{On} \vec{f}^0 & -V(\varphi) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} s \\ z \\ v \end{pmatrix} = M^{-1} (U(\varphi) - A_{On} Q) \quad (5.18)$$

Zpětným dosazením u do (5.15) získáme průsečík.

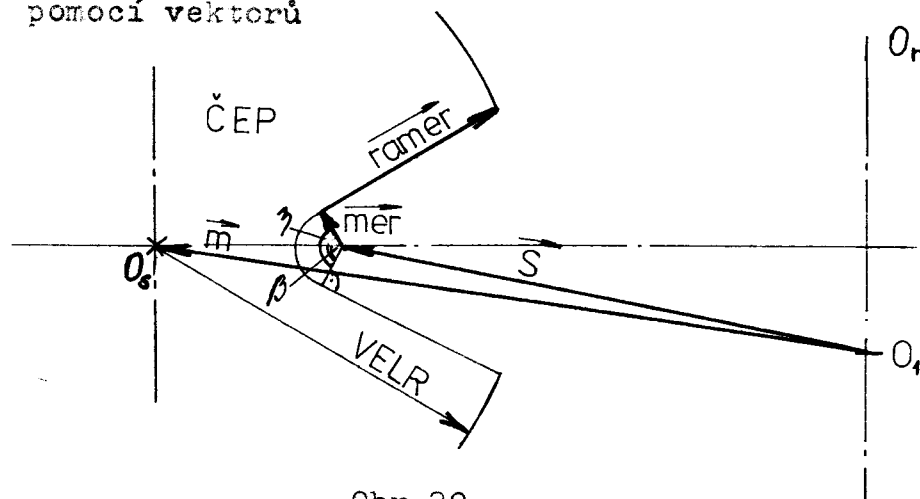
Pro sklon drážky zubu ve šroubovici použijeme vztahu (4.73). Řešení průsečíku je obdobné.

5.2 Příklad jemného drážkování ČSN 014933 /19/ Vnější drážkování obr.19.



Obr.19.

Obrázek si překreslíme pro odvalovací frézování obr.20. Vyjádříme postupně plochu drážkování pomocí vektorů



Obr.20.

Válcová plocha drážkování

$$\vec{VPL}(\beta, v) = \vec{s} + A_{Os}^\beta (\vec{m} - \vec{s})^\circ \text{er} + v\vec{Os} \quad (5.19)$$

v - parametr, er - poloměr r (obr.19)

v_{Os} - posuv nástroje ve směru osy Os

$A_{Os}^\beta (\vec{m} - \vec{s})^\circ \text{er}$ - vyjádření otočení vektoru $\vec{mer}$

$$\left| -\frac{\gamma}{2} \right| \leq \beta \leq \left| \frac{\gamma}{2} \right|$$

Rovinná část - vyjádříme jako tečnu pro $\frac{\gamma}{2}$; 0

$$\vec{ROV} = \vec{VPL}\left(\frac{\gamma}{2}; 0\right) + x \frac{\partial}{\partial \beta} \vec{VPL}(\beta, v) \Big|_{\frac{\gamma}{2}; 0} + v\vec{Os} \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \vec{VPL} = R_{(Os)} A_{Os}^\beta (\vec{m} - \vec{s})^\circ \text{er} \quad (5.21)$$

dosazením do rovnice 5.19 dostaneme

$$\vec{ROV}\left(\pm\frac{\gamma}{2}, v\right) = \vec{s} + A_{Os}^{\pm\frac{\gamma}{2}} (\vec{m} - \vec{s})^\circ \text{er} + x R_{(Os)} A_{Os}^{\pm\frac{\gamma}{2}} (\vec{m} - \vec{s})^\circ \text{er} + v\vec{Os}$$

Výpočet oválky nástroje budeme provádět po částech.

Nejprve pro válcovou plochu. Zastavíme pohyb nástroje a necháme pohybovat součást vzhledem k nehybnému nástroji. Označme válcovou plochu povrchu obrobku symbolem $\vec{K}$.

Pak

$$\vec{K}(\beta, v, \gamma) = A_{On}^\gamma \vec{m} + A_{On}^\gamma A_{Os}^{p\gamma} \vec{VPL}(\beta, v) \quad (5.22)$$

Parciální derivace

$$\vec{K}_\beta = A_{On}^\gamma A_{Os}^{p\gamma} R_{(Os)} A_{Os}^\beta (\vec{m} - \vec{s})^\circ \text{er}$$

substituce $(\vec{m} - \vec{s})^\circ \text{er} = \vec{mer}$

$$\vec{K}_\beta = A_{On}^\gamma R_{(Os)} A_{Os}^{p\gamma} A_{Os}^\beta \vec{mer} = R(A_{On}^\gamma \vec{Os}) A_{On}^\gamma A_{Os}^{p\gamma+\beta} \vec{mer} \quad (5.23)$$

$$\vec{K}_v = A_{On}^\gamma \vec{Os} \quad (5.24)$$

$$\vec{K}_\gamma = R_{(On)} A_{On}^\gamma \vec{m} + [R_{(On)} + pR(A_{On}^\gamma \vec{Os})] A_{On}^\gamma A_{Os}^{p\gamma} \vec{VPL}(\beta, v) \quad (5.25)$$

provedeme substituci

$$\vec{K}_\gamma = \vec{a} + v\vec{b} \quad (5.26)$$

$$\begin{aligned}\vec{a} &= R_{(On)} A_{On}^{\varphi} \vec{m} + [R_{(On)} + pR_{(A_{On}^{\varphi} \vec{Os})}] A_{On}^{\varphi} A_{Os}^{p\varphi} (s + A_{Os}^{\beta} \vec{mer}) \\ \vec{b} &= R_{(On)} A_{On}^{\varphi} \vec{m} + [R_{(On)} + pR_{(A_{On}^{\varphi} \vec{Os})}] A_{On}^{\varphi} \vec{Os}\end{aligned}$$

Podmínka odvalení

$$\det /K_{\beta}, K_v, \vec{a} + v\vec{b}/ = 0 \quad (5.27)$$

$$v = - \frac{\det /K_{\beta}, K_v, \vec{a}/}{\det /K_{\beta}, K_v, \vec{b}/} \quad (5.28)$$

Dosazením do rovnice (5.22) dostaneme obálku

Rovinná plocha součásti

Obálka rovinné plochy součásti se určí podobným postupem výpočtu jako umhranu. Vyjímku tvoří ohraničení parametru x (Obr.20).

Substituce do rovnice (5.21)

$$\begin{aligned}R_{(Os)} A_{Os}^{\frac{z}{2}} \vec{mer} &= \vec{ramer} \\ (\vec{m} - \vec{s})^0_{er} &= \vec{mer}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Ohraničení } x \quad & \left| \vec{s} + A_{Os}^{\frac{z}{2}} \vec{mer} + x \vec{ramer} - \vec{m} \right| = VELR \\ & \left| \vec{s} + A_{Os}^{\frac{z}{2}} \vec{mer} - \vec{m} + x \vec{ramer} \right| = VELR\end{aligned}$$

$$\text{substituce} \quad \vec{s} + A_{Os}^{\frac{z}{2}} \vec{mer} - \vec{m} = \vec{eso}$$

$$\left| \vec{eso} + x \vec{ramer} \right|^2 = VELR^2$$

$$\vec{eso}^2 + x^2 (\vec{ramer})^2 + 2 x \vec{eso} \vec{ramer} = VELR^2 \quad (5.29)$$

Řešením kvadratické rovnice (5.29) získáme hledané ohraničení parametru x .

6. ALGORITMUS VÝPOČTU ŠESTIHRANU

6.1. Šestihran s podélným řezem rovnoběžným s osou nástroje a kolmým na osu nástroje.

Nejprve si označíme veličiny používané ve výpočtu písmeny anglické abecedy.

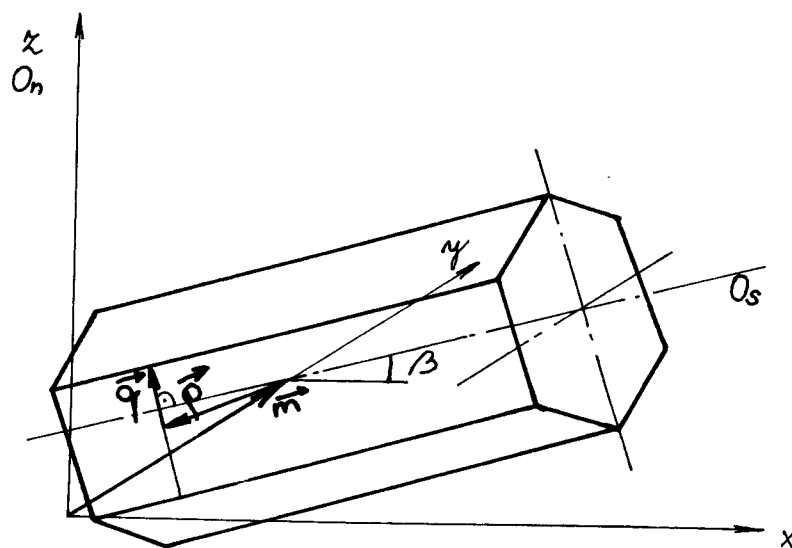
$\vec{O}_s = OS$	$\vec{q} = GV$	$\eta = \text{ETA}$	$\alpha(\varphi) = \text{ALFA}$
$\vec{O}_n = ON$	$\vec{Q} = KVE$	$\gamma = \text{GAM}$	$\beta(\varphi) = \text{BETA}$
$\vec{m} = M$	$\vec{f}_0 = VE1$	$\beta = BQ$	
$\vec{p} = RO$	$\varphi = \text{FIK}$	$\alpha = \text{ALF}$	
$\vec{a} = A$	$\vec{b} = B$	$\vec{c} = C$	

Zadání příkladu (Obr.21,22)

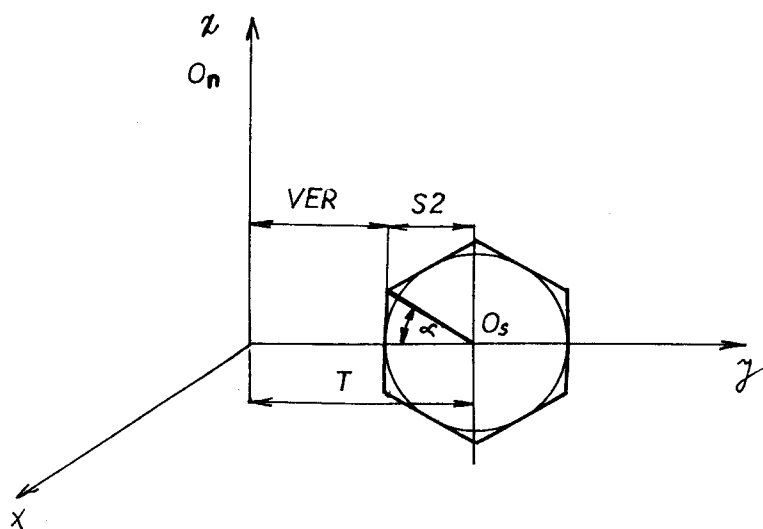
S2	- poloměr vepsané kružnice n-hranu
BET	- úhel sklonu nástroje
T	- nejkratší vzdálenost mezi OS, ON
VER	- poloměr navržené frézy
PH	- počet hran šestihranu
D	- vzdálenost kolmé roviny od počátku
JGAMAP	- počáteční úhel γ'
KGAMA	- krok úhlu γ'
EGAMA	- konečný úhel GAMA
KFI	- krok úhlu φ
JFI	- počáteční úhel φ
FRFI	- konečný úhel φ
ETAK	- krok sklonu roviny řezu

$$\text{Převodový poměr } p = \frac{1}{PH}$$

OS(1)	= COS (BQ)
OS (2)	= θ .
OS (3)	= SIN (BQ)
RO	= (θ , -S2, θ)
KVE	= (θ , VER, θ)
VE1	= (θ , 1, θ)
ALF	= $\frac{360}{2 \cdot PH}$



Obr.21.



