

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI
nositelka Řádu práce
Fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 8
Strojírenská technologie

Zaměření :
obrábění a montáže

Katedra obrábění a montáže

PRŮŘEZ ŘEZU PŘI ODVALOVACÍM FRÉZOVÁNÍ

Petr I m r a m o v s k ý

KOM - OM - 090

Vedoucí práce: Ing. Robert Kvapil, CSc., KOM

Konzultanti: Ing. Vladimír Kracík, CSc., KTK
Ing. Květuše Cejnohová, KOM

Rozsah práce a příloh

Počet stran: 92
Počet příloh
a tabulek: 1
Počet obrázků: 25
Počet výkresů: -
Počet modelů nebo
jiných příloh: -

V Liberci 4. června 1982

Vysoká škola: strojní a textilní v Liberci Fakulta: strojní
Katedra: obrábění a montáže Školní rok: 1981/82

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Petra Imramovského
obor 23 - 07 - 8 strojírenská technologie

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

Název tématu: Průřez řezu při odvalovacím frézování
.....
.....

Zásady pro vypracování:

1. Politický význam diplomového zadání
2. Seznámení s dosavadními teoriemi analytického stanovení průřezu řezu při odvalovacím frézování
3. Aplikace průřezu řezu na zvolených modelech
4. Grafické vyhodnocení získaných výsledků
5. Ekonomický přínos

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

Autorské právo se řídí směrnicemi
MŠK pro státní záv. zkoušky č. j. 31
727/62-III/2 ze dne 13. července
1962-Věstník MŠK XVIII, sešit 24 ze
dne 31. 8. 1962 § 19 aut. z. č. 115/53 Sb.

V 95/82 S

KOM/OM

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran textu
Seznam odborné literatury: Budinský, B., Kepr, B.: Základy diferenciální geometrie s technickými aplikacemi
Cejhonová, K.: Analytické stanovení řezné síly při odvalovacím frézování. DP VSST Liberec 1981

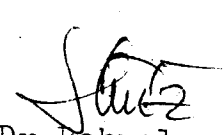
Vedoucí diplomové práce: Ing. Robert Kvapil, CSc

Datum zadání diplomové práce: 15.9.1981 - konečné zadání

Termín odevzdání diplomové práce: 4.6.1982




Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc
Vedoucí katedry


Doc. RNDr Bohuslav Stříž, CSc
Děkan

Liberci 15.9. 81
v dne 10

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

V Liberci dne 4. června 1982

Kramovský Petr

O B S A H

strana:

Seznam použitých zkratek a symbolů

1.	Ú V O D	1
2.	PROCES ODVALOVACÍHO FRÉZOVÁNÍ	4
2.1	Princip práce odvalovacích fréz	4
2.2	Namáhání a opotřebení nástroje při odvalovacím frézování	6
2.2.1	Zlepšení záběrových poměrů pomocí PROGRES frézy	9
3.	METODY STANOVENÍ PRŮŘEZU ODEBÍRANÉ VRSTVY	16
3.1	Teorie podle Z. Přikryla	17
3.2	Teorie podle J. Budy a J. Békése	22
3.3	Snahy o přesnější výpočet	24
3.4	Metoda podle Rodina	25
3.5	Metoda vycházející ze znalostí trajektorie ostří	26
3.5.1	Princip této metody	26
3.5.2	Postup při vlastním řešení	27
3.6	Zhodnocení	31
4.	VÝPOČET PRŮŘEZU PŘI ODVALOVACÍM FRÉZOVÁNÍ	33
4.1	Zvolený nástroj	33
4.1.1	Předmět obrábění	35
4.2	Zavedení pevného souřadnicového systému	35
4.3	Základní poloha soustavy	36
4.3.1	Základní polohy nástroje a obrobku	36
4.3.2	Základní poloha jednotlivých zubů	37
4.3.3	Základní poloha jednotlivých bodů na zubech	38

4.4	Průsečnice trajektorie břitu s dimenzionální rovinou	41
4.4.1	Trajektorie bodů na ostří	41
4.4.2	Volba dimenzionální roviny	43
4.4.3	Výpočet úhlu pootáčení dimenzionální roviny	44
4.4.4	Zjištění průsečíků trajektorií s dimenzionální rovinou	45
4.5	Průřez řezu	47
4.6	Program pro číslisový počítač	49
4.6.1	Vývojový diagram	50
4.6.2	Program	77
5.	GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ	88
5.1	Znázornění průřezu na příkladu	88
6.	ZÁVĚR	89
	Literatura	91

Seznam použitých zkratek a symbolů

A_D	plocha průřezu řezu
A_{D_i}	elementární plocha i-tého průřezu
a, b	reálná čísla
$\bar{A}, \bar{B}, \bar{P}$	polohové vektory
A_o^φ	tenzor otočení kolem osy o
$A_{o_n}^{\omega_{nt}}$	tenzor otočení kolem osy o_n o úhel ω_{nt}
$A_{o_o}^{\omega_{nt}}$	tenzor otočení kolem osy o_o o úhel ω_{ot}
$\bar{B}_i(0)$	polohový vektor ostří v základní poloze
$\bar{B}_i(t)$	okamžitý vektor bodu ostří
$k\bar{B}_i$	polohový vektor i-tého bodu na k-tém zubu
$k\bar{B}_i(t)$	okamžitý vektor i-tého bodu na k-tém zubu
D	průměr roztečné kružnice
D_{h_n}	průměr hlavové kružnice nástroje
D_{h_o}	průměr hlavové kružnice obrobku
D_{p_n}	průměr patní kružnice nástroje
D_{p_o}	průměr patní kružnice obrobku
E	jednotková matice
$F(x)$	funkce jedné proměnné
h	hloubka odebírané vrstvy
i_n	počet chodů šroubovice
$\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$	jednotkové vektory souřadnicových os
K	součinitel přechování

L_n celková délka frézy
 L_{z_n} délka závitové části frézy
 L_{k_n} délka kontrolních nákrůžků
 l_p maximální délka záběrového pole
 m modul
 $\bar{n}_d$ vektor normály k dimenzionální rovině
 n_k otáčky kola
 n_n otáčky nástroje
 o_o osa obrobku
 o_n osa nástroje
 $\bar{o}_o$ jednotkový vektor osy obrobku
 $\bar{o}_n$ jednotkový vektor osy nástroje
 $\bar{o}_n(t)$ okamžitý vektor osy nástroje
 $\bar{P}(t)$ okamžitý polohový vektor
 R_{h_n} poloměr hlavové kružnice nástroje
 R_{p_n} poloměr patní kružnice nástroje
 R_{h_o} poloměr hlavové kružnice obrobku
 R_{p_o} poloměr patní kružnice obrobku
 $R(o)$ antisymetrický tenzor
 s posuv
 s_z posuv na zub
 SK_i axiální souřadnice i -tého bodu břitu
 SR_i radiální souřadnice i -tého bodu břitu
 t parametr

t_d časová difference
 v řezná rychlost
 v_f posuvová rychlost
 x, y, z osy pevného souřadnicového systému
 k_{x_i}, k_{y_i} ... souřadnice průsečíku v dimenzionální rovině
 z_h počet hřebenů nástroje
 z_k počet zubů kola
 α úhel sklonu boku zubu
 β úhel sklonu šroubovice nástroje
 γ úhel čela
 ε přesnost výpočtu
 χ úhel nastavení hlavního ostří
 ω_n úhlová rychlost nástroje
 ω_o úhlová rychlost obrobku

1. Ú v o d -----

Základem hospodářského a sociálního rozvoje pro 80. léta je podle slov generálního tajemníka Ústředního výboru KSČ a presidenta ČSSR, soudruha Gustava Husáka, generální linie výstavby rozvinuté socialistické společnosti. Hlavním cílem politiky strany pro příští období je udržet a zkvalitňovat dosaženou životní úroveň obyvatelstva a upevňovat jeho sociální jistoty v souladu s výsledky, kterých dosáhneme v rozvoji národního hospodářství. Na základě tohoto předsedvzetí byly na XVI. sjezdu KSČ stanoveny směrnice pro rozvoj československého národního hospodářství, které jsou zaměřeny především na podstatně lepší využívání současné výrobně-technické základny, zvláště pak mimořádně nákladných strojů a zařízení s vysokými technicko-hospodářskými parametry, zvyšování úrovně řídicí a organizační práce a zvyšování technické úrovně výrobků při důrazném a rychlém zavádění výsledků vědy a techniky do praxe.

Z tohoto hlediska má mimořádný význam neustálé zlepšování a zdokonalování stávajících výrobků československého strojírenství a rovněž zkvalitňování technologie jejich výroby a tím i zefektivňování celého výrobního procesu.

Zkvalitněním a zefektivněním výroby lze dosáhnout patřičného růstu produkce a podstatného snížení závislosti československého průmyslu na zahraničních trzích a naopak zvýšení výrobního exportu našich výrobků za patřičného finančního efektu, což by se kladně projevilo i na životní úrovni obyvatelstva naší

republiky. V jednotlivých oborech našeho strojírenství je nutné klást důraz především na výzkum a vývoj nových strojů a zařízení při maximálním využití strojů stávajících a zároveň na hledání nových technologií, využívajících dle možnosti a potřeby automatizace a mechanizace, které by umožnily podstatné snížení výrobních nákladů a zvýšení produktivity práce při současném růstu kvality výrobků.

Mezi přední metody z hlediska produktivity práce a hospodárnosti patří odvalovací způsob frézování, který umožňuje vyrábět složité povrchy součástí nejrozdílnějších tvarů a velikostí.

Na základě kinematických a silových poměrů vznikajících v průběhu procesu obrábění lze provést analýzu soustavy stroj - nástroj - obrobek. Výsledků těchto studií může pak být využito při návrhu řezných nástrojů, kde se pak s ohledem na tyto výsledky provádějí různé korekce za účelem dosažení co nejrovnoměrnějšího namáhání jednotlivých břitů nástroje a tím i zvýšení trvanlivosti.

Zkoumáme-li vztahy nástroj - obrobek z hlediska silového namáhání, je nutno vycházet z velikosti a tvaru průřezu odebírané vrstvy materiálu.

Cílem mé práce je stanovit analytické vztahy pro průřez řezu při odvalovacím frézování čelních ozubených kol v návaznosti na výsledky předchozích prací na toto téma. Tyto vztahy pak naprogramovat ve strojovém jazyce FORTRAN IV. pro počítač EC 1033 a výsledky pak graficky zhodnotit tak, aby z nich

bylo možno vycházet při dalším výzkumu, případně i při návrhu nového, progresivního nástroje pro tento způsob obrábění. Dále tato práce obsahuje zhodnocení teorií zabývajících se určováním velikostí plochy řezu a podrobněji je zde zpracována oblast navrhování korekcí.

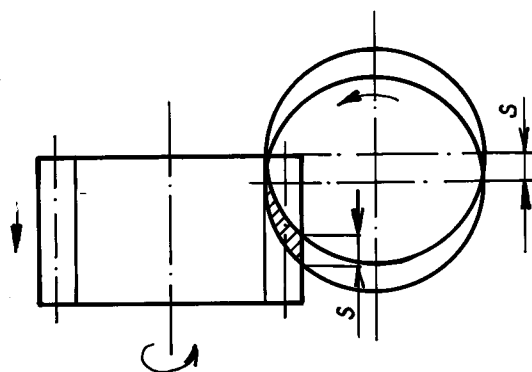
Matematickým aparátem pro tuto práci je vektorová a tensorová analýza. Pomocí její symboliky je umožněn velmi jednoduchý a stručný zápis poměrně složitých vztahů.

2. Proces odvalovacího frézování

Odvalovací frézování dnes patří mezi nejrozšířenější způsoby výroby ozubených kol. Je to dáno především tím, že odvalovací fréza a obrobek představují při řezání záběr evolventního šneku s kolem, takže všechny zuby kola se obrábějí plynule bez ztrátových reverzačních časů. Jednou frézou lze vyrobit ozubená kola stejného modulu s libovolným počtem zubů, ať už přímých nebo šikmých, korigovaná i nekorigovaná. Určitou nevýhodou jsou ztrátové časy pro náběh a výběh nástroje.

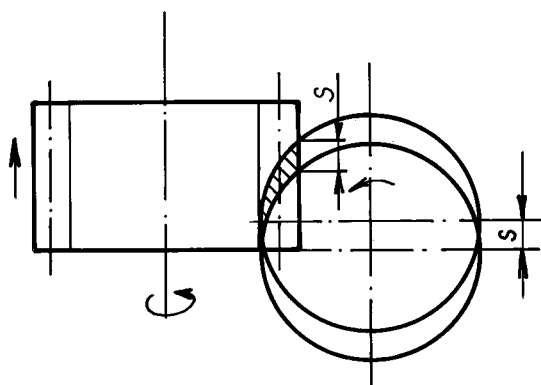
2.1 Princip práce odvalovacích fréz

Odvalovací frézování je poměrně složitý proces, kde se výsledný pohyb skládá ze dvou rotačních pohybů a jednoho pohybu přímočarého. Patří tedy do 7. skupiny kinematických schemat. Nástroj koná při obrábění rotační pohyb kolem své osy a zároveň dochází k posuvu ve směru osy obrobku. Současně s těmito pohyby vykonává obrobek rotační pohyb kolem své osy. Tím dochází k relativnímu odvalování profilu nástroje po obrobku. Výslednou trajektorii pohybu je cykloida navinutá na válci. Fréza může pracovat buď sousledně (obr. 1a) nebo nesousledně (obr. 1 b). Výhodnějším se jeví první způsob. Lze jím dosáhnout lepší jakosti obráběného povrchu a větší trvanlivosti rezného nástroje.

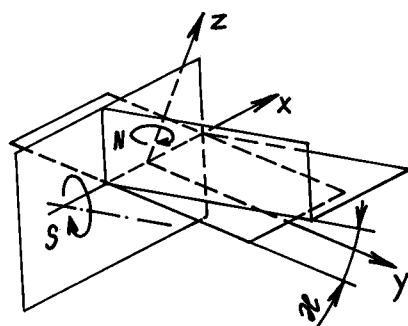


obr. 1

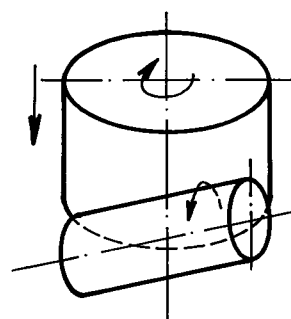
a)



b)



obr. 2

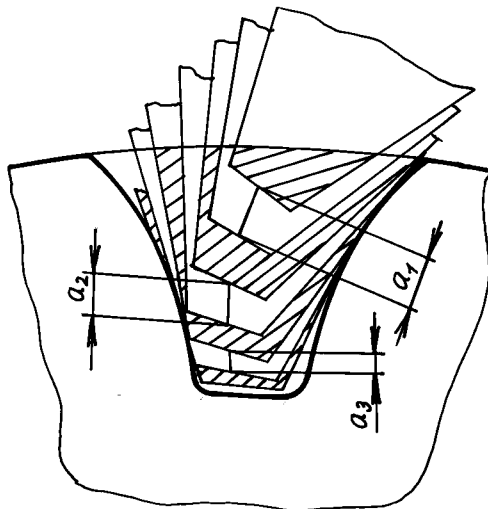


obr. 3

Při odvalovacím frézování tvoří tedy nástroj a obrobek, jak již bylo řečeno šroubové válcové soukolí. Fréza je tvořena tělesem, na kterém jsou ve šroubovnici jakoby navinuty jednotlivé zuby. Fréza a obrobek musí mít vázaný pohyb. Platí převod:

$$i = \frac{i_n}{z_k} = \frac{n_k}{n_n} \quad (2.1)$$

Boky zubů se vytvářejí jako obalové plochy jednotlivých poloh nástroje (obr. 4).

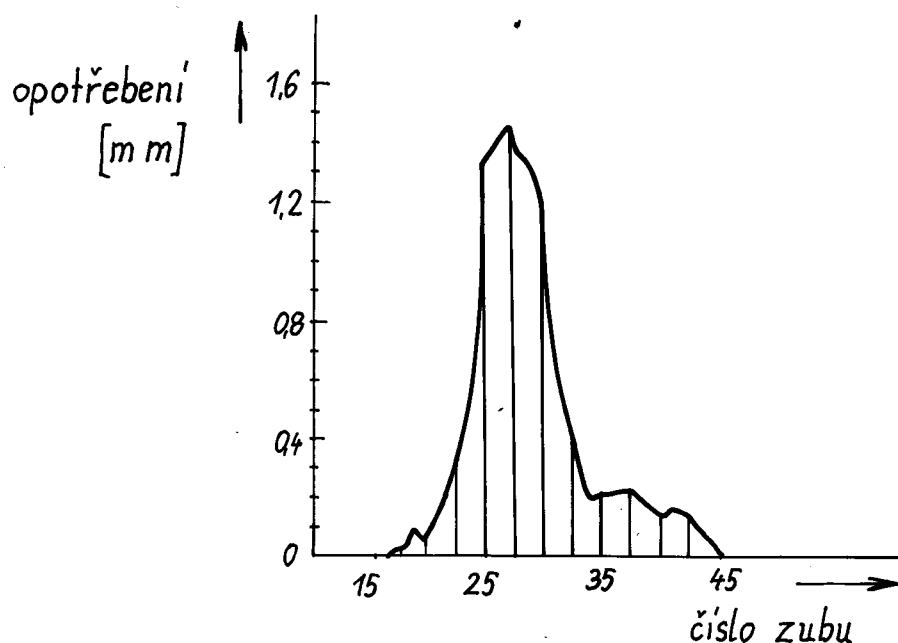


obr. 4

2.2 Namáhání a opotřebení nástroje při odvalovacím frézování

Při odvalovacím frézování dochází k nerovnoměrnému úběru materiálu. Některé zuby odebírají silné třísky, jiné kratší a slabší. Je zřejmé, že i namáhání jednotlivých zubů je proměnné. Vždy jen několik málo zubů (1 až 3) odebírá nejhrubší třísku (obr. 5). K většímu opotřebení dochází obecně na těch zubech frézy, které jsou nejdéle v záběru s obrobkem. Přeostrřování se provádí podle nejvíce opotřebovaných zubů. O stejnou hodnotu jako tyto zuby se však ostří i ostatní zuby. Při snaze o hospodárný provoz je pochopitelně takovéto ostření nevhodné. Fréza se zdaleka nevyužije v celém svém rozsahu

a kvůli několika zubům se musí celá přestřít. Tím klesá její životnost a proces obrábění se tak stává neekonomickým. Proto se snažíme rozložit zatížení rovnoměrně na více zubů tak, aby se dosáhlo přibližně stejného opotřebení všech zubů frézy. Za tímto účelem se zavádějí různé způsoby korekce, které zvyšují účinnost fréz a rovnoměrnost opotřebení.



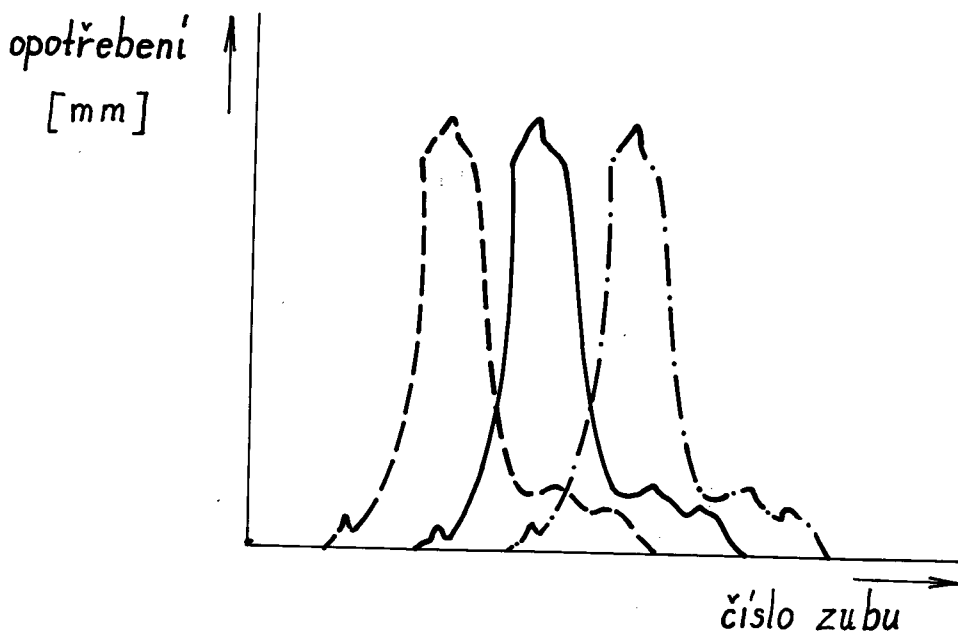
obr. 5

Existují dvě alternativy:

- 1) rozdělení opotřebení krokováním
- 2) změnou záběrových poměrů pomocí speciální geometrie frézy.

Při rozdělení opotřebení krokováním se provádí osové posunutí frézy, aby se frézy využilo po celé délce a zuby byly rovnoměrně opotřebeny. Nej-

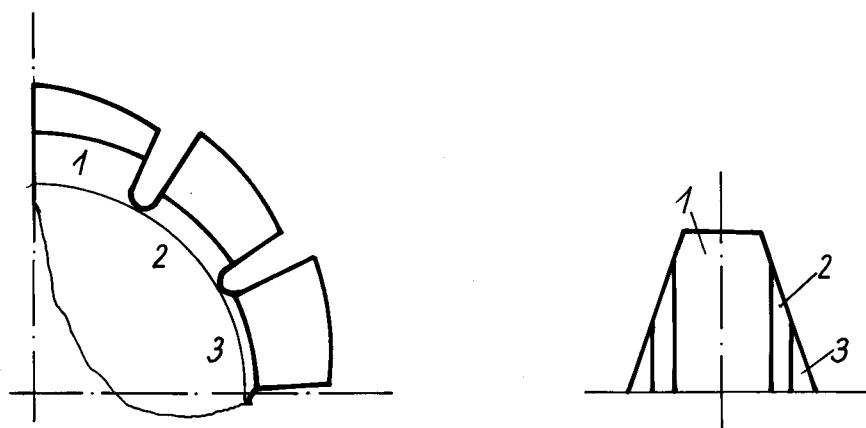
větší namáhání a tedy i opotřebení se postupně přenáší na více zubů (obr. 6).



obr. 6

Změnu záběrových poměrů pomocí speciální geometrie frézy lze provádět dvěma způsoby. Tvarovým vybroušením válce frézy podle korekční křivky, která je pro každý počet zubů kola jiná. Tyto nástroje se nazývají PROGRES frézy. Jejich výroba je dosti náročná a pracná. Přesto se však vyplatí.