Obr.22.

$$\begin{aligned}
 GV (1) &= - (S2. \operatorname{tg} ALF) OS (3) \\
 GV (2) &= -\theta_z \\
 GV (3) &= (S2. \operatorname{tg} ALF) OS(1) \\
 ON &= (\theta, \theta, 1) \\
 M &= (\theta, T, \theta) \\
 A_{On}^{\varphi} &= AON \\
 A_{Os}^{P\varphi} &= AOS \\
 AON.AOS &= F
 \end{aligned}$$

$$AON.OS = A2$$

$$R_{(A_{On}^{\varphi} OS)} = RA2$$

$$R_{(On)} = RON$$

$$RA2.P = PR$$

$$RON+PR = RPR$$

$$F.RPR = G$$

$$F.GV = KU$$

$$AON.OS = KV$$

$$RON.AON = RA$$

$$RA.M = RAM$$

$$G.RO = GRO$$

$$RAM+GRO = A$$

$$G.GV = B$$

$$G.OS = C$$

$$\det /KU, KV, C/ = JM$$

$$\det /KU, KV, A/ = JA$$

$$\det /KU, KV, B/ = JB$$

$$ALFA = - \frac{JA}{JM}$$

$$BETA = - \frac{JB}{JM}$$

$$OS.ALFA = HOS$$

$$HOS + RO = ROA$$

$$F.ROA = FRO$$

$$AON.M = AM$$

$$FRO.AM = VFI$$

$$OS.BETA = BOS$$

$$GV + BOS = KBO$$

$$F.KBO = VFI$$

$$A_{On}^{\mathcal{A}} = AGA$$

$$A_{On}^{\mathcal{A}} = ATA$$

$$ATA.AGA = ATAK$$

$$ATAK.VEl = AK$$

$$-AK = AK1$$

$$-VFI = VFI$$

$$ATA.ON = ATP$$

$$MV = /ATP, AK1, VFI/$$

$$/G = /R_{(On)} + pR_{(A_{On}^{\varphi} OS)} / F /$$

$$\vec{a} = R_{(On)} A_{On}^{\varphi} \vec{m} + G \vec{\rho} /$$

$$/U_{(\varphi)} = A_{On}^{\varphi} + F(\vec{\rho} + \alpha_{(\varphi)} \vec{OS}) /$$

$$/V_{(\varphi)} = F(\vec{q} + \beta_{(\varphi)} \vec{OS}) /$$

$$/M = /A_{On}^{\mathcal{A}} \vec{On}, -A_{On}^{\mathcal{A}} A_{On}^{\mathcal{A}} \vec{f}^0, -V_{(\varphi)} / /$$

$$MV^{-1} = MM$$

$$ATA.KVE = AVE$$

$$UFI - AVE = UKV$$

$$MM . UKV = MU$$

$$MU = /s, z, u/$$

$$VFI . ON = VO$$

$$UFI . ON = UO$$

$$D - UO = DV$$

$$DV / VO = UP$$

$$VFI . MU(3) = MFI$$

$$UFI + MFI = OB$$

$$AK . MU(2) = MUK$$

$$ATP . MU(1) = MUN$$

$$MUN - MUK = OBA$$

$$AVE + OBA = ROVG$$

$$VFI . UP = UPV$$

$$UFI + UPV = OBP$$

OB - průsečík roviny s φ charakteristikou obálky

ROVG - průsečík roviny s φ charakteristikou obálky

OBP - průsečík roviny kolmé na O_n s φ charakteristikou obálky

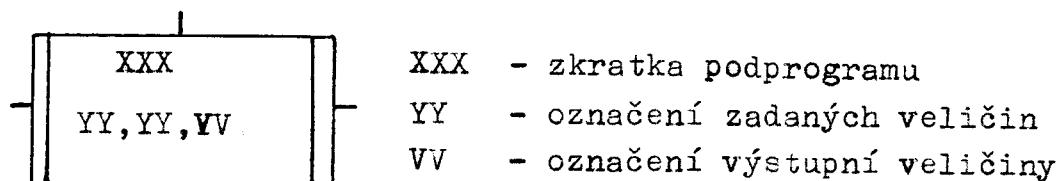
6.1.1 Vývojový diagram

Pro kreslení diagramu bylo použito normy ČSN 36 90 30. Pro výpočet byla použita řada podprogramů, z nichž většina pochází od Ing Longa. Některé bylo třeba doplnit a několik sestavit.

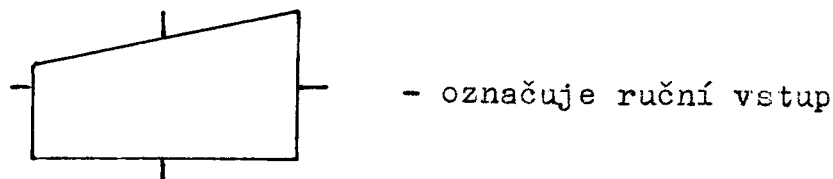
Seznam podprogramů:

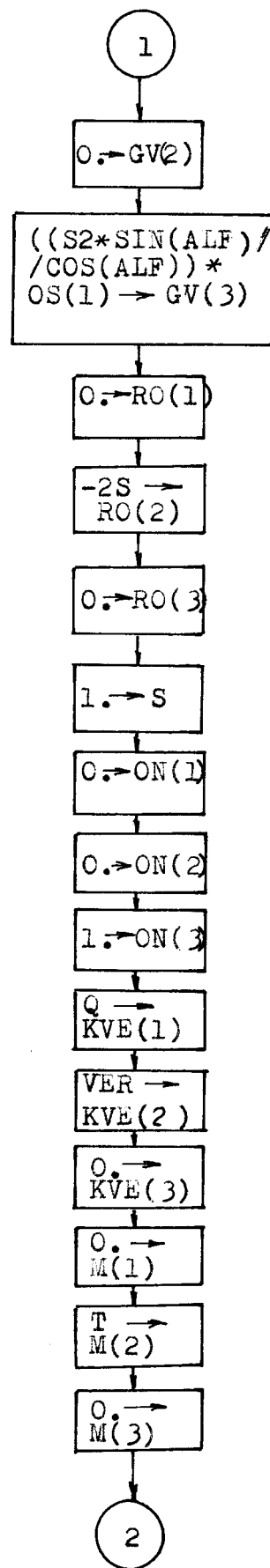
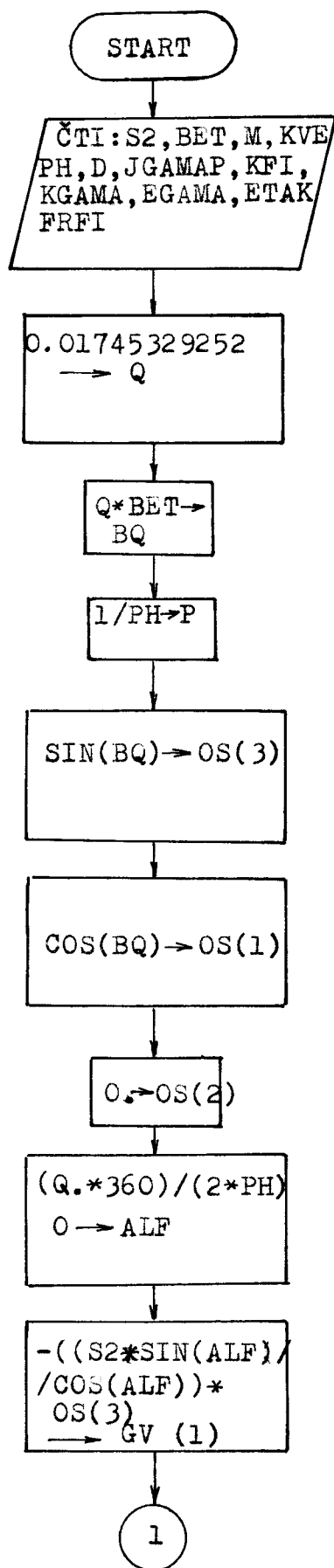
zkratka	název
TENZ	- výpočet tenzoru otočení
NAM	- násobení matic
NAV	- násobení matic vektorem
ANZ	- výpočet asymetrického tenzoru
NAK	- násobení matice konstantou
SOM	- součet dvou matic
VEK	- násobení vektoru konstantou
INVER	- inverzní matice
SKAV	- skalární součin dvou vektorů
SEV	- sečtení dvou vektorů
DET	- výpočet determinantu
ODV	- odečtení dvou vektorů
SEM	- sestavení matice z vektorů
OTV	- otočení vektoru
KLIČ	- podprogram z knihovny počítače (LKEY)

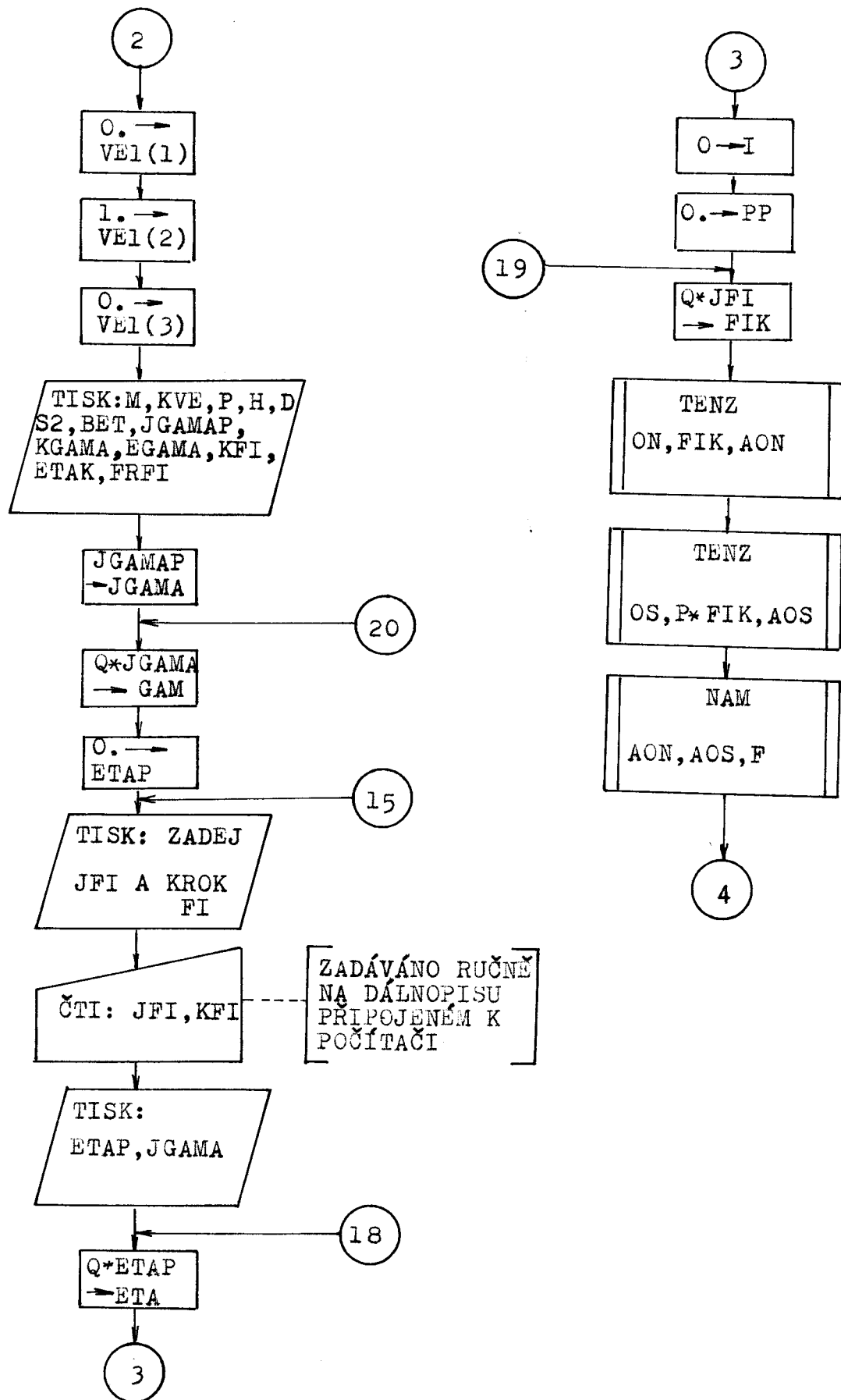
Značky:

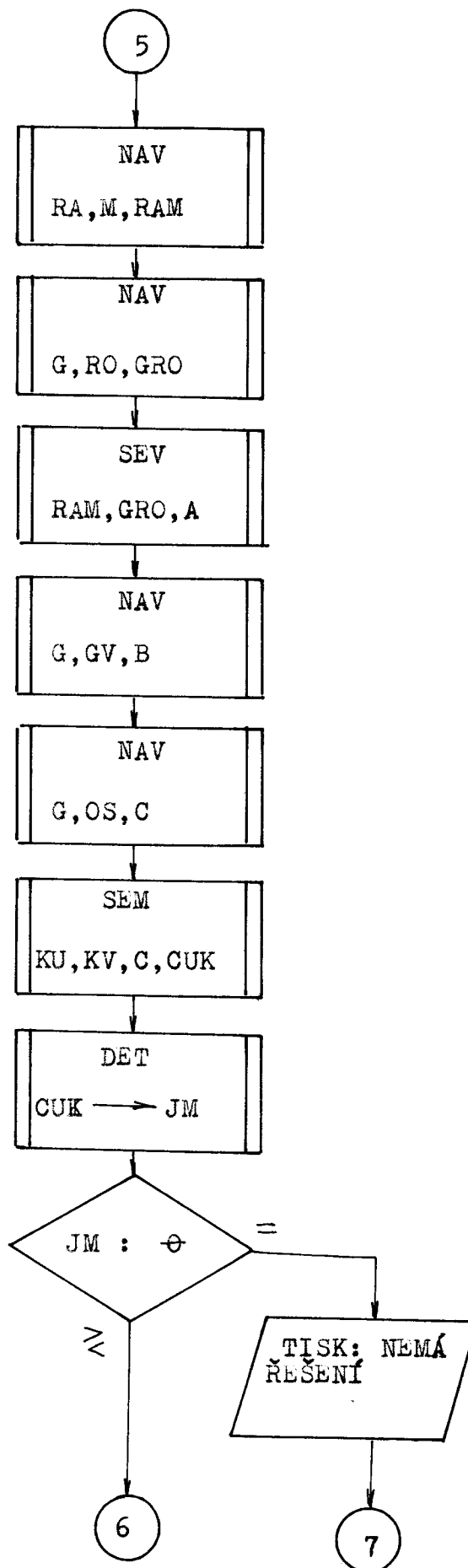
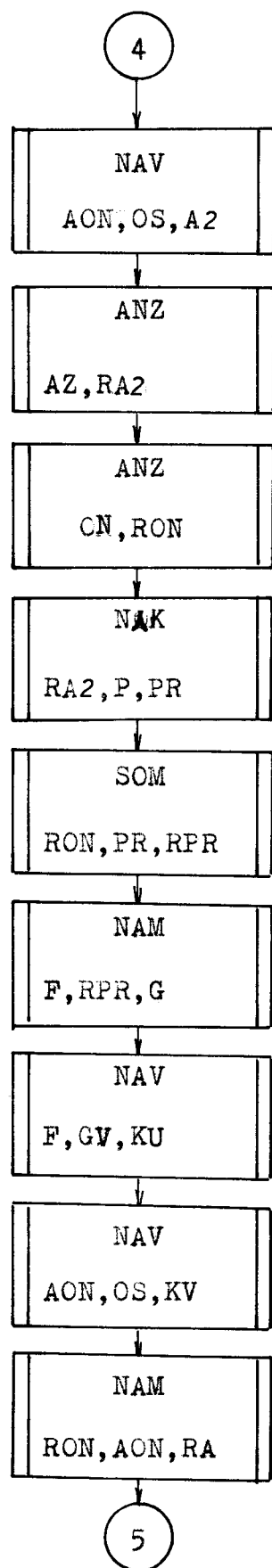


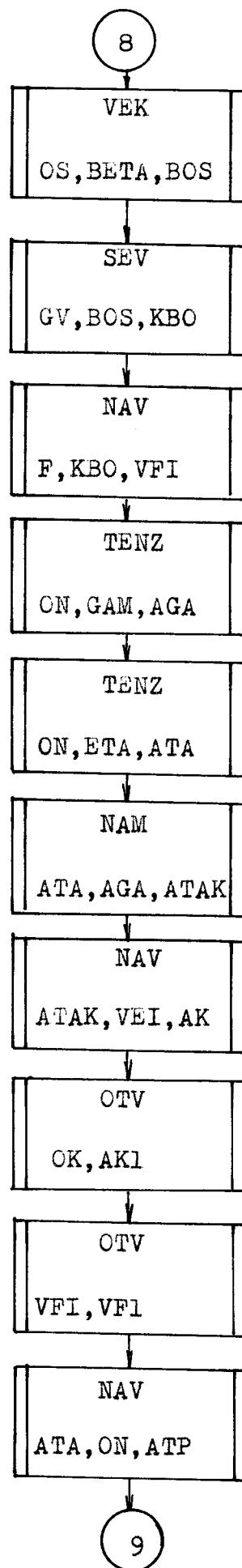
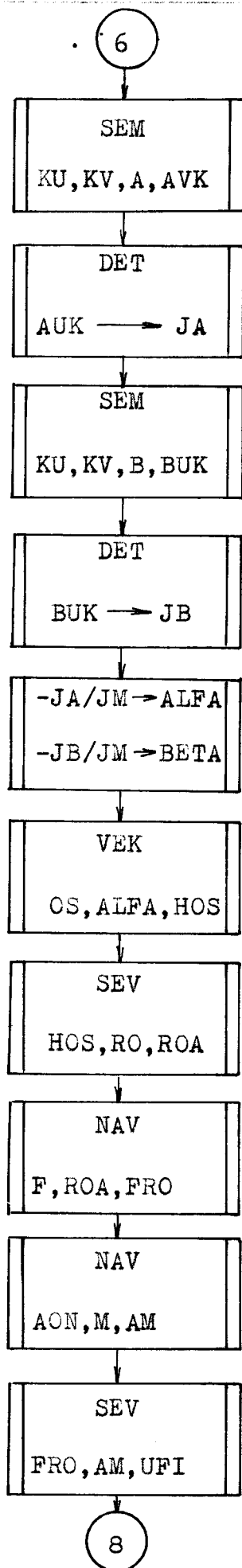
Pořadí veličin musí odpovídat pořadí **v** daném podprogramu. Podprogram KLIČ se zapíná a vypíná na ovládacím pultě počítače.