Druhým způsobem je rozdělení třísky různě přesazenými břity nebo rozdělení záběru na více zubů (obr. 7), tedy použití tzv. FETTE fréz. Tento způsob je velice perspektivní.



obr. 7

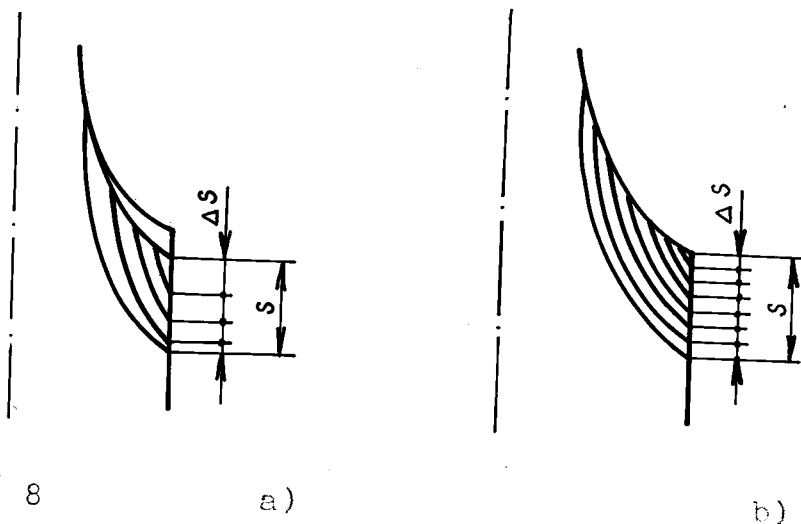
a)

b)

2.2.1 Zlepšení záběrových poměrů pomocí PROGRES frézy

Tento způsob vznikl v letech 1949 - 1950 v Sovětském svazu. U jeho zrodu stáli vědci Kogan a Sidorenko, kteří vyšli z toho, že při zvětšení posuvu rychle vzrůstá zatížení na nejnamáhanější zub frézy a zvětšuje se tloušťka třísky. Vybrousí-li se do frézy korekční křivka podle předem zjištěné závislosti, dosáhne se tak rovnoměrné zatížení na všechny zuby po celé délce pracovní části frézy tak, že se vyrovná tloušťka třísky odebíraná jednotlivými zuby. Na obr. 8 a) je vidět rozdělení odebíraného materiálu u běžné odvalovací frézy a na obr. 8 b) u frézy korigované (viz str. 10).

Ke korigování je nutno znát tyto veličiny: směr posuvu kola, způsob nastavení frézy vzhledem k ose kola, modul, počet zubů, hloubku frézování, potřebný posuv na otáčku kola a posuv na zub.



obr. 8

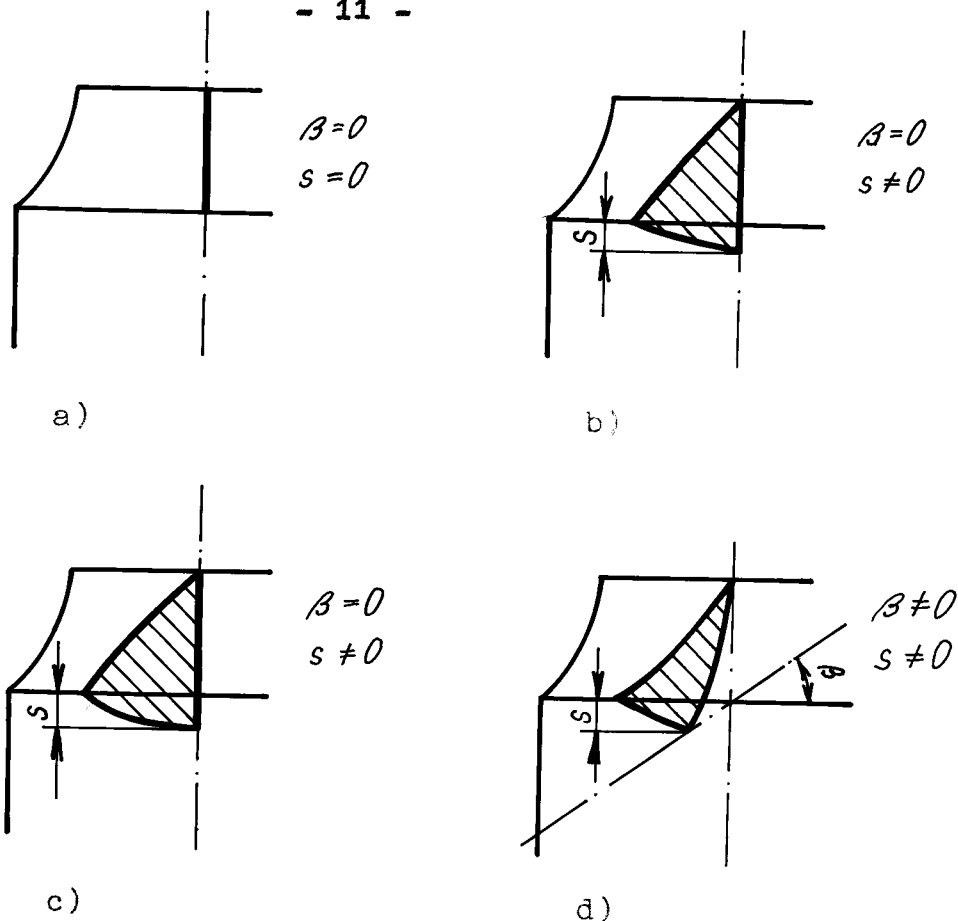
a)

b)

Korekci provádíme souměrnou nebo nesouměrnou. Při souměrné korekci je korigovaná část frézy umístěna vzhledem k ose frézy na obě strany stejně. U korekce nesouměrné je korigovaná část posunutá od osy kola na nabíhající stranu.

Rozdělení třísky závisí též na charakteru záběrového pole. Záběrovým polem rozumíme prostorovou křivou plochu ohraničenou pronikem válcové plochy (případně kuželové) frézy s válcovou plochou opsanou obrobku nebo ozubení, přičemž válcová plocha obrobku na odchodné straně, kde obrobek vychází ze záběru, je zmenšena na poloměru o hloubku frézované zubové mezery (7).

Na velikost a tvar záběrového pole má vliv hloubka frézování, posuv na otáčku, úhel nastavení frézy, poloměr frézy a poloměr hlavové kružnice ozubeného kola. Změna tvaru a velikosti záběrového pole s posuvem a s úhlem nastavení frézy vůči obrobku je zřejmá z obr. 9 a - d.



obr. 9

Maximální délku záběrového pole lze zjistit ze vztahu:

$$l_p = \sqrt{(R_{ho} - R_{po}) \cdot [2 R_{po} - (R_{ho} - R_{po})]} \quad (2.2)$$

Obecně se délka vypočítá pro $\beta = 0$ podle (8) ze vztahu:

$$l'_1 = \sqrt{R^2 - (R - XM + h'_1)^2} \quad (2.3)$$

kde

$$h'_1 = r - \sqrt{r^2 - C_1^2}$$

kde

$$C_1 = C - s$$

$$C = \sqrt{r^2 - (r - XM)^2}$$

R poloměr hlavové kružnice obrobku

r poloměr hlavové kružnice frézy

XM výška zubu

Pro $\beta = 0$ pak

$$l'_p = \frac{\cos J_0 \sqrt{XM (2R - XM)} + \sin \beta \cdot \sin J_0 \sqrt{XM (2r - XM)}}{\cos \beta}$$

(2.4)

kde

$$J_0 = 90^\circ - \beta_0 - J''$$

kde

$$J'' = 1 - \frac{s \cdot \cos \beta_0}{r_1}$$

kde

$$\operatorname{tg} \beta_0 = \frac{\sin \beta \sqrt{XM (2R - XM)}}{XM (2r - XM)}$$

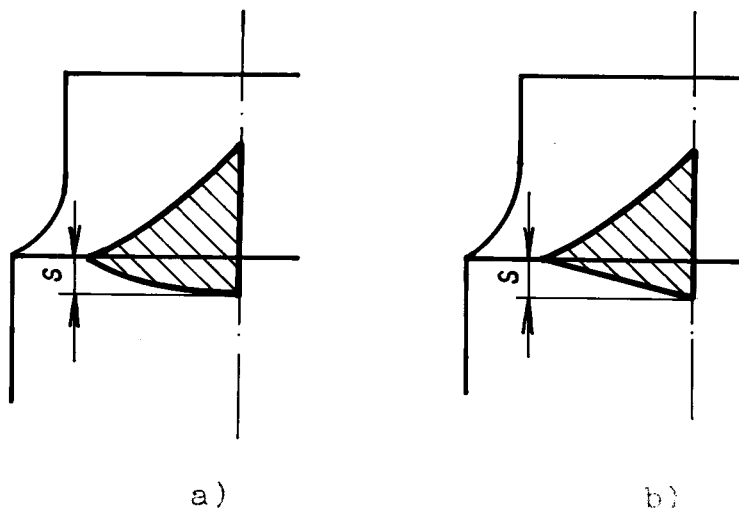
r_1 afinní poloměr eliptické křivky vzhledem k

Odvození tohoto vztahu je provedeno v (8).

pozn.: $J = \gamma$

Stanovení velikosti posuvu na zub je provedeno v (8).

Použitím korigované frézy dojde ke změně tvaru záběrového pole. Spodní hranice záběrového pole se změní přibližně v přímku (obr. 10 b).



obr. 10

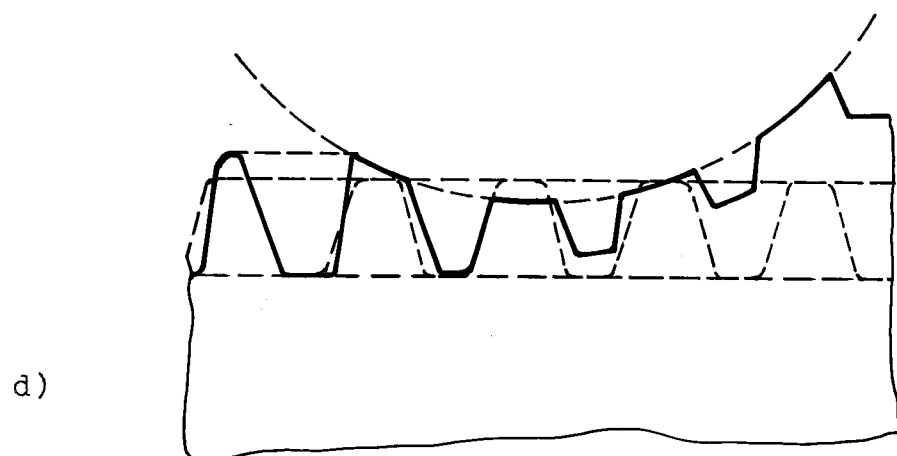
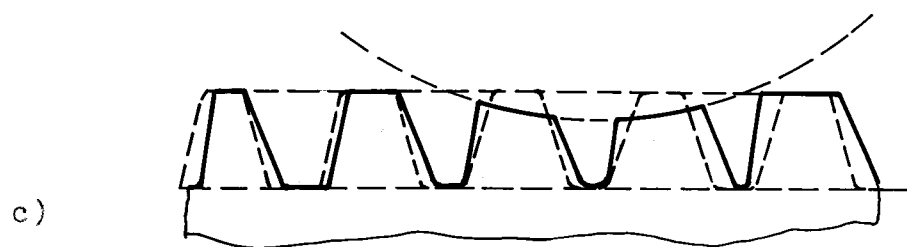
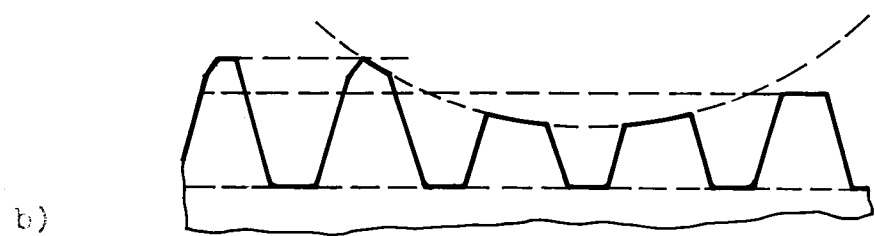
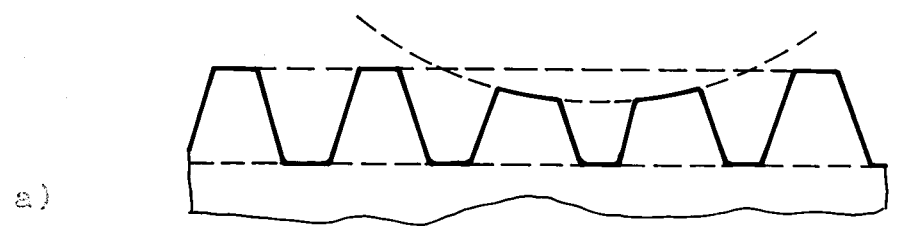
Odebíraná vrstva se rovnoměrně rozdělí mezi jednotlivé zuby (obr. 8 b).

Podle tvaru korekční křivky a jednotlivých zubů vznikly postupně čtyři druhy odvalovacích fréz:

- 1) frézy I. druhu (obr. 11 a), které lze použít jako hrubovací i hladící, pro kola s velkým počtem zubů a velké úhly stoupání šroubovice kola. Cena těchto fréz je o 5 - 10 % větší než u nekorigovaných fréz, přičemž výkon se zvýší 3 - 6 krát

- 2) frézy II. druhu (obr. 11 b) mají oproti frézám I. druhu poněkud hlubší profil. Lze je použít jako hlubovací i hladící, pro kola s malým počtem zubů a s malým úhlem stoupání šroubovice kola. Při použití těchto fréz vzroste výkonnost 4 - 8 krát. Cena se zvýší o 15 - 25 %
- 3) frézy III. druhu (obr. 11 c), které mají profilové zuby postupně zeslabované. Používají se většinou jako hrubovací. Jejich použitím se zvýší výkonnost 5 - 10 krát, přičemž cena vzroste o 50 - 80 %. Používají se pro kola s větším počtem zubů a velké úhly stoupání šroubovice
- 4) frézy IV. druhu (obr. 11 d) jsou speciální, jednotlivé zuby jsou různě široké. Používají se při hrubování, pro kola s malým počtem zubů a s malým úhlem stoupání šroubovice kola. Výkonnost se jimi zvýší 10 - 15 krát, cena vzroste o 60 - 100 %. Frézy I. a II. druhu se vzájemně doplňují a mohou vyrábět čelní ozubená kola v celém rozsahu. Totéž platí i o frézách III. a IV. druhu, které jsou však výkonnější (8).

Progres frézy jsou tedy speciální nástroje s omezeným universálním použitím. Proto jsou vhodné pro větší série ozubených kol. I přes své nevýhody se uplatňují ve výrobě a dosahuje se s nimi pronikavého zvýšení produktivity práce.



3. Metody stanovení průřezu odebírané vrstvy

Zkoumáme-li namáhání jednotlivých břitů nástroje, musíme znát jednak měrný řezný odpor obráběného materiálu a jednak průřez odebírané vrstvy. Určením průřezu odebírané vrstvy se proto zabývalo mnoho odborníků.

K získání vztahů pro výpočet průřezu řezu se původně používalo běžného matematického aparátu. V současné době by pro řešení složitějších případů nestačil a proto byly hledány nové možnosti v oboru vyšší matematiky s využitím kybernetiky.

Z hlediska vývoje lze teorie průřezu odebírané vrstvy rozdělit do dvou etap:

- 1. etapa je představována autory, kteří vycházejí z určitých zjednodušujících předpokladů. Sem patří například Z. Přikryl, V. F. Bobrov, J. Buda, J. Békés, V. A. Aršinov a další.
- 2. etapa, tedy etapa současná, byla zahájena P. R. Rodinem, který přišel se zcela novou teorií, kde využívá vektorového počtu. Dále se prosazují metody vycházející ze znalosti trajektorie ostří řezného nástroje, jež jsou vhodné pro stanovení průřezu odebírané vrstvy u složitějších způsobů obrábění, např. u odvalovacího frézování. Dále budou přiblíženy některé teorie průřezu předních světových i našich autorů. Nutno podotknout, že při výkladu jejich teorií bude používáno původní terminologie a symboliky autorů. Jelikož některé z těchto pojmů a symbolů jsou již zastaralé, nebude tato symbolika uvedena v seznamu použitých značek.

3.1 Teorie podle Z. Přikryla

Autor definuje třísku jako část materiálu odřezanou z obrobku při obrábění, která se tvoří při vníkaní břitu nástroje do materiálu za určitých řezných podmínek (řezné rychlosti v , posuvu s , hloubky odřezávané vrstvy h).

Velikost třísky je určena jejím průřezem. Protože průřez je vlivem deformace jednotlivých elementů při vzniku třísky odlišný od průřezu odřezávané vrstvy, určuje autor velikost průřezu třísky průřezem oddělované vrstvy materiálu v rovině kolmé na směr hlavního řezného pohybu.

Autor zavádí dva pojmy průřezu třísky:

- 1) teoretický průřez třísky S_t
- 2) jmenovitý průřez třísky S_j .

Teoretický průřez třísky S_t je definován součinem tloušťky a a šířky b odřezávané vrstvy materiálu. Např. u podélného soustružení platí (11):

$$S_t = a \cdot b = s \cdot h \text{ /mm}^2 \quad (3.1)$$

pro $r \ll h$ a

$$S_t = a \cdot b = \frac{h \cdot s}{r \left(\arccos \frac{r-h}{r} + \arcsin \frac{s}{2r} \right)} \cdot \frac{2h}{2h - a_s} \cdot r \cdot \arccos \frac{r-h}{r} \quad (3.2)$$

pro $r \geq h$

kde

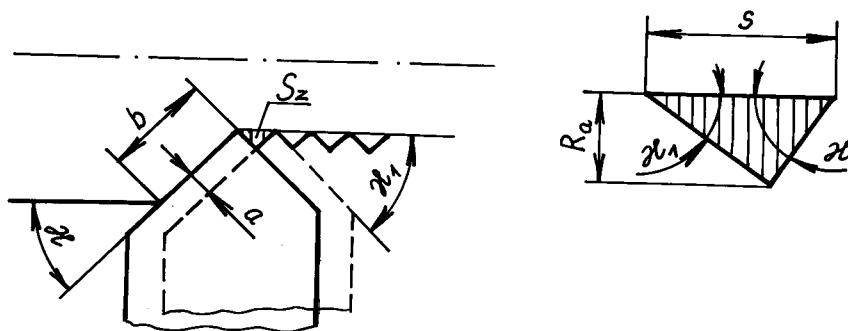
$$a_s = \frac{h \cdot s}{r \left(\arccos \frac{r-h}{r} + \arcsin \frac{s}{2r} \right)}$$

kde s je posuv, h - hloubka řezu, r - poloměr zaoblení špičky nože. Jmenovitý průřez třísky S_j je skutečný průřez odebíraného materiálu, který je o zbytkovou plochu S_z menší než teoretický průřez S_t . Jako příklad lze uvést jmenovitý průřez při podélném soustružení:

$$S_j = S_t - S_z = a \cdot b - \frac{s^2}{2} \cdot \frac{\operatorname{tg} H \cdot \operatorname{tg} H_1}{\operatorname{tg} H + \operatorname{tg} H_1} / \text{mm}^2 / \quad (3.3)$$

kde H je úhel nastavení hlavního ostří, H_1 úhel nastavení vedlejšího ostří.

Odvození vztahu je zřejmé z obr. 12.



obr. 12

Plastická deformace jednotlivých elementů způsobuje, že skutečný průřez třísky je větší než jmenovitý nebo teoretický průřez. Mění se hlavně tloušťka třísky a , kdežto její šířka b se mění poměrně málo.

pozn.: $H = \alpha$

Plastická deformace je charakterizována koeficientem pěchování K_s , který vyjadřuje poměr skutečného průřezu třísky S_s ku jmenovitému průřezu S_j :

$$K_s = \frac{S_s}{S_j}$$

Tento vztah lze rozepsat na příčný K_1 a podélný součinitel pěchování K_a :

$$K_1 = \frac{l}{l_t} \qquad K_a = \frac{a_t}{a}$$

kde l je dráha nože, l_t - délka třísky.

Platí:

$$K_s = K_1 = K_a = K$$

Hodnoty součinitele pěchování se dají určit přímým měřením.

Pro další způsoby obrábění pak odvodil Z. Přikryl za určitých zjednodušujících předpokladů (11) následující vztahy, ke kterým dospěl na základě znalostí řezných podmínek a tvaru břitu řezného nástroje. Pro protahování drážek je to vztah:

$$S = a_1 b n i \qquad (3.4)$$

kde a_1 je tloušťka třísky odebíraná jedním zubem, b - šířka drážky, n - počet drážek, i - počet současně zabírajících zubů. Pro vrtání platí:

$$S = \frac{s}{2} \cdot \frac{D}{2} \qquad (3.5)$$

kde s je posuv a D průměr vrtáku.

Při frézování válcovými frézami s přímými zuby okamžitý průřez odebíraný jedním zubem S_1 je dán rovnicí:

$$S_1 = b \cdot a = b s_z \sin \varphi$$

kde s_z je posuv na zub.