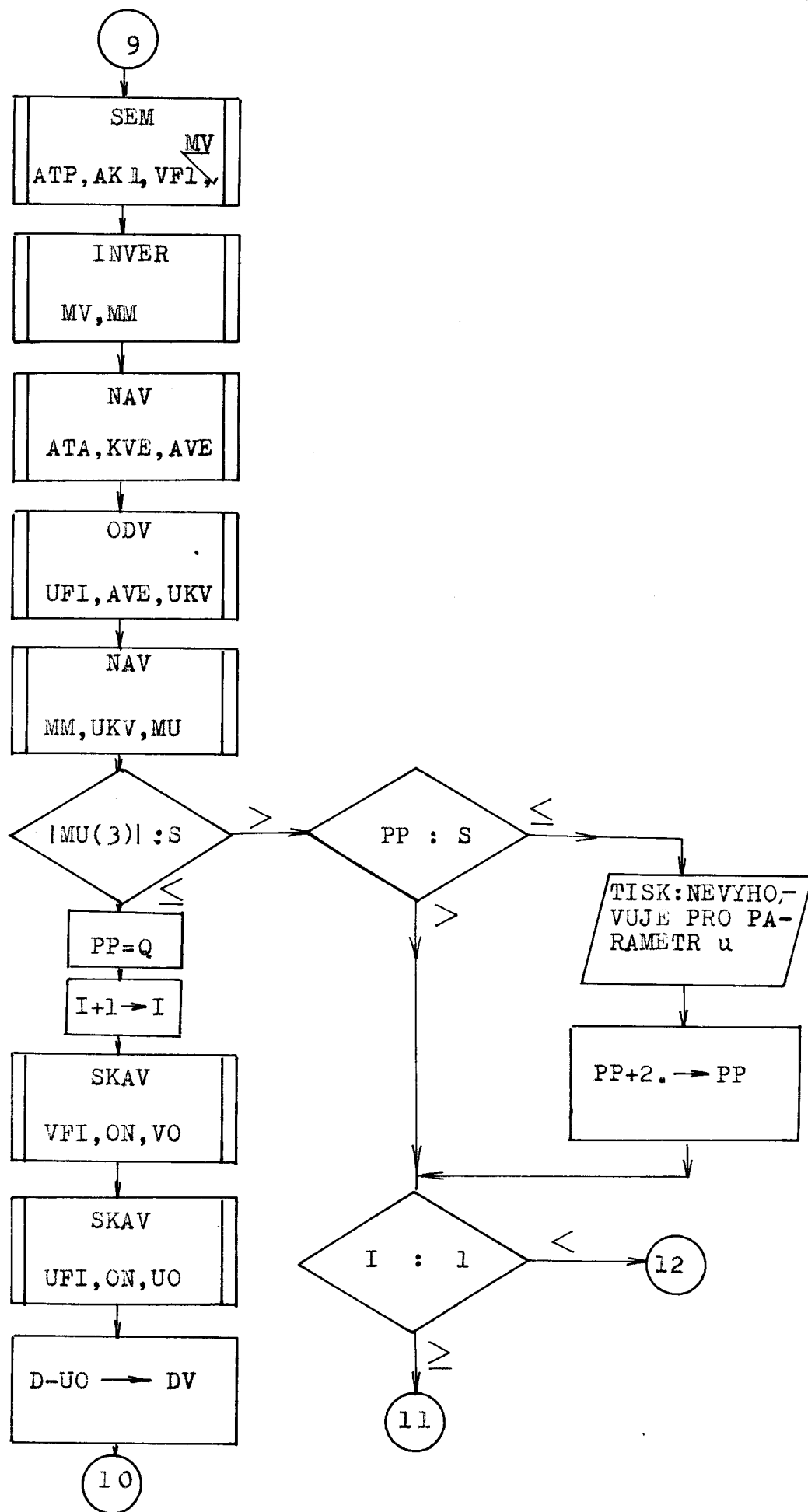


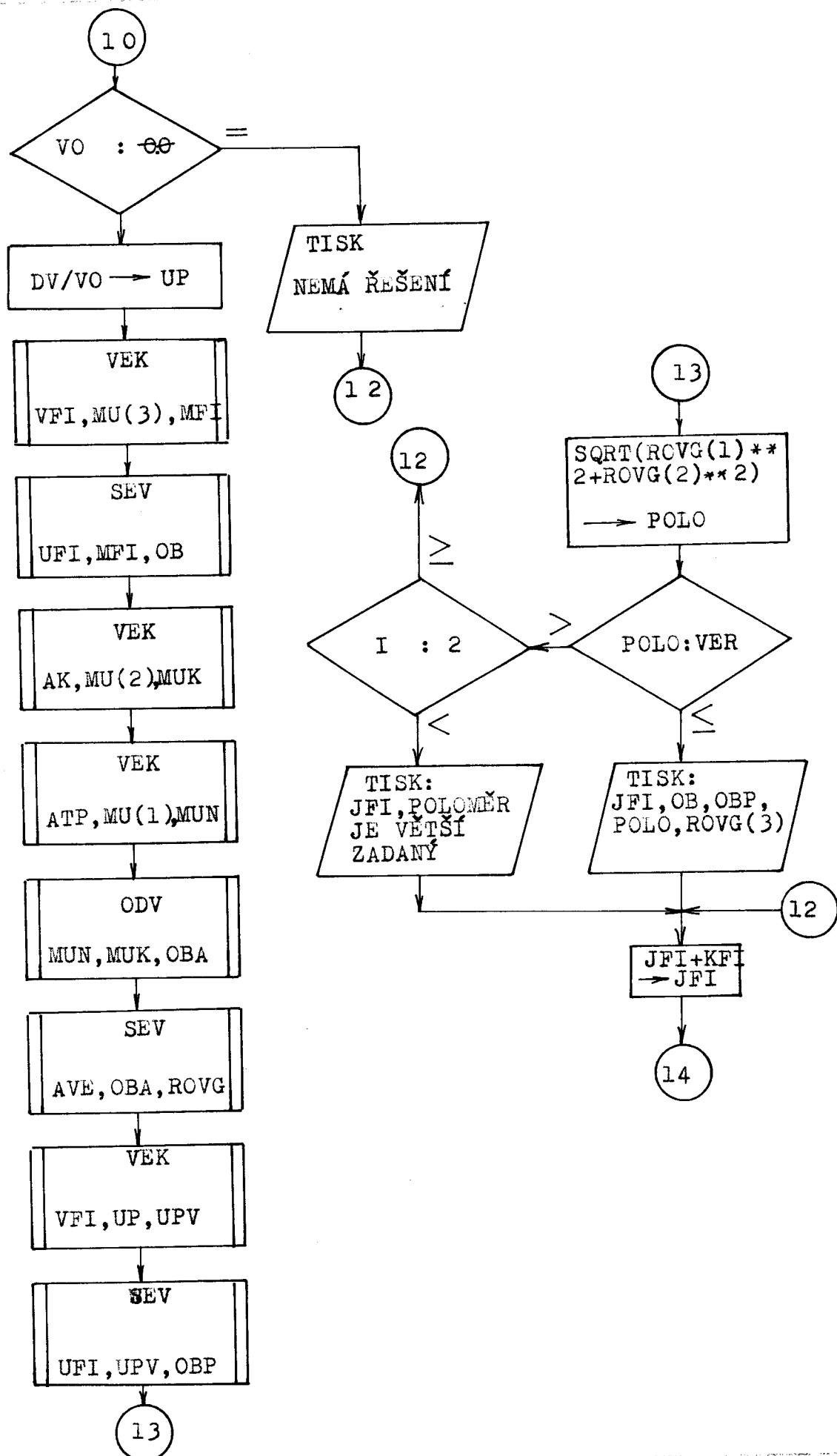


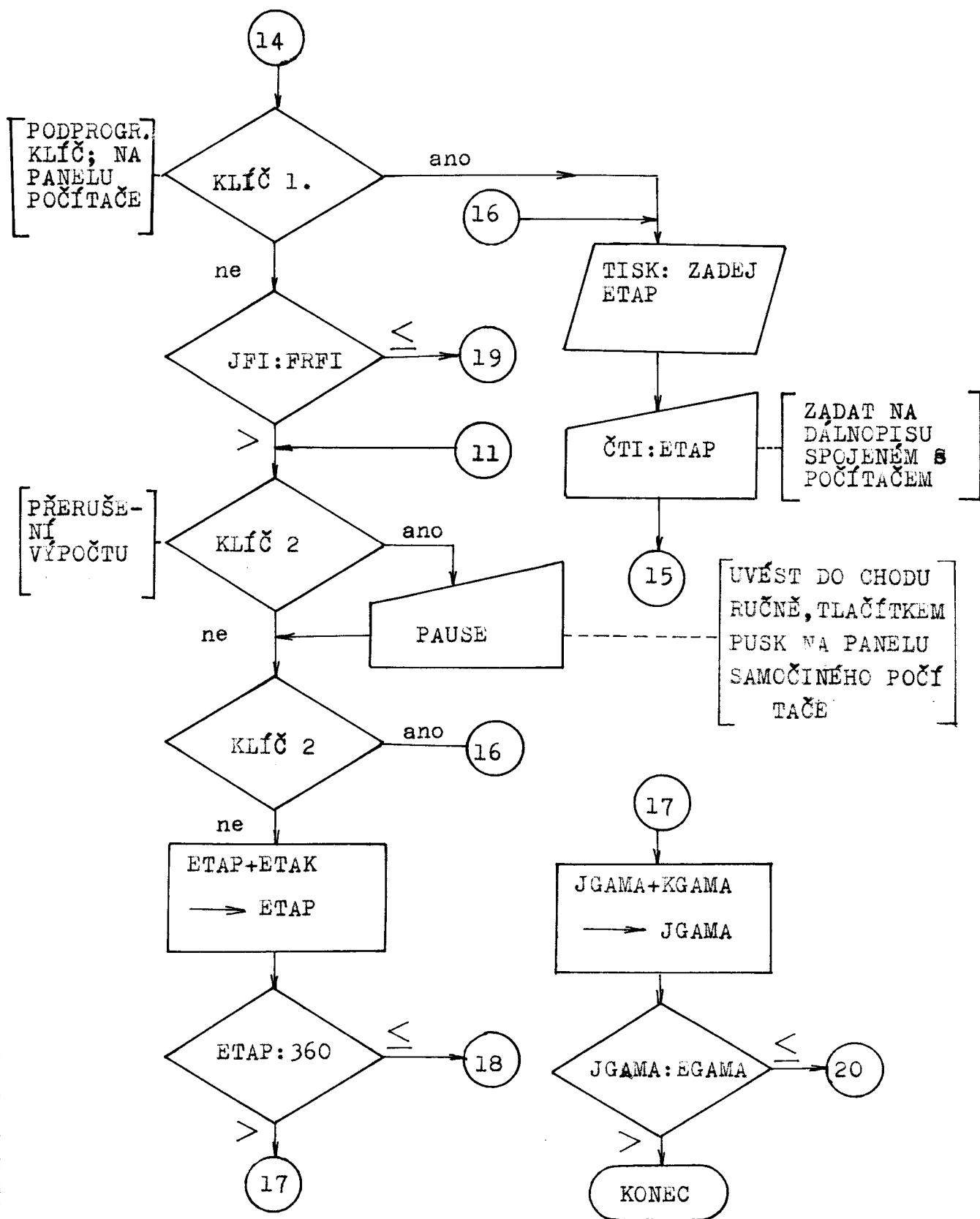












6.1.2 Tabulka vstupních a výstupních údajů

Pořadí dat vstupujících do počítače přes snímač

Označení	popis
S2 /m m/	POLOMĚR VEPSANÉ KRUŽNICE N-hranu
BET / ° /	ÚHEL SKLONU NÁSTROJE
T /m m/	NEJKRATŠÍ VZDÁLENOST OS NÁSTROJE SOUČÁSTI
VER /m m/	POLOMĚR NAVRŽENÉ FRÉZY
PH	POČET HRAN N-HRANU
D /m m/	VZDÁLENOST ROVINY KOLMÉ NA O_n OD POČÁTKU
JGAMAP /° /	POČÁTEČNÍ ÚHEL γ
KGAMAP /° /	KROK ÚHLU γ
EGAMAP /° /	KONEČNÝ ÚHEL γ
ETAK /° /	KROK ÚHLU γ (DÁN POČTEM ZUBŮ)
FRFI /° /	KONEČNÝ ÚHEL γ

Data zadávaná přes dálkopis

JFI /° /	POČÁTEČNÍ ÚHEL γ
KFI /° /	KROK OTÁČENÍ NÁSTROJE

Pořadí dat vystupujících z počítače

ETA :...

GAMA:...

FI	OB	OBP	POLO
	x y z	x y z	r z

OB - souřadnice obálky s řezem rovnoběžným s osou O_n

OBP - souřadnice obálky s řezem kolmým na osu O_n

POLO - ostří vyjádřené v rovině řezu poloměrem r a posunem kolem osy z (O_n).

6.1.3 Návod k práci s programem

Program je napsán v jazyce FORTRAN. Jekékoliv opravy nebo úpravy nejsou tedy možné bez znalosti tohoto jazyka.

Nejprve je třeba přeložit děrné pásy na magnetic-kou pásku počítače. Pomocí monitorových příkázů sestavit z programu PETR 1 na magnetické pásce program například FREZA 2. Po těchto úkonech se naděrují data podle 6.1.2 s příslušnými monitorovými příkazy. Na dálnopisu počítače zadáváme data přímo do počítače (JFI, KFI) tak, abychom získali potřebný počet souřadnic.

Klíč 1 a 2 slouží k urychlení hledání těchto dat. Klíčem 1 přerušíme výpočet kroku FI a můžeme zadat buď rovinu ETA stejnou a znovu zadat JFI, KFI, nebo zadat rovinu ETA novou. Klíč 2 zastavuje výpočet tak, abychom si mohli prohlédnout data na široké tiskárně a přesunout výpočet do potřebné roviny ETA. Hodnota FRFI v datech se volí nejčastěji 360° . Je to otočení nástroje o 360° .

Klíčem 2, je-li zapnut, se blokuje přechod k jinému γ . Chceme-li počítat s jiným úhlem γ zvětšeným o krok tohoto úhlu aniž bychom ukončili cyklus otáčení nástroje, zapneme klíč 2 při výpočtu.

Pak na dálnopisu po vypsání "ZADEJ ETA" zadáme hodnotu FRFI, vypneme klíč 2 a zadáme JFI = FRFI číselně a FI=1. Tímto jsme změnilí úhel γ a můžeme provést výpočet pro $\gamma = 0$. Chceme-li pro jiné γ , musíme zapnout klíč 1, zadat JFI, FI pro $\gamma = 0$. Výpočet se při prvním kroku přeruší a po vypsání potřebného úhlu γ na dálnopisu vypneme klíč 1.

6.2 Algoritmus výpočtu s řezem ve šroubovici

Používáme stejných veličin k výpočtu jako u příkladu 6 .1., které jsou rozšířeny o

$h = SC$

$t = TT \quad \pi = PI$

$C = SC1$

Zadání příkladu

- TT - parametr přímky
- SC - stoupání šroubovice
- MK1 - tři počáteční hodnoty parametrů pro Newtonovu aproximaci
- S2 - poloměr vepsané kružnice n-hranu
- BET - úhel sklonu nástroje
- T - nejkratší vzdálenost mezi OS, ON
- VER - poloměr navržené frézy
- PH - počet hran šestihranu
- D - vzdálenost kolmé roviny od počátku
- JGAMAP - počáteční úhel
- KGAMA - krok úhlu
- EGAMA - konečný úhel GAMA
- KFI - krok úhlu
- JFI - počáteční úhel
- ETAK - krok sklonu roviny řezu

Převodový poměr $p = \frac{1}{PH}$

$OS(1) = \cos(BQ)$

$OS(2) = \theta$

$OS(3) = \sin(BQ)$

$RO = (\theta, -S2, \theta)$

$KVE = (\theta, VER, \theta)$

$VE1 = (\theta, 1, \theta)$

$ALF = \frac{360}{2 \cdot PH}$

$SC1 = \frac{SC}{2 \cdot PI}$

GV (1) = - (S2. tg ALF) OS (3)
 GV (2) = θ .
 GV (3) = (S2. tg ALF) OS (1)
 ON = (θ , θ , 1)
 M = (θ , T, θ)
 A_{On}^{φ} = AON
 A_{Os}^{φ} = AOS
 AON.AOS = F
 AON.OS = A2
 $R_{(A_{On}^{\varphi} OS)}$ = RA2
 $R_{(On)}$ = RON
 RA2.P = PR
 RON+PR = RPR
 F.RPR = G
 F. GV = KU
 AON.OS = KV
 RON.AON = RA
 RA.M = RAM
 G.RO = GRO
 RAM+GRO = A
 G . GV = B
 G . OS = C
 det /KU, KV, C/ = JM
 det /KU, KV, A/ = JA
 det /KU, KV, B/ = JB
 ALFA = - $\frac{JA}{JM}$
 BETA = - $\frac{JB}{JM}$
 OS.ALFA = HOS
 HOS + RO = ROA
 F. ROA = FRO
 AON . M = AM
 FRO . AM = VFI
 OS.BETA = BOS
 GV + BOS = KBO

$$/G = /R_{(On)} + pR_{(A_{On}^{\varphi} \vec{Os})} / F /$$

$$/\vec{a} = R_{(On)} A_{On}^{\varphi} \vec{m} + G \vec{p} /$$

$$/\vec{U}_{(\varphi)} = A_{On}^{\varphi} + F(\vec{p} + \alpha_{(\varphi)} \vec{Os}) /$$