Je-li v záběru z zubů, pak je celková plocha S odřezávána těmito zuby:

$$S = b s_z \sum_{i=1}^z \sin \varphi_i \quad a_s b z \frac{\varphi_{\max}}{2\pi} \quad (3.6)$$

Střední tloušťka třísky a_s lze vyjádřit vztahem

$$a_s = s_z \cdot \sin \frac{\varphi_{\max}}{2}$$

a úhel délky záběru

$$\cos \varphi_{\max} = 1 - \frac{2h}{D}$$

φ_1 úhel okamžité polohy zubu

D průměr frézy

U frézování válcovými frézami se šikmými zuby pro okamžitý průřez odebíraný jedním zubem platí:

$$S_\varphi = \frac{D s_z}{2 \cdot \sin \omega} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (3.7)$$

kde ω je úhel sklonu šroubovice, φ_1 úhel polohy zubu na počátku záběru a φ_2 úhel polohy zubu na konci záběru. Pro čelní frézování platí:

$$S_\varphi = h s_z \sin \varphi \quad (3.8)$$

$$S = h \cdot a_s \cdot i \quad (3.9)$$

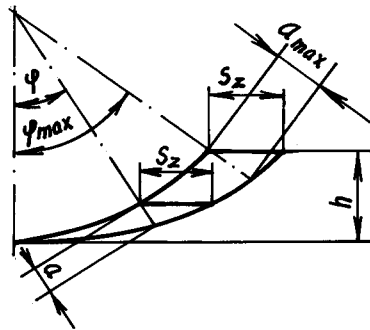
Při symetrickém frézování čelní válcovou frézou je střední tloušťka třísky:

$$a_s = s_z \cdot \cos \frac{\psi}{4}$$

kde úhel ψ se vypočte ze vztahu:

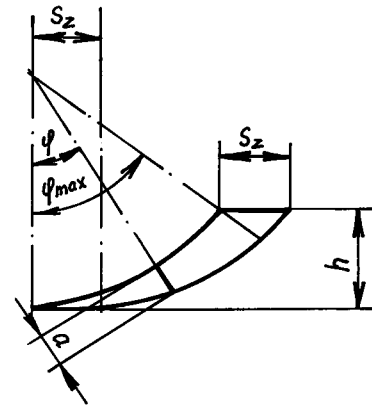
$$\frac{\psi}{2} = \arcsin \frac{B}{D}$$

kde B je šířka frézování.



obr. 13

a)



b)

Při frézování nožovou hlavou s úhlem nastavení nožů κ je celkový průřez třísky:

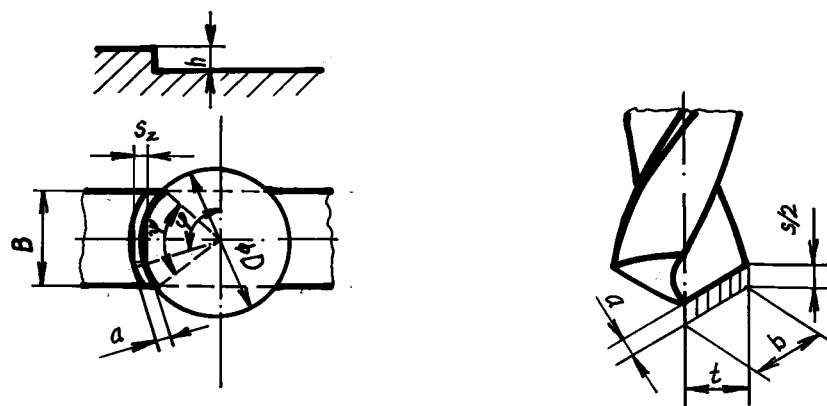
$$S = h s_z \sin \kappa \cos \frac{\psi}{4} \cdot i \quad (3.10)$$

kde počet zubů v záběru

$$i = \frac{\psi z}{2\pi}$$

kde z je počet zubů frézy.

Výše uvedené vztahy udávají okamžitý průřez třísky odebírané 1 zubem (S_1, S_φ) nebo současně všemi zabírajícími zuby (S). Odvození vztahů je patrné z obrázků 12 - 14.



obr. 14

a)

b)

3.2 Teorie podle J. Budy a J. Békése

Tito autoři zavádějí pojem řezu a definují ho jako tu část materiálu obrobku, která se odřezáváním mění na třísku. Tvar a rozměry řezu jsou charakterizovány tloušťkou řezu a , šířkou řezu b a průřezem řezu S v rovině kolmé na směr hlavního řezného pohybu.

Tloušťka řezu je vzdálenost dvou za sebou následujících řezných ploch. Šířka řezu je měřena podél průmětu řezné hrany v příslušné rovině.

Kromě šířky řezu b zavádí ještě šířku řezání b_0 pro niž platí:

$$b_0 > b$$

Představuje rozměr řezu podél ostří nástroje. Při podélném soustružení např. je:

$$b_o = \frac{b}{\cos \lambda}$$

kde λ je úhel sklonu ostří.

Průřez řezu S je počítán jako plocha geometrického útvaru, autor rozeznává dva druhy průřezu:

- 1) průřez řezu S , což je průřez odřezávané vrstvy v rovině kolmé na směr hlavního řezného pohybu
- 2) průřez řezání S_o - součin délky řezné hrany v záběru a tloušťky odřezávané vrstvy.

Budeme-li aplikovat tyto definice na podélné soustružení, pak platí:

$$S = a b \quad /mm/$$

$$S_o = a b_o = \frac{S}{\cos \lambda} \quad /mm^2/$$

Jde-li o případ proměnné tloušťky řezu m , která vyjadřuje poměr průřezu řezu S a délky řezné hrany l v rovině kolmé na hlavní řezný pohyb. Platí

$$m = \frac{S}{l} \quad /mm/$$

Pro frézování válcovými frézami s přímými zuby je:

$$m = \frac{1}{i} \int_0^{\varphi} a \times d_i = \frac{s_z t}{i} \quad /mm/ \quad (3.12)$$

U čelního frézování pak

$$m = \frac{s_z \sin \alpha \cdot B}{i} \quad (\text{mm}) \quad (3.13)$$

kde délka záběrového oblouku

$$i = \frac{\pi D \varphi}{360} \quad (\text{mm})$$

$$\varphi = \arccos \left(1 - \frac{2t}{D} \right)$$

kde t je hloubka záběru a D průměr frézy.

Je-li tloušťka průřezu během procesu obrábění neměnná, řešení plochy řezu jsou podobná jako u Z. Přikryla, proto zde nejsou uvedena. Odvození všech uvedených vztahů je provedeno v literatuře (1).

3.3 Snahy o přesnější výpočet

Teorie popsané v předchozím odstavci jsou pro některé způsoby obrábění značně nepřesné. Proto bylo nutno i pro tyto způsoby obrábění najít odpovídající vztahy. Zde dosáhli dobrých výsledků například V. A. Aršinov, V. F. Bobrov, P. R. Rodin a další.

V. A. Aršinov určil exponenciální závislost mezi celkovým maximálním průřezem a těmito veličinami: modulem m (mm), posuvem s (mm/ot), počtem zubů z .

Pro odvalovací frézování čelních ozubených kol s přímými zuby platí:

$$A_{D_{\max}} = \frac{0,609 m^2 s}{z^{0,11}} \quad (\text{mm}^2) \quad (3.14)$$

Jelikož se však průřez řezu při odvalovacím frézování mění podél břitu zubů nástroje a je jiný pro každý zub, slouží tento vztah pouze jako orientační.

3.4 Metoda podle Rodina

Tato metoda patří mezi nejpokrokovější metody určování průřezu odebírané vrstvy.

Podle autora je průřez odebírané vrstvy charakterizován aktivním úsekem ostří, jeho tvarem a tloušťkou průřezu v daných bodech ostří.

Tloušťkou průřezu rozumí autor obecně vzdálenost od řezné plochy k vnějšímu povrchu odebírané vrstvy v daný okamžik ve směru normály k řezné ploše.

Aktivní ostří pak definuje jako tu část ostří, která se v určitém okamžiku stýká s materiálem a přetváří ho v třísku. Autor odvodil vztah pro tloušťku průřezu h (12).

$$h = s \cdot \cos \varepsilon = \frac{\bar{N} \cdot \bar{s}}{|\bar{N}|} \quad (3.15)$$

Normála k řezné ploše N je dána vektorovým součinem řezné rychlosti $\bar{v}$ a vektorem $\bar{P}$, který směřuje po tečně k ostří:

$$\bar{N} = \bar{v} \times \bar{P}$$

Pro soustavu souřadnic x, y, z platí:

$$\bar{s} = s_x \bar{i} + s_y \bar{j} + s_z \bar{k}$$

$$\bar{v} = v_x \bar{i} + v_y \bar{j} + v_z \bar{k}$$

Rozepsání vztahu (3.15) v souřadnicovém tvaru je provedeno v literatuře (12).

Rodinovou metodou lze řešit i značně složité způsoby obrábění, jako např. frézování šroubových povrchů apod.

3.5 Metoda vycházející ze znalostí trajektorie ostří

Vzhledem k tomu, že dříve uvedené metody nelze aplikovat s dostatečnou přesností na složitější případy obrábění, bylo nutno vypracovat metodu, která by vycházela z přesných matematických závislostí a známých technologických podmínek pro konkrétní způsob obrábění. Těmto požadavkům plně vyhověla metoda založená na znalosti trajektorie ostří.

3.5.1 Princip této metody

Tato metoda vychází z určování průsečíků trajektorií jednotlivých bodů na břitu s předem zvolenou rovinou (dimenzionální). Dimenzionální rovinou rozumíme v obecném případě jakoukoliv rovinu. V konkrétním případě pak volíme takovou rovinu, která je pro zkoumání daného případu nejvýhodnější.

V případě soustružení je dimenzionální rovina rovnoběžná se základní rovinou a prochází špičkou nože. U frézování prokládáme tuto rovinu osou frézy a uvažovaným bodem ostří. To platí i pro případ odvalovacího frézování.

Dimenzionální rovina procházející plochou řezu je tedy vždy určena bodem ostří a normálou k hlavnímu řeznému pohybu v daném časovém okamžiku.

Průřezem odebírané vrstvy rozumíme plochu průniku množiny bodů obrobku a řezného nástroje v dimenzionální rovině (7). Tento průřez je vymezen průsečíky trajektorií ostří ve dvou po sobě jdoucích polohách.

Abychom mohli analyticky plochu řezu vyjádřit, musíme znát kinematické schema utváření, respektive řezné podmínky daného způsobu obrábění, dále pak rozměry obrobku a parametry geometrie řezného nástroje.

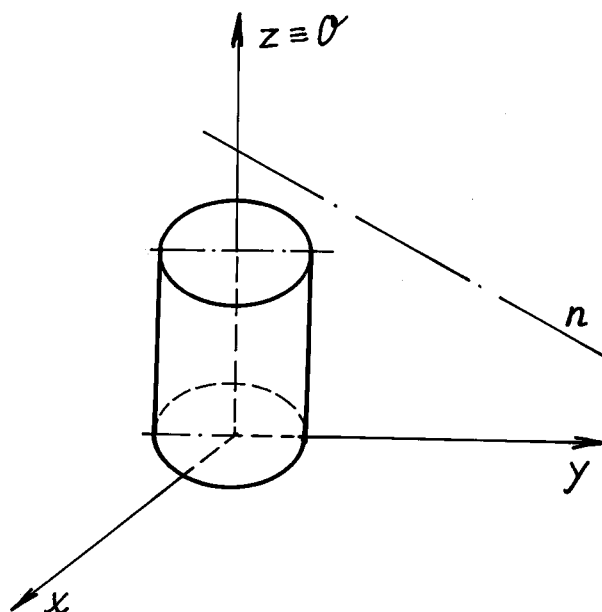
3.5.2 Postup při vlastním řešení

Řešení lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Zavedení pevného souřadnicového systému x, y, z (obr. 15). V tomto systému jsou všechny pohyby přeneseny na nástroj (systém je spojen s obrobkem). Z hlediska procesu utváření je lhostejné, jakou kombinací pohybu obrobku a nástroje dosáhneme relativního pohybu.
- 2) Vyjádření základní polohy jednotlivých bodů ostří pomocí vektoru:

$$\bar{B}_i(0) = F(x, y, z) \quad (3.16)$$

kde x, y, z jsou souřadnice i -tého bodu v nulovém čase.



obr. 15

- 3) Vyjádření trajektorií jednotlivých bodů ostří $B_i(t)$. Dráha pohybu je dána v podstatě dráhou pohybu nástroje a povrchu obrobku. Tyto pohyby při obrábění jsou tvořeny většinou pohybem rotačním, postupným nebo kombinací těchto dvou pohybů. Pro to lze jako matematického aparátu použít tenzorového a vektorového počtu. Trajektorii lze pak zapísat obecně takto:

$$\bar{B}_i(t) = FF A_o^{p_t} \bar{a}(0), A_n^{q_t} \bar{b}(0), \bar{B}_i(0), \bar{d}(t)$$

(3.17)

$A_o^{p_t}$ je tenzor otáčení bodu kolem osy o obrobku o úhel p_t
 $A_n^{q_t}$ - tenzor otáčení bodu kolem osy n nástroje o úhel q_t

p, q - parametry

$\vec{d}(t)$ - vektor v čase t

$\vec{a}(0), \vec{b}(0), \vec{c}(0)$ - vektory v základní poloze.

- 4) Volba dimenzionální roviny p_d , která je obecně určena bodem B a normálou $\vec{n}_p$:

$$(\vec{R}_0 - \vec{B}) \cdot \vec{n}_p = 0$$

kde R_0 je libovolný bod roviny p_d .

Vektor normály $\vec{n}_p$ je dán vektorovým součinem:

$$\vec{n}_p = \vec{H} \times (\vec{B} - \vec{G})$$

kde $\vec{B} - \vec{G}$ je vektor známého bodu roviny p_d , jehož jedno umístění leží v rovině p_d .

$\vec{H}$ je vektor, jehož jedno umístění leží v rovině p_d .

Okamžitá poloha roviny p_d je vyjádřena parametrickou rovnicí:

$$p_d(u, v) = F A_o^{p_t} \vec{q}(0) + \vec{v}_f \cdot t \vec{\omega}^0 \quad (3.18)$$

kde $A_o^{p_t}$ je tenzor otáčení roviny p_d kolem osy O o úhel p_t

p - parametr

t - čas

$\vec{q}(0)$ - vektor v čase $t = 0$

$\vec{v}_f$ - vektor rychlosti posuvu roviny p_d ve směru jednotkového vektoru $\vec{O}_e$

- 5) Získání hranic průřezu z průsečnic trajektorií $B_i(t, x)$ s dimenzionální rovinou $p_d(u, v)$

$$\bar{B}_i(t, x) = p_d(u, v) \quad (3.19)$$

kde t, u, v jsou dané parametry a x je neznámý parametr.

Trajektorie $\bar{B}_i(t)$ je popsána rovnicí (3.17).

- 6) Zjištění, zda uvažovaný bod $B_i(t)$ vyhovuje záběrovým podmínkám. To znamená zjistit jest-li leží v záběrovém poli. Omezení geometrickými podmínkami pro jednotlivé souřadnice x, y, z je:

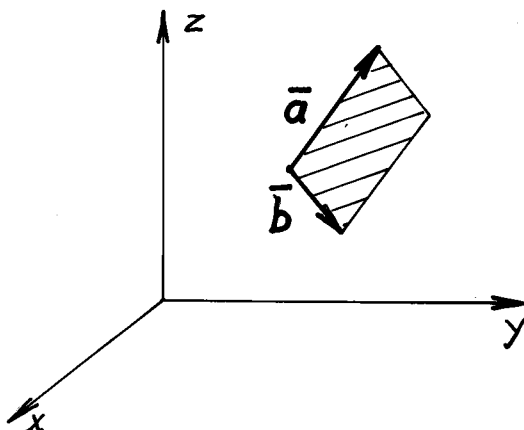
$$\begin{aligned} x &\in (h_1, h_2) \\ y &\in (l_1, l_2) \\ z &\in (r_1, r_2) \end{aligned} \quad (3.20)$$

kde $h_1, h_2, l_1, l_2, r_1, r_2$ jsou skalární veličiny.

- 7) Výpočet plochy i -tého průřezu odebírané vrstvy, který lze s vyhovující přesností řešit vektorovým součinem dvou vektorů $\bar{a}, \bar{b}$, za předpokladu, že vzdálenosti mezi body tvořícími hranici plochy jsou dostatečně malé. Element průřezu má pak tvar rovnoběžníka (obr. 16). Platí

$$A_{D_i} = |\bar{a} \times \bar{b}| \quad (3.21)$$

Průřez lze spočítat přesněji pomocí integrálního počtu. Tento způsob je však značně pracný a vyžaduje velké matematické zručnosti (3).



obr. 16

Tento postup, jak je zřejmé, je zcela obecný. Jeho aplikace na zvoleném modelu bude provedena později.

3.6 Zhodnocení

Srovnáme-li navzájem uvedené teorie, zjistíme, že mezi nimi existuje řada odlišností způsobených jak historickým, tak společenským vývojem.

Autoři vývojově starší (Buda, Békés, Přikryl a další) používají při výpočtu tradičních matematických způsobů řešení, přičemž úlohu obvykle více či méně zjednoduší, takže nakonec dojde k jisté nepřesnosti ve výpočtu, která by u složitějších způsobů obrábění značně zkreslila představu o skutečném průřezu. Proto se zde raději nepoužívá.

Jako příklad uveďme válcové frézování. Průřez odebíraného materiálu se zde mění od nuly až po maximální hodnotu. Trajektorie břitu v rovině kolmé na obrobenou plochu je cykloida. Uvedení autoři nahrazují při výpočtu cykloidu kružnicí při zanedbání

změny plochy frézy. Proto matematické vztahy podle Z. Přikryla a J. Békése nejsou zcela přesné.

Rodinova metoda a metoda založená na znalosti trajektorie ostří nástroje, které se vyvíjí v současné době, používají složitějších matematických aparátů.

Jelikož se jedná o řešení prováděné převážně v trojrozměrném eukleidovském prostoru, používá se vektorového, maticového a tenzorového počtu. To umožňuje poměrně přesně postihnout rozměry řezu i u složitějších způsobů obrábění.

Pro velký rozsah řešených úloh je s výhodou používáno k řešení výpočetní techniky.

Mezi jednotlivými metodami lze rovněž najít rozdíl v symbolice a terminologii. Například pro termín řezu jednotliví autoři používají různé označení. Buda a Békés zavádí dva pojmy - průřez řezu a průřez řezání. Z. Přikryl nerozlišuje důsledně mezi průřezem odebírané vrstvy materiálu a průřezem třísky.

Ani v symbolickém označení není ještě zaveden jednotný systém. Pro tloušťku průřezu používá J. Buda symbol t , Z. Přikryl a norma ISO h_D .

4. Výpočet průřezu při odvalovacím frézování

Při tomto výpočtu jsem zvolil metodu vycházející ze znalosti trajektorie ostří nástroje, jelikož při tak složitém procesu, jako je odvalovací frézování nelze použít s dostatečnou přesností žádnou z doposud běžně užívaných metod.

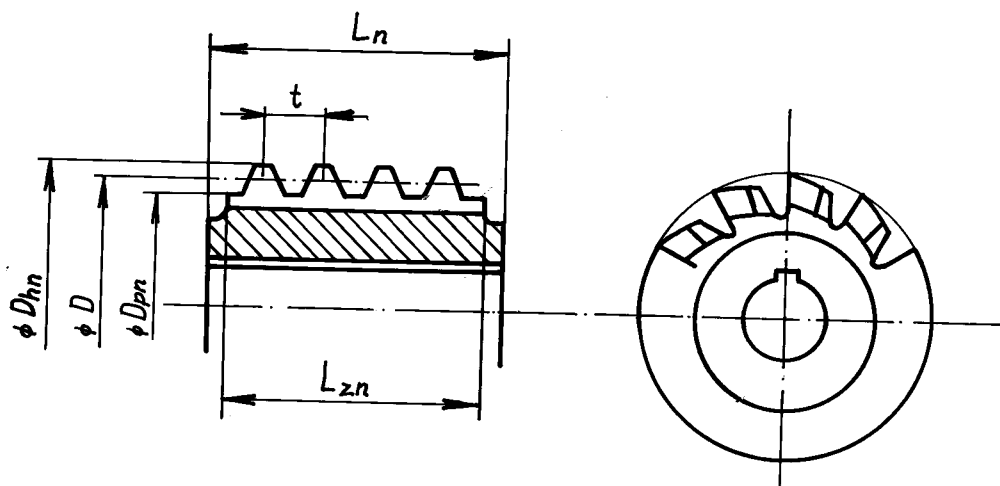
Celý výpočet jsem rozdělil do čtyř částí. V první části se zabývám ustavením nástroje do základní polohy, načítáním výchozích souřadnic předem zvolených bodů na ostří břitu. V části druhé se pak zabývám volbou dimenzionální roviny, ve které se budou počítat jednotlivé průřezy a výpočtem úhlu pootáčení této roviny kolem osy obrobku. Další část se zabývá zjišťováním průsečíků jednotlivých bodů břitu s dimenzionální rovinou. Ze souřadnic těchto průsečíků se pak vychází v poslední části výpočtu při určování průřezu řezu a tloušťky třísky v dané dimenzionální rovině.

4.1 Zvolený nástroj

Celý výpočet bude aplikován na zvolený model odvalovací frézy. Pro jednoduchost a za účelem urychlení výpočtu na počítači jsem zvolil frézu s minimálním počtem hřebenů. Tomu odpovídá fréza s těmito parametry (13):

$$m = 12, D_{h_m} = 155, \alpha = 20^\circ, L_n = 175, L_{k_n} = 4,$$

$$z_h = 7$$



obr. 17

Smysl stoupání šroubovice je levý.

Úhel stoupání šroubovice se vypočítá ze vztahu:

$$\beta = \arctg \frac{m}{D} \quad (4.1)$$

kde D je průměr roztečné kružnice (obr. 18).

$$D = D_{h_n} - h_{h_n} \quad /mm/$$

Délka závitové části fréty L_{z_n} je:

$$L_{z_n} = L_n - L_{k_n} \quad /mm/ \quad (4.2)$$

kde L_{k_n} je délka kontrolních nákrůžků.

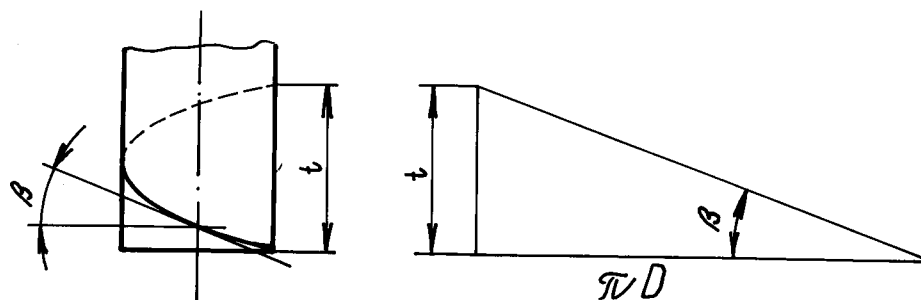
Nástroj je vyobrazen na obr. (17).

4.1.1 Předmět obrábění

Frézovat budeme čelní ozubené kolo s přímými zuby o průměru $D_{h_n} = 174$ mm. Počet zubů kola je dán vztahem:

$$z_k = \frac{D}{m} \quad (4.3)$$

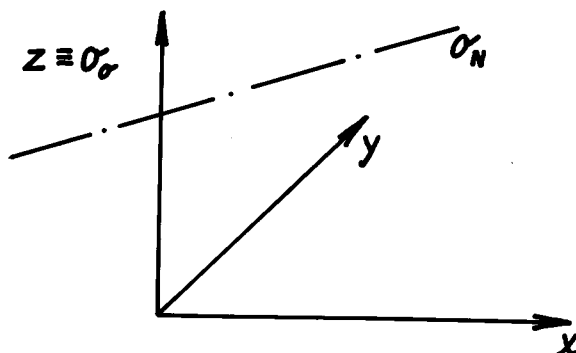
Šířka kola b je 50 mm. Ostatní parametry kola vyplývají z výše uvedených parametrů.



obr. 18

4.2 Zavedení pevného souřadnicového systému

Pro naši úlohu je třeba nejprve zavést pevný souřadnicový systém. Osa z tohoto systému bude totožná s osou obrobku a osy x , y jsou mimoběžné s osou nástroje i obrobku. Systém je ortogonální a je pevně spojen s obrobkem (obr. 19). Všechny pohyby potřebné ke vzniku ozubeného kola tedy relativně vykonává nástroj.



obr. 19

4.3 Základní poloha soustavy

4.3.1 Základní polohy nástroje a obrobku

Základní polohou se rozumí poloha v nulovém čase, tedy na začátku obrábění. Základní poloha nástroje je určena polohovým vektorem bodu P na ose nástroje a jednotkovým vektorem $\bar{o}_n$ osy nástroje. Platí:

$$\bar{o}_n = -\bar{i} \cos \quad - \bar{k} \sin \quad (4.4)$$

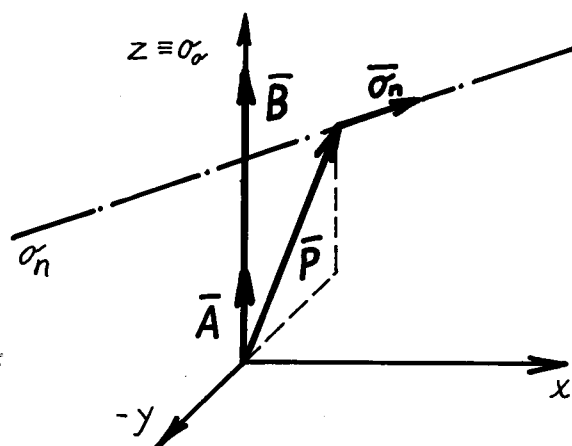
$$\bar{P} = \bar{j} \cdot (R_{h_n} + R_{p_o}) + \bar{k} \cdot a \quad (4.5)$$

Předpokládáme, že nástroj bude zabírat ihned do plného materiálu a zanedbáme tedy jeho náběh. Obrobek v základní poloze je určen jednotkovým vektorem osy obrobku $\bar{o}_o$ a polohovými vektory $\bar{A}$, $\bar{B}$, jejichž velikost je rovna zvoleným parametrům a , b .

$$\bar{o}_0 = \bar{j} \quad (4.6)$$

$$\bar{A} = \bar{k} a \quad (4.7)$$

$$\bar{B} = \bar{k} b$$



obr. 20

Vektory určující základní polohu nástroje a obrobku jsou znázorněny na obr. 20.

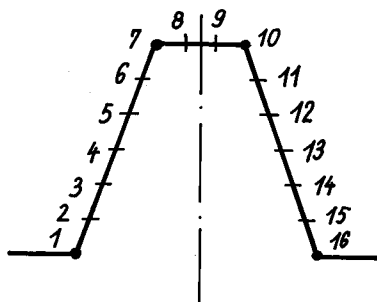
4.3.2 Základní poloha jednotlivých zubů

Poloha zubů prvního hřebene, který přijde do záběru vzhledem k ose nástroje je určena jednotkovým vektorem $\bar{V}$ o souřadnicích $(0, -1, 0)$ a příslušným parametrem nástroje. Zuby v následujících hřebenech dostaneme vždy pootočením kolem osy nástroje o σ_n o úhel, který jsem označil jako σ a posunutím o $\frac{1}{z_{h_n}}$ násobek průmětu normální rozteče t_n do směru $\bar{o}_n$. Pro úhel platí:

$$\sigma = \frac{2\pi}{z_{h_n}}$$

4.3.3 Základní poloha jednotlivých bodů na zubech

Pro naše potřeby bude výhodné rozdělit každý zub na určitý počet bodů. Čím více bodů zvolíme, tím bude výpočet přesnější. Jsme však omezeni jednak počítačovou pamětí a jednak časovými možnostmi výpočetního střediska, které je před koncem semestru obvykle značně vytížené. Zvolil jsem tedy na každém zubu 16 bodů dle obr. 21.



obr. 21

Základní polohy jednotlivých bodů jsou určeny jejich polohovými vektory. Pro bod 1 na 1. zubu platí

$${}^1\bar{B}_1 = \bar{P} - SK\ 1 \cdot \bar{o}_n + SR\ 1 \cdot \bar{V}$$

pro bod 7 pak

$${}^1\bar{B}_7 = \bar{P} - SK\ 7 \cdot \bar{o}_n + SR\ 7 \cdot \bar{V}$$

Polohové vektory bodů 10 a 16 získáme posunutím bodů 1 a 7 o příslušný parametr ve směru osy $\bar{o}_n$:

$${}^1\bar{B}_{10} = {}^1\bar{B}_7 - HZ \cdot \bar{o}_n$$

$${}^1\bar{B}_{16} = {}^1\bar{B}_1 - PZ \cdot \bar{o}_n$$

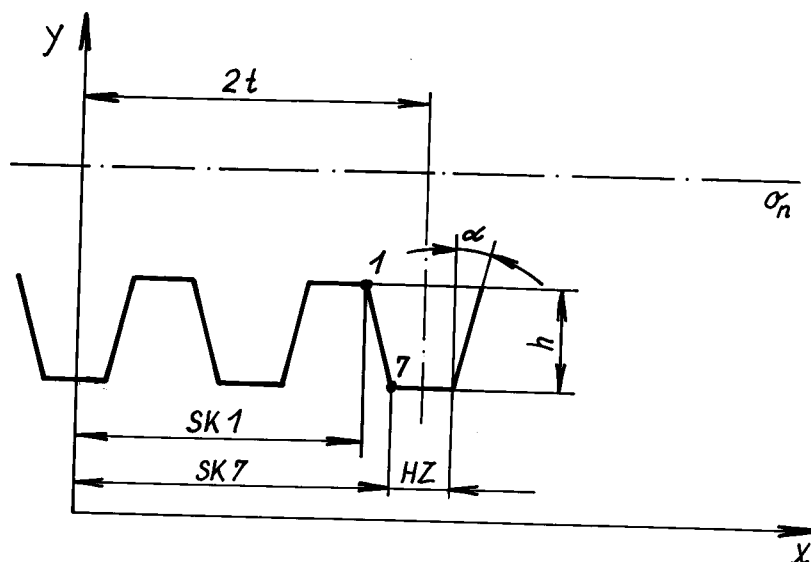
Parametry SK_1 , SR_1 získáme z následujících vztahů, které jsou zřejmé z obr. 22 a platí za předpokladu, že 1. zub je vzdálen od bodu P 2 t proti směru $\bar{o}_n$.

$$SK_1 = 2t - \left(\frac{HZ}{2} + (2,25m + 0,4 \cdot \sqrt{m}) \cdot \operatorname{tg} \alpha \right)$$

$$SK_7 = 2t - \frac{HZ}{2}$$

$$SR_1 = R_{p_n}$$

$$SR_7 = R_{h_n}$$



obr. 22

Polohové vektory bodů 2 - 6 dostaneme ze vztahu

$${}^1\bar{B}_i = {}^1\bar{B}_1 + \frac{i-1}{6} ({}^1\bar{B}_7 - {}^1\bar{B}_1)$$

Pro body 8, 9

$${}^1\bar{B}_1 = {}^1\bar{B}_7 + \frac{i-7}{3} ({}^1\bar{B}_{10} - {}^1\bar{B}_7)$$

a pro $i \in \langle 11, 15 \rangle$

$${}^1\bar{B}_i = {}^1\bar{B}_{10} + \frac{i-10}{6} ({}^1\bar{B}_{16} - {}^1\bar{B}_{10})$$

Uvedené vztahy platí za předpokladu lichoběžníkového profilu zubů a nulového úhlu čela γ . Při sestavování programu pro číslicový počítač jsem však z důvodu univerzálnosti odvodil vztahy pro $\gamma \neq 0$. Při výpočtu je vhodné použít tenzoru otočení jehož popisem se však budu zabývat až v další kapitole. Jeho obecné vyjádření je v (7).

V daném případě lze vyjít ze vztahů pro body na zubu s úhlem čela $\gamma = 0$. Hledané body ${}^1\bar{B}_1$ získáme jejich otočením kolem osy o_n proložené body 1 a 16 o úhel γ . Polohové vektory bodů 1 a 16 zůstanou tedy nezměněny:

$${}^1\bar{B}_1 = {}^1\bar{B}_1'$$

$${}^1\bar{B}_{16} = {}^1\bar{B}_{16}'$$

Otočený bod 7 má polohový vektor

$${}^1\bar{B}_7' = ({}^1\bar{B}_7 - \bar{B}_1) \cdot A_{ON}^{\gamma}$$

kde A_{ON}^{γ} je tenzor otočení.

Vztahy pro ostatní body zůstanou v podstatě nezměněny, pouze místo vektoru ${}^1\bar{B}_7$ budeme dosazovat ${}^1\bar{B}'_7$.

Body na ostatních zubech jsou určeny polohovými vektory ${}^k\bar{B}_i$, které vypočteme ze vztahu:

$${}^k\bar{B}_i = \bar{P} + A_{O_n} ({}^1\bar{B}_i - \bar{P}) + \frac{(k-1) \cdot \pi \cdot m}{z_{h_n} \cos \beta} \cdot \bar{o}_n \quad (4.8)$$

4.4 Průsečnice trajektorie břitu s dimenzionální rovinou

Pro výpočet průřezu řezu je třeba znát trajektorie všech zvolených bodů na břitu a jejich průsečíky s předem zvolenou deimenzionální rovinou.

4.4.1 Trajektorie bodů na ostří

Vyjděme z relativního pohybu nástroje v pevném souřadnicovém systému x, y, z . Nástroj koná rotační pohyb kolem své osy, dále pak pohyb kolem osy obrobku a konečně posuv ve směru $\bar{o}_0$. Rotační pohyby vyjádříme pomocí tenzoru otočení. Odvození tenzoru otočení a jeho definice je v (7). Základní vlastností tenzoru otočení je, že otáčí obecný vektor $\bar{r}_x$ kolem osy o konstantní úhel φ , přičemž se velikost vektoru $\bar{r}_x$ nemění.

Obecné vyjádření tenzoru otočení kolem osy o úhel φ má tento tvar:

$$A_0^\varphi = \left[(E - \bar{o} \otimes \bar{o}) \cos \varphi + R(\bar{o}) \sin \varphi + \bar{o} \otimes \bar{o} \right] \quad (4.9)$$

kde $R(\bar{o})$ je antisymetrický tenzor, E jednotková matice a $\bar{o} \times \bar{o}$ je diadický součin vektoru $\bar{o}$. Rozepsání jednotlivých složek bude provedeno až v aplikaci na konkrétní případ. Posuvný pohyb je určen směrem $\bar{o}_0$ a rychlostí posuvu v_f . Okamžitá poloha i -tého bodu v čase t je pak vyjádřena rovnicí

$$k_{\bar{B}_i}(t) = A_{o_o}^{-\omega_o t} \left[A_{o_n}^{\omega_n t} (k_{\bar{B}_i}(0) - \bar{P}) \right] + v_f \cdot t \cdot \bar{o}_0 \quad (4.10)$$

Tenzor otočení kolem osy nástroje

$$A_{o_n}^{\omega_n t} = \left[(E - \bar{o}_n \otimes \bar{o}_n) \cdot \cos \omega_n t + \right. \\ \left. + R(\bar{o}_n) \sin \omega_n t + \bar{o}_n \otimes \bar{o}_n \right] \quad (4.11)$$

kde

$$E = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.12)$$

$$\bar{o}_n \otimes \bar{o}_n = \begin{vmatrix} \cos^2 \beta & 0 & \cos \beta \sin \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ \sin \beta \cos \beta & 0 & \sin^2 \beta \end{vmatrix}$$

$$R(\bar{o}_n) = \begin{vmatrix} 0 & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \\ 0 & -\cos \beta & 0 \end{vmatrix}$$

Pro tenzor otočení kolem osy obrobku platí

$$A_{o_o}^{\omega_o t} = \left[(E - \bar{o}_o \otimes \bar{o}_o) \cdot \cos \omega_o t + \right.$$

$$+ R (\bar{\delta}_0) \sin \omega_0 t + \bar{\delta}_0 \otimes \bar{\delta}_0 \quad (4.13)$$

kde E je stejné jako ve vztahu (4.12), diadický součin je

$$\bar{\delta}_0 \otimes \bar{\delta}_0 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

a antisymetrický tenzor

$$R (\bar{\delta}_0) = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Spojnice jednotlivých poloh i -tého bodu vyjádřených rovnicí (4.10) v různých časových okamžicích je trajektorii tohoto bodu.

4.4.2 Volba dimenzionální roviny

Při výpočtu průřezu je třeba si nejprve ujasnit, kde se bude průřez počítat. Jelikož další výzkum bude zaměřen především na namáhání nástroje, bude výhodné vztáhnout výpočet průřezu k nástroji. Z toho budeme vycházet při volbě dimenzionální roviny. Obecně je volba provedena v kap. 3.5. V našem případě budeme dimenzionální rovinu prokládat okamžitou osou nástroje a okamžitým bodem ostří po určitých časových intervalech. Dimenzionální rovina je určena vektorem normály $\bar{n}_d$ a vektorem $({}^k\bar{B}_1(x) - \bar{P}(t))$, kde x je neznámý parametr. Normála n_d je dána vztahem

$$\bar{n}_d = \left[\bar{\delta}_n(t) \times (\bar{P}(t) - {}^k\bar{B}_1(t)) \right] \quad (4.14)$$

kde $\bar{o}_n(t)$ je jednotkový vektor okamžité osy otáčení nástroje. Platí

$$\bar{o}_n(t) = A_{o_n}^{-\omega_o t} \cdot \bar{o}_n \quad (4.15)$$

$P(t)$ je okamžitá poloha vektoru P , což je jednotkový vektor nejkratší příčky mezi osou nástroje o_n a osou obrobku o_o . Platí

$$\begin{aligned} \bar{P}' &= \bar{j} \\ \bar{P}'(t) &= A_{\bar{o}_n}^{-\omega_o t} \bar{P} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Rovnice dimenzionální roviny má tvar

$$({}^k\bar{B}_i(x) - \bar{P}(t)) \bar{n}_d = 0 \quad (4.17)$$

kde $P(t)$ je okamžitá poloha polohového vektoru, která je dána vztahem

$$\bar{P}(t) = A_{o_o}^{-\omega_o t} \bar{P} + v_f t \bar{o}_o \quad (4.18)$$

4.4.3 Výpočet úhlu pootáčení dimenzionální roviny

Abychom zjistili průřezy odebírané jednotlivými zuby v celém rozsahu záběru, proložíme dimenzionální rovinu v několika časových okamžicích, a to tak, že nám rozdělí záběrové pole na 10 stejných částí. Časové difference mezi jednotlivými polohami dimenzionální roviny budou rovny jedné desetině celkového času, který potřebuje k proběhnutí záběrovým polem bod, jehož záběr trvá nejdéle.

Prakticky provedeme zjištění časové difference tak, že budeme brát zvolené body nástroje jeden po druhém, sledovat jejich polohu po elementárních, předem určených časových elementech a zjišťovat, kdy přestane platit podmínka záběru ve tvaru

$$x^2 + y^2 < R_{h_0}^2 \wedge z \in (A/. / B/) \quad (4.19)$$

kde x, y, z jsou souřadnice bodu v pevném ortogonálním souřadnicovém systému. Jedna desetina nejdelší doby záběru pak bude naše časová difference.

Úhel pootáčení dimenzionální roviny kolem osy o_0 se vypočte z úhlové rychlosti ω_0 .

$$\int = \omega_0 \cdot t_d \quad (4.20)$$

kde t_d je časová difference.

4.4.4 Zjištění průsečíků trajektorií s dimenzionální rovinou

K vyhledávání průsečíků trajektorií jednotlivých bodů na břitu s dimenzionální rovinou je výhodné použít Newtonovu iterační metodu.

Rovina je určena vektorovou rovnicí ve tvaru (4.17) a trajektorie uvažovaného bodu ${}^k\bar{B}_i(t)$ vztahem (4.10). Zavedeme funkci

$$F(x) = ({}^k\bar{B}_i(x) - \bar{P}(t)) \cdot \bar{n}_d \quad (4.21)$$

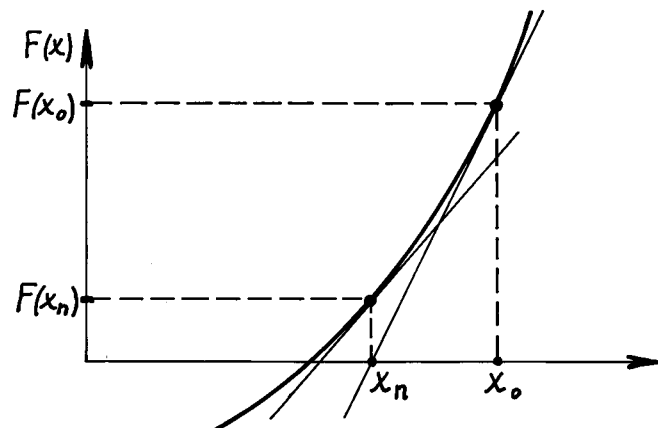
Hledáme takové x , pro které bod ${}^k\bar{B}_i$ bude s určitou, předem zvolenou přesností ležet v dimenzionální rovině. Zvolíme tedy počáteční hodnotu x_0 odpovídající

určité vzdálenosti od naší roviny. Dále postupujeme po elementárních iteračních krocích dle obr. 23. Novou hodnotu parametru x získáme ze vztahu

$$x_n = x + \frac{F(x)}{(F(x))'}, \quad (4.22)$$

kde

$$(F(x))' = \left\{ \left[(-\omega_o) R(\bar{o}_o) + {}_n R(A_{o_n}^{-\omega_{o,t}} \bar{o}_n) \right] \right. \\ \left. {}_{A_{o_o}}^{-\omega_{o,t}} {}_{A_{o_n}}^{\omega_{nt}} ({}^k \bar{B}_1 - \bar{P}) + (-\omega_o) \cdot \right. \\ \left. \cdot R(\bar{o}_o) {}_{A_{o_o}}^{-\omega_{ot}} \bar{P} + v_f \cdot \bar{o}_o \right\} \cdot \bar{n}_d$$



obr. 23

Výpočet provádím tak dlouho, dokud nebude platit podmínka

$$|F(x_n) - F(x)| \leq \varepsilon$$

Získané x_n bude přibližně odpovídat času, ve kterém uvažovaný bod protne dimenzionální rovinu

a polohový vektor ${}^k\bar{B}_i(x_n)$ určuje polohu hledaného průsečíku trajektorie s touto rovinou.

Přesnost této metody závisí na vhodné volbě ε . V našem případě by mělo být ε řádově menší než 10^{-3} . Pak bude průsečík nalezen s dostatečnou přesností.

Průsečnice ostří s dimenzionální rovinou bude tvořena spojnici průsečíků jednotlivých trajektorií.

4.5 Průřez řezu

Při řešení průřezu vyjdeme z průsečnic trajektorií dvou po sobě jdoucích zubů v uvažované dimenzionální rovině. Vzhledem k tomu, že se při výpočtu budeme pohybovat pouze v dimenzionální rovině, tedy v dvojrozměrném prostoru, je vhodné zavést novou souřadnicovou soustavu, kde osa x' je dána jednotkovým vektorem $\bar{o}_n(t)$ a osa y' jednotkovým vektorem $\bar{p}'(t)$. Souřadnice jednotlivých průsečíků jsou pak

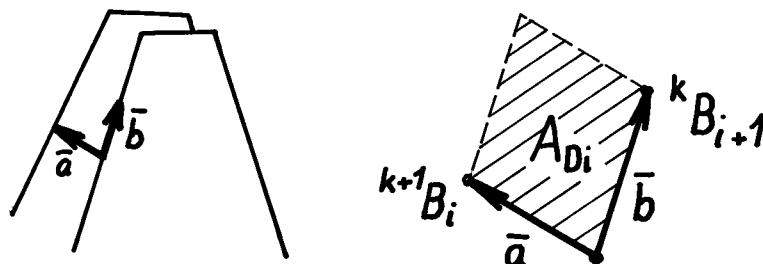
$${}^k x_i = ({}^k\bar{B}_i(x) - \bar{p}(t)) \cdot \bar{o}_n(t)$$

$${}^k y_i = ({}^k\bar{B}_i(x) - \bar{p}(t)) \cdot \bar{p}'(t)$$

Elementární průřezy A_{D_i} odebírané úsekem ostří mezi dvěma sousedními body jsou určeny velikostí vektorového součinu mezi vektory $\bar{a}$, $\bar{b}$ z obr. 24, kde

$$\bar{a} = {}^{k+1}\bar{B}_i - {}^k\bar{B}_i$$

$$\bar{b} = {}^k\bar{B}_{i+1} - {}^k\bar{B}_i$$



obr. 24

Průřez řezu je tedy

$$A_{D_i} = |(k+1\bar{B}_i - k\bar{B}_i) \times (k\bar{B}_{i+1} - k\bar{B}_i)| \quad (4.23)$$

Po rozepsání do souřadnic pak

$$A_{D_i} = (k+1x_i - kx_i) \cdot (ky_{i+1} - ky_i) + \\ + (k+1y_i - ky_i) \cdot (kx_i - kx_{i+1})$$

Celkový průřez odebíraný i-tým zubem lze spočítat jako součet elementárních průřezů

$$A_D = \sum_{i=1}^{15} A_{D_i} \quad (4.24)$$

Výpočet průřezu má však smysl jen tehdy, je-li splněna podmínka záběru ve tvaru (4.19). Snadno lze stanovit též tloušťku odřezávaného materiálu jako velikost vektoru $\bar{a}$ z obr. 24 .

4.6 Program pro číslicový počítač

Na základě uvedeného výpočtu průřezu řezu byl sestaven program pro počítač EC 1033. Výpočet je naprogramován v symbolickém jazyce FORTRAN IV.