$$F \cdot KBO = VFI$$

$$/\vec{V}(\varphi) = F(\vec{q} + \beta(\varphi)\vec{O_S})/$$

$$A_{On} = AGA$$

$$A_{On} = ATA$$

$$ATA.AGA = ATAK$$

$$ATAK.VEl = AK$$

$$- AK = AKl$$

$$- VFI = VF1$$

$$ATA.ON = ATP$$

$$MV = /ATP, AKl, VF1/$$

$$/M = /A_{On}^{\vec{v}} \vec{O_n}, -A_{On}^{\vec{v}} A_{On}^{\vec{v}} \vec{f}^{\vec{O}}, -V(\varphi) //$$

$$MV^{-1} = MM$$

$$ATA.KVE = AVE$$

$$UFI - AVE = UKV$$

$$MM \cdot UKV = MU$$

$$MU = (s, z, u)$$

$$MFI = MU(3) \cdot VFI$$

$$OB = UFI + MFI$$

$$/OB = U(\varphi) + uV(\varphi) /$$

$$MKl(1) = MU(3)$$

$$MK\ l(3) = OB(3) /SCI$$

$$L = 1, 2, 3$$

$$MK(L) = MK\ l(L)$$

Newtonova metoda

$$AOP = A_{On}^{\psi}$$

$$AOA = ACP \cdot ATA$$

$$NAO = AOA \cdot N$$

$$TN = NAO \cdot MK(2)$$

$$TNK = AOA \cdot KVE$$

$$TAO = TNK + TN$$

$$TRO = RON \cdot TAC$$

$$OSN = ON \cdot SCI$$

$$TROS = OSN + TRO$$

$$FMI /VF1, VAO, TROS/$$

$$FMI = /I, II, III/$$

$$FM2 = FM^{-1}$$

$$UVF = VF1 \cdot MK(1)$$

$$SCI = SCI\ MK(3)$$

$$OS1 = ON \cdot SCI$$

$$UVF1 = -UVF$$

UTN = UVF1 + TN
 AFI = TNK - UFI
 AUT = AFI + UTN
 FM = AUT + OS1 / $-uV(\varphi) + tA_{On}^{\psi} + A_{On}^{\psi} Q - U(\varphi) + C\psi_{On}$
 FM3 = FM2.FM
 MK1 = MK - FM3
 MK2 = MK - MK1 / -přesnost výpočtu/

Dosazení kořenů rovnice do rovnice obálky

VFM = VF1 . MK1
 OBS = UFI + VFM

Dosazení do rovnice šroubové roviny

AOP 1 = A_{On}^{ψ}
 AOAl = AOP1 . ATA
 NAO1 = AOAl . N
 TN1 = NAO1 . MK1(2)
 TNK1 = AOAl . KVE
 OSMK = OSN . MK1 (3)
 OSTK = OSMK + TNK 1
 SRPL = OSTK + TN 1

Kontrola správnosti, výsledky musí být stejné

OBS = SRPL

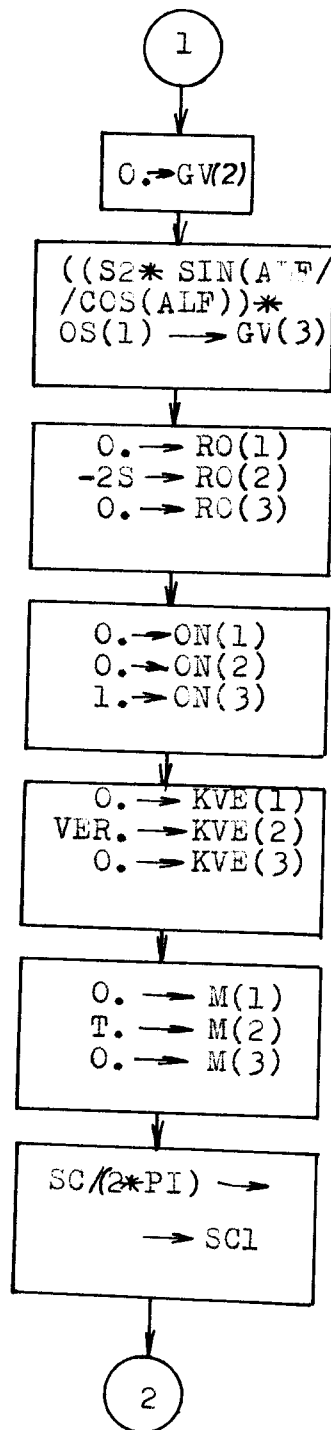
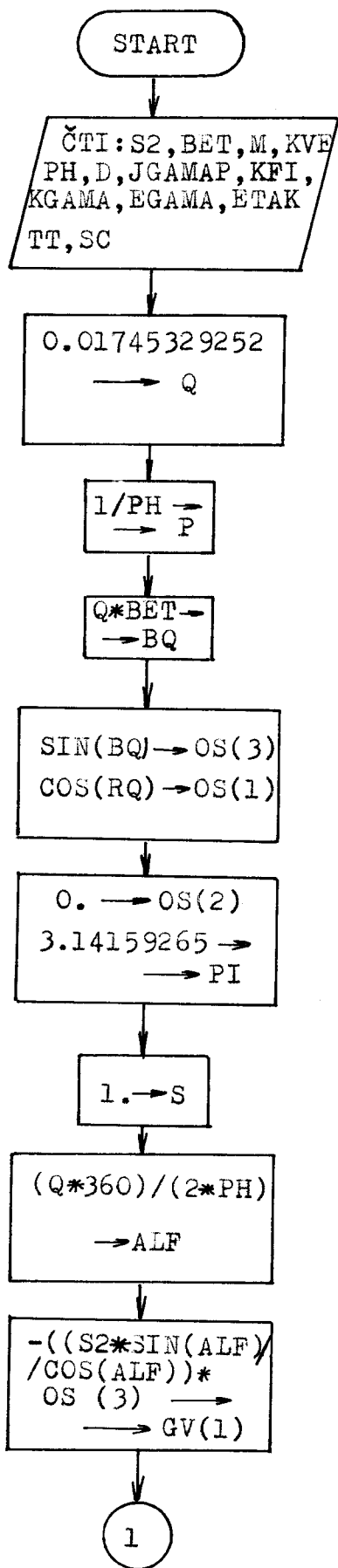
OB - souřadnice roviny (pro přímou drážku) rovnoběžné s osou ON

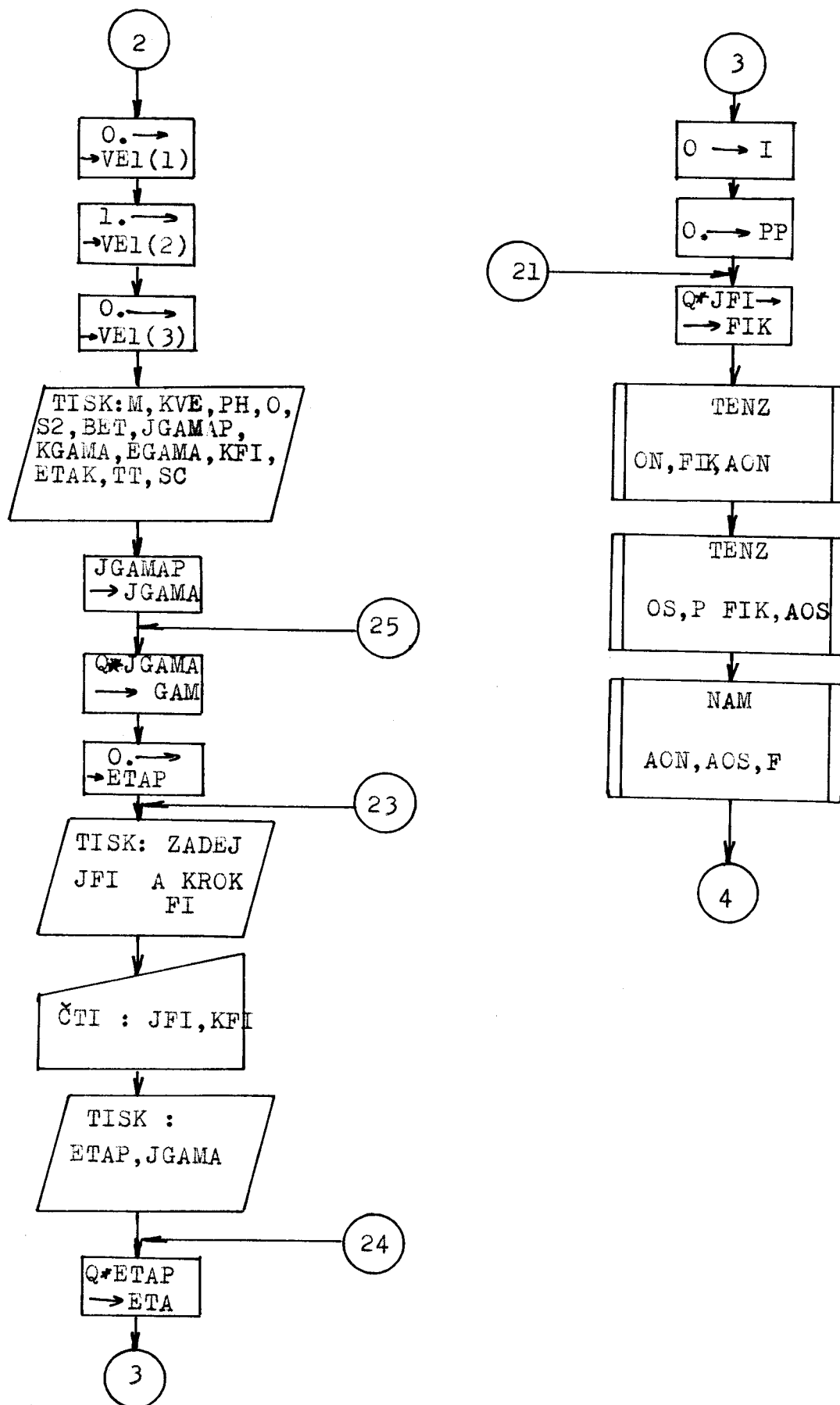
OBS - souřadnice průsečníků šroubové plochy a obálky (dosazeno do rovnice obálky)