Program je sestaven tak, že se zjišťují průsečíky trajektorií jednotlivých bodů břitu s deseti dimenzionálními rovinami prokládanými osou nástroje a uvažovaným bodem ostří v časových intervalech, které odpovídají desetině doby potřebné k proběhnutí hřebene nástroje záběrovým polem. Uvažují se pouze body splňující podmínky záběru. Z průsečíků se počítají elementární průřezy, ze kterých lze vyjít při výpočtu řezných sil. Načítáním těchto průřezů v cyklu přes body jednoho zubu získáváme celkový průřez řezu materiálu odebíraného tímto zubem. Počítána je též tloušťka řezu v uvažovaných bodech. Z úsporných důvodů uvažujeme pouze vyfrézování jedné zubové mezery. Ostatní by měly vycházet analogicky. Program je rozdělen do 6 částí:

1. část, označená textem

C POLOHOVE VEKTORY

obsahuje načtení polohových vektorů, které určují základní polohu nástroje a obrobku.

2. část se zabývá základní polohou zvolených bodů na prvním zubu a je nadepsána

C SOURADNICE BODU V ZAKLADNI POLOZE

3. část vychází z části předchozí. Transformací získaných bodů na prvním zubu získáváme postupně polohy

všech bodů na všech zubech. Tato část se nazývá

C ZAKLADNI POLOHA JEDNOTLIVYCH ZUBU

a navazuje na ni část další,

C VYPOCET DZE,

ve které se počítá čas potřebný k získávání jednotlivých dimenzionálních rovin pootáčením o úhel DZE kolem osy obrobku a o úhel PSI kolem osy nástroje. Výpočet je popsán v kap. 4.4.3. S ohledem na ušetření počítačové paměti jsem uvažoval pouze body jednoho hřebene, čímž jsem se dopustil jisté nepřesnosti, která však na samotný výpočet průřezu nemá žádná vliv. Část s názvem

C DIMENZIONALNI ROVINA

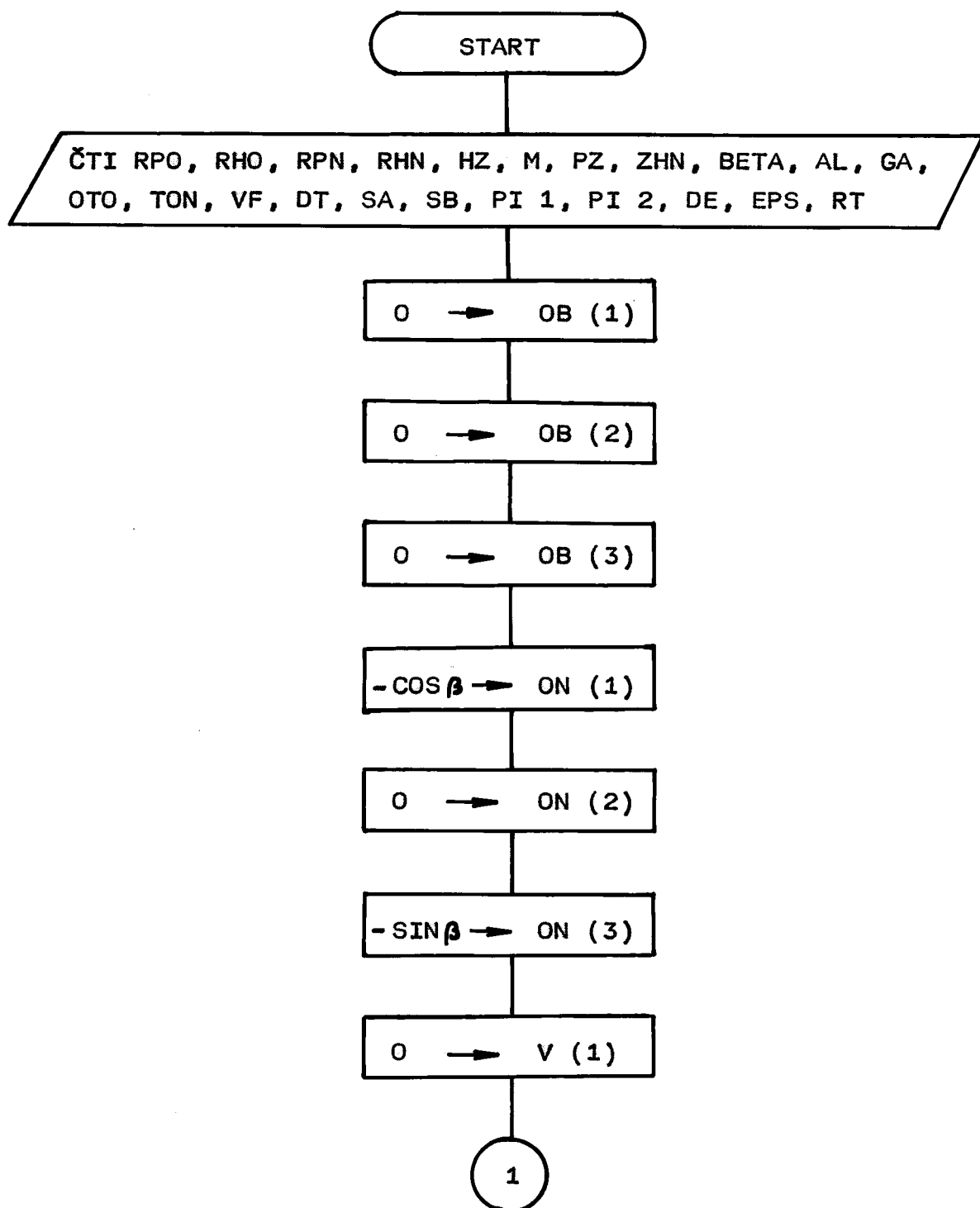
obsahuje výpočet průsečíků trajektorií jednotlivých bodů na ostří nástroje s danými dimenzionálními rovinami prokládanými po vypočtených časových intervalech. Závěrečná část pod komentářem

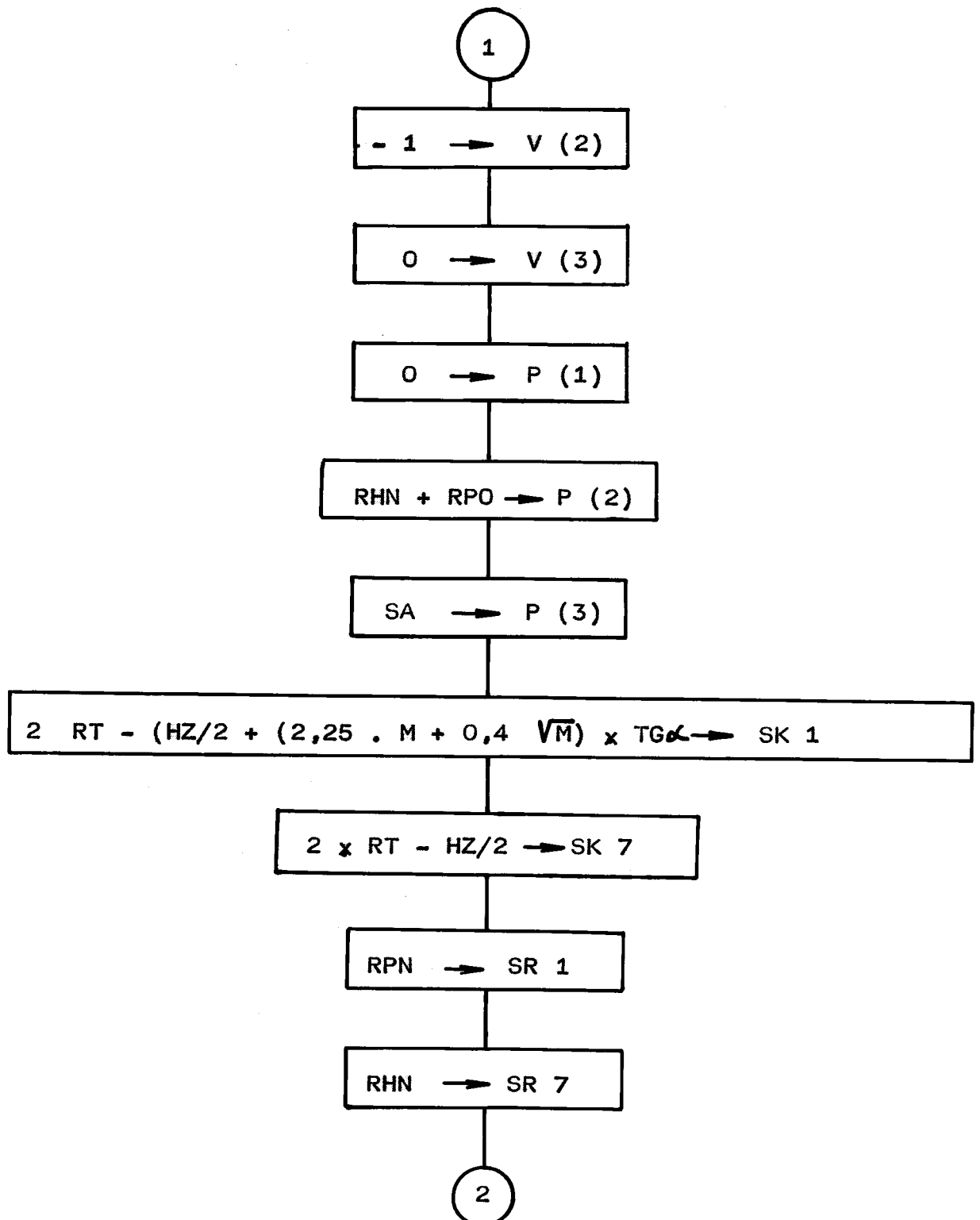
C VYPOCET PRUREZU

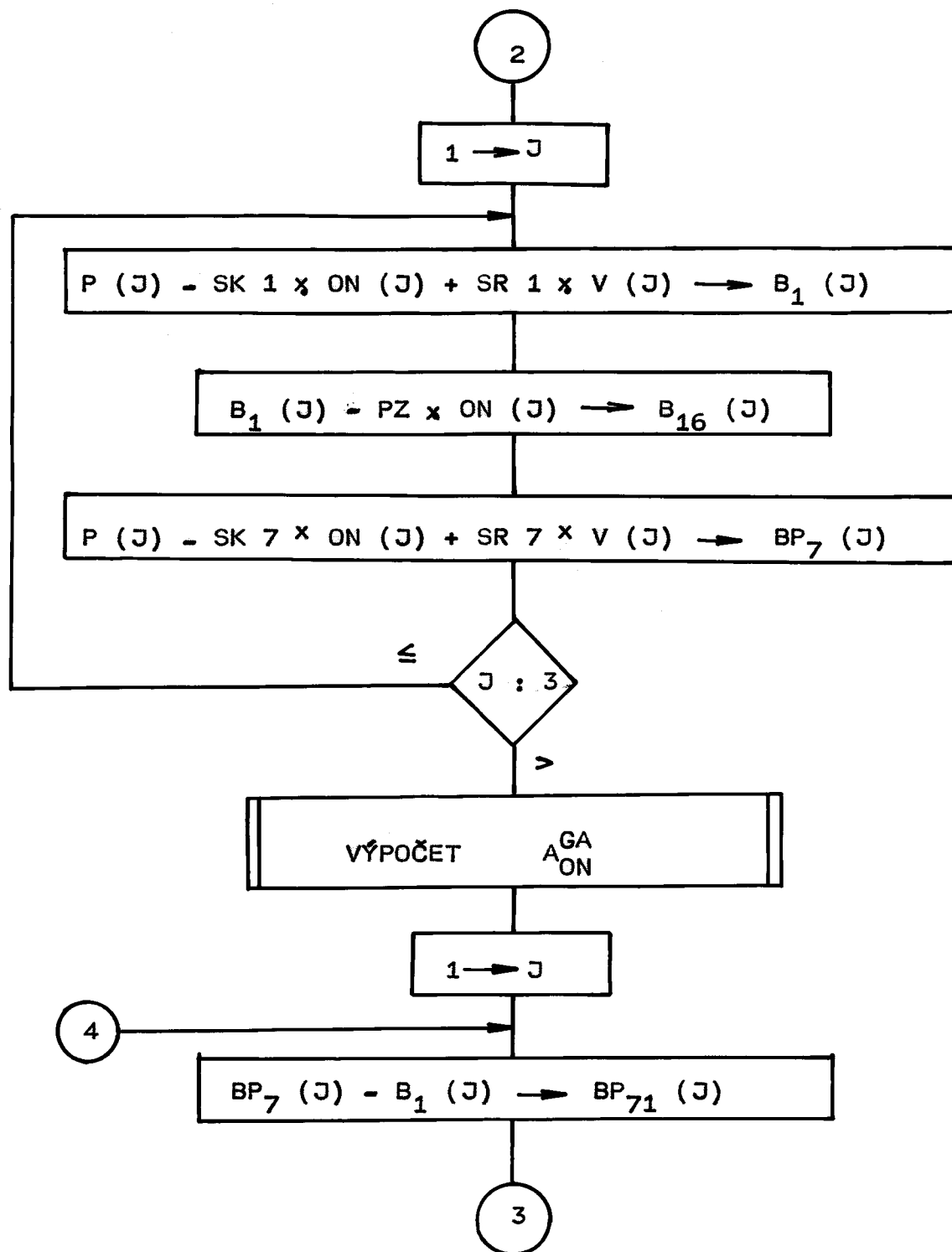
zahrnuje výpočet elementárních průřezů z vypočtených souřadnic průsečíků v dané dimenzionální rovině, celkových průřezů a tloušťek v jednotlivých bodech.

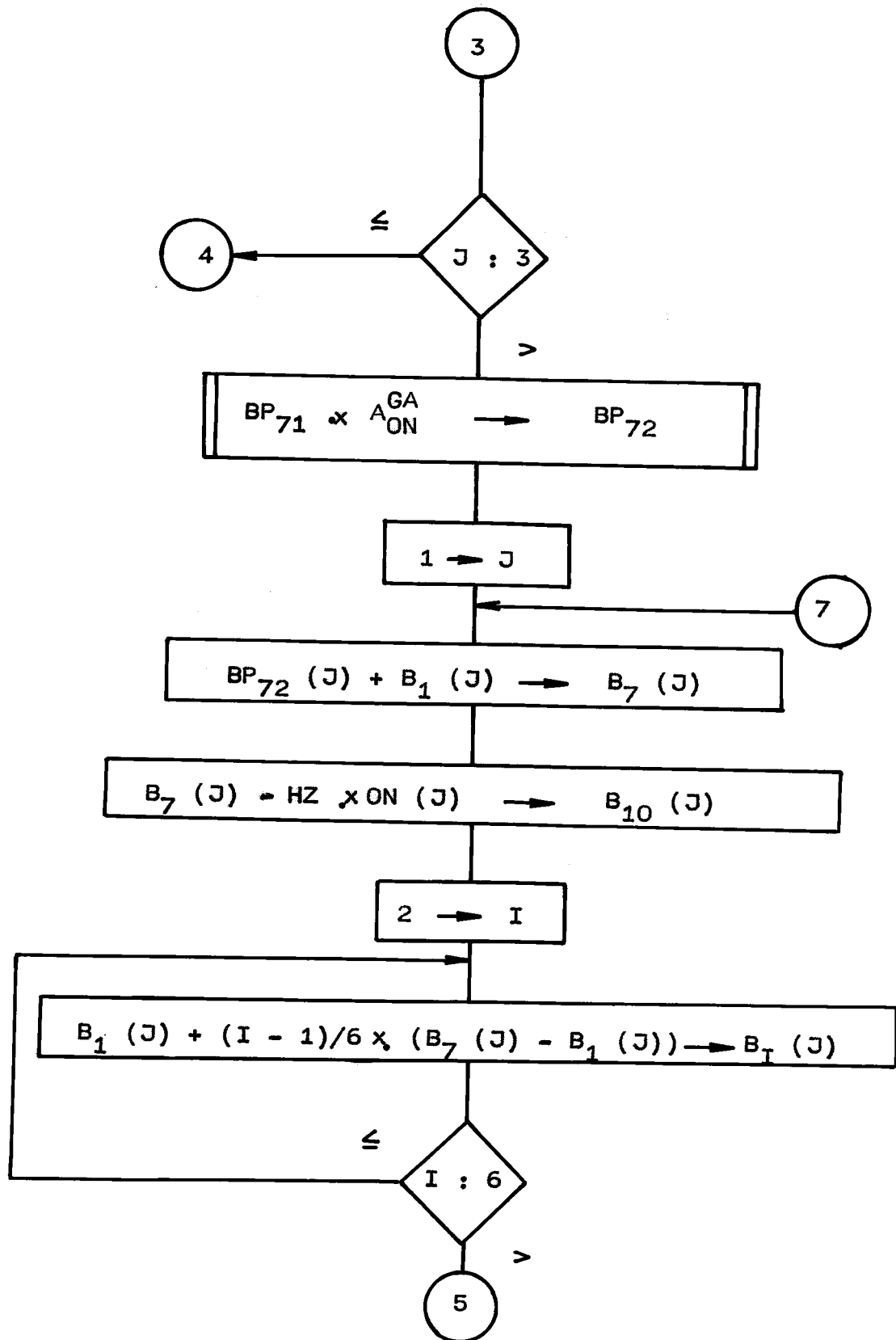
4.6.1 Vývojový diagram

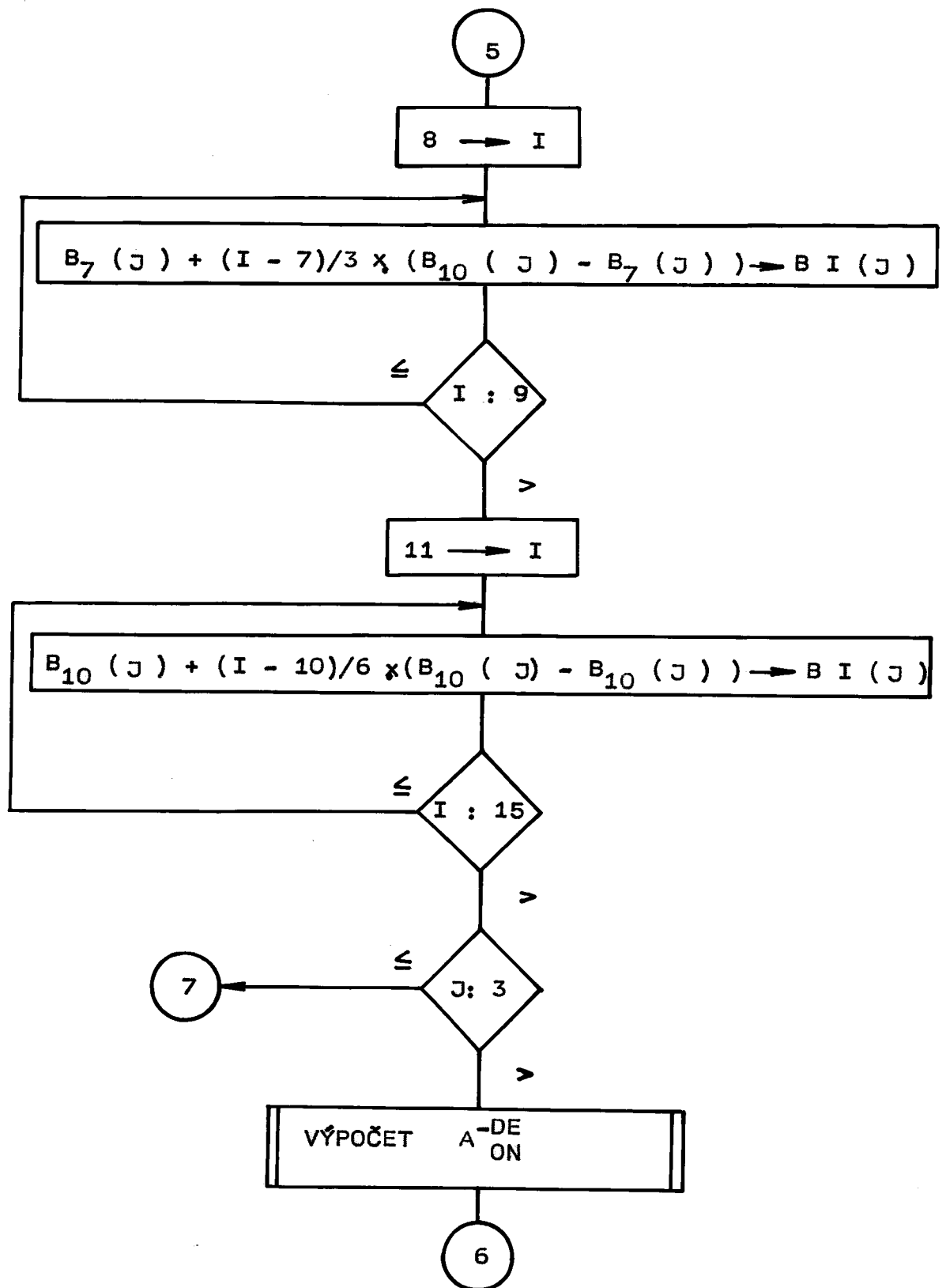
Algoritmus výpočtu je zřejmý z vývojového diagramu. Proto jej zde uvádím:

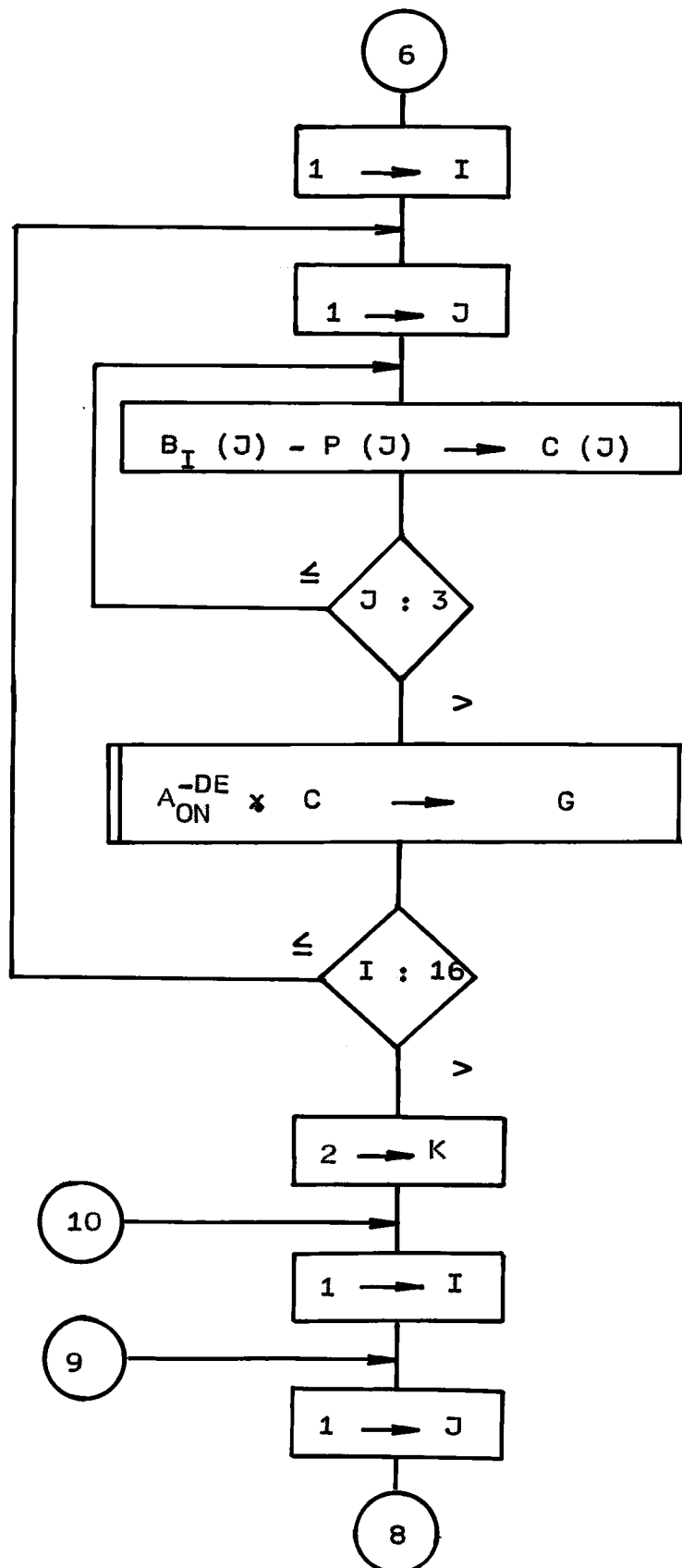


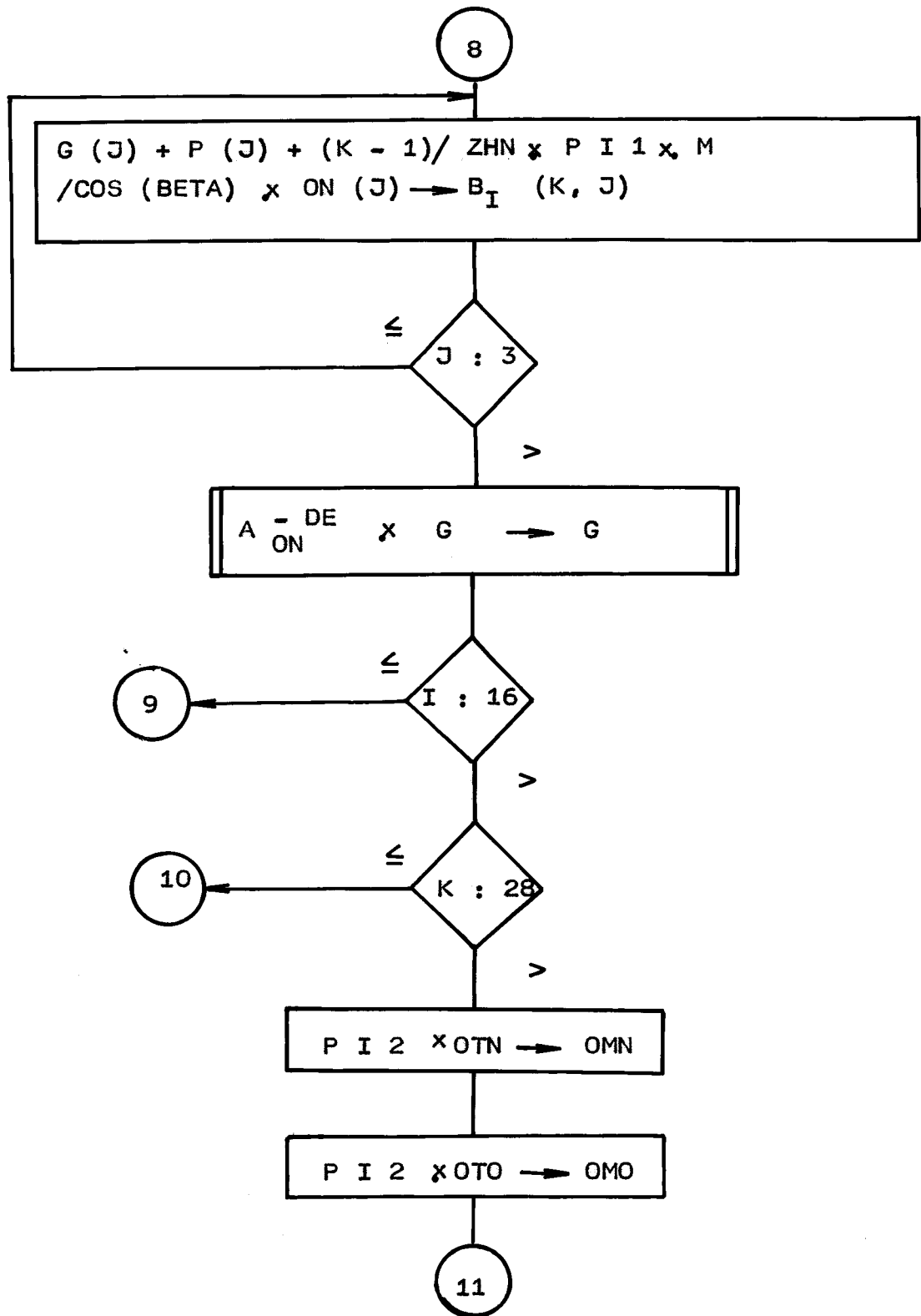


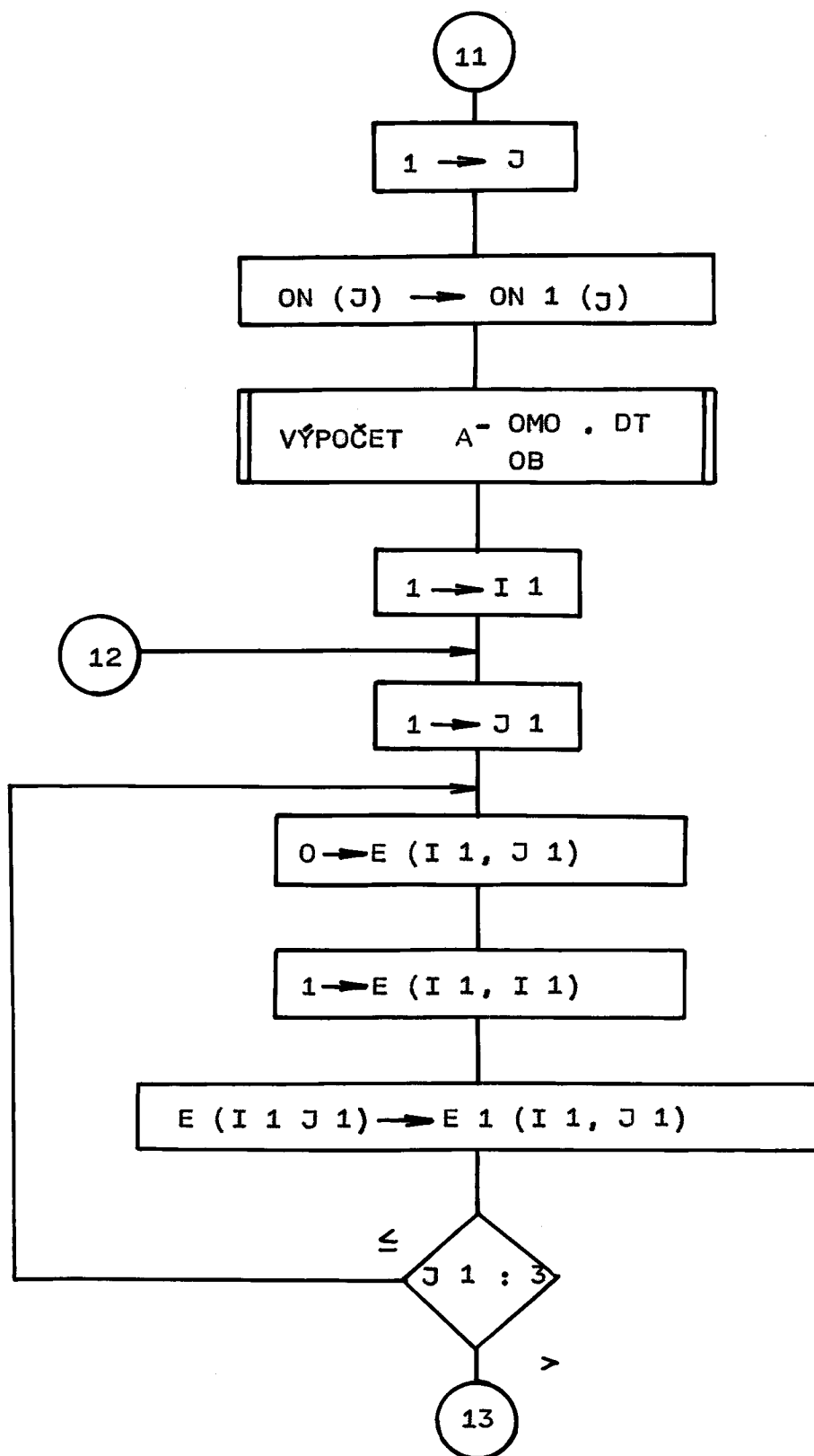


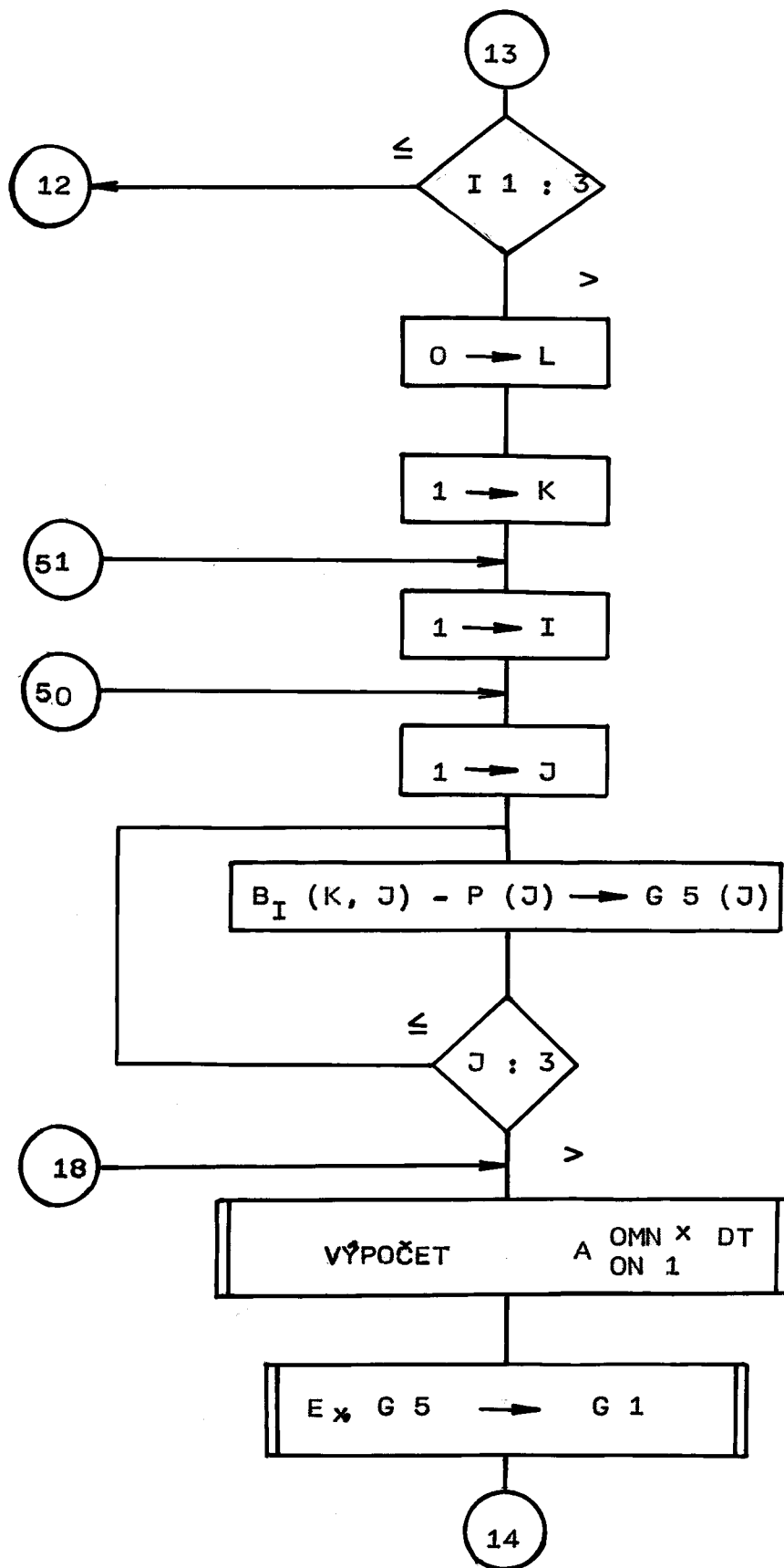


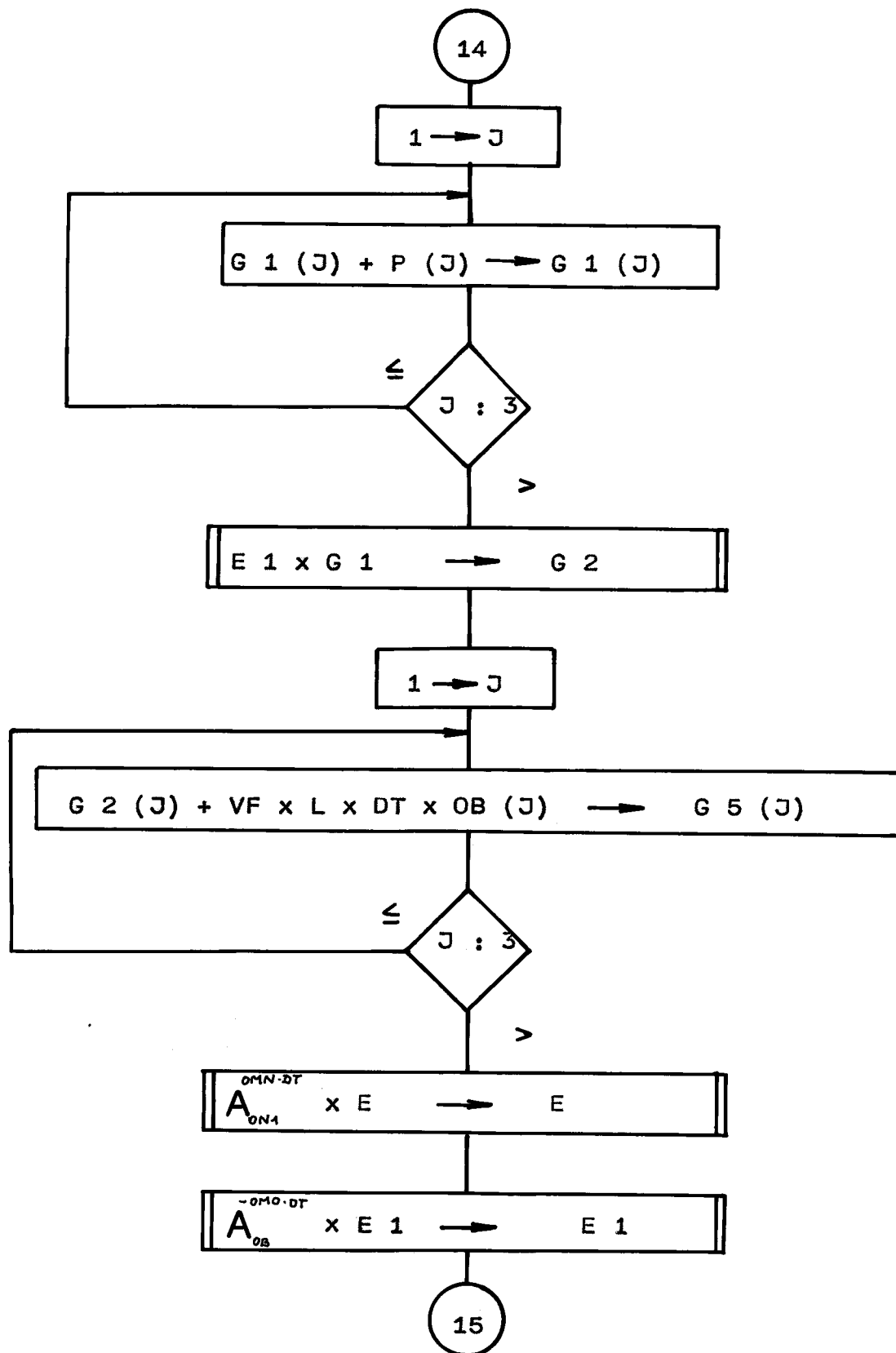


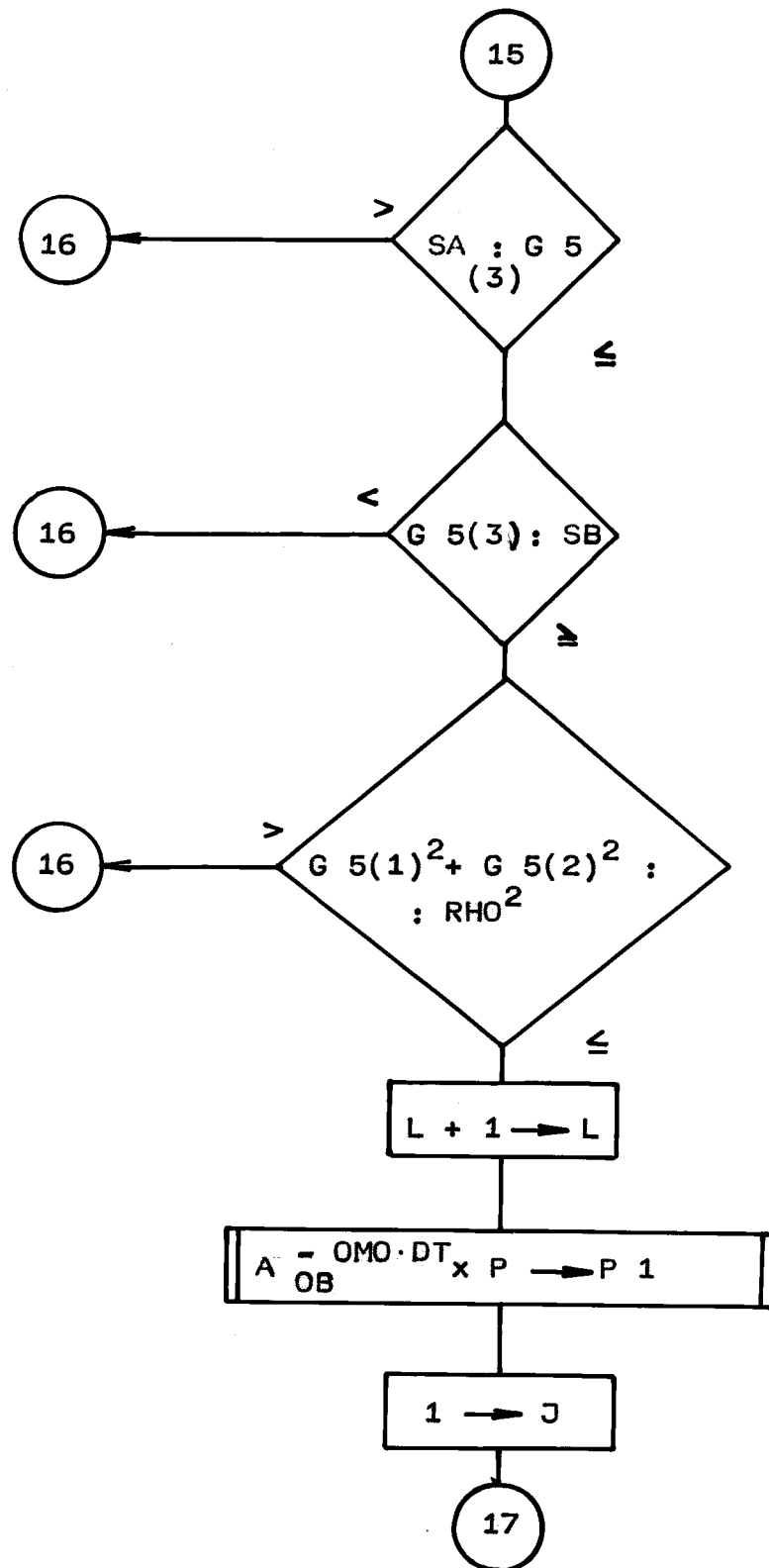