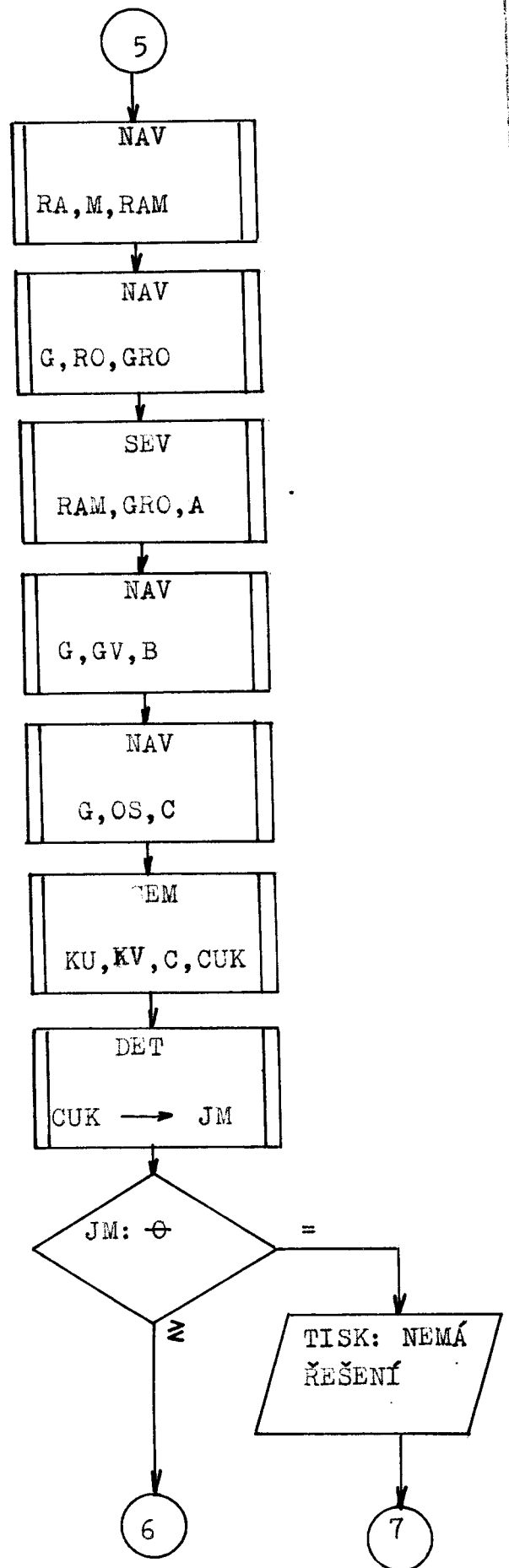
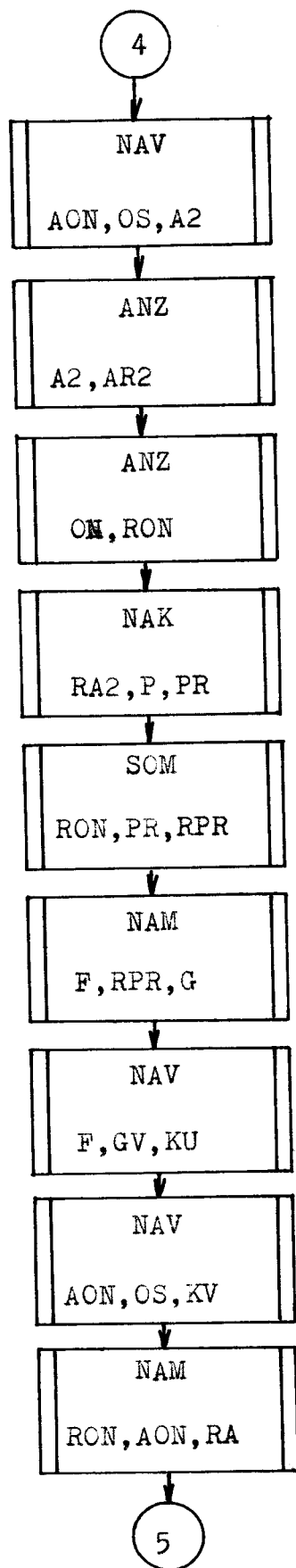
SRPL - souřadnice průsečíků šroubové plochy a obálky (dosazeno do rovnice šroubové plochy)

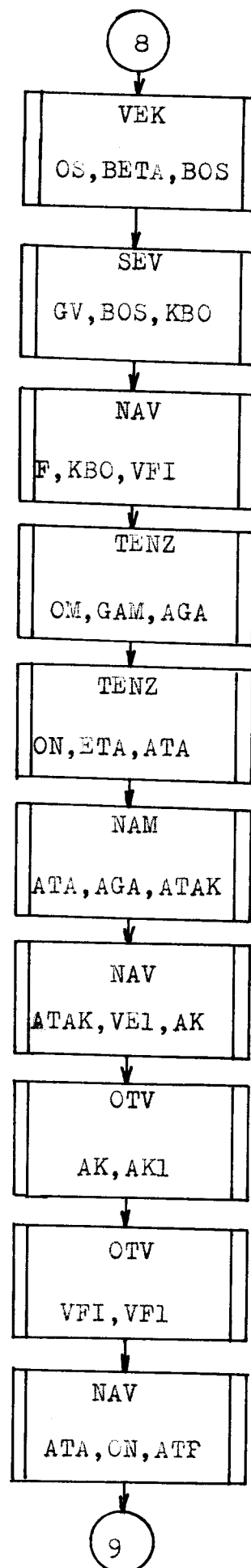
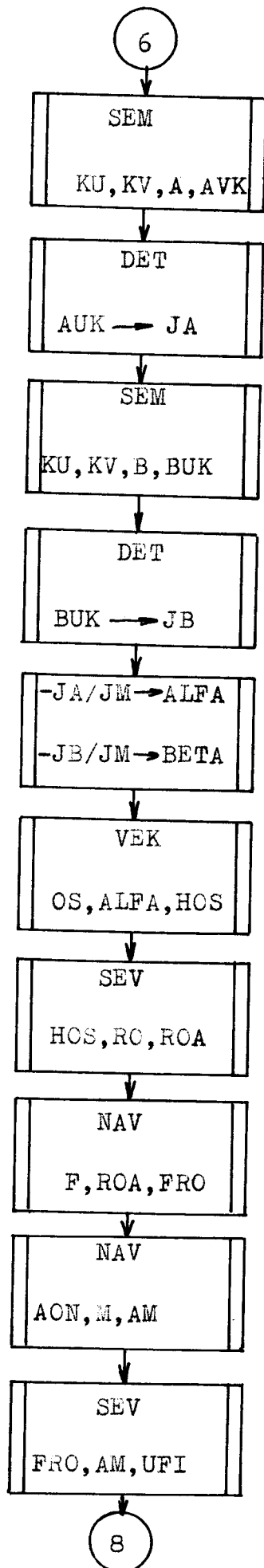
6 .2.2 Vývojový diagram

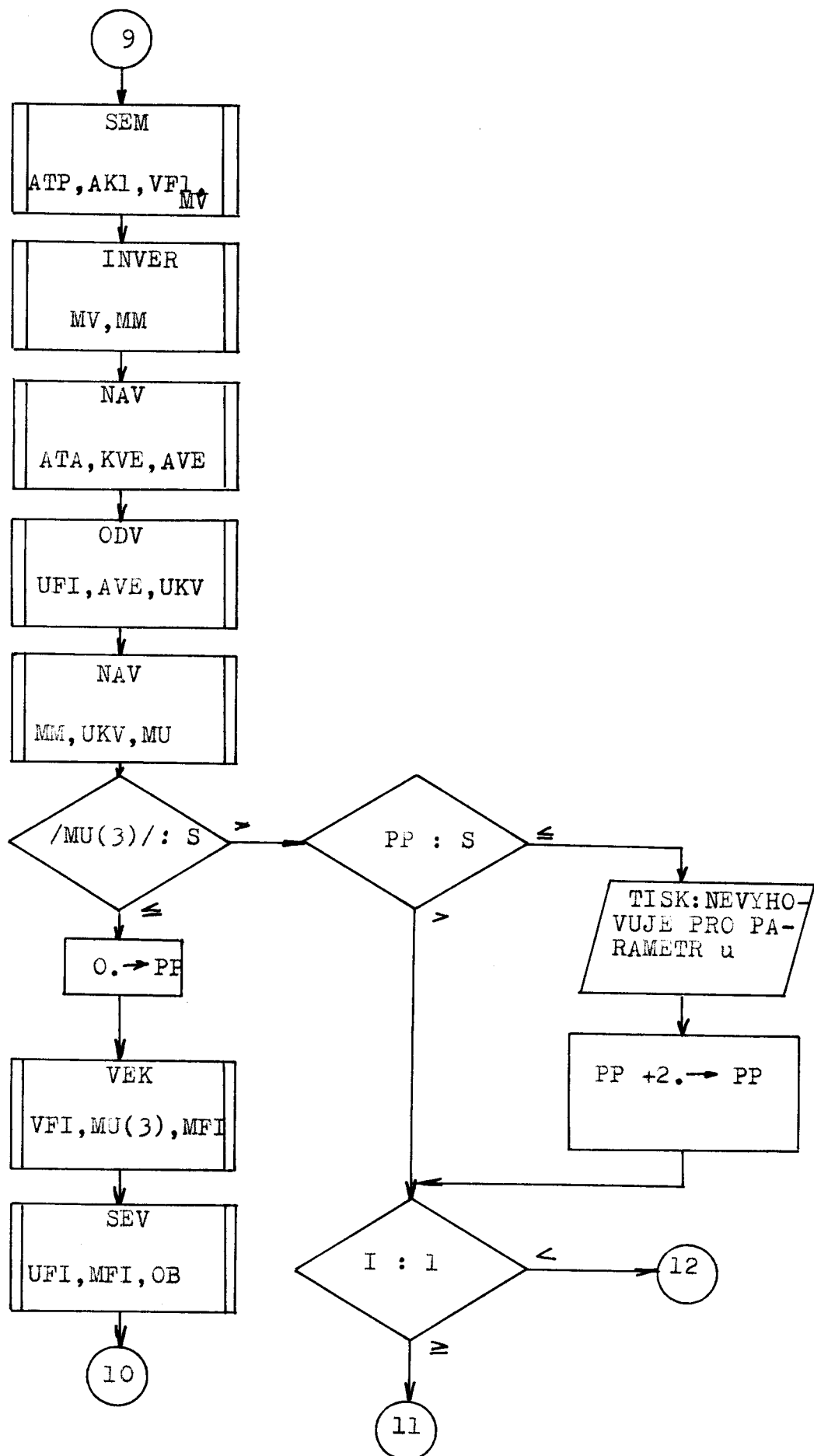
Použity značky a podprogramy viz 6.1.1

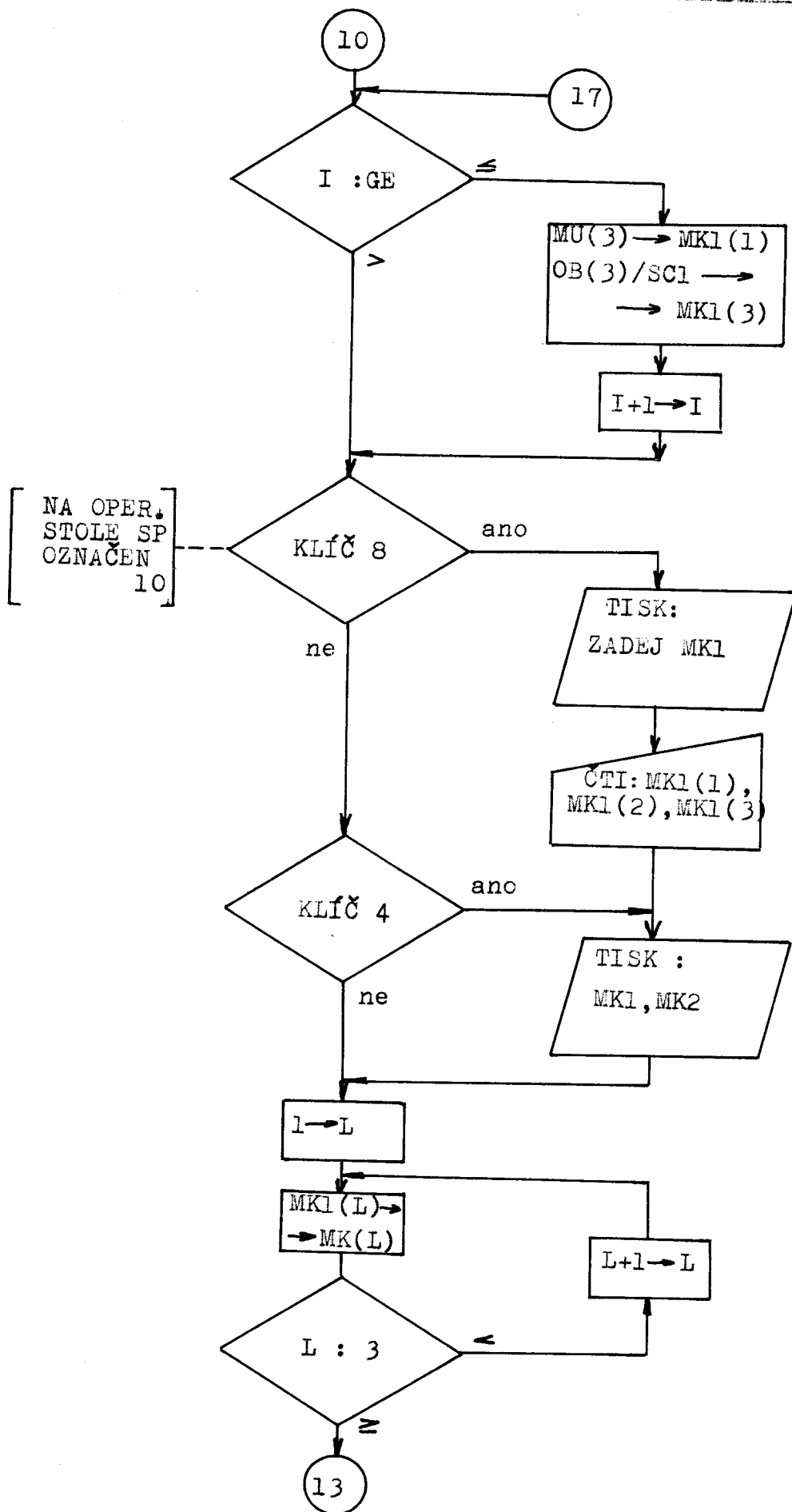


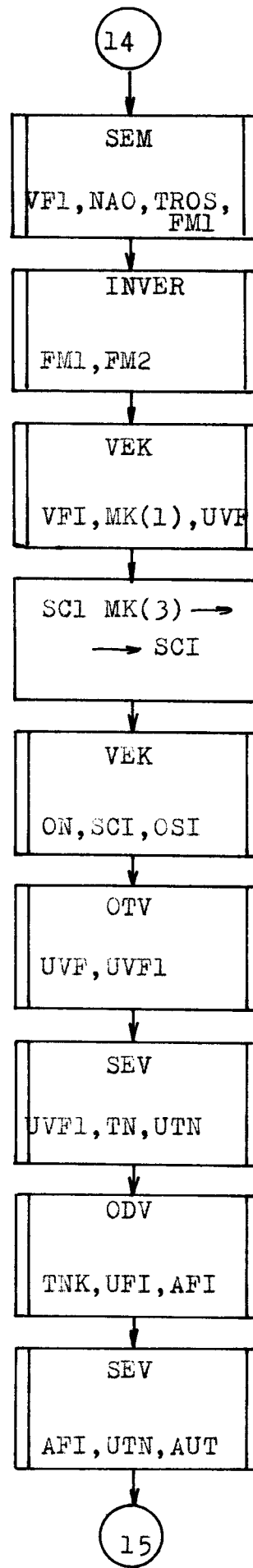
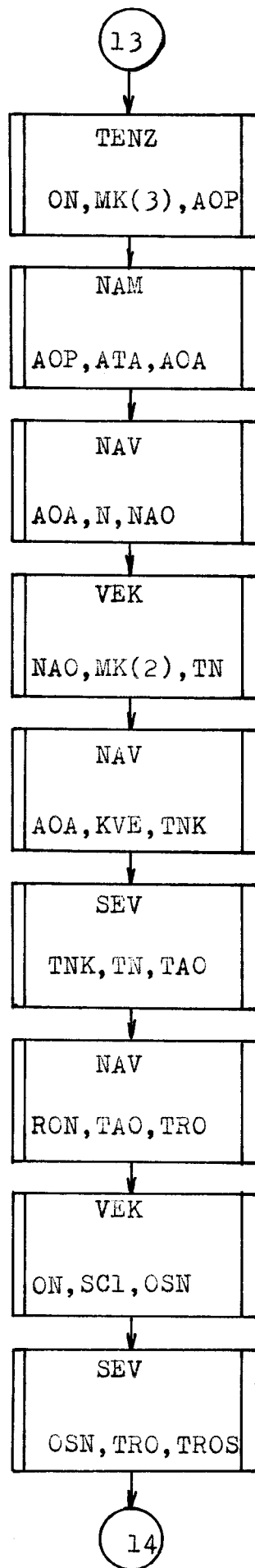


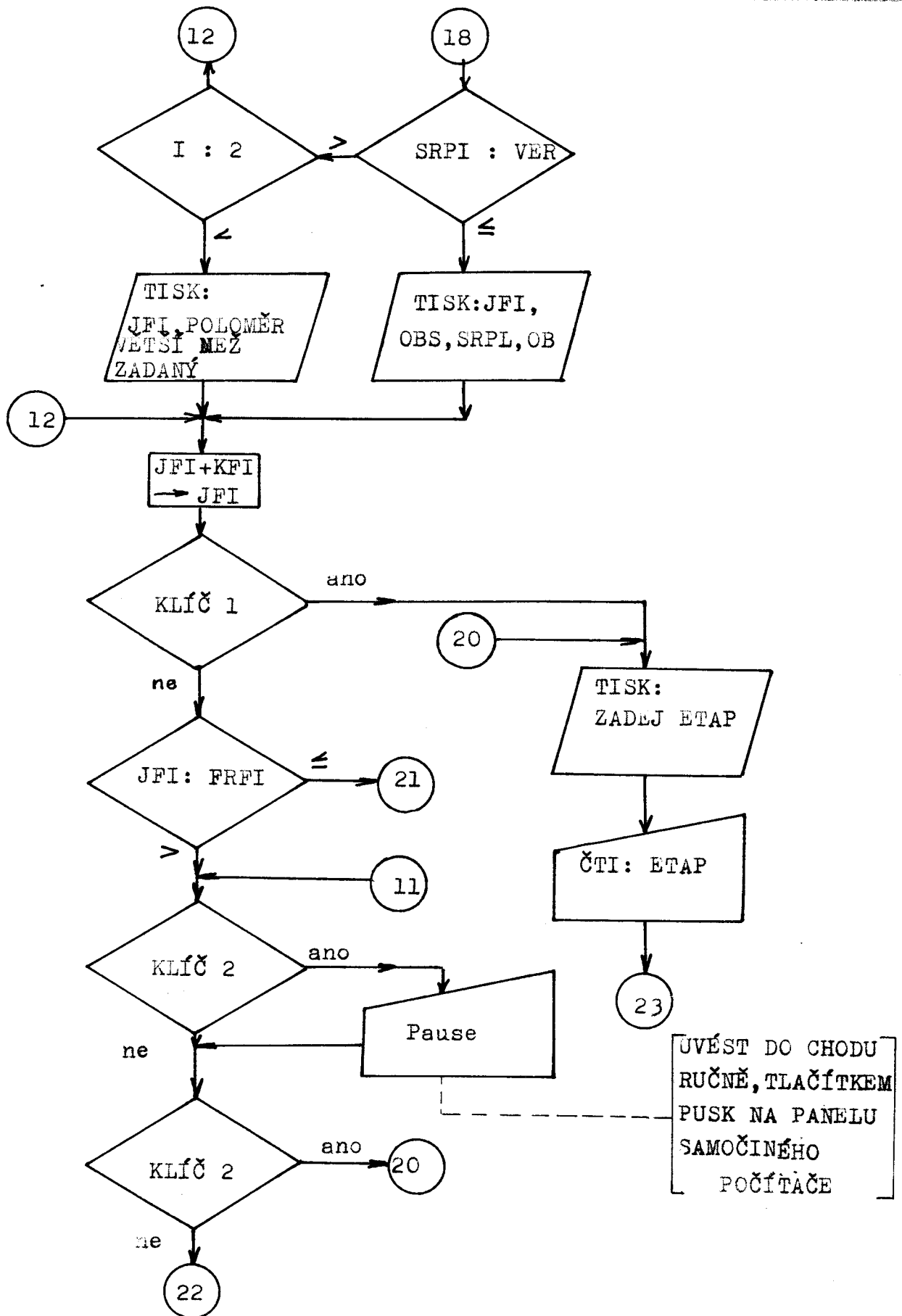


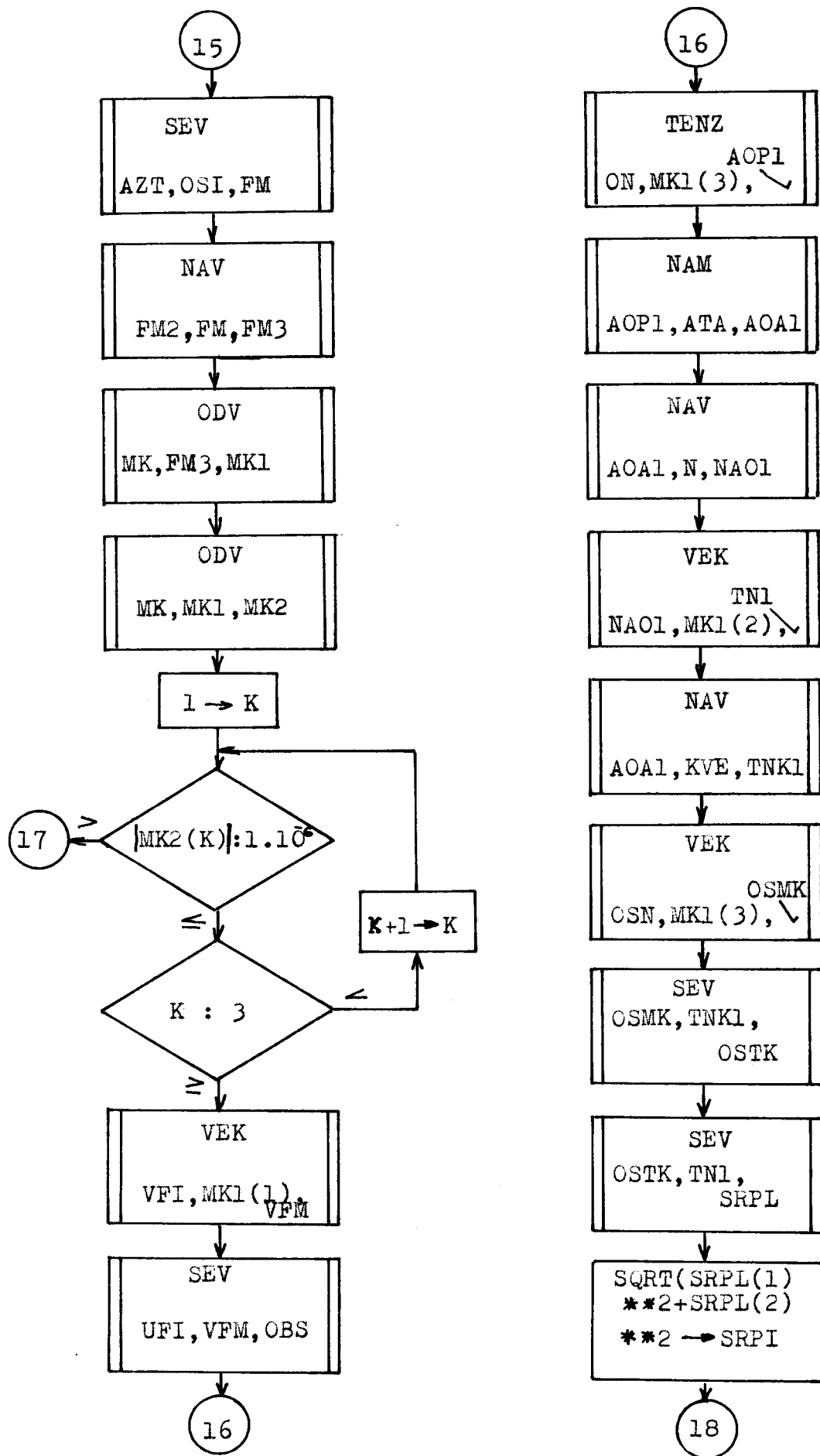


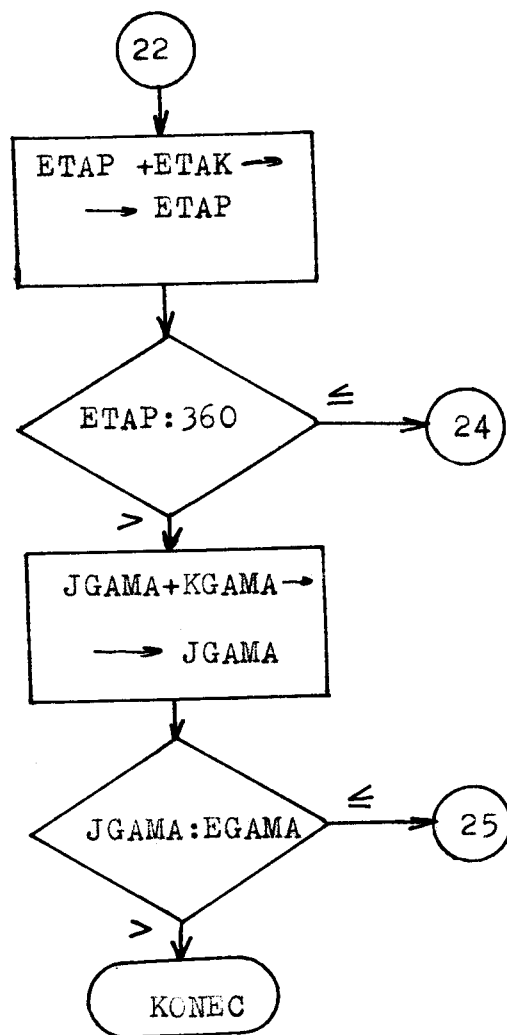












6.2.2 Tabulka vstupních a výstupních údajů

Zadané hodnoty do snímače děrnou páskou

Označení	Popis
S2 /m m/	POLOMĚR VEPSANÉ KRUŽNICE
BET / ° /	ÚHEL SKLONU NÁSTROJE
T /m m/	NEJKRATŠÍ VZDÁLENOST OS
VER /m m/	POLOMĚR NAVRŽENÉ FRÉZY
PH	POČET HRAN N-HRANU
D /m m/	VZDÁLENOST ROVINY KOLMÉ NA OSU NÁSTROJE
JGAMAP /°/	POČÁTEČNÍ ÚHEL GAMA
KGAMA /°/	KROK ÚHLU GAMA
EGAMA /°/	KONEČNÝ ÚHEL GAMA
ETAK /°/	KROK ÚHLU ETA
TT	PARAMETR PŘÍMKY
SC /m m/	STOUPÁNÍ ŠROUBOVICE