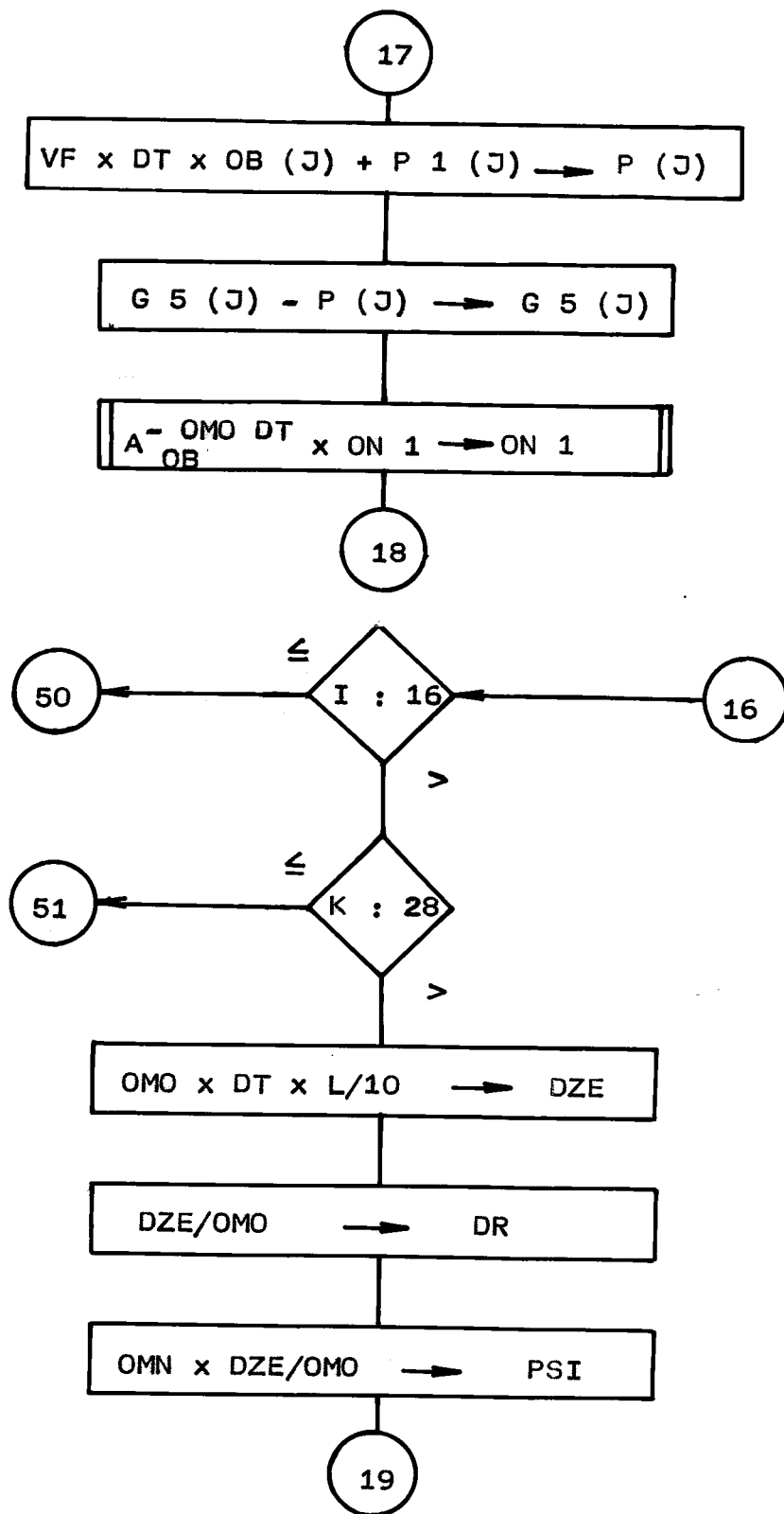


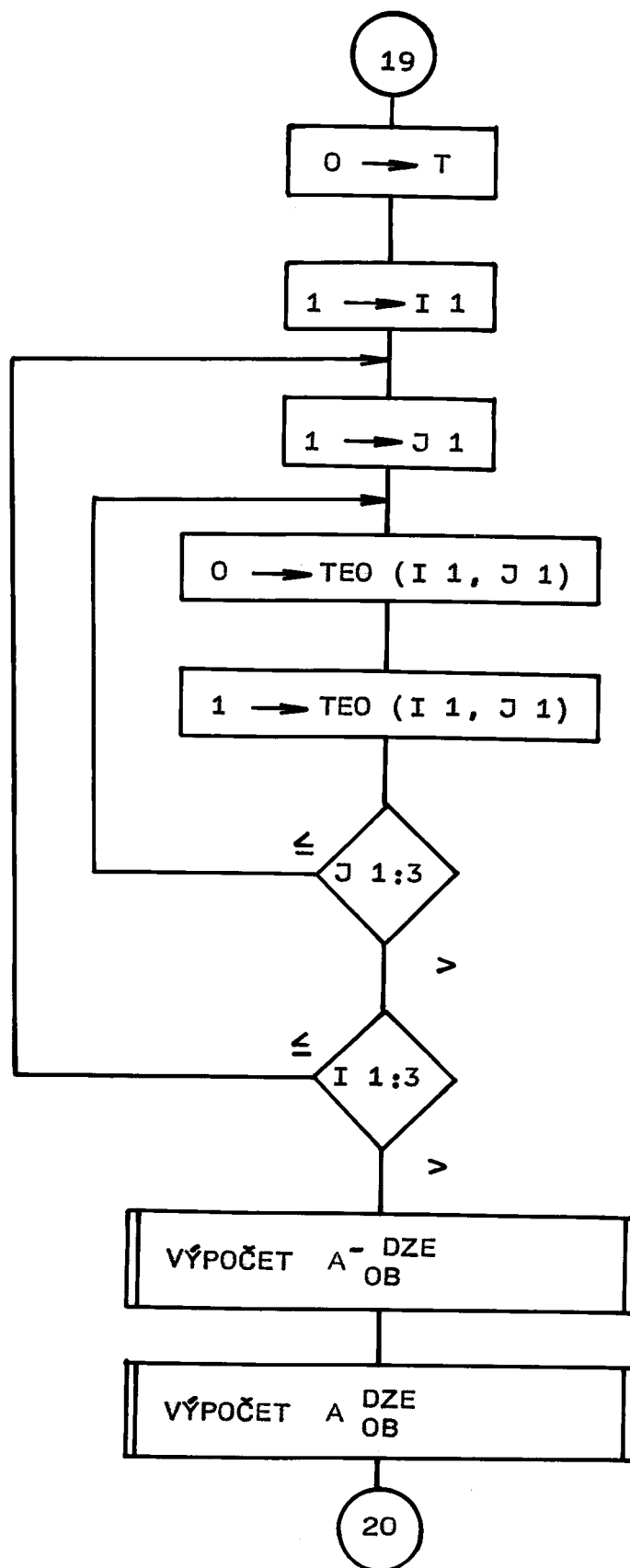


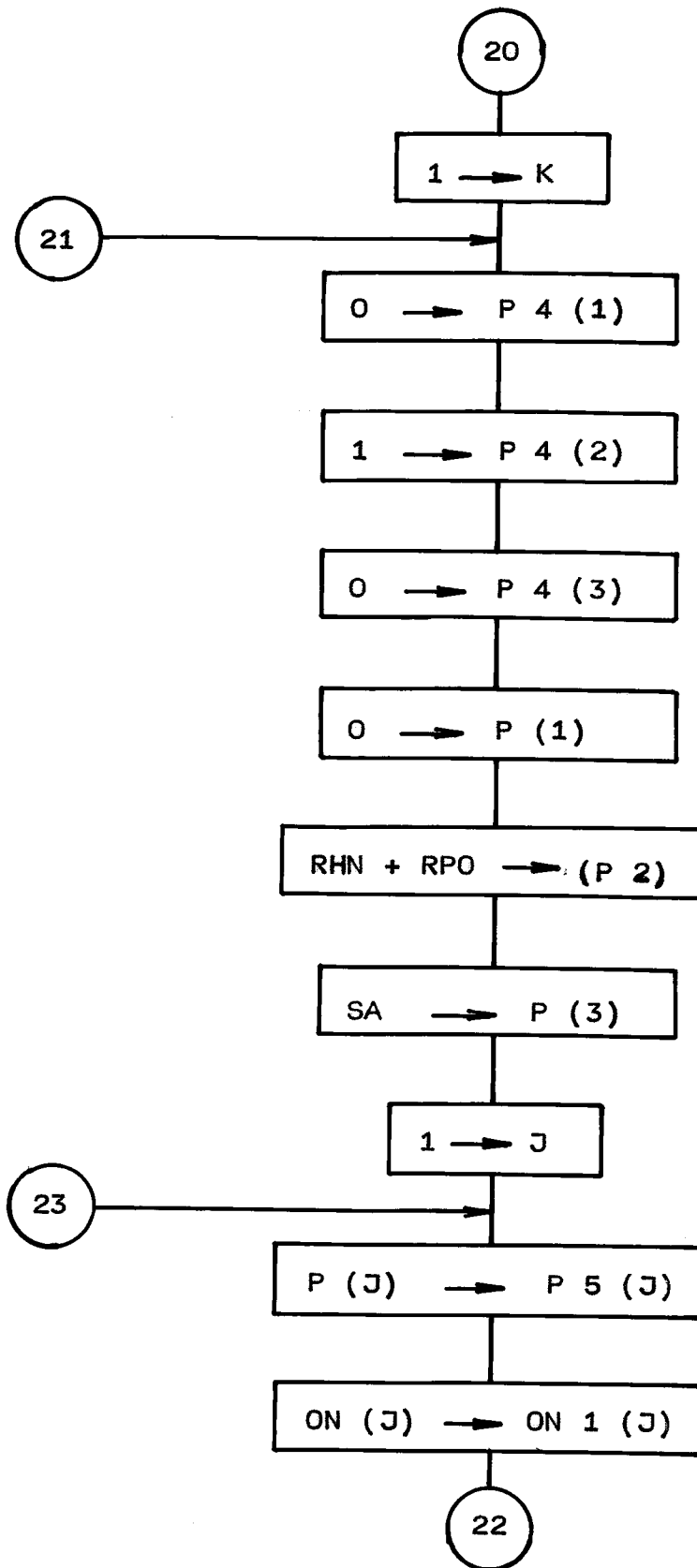


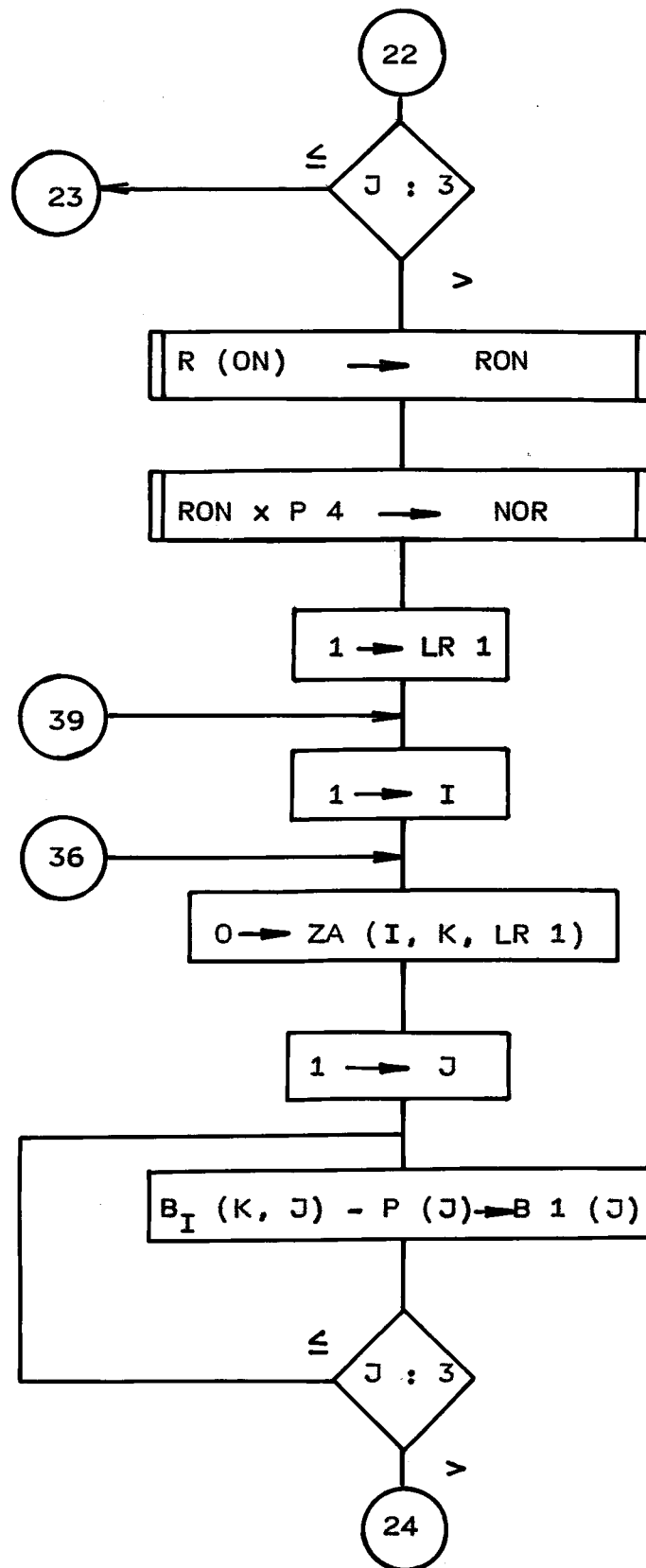


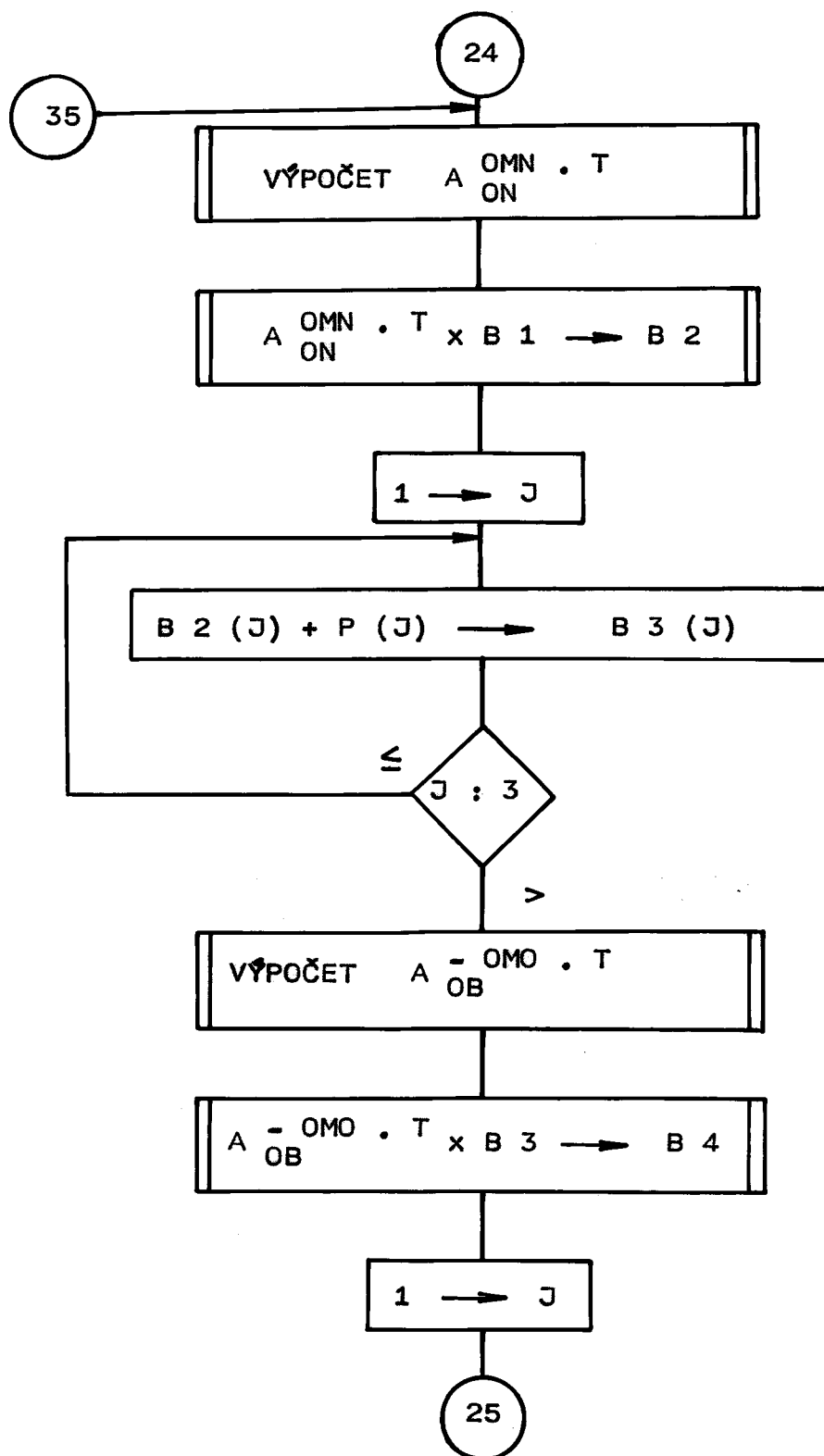


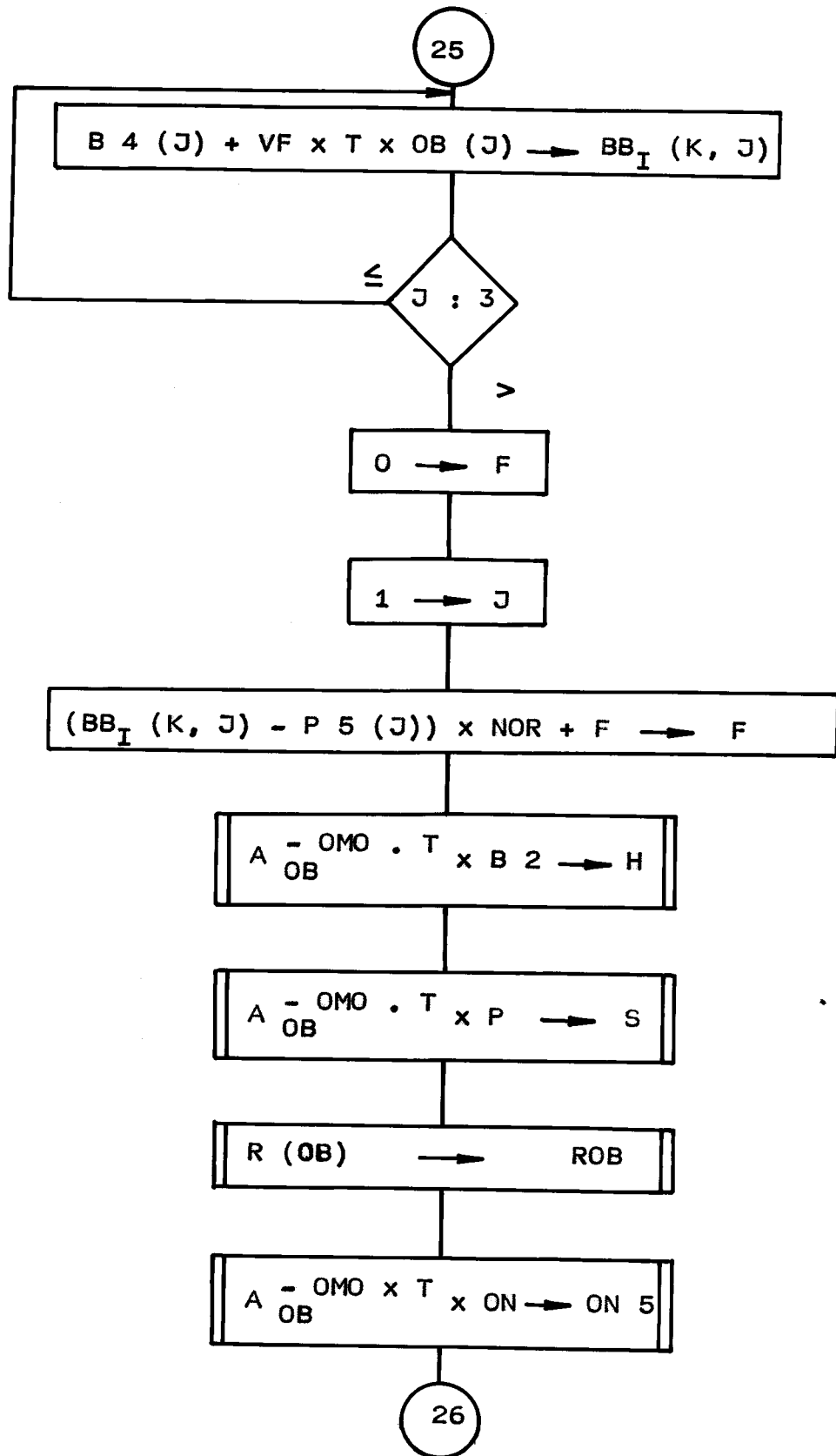


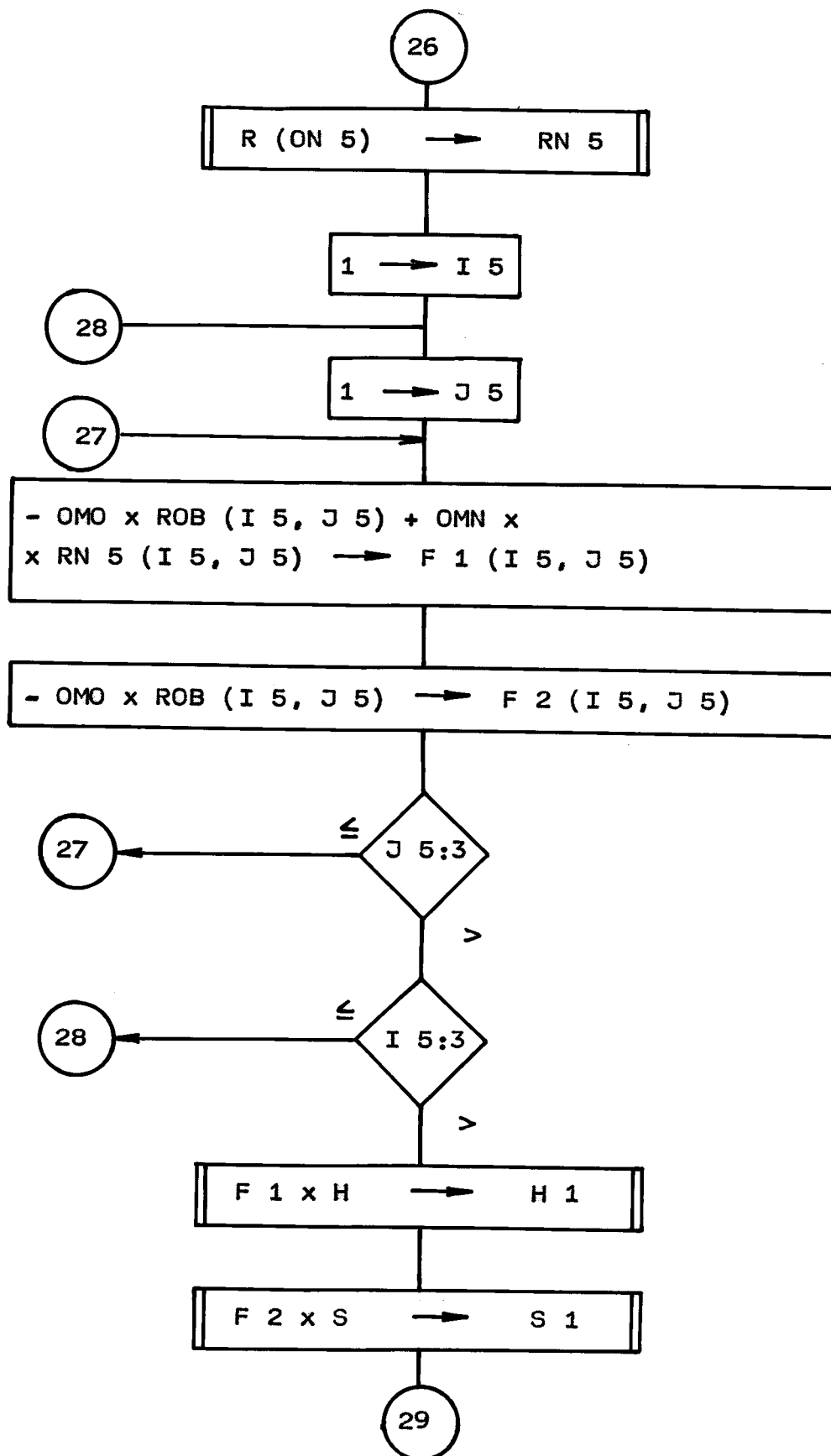


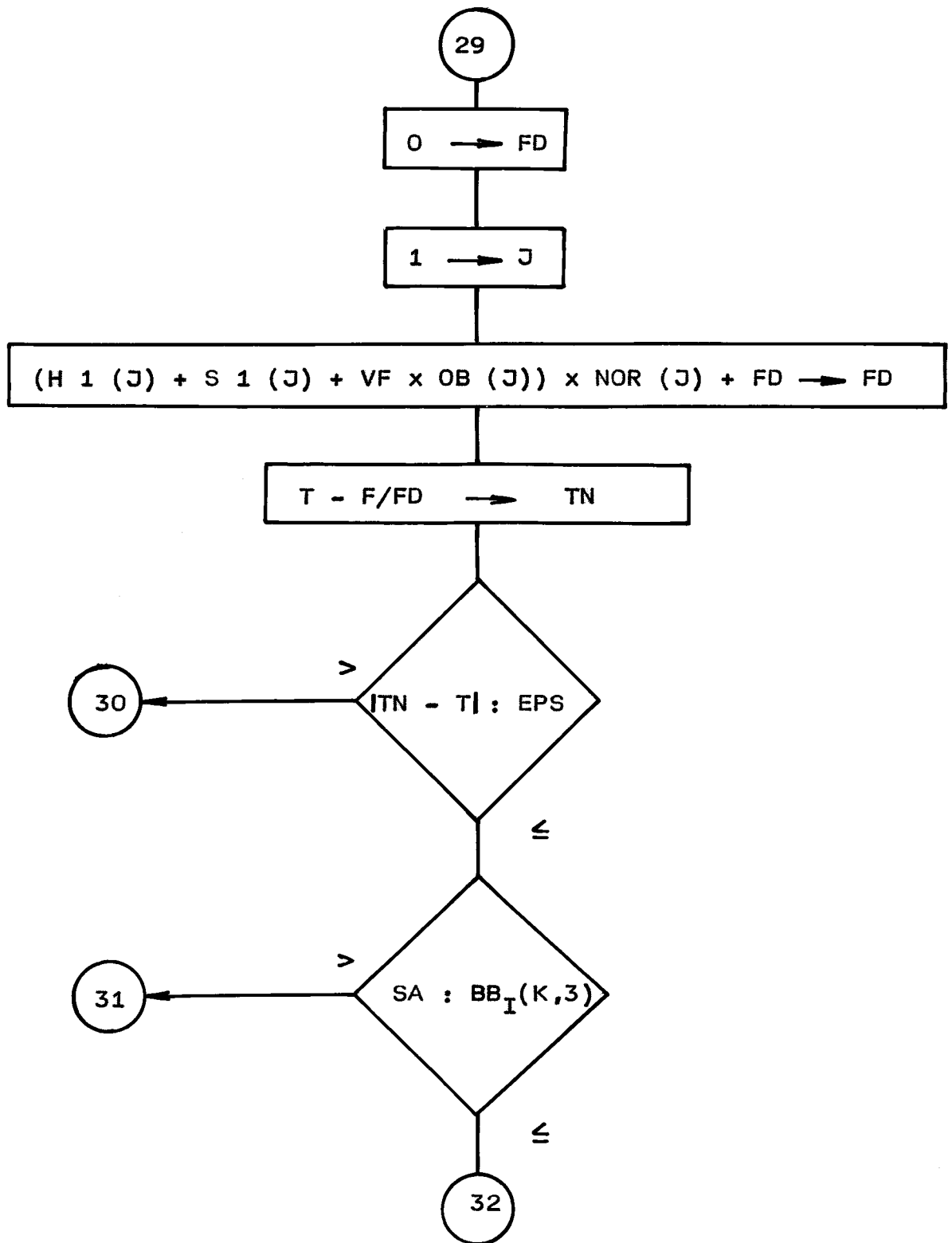


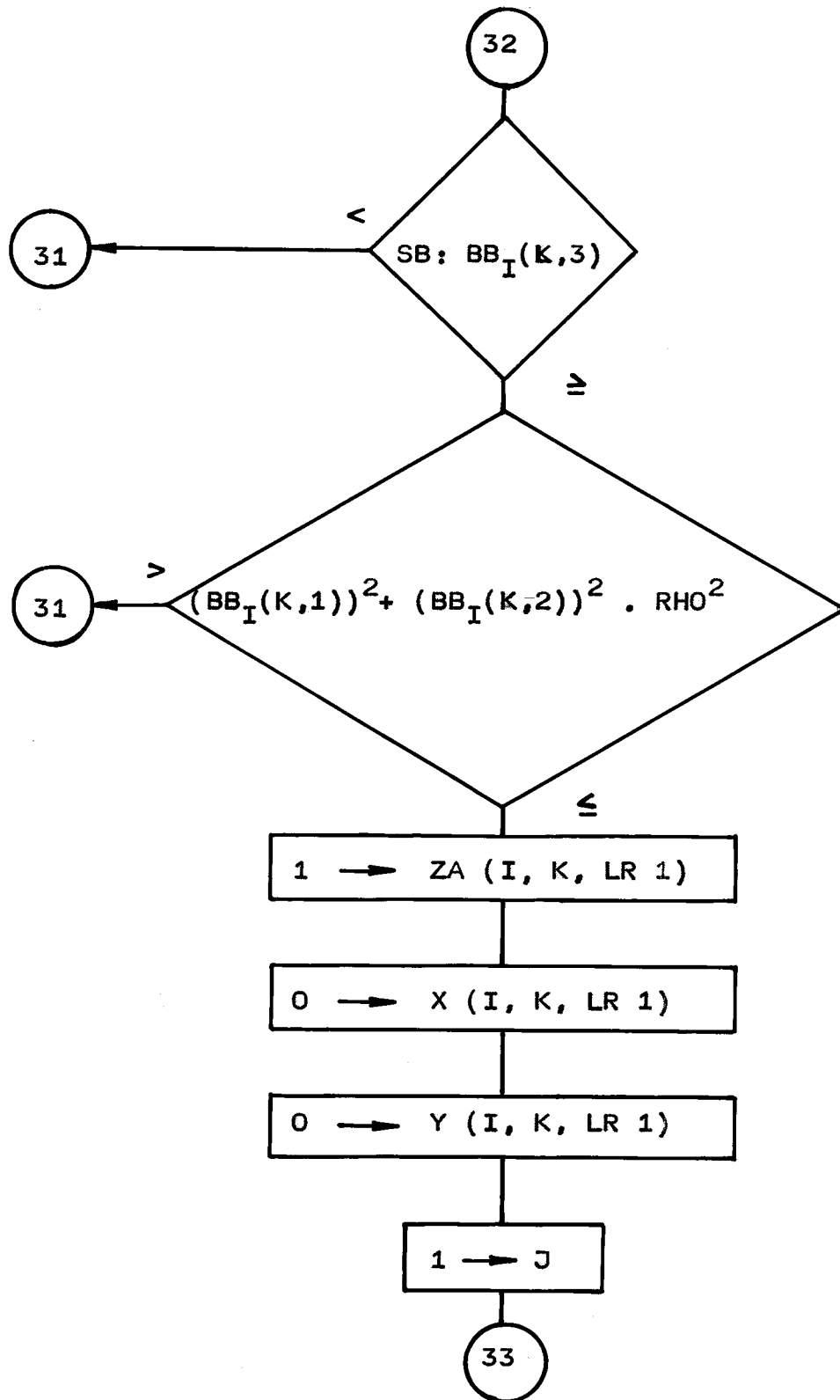


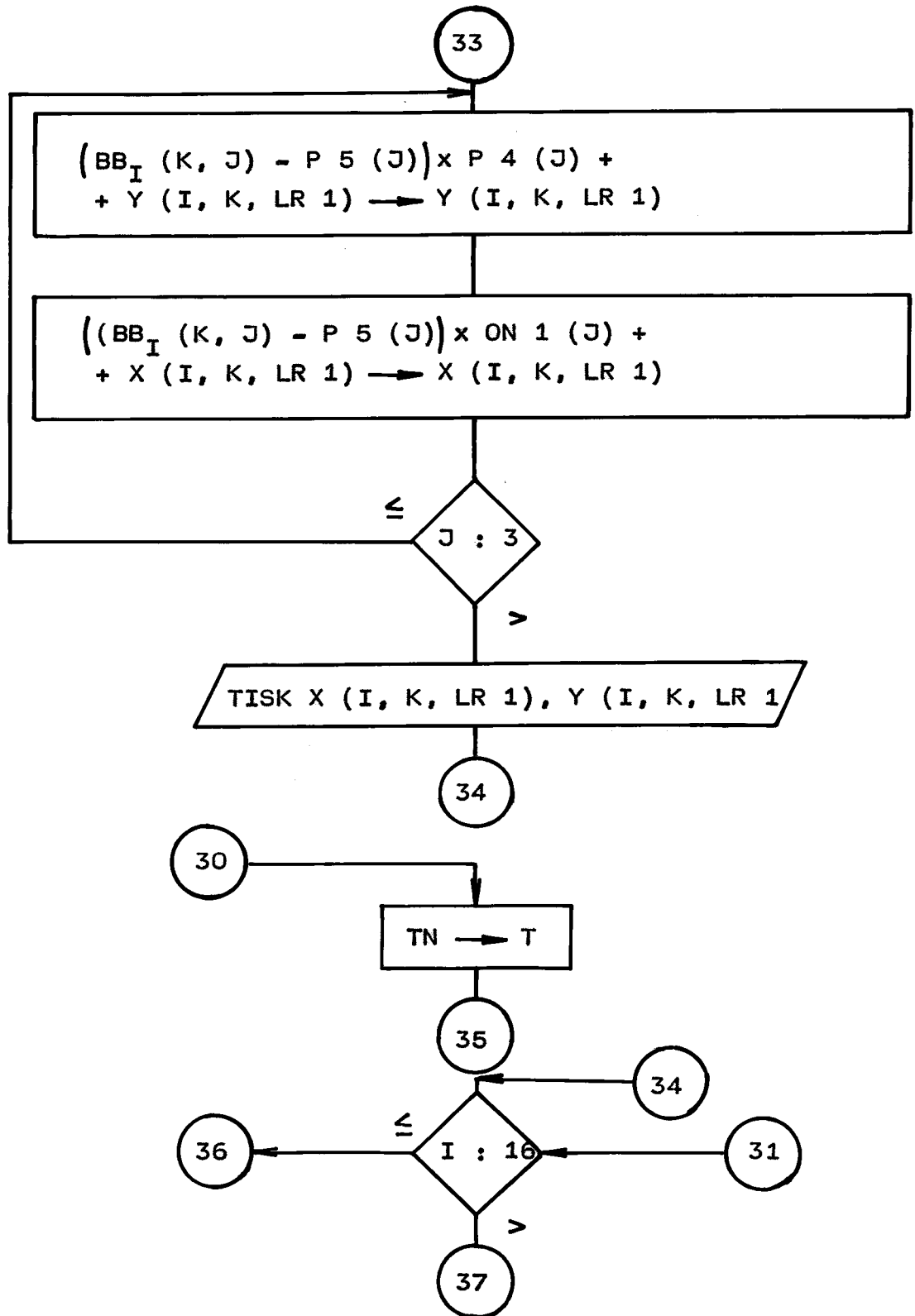


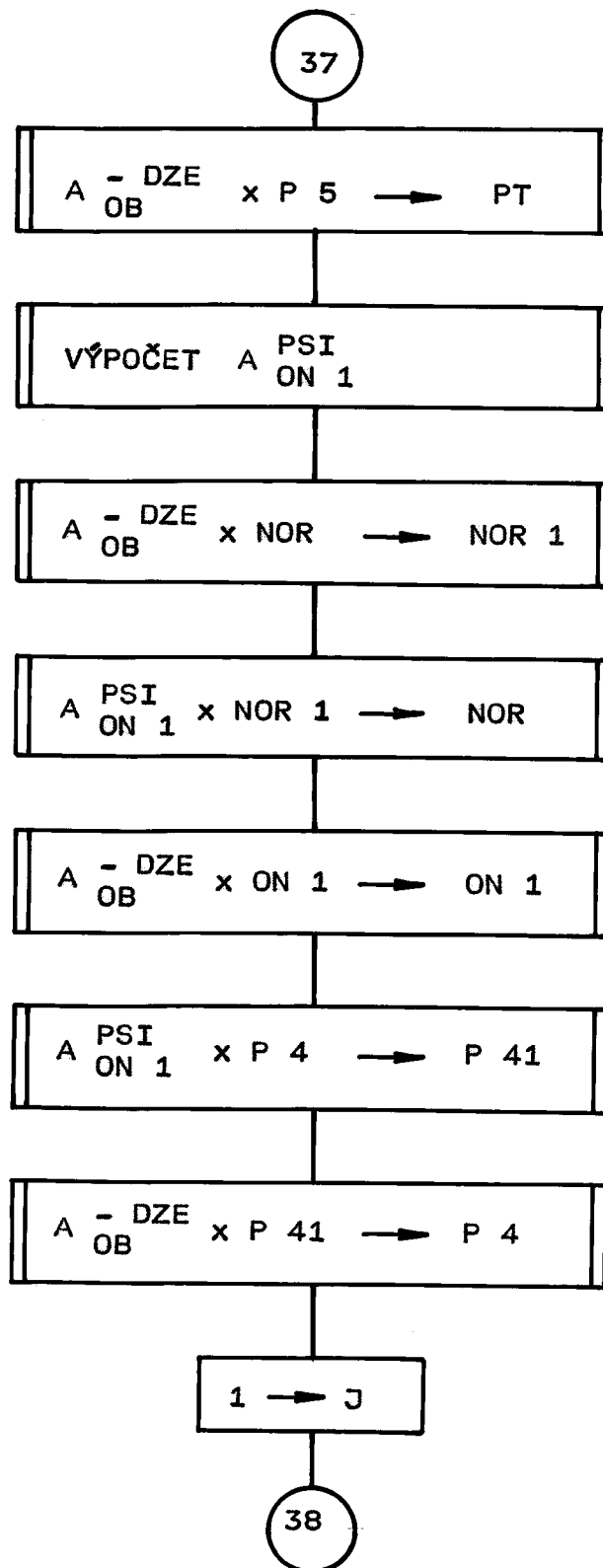


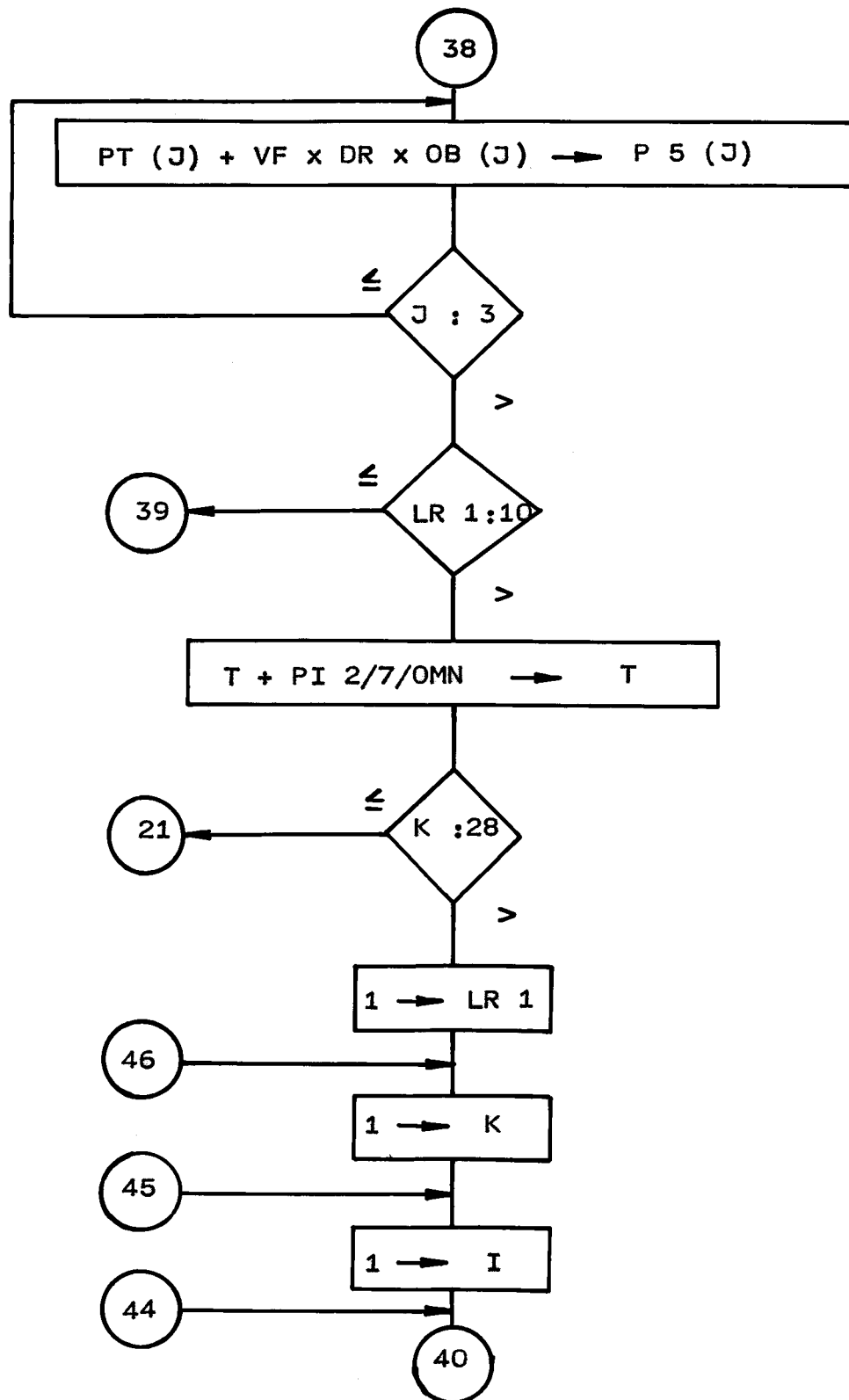


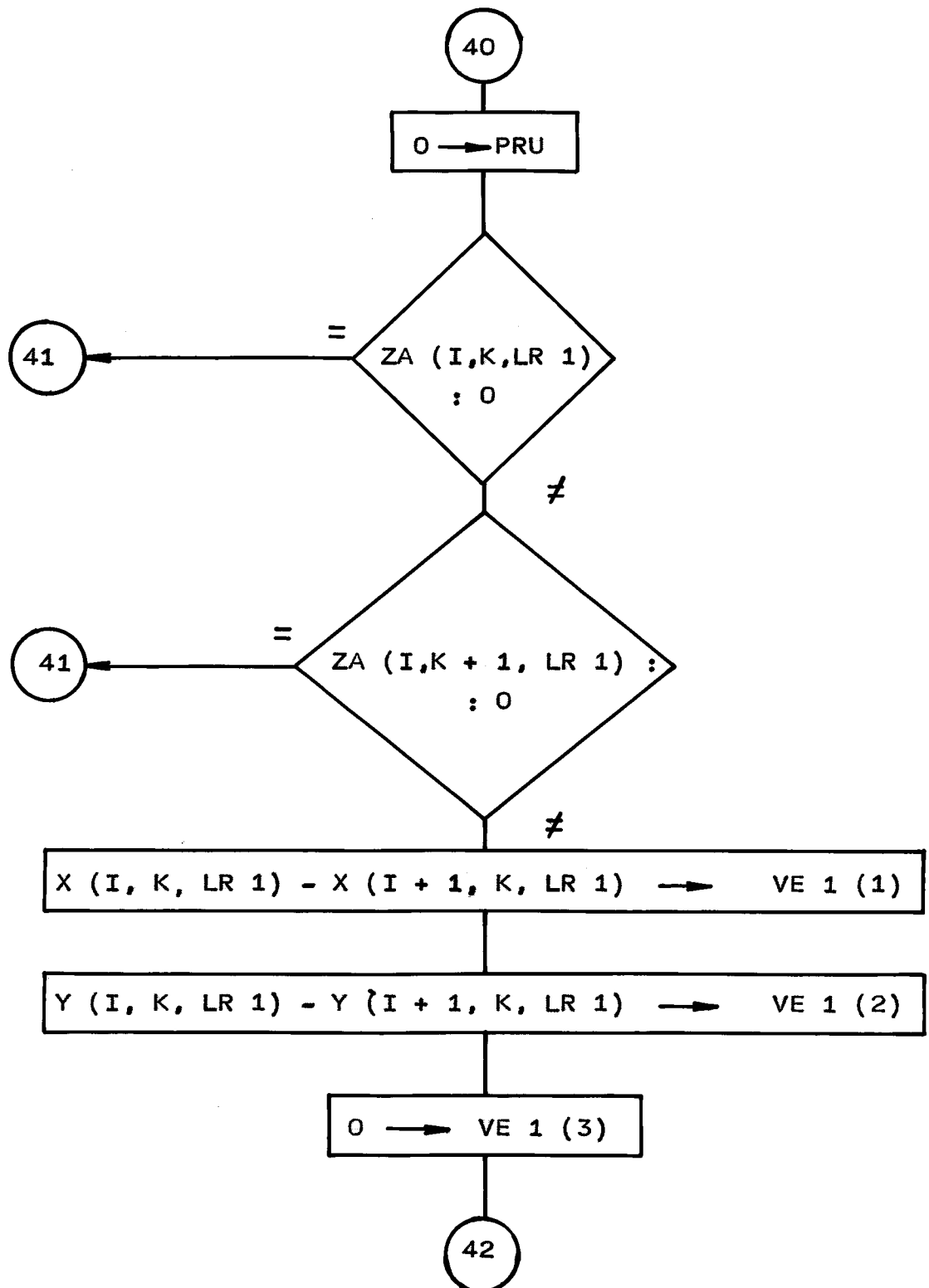