Zadané hodnoty z dálnopisu přímo do počítače

KFI/°/	KROK ÚHLU FI
JFI /°/	POČÁTEČNÍ ÚHEL FI
MK1 (1)	POČÁTEČNÍ ODHAD PARAMETRŮ
MK1 (2)	PRO APROXIMACI NEWTONOVOU
MK1 (3)	METODOU

TABULKA VÝSTUPU

FI	OBS	SRPL	OB
	x y z	x y z	x y z

OB - souřadnice roviny (pro přímou drážku) rovnoběžné s osou ON

OBS- souřadnice průsečíků šroubové plochy a obálky (dosazeno do rovnice obálky)

SRPL - souřadnice průsečíků šroubové plochy a obálky (dosazeno do rovnice šroubové plochy)

6.2.2 Vývojový diagram

Použity značky a podprogramy viz 6.1.1.

6.2.3 Návod k práci s programem

Platí to samé co je v kapitole 6.1.3. Z hlavního programu PETR a podprogramů sestavíme program pod jménem FRÉZA 1. Naděrují se data na děrnou pásku v pořadí vstupních hodnot 6.2.2 a vloží do snímače (požádáme o připojení dálkopisu k počítači).

Podle potřeby si na panelu počítače zapínáme a vypínáme KLÍČE 1, 2, 4, 10. Klíče 1,2 mají stejný význam jako kapitola 6.1.3. Klíč 4 nám umožňuje tisknout MK2, MK1. MK1 jsou kořeny řešení rovnice a MK2 nepřesnost výpočtu. Klíč 10 zvětšuje tento tisk o zadání počátečního odhadu aproximace. Je nutné jej po vypsání na dálkopisu "ZADEJ MK1" vypnout. Klíč 10 také přerušuje výpočet aproximace. Z výpočtu aproximace nelze odskočit na začátek programu bez dokončení výpočtu. Bylo by dobré program rozšířit o přeskakování na začátek programu za použití kombinace již známých klíčů.

Cílem diplomové práce bylo ukázat na praktickém příkladě použití a možnosti obecné teorie při vyšetřování výchozího povrchu nástroje ze známého tvaru obráběné plochy, na vhodných příkladech sestavit programy a odladit je. Výpočty výchozího povrchu nástroje měly zahrnovat různé úhly čela zubů nástroje a drážek zubů frézy.

Po první všeobecné části se v druhé kapitole zabývá DP některými základními pojmy a nejznámějšími metodami navrhování výchozího povrchu odvalovacích fréz tak, aby vznikl ucelený a stručný přehled.

Ve třetí kapitole je rozebrána teorie obalových ploch, tenzor otočení, jeho podstata a vlastnosti. Tato část je zpracována odlišněji než tomu tak bylo u DP J. Pazoura. Je sestavena tak, aby čtenatel se základními znalostmi vektorového počtu byl schopen pochopit tento základní matematický aparát, který je využit v dalším zpracování diplomového úkolu.

Čtvrtá kapitola se zabývá problematikou odvalovacího frézování v aplikaci na rovinnou plochu obrobku s výpočtem výchozího povrchu, s ohledem na tvar drážky a úhel čela bříty. I když vychází z diplomové práce J. Pazoura, odlišuje se toto řešení velmi brzy, neboť se dopustil při výpočtu obálky chyby. Průsečíky charakteristiky obálky s rovinami řezu jsou vlastním řešením popsány obecně pro různé úhly γ' , pro zubové drážky přímé, ve šroubovici a je zde proveden i řez kolmý na osu nástroje.

Pátá kapitola se zabývá konkrétním příkladem šestihranu a částečně i příkladem jemného drážkování. Z uvedeného si lze představit, jak se mění obtížnost a náročnost řešení se změnou tvaru obráběné plochy.

Šestá kapitola obsahuje algoritmy výpočtů n-hranů, vývojové diagramy, návod na použití programů, tabulky vstupů a výstupu. Programy jsou postaveny tak, aby byly

použitelné pro libovolný n -hran, vlastní výpočet je pak proveden pro šestihran. Sestavení a ladění programů bylo velmi náročné na čas a proto uvedené programy nejsou úplně dokončené. Toho by bylo možno docílit až po provedení několika výpočtů s uvedenými programy pro různá zadání a po doladění Newtonovy aproximace. Tyto úpravy však nejsou na závadu přesnosti a správnosti výpočtu.

Z celé teorie vyplývá, že se jedná o obecný princip vycházející z poznatků o odvalovacím frézování. Návrh konkrétních typů nástroje pro konkrétní tvar součásti (n hran, jemné drážkování) je zvláštním případem řešení. Práce si nemohla klást za cíl úplné vyřešení problematiky navrhování výchozího povrchu nástroje na samočinném počítači. Ukázala však praktickou použitelnost teorie. I když se jedná o poměrně složité vztahy a výpočty proti dřívějším způsobům výpočtu a návrhu výchozího povrchu, dostáváme zde přesné výsledky, které lze dále využít ať pro kontrolu nástroje, nebo pro jeho výrobu. Náročnost výpočtu má tu nevýhodu, že není přístupná široké technické veřejnosti tak, jak by měla být.

S postupem specialisace a integrace ve výrobě lze očekávat úzkou specializaci výrobců. Výroba nástrojů by měla být záležitostí jednoho výrobního podniku, jenž by pro výpočet nástrojů používal vlastní výpočetní středisko s týmem odborníků techniků analytiků, kteří by na zakázku prováděli konstrukční a technologickou přípravu výroby nástrojů pomocí číslicového počítače.

Postupem času, tak jak jsem pronikal do problematiky zadání diplomové práce, poznával náročnost zadání, docházel jsem k přesvědčení, že zvládnout celou problematiku v jedné diplomové práci je nemožné. Přesto si myslím, že se podařilo dořešit stěžejní úkol, před který jsem byl postaven.

Proto mi dovolte, abych ve stručnosti přednesl některé náměty pro další práci na tomto, nebo jiném podobném zadání. Předně je třeba pokračovat ve výpočtech n-hranu, i když jde o příklad, který nenajde uplatnění v praxi. Je třeba, aby se dotyčný řešitel dalších úkolů seznámil s problematikou výpočtu, provedl na programu některé úpravy, které by jej zjednodušily a dořešil by zadávání dat pro Newtonovu metodu. Nebylo by na škodu podle vypočtených souřadnic sestavit model nástroje, který by se mohl použít též pro konečnou kontrolu správnosti výpočtu.

Vlastní řešení dalších prací bych navrhoval rozdělit do několika oblastí :

- 1) teoretická oblast
- 2) samočinný počítač
- 3) praktická oblast

V teoretické části je třeba řešit tvary nových součástí evolventních i neevolventních, sestavit algoritmy výpočtů na stejné úrovni jako jsou v této práci. Dále se zabývat teorií podřezání a optimalizací velikostí rozměrů nástroje tak, aby bylo možno sestavit výrobní výkres.

Na samočinném počítači se omezit z časových důvodů pouze na sestavení a odladění programu podle algoritmů a provést výpočty pro různé rozměry daného tvaru.

V praktické části pak ve spolupráci s podnikem odzkoušet využití NC strojů a po případě i sestavit program pro NC stroj.

Jsou to jen velmi stručné podněty pro práci. Samozřejmě, že lze i zkoumat další vlastnosti odvalovací frézy. Vyjmenujme aspoň přechodové křivky, zatížení jednotlivých zubů při obrábění a s tím související optimalizace řezných podmínek a opotřebení.

Je více než zřejmé, že tyto náměty se mohou s poznáním radikálně změnit. Je však bezpodmínečně nutné, aby celkové zaměření dalších úkolů bylo vedeno k použitelnosti v praxi, aby nevznikla teorie, která by byla sama pro sebe, ale aby vznikl třeba i ucelený obor, který by výrazně ovlivnil dosavadní výrobu odvalovacích fréz a obráběcích nástrojů vůbec.

9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- /1/ Long B.T. : Obecná teorie vytváření povrchových ploch součástí obráběním s aplikací na prostorové ozubení pomocí samočinného počítače. Kandidátská disertační práce VŠST Liberec 1977
- /2/ Pazour J. : Vyšetřování výchozího povrchu odvalovacích fréz. Diplomová práce VŠST Liberec 1977
- /3/ Budínský, Kepr : Základy diferenciální geometrie s technickými aplikacemi. SNTL 1970
- /4/ Finikov S.P. : Diferenciálnaja geometrija. Izdatel'stvo MGU Moskva 1961
- /5/ Rodin P.R. : Metalorežuščiye instruměnty Kijev 1974
- /6/ Rodin P.R. : Osnovy teoriji projektirovănija režuščich instruměntov, Mašgis, Moskva 1960
- /7/ Grankovskij G.J. : Kiněmatika rezanija. Mašgis, Moskva 1948
- /8/ Rodin P.R. : Projektirovănije i proizvodstvo režuščevo instruměnta. Technika Kijev 1968
- /9/ Kvapil R. : Principy navrhovăní profilů odvalovacích nástrojů na ozubení, Kandidátské minimum, KOE - VŠST Liberec 1976.
- /10/ Long B.T. : Základy teorie vytváření obalových ploch vznikajících při pohybu nástroje a obrobku. Kandidátské minimum, KOE - VŠST, Liberec 1975

- /11/ Valčuha Š. : Výpočet a konstrukce odvalovacích fréz na neevolventní profily. VZ úkolu P04 - 533 - 081 - 00/3.10.3., SVŠT Bratislava 1974
- /12/ Frajfeld I.A. : Rasčoty i konstrukcii specialnovo metalorežuščego instrumenta. Mašgiz, Leningrad 1957
- /13/ Seidl O. : Řezné nástroje pro výrobu čelních ozubených kol. Učební texty, ČVUT, Fakulta strojní, KNO 1975
- /14/ Long, Kvapil : Obecná teorie vytváření povrchu součástí obráběním s aplikací na kuželová kola. Časopis Strojírenství, SNTL, září 1977
- /15/ Olehlá M, Tišer J.: Použití FORTRANU v praxi. VŠST Liberec 1972
- /16/ Areev, Alik, Markov: Bibliotěka tehničeskoj kibernetiki. Bibliotěka algoritmov 51b - 100b. Sovětskoje radio 1976
- /17/ Rektorys K. : Přehled užité matematiky. Česká matice technická (ČMT) 1968
- /18/ Nekvinda, Markov, Šrubar, Vild : Úvod do numerické matematiky. Skripta VŠST Liberec 1971
- /19/ Bartoš J. a kol. : Strojnické tabulky SNTL Praha 1976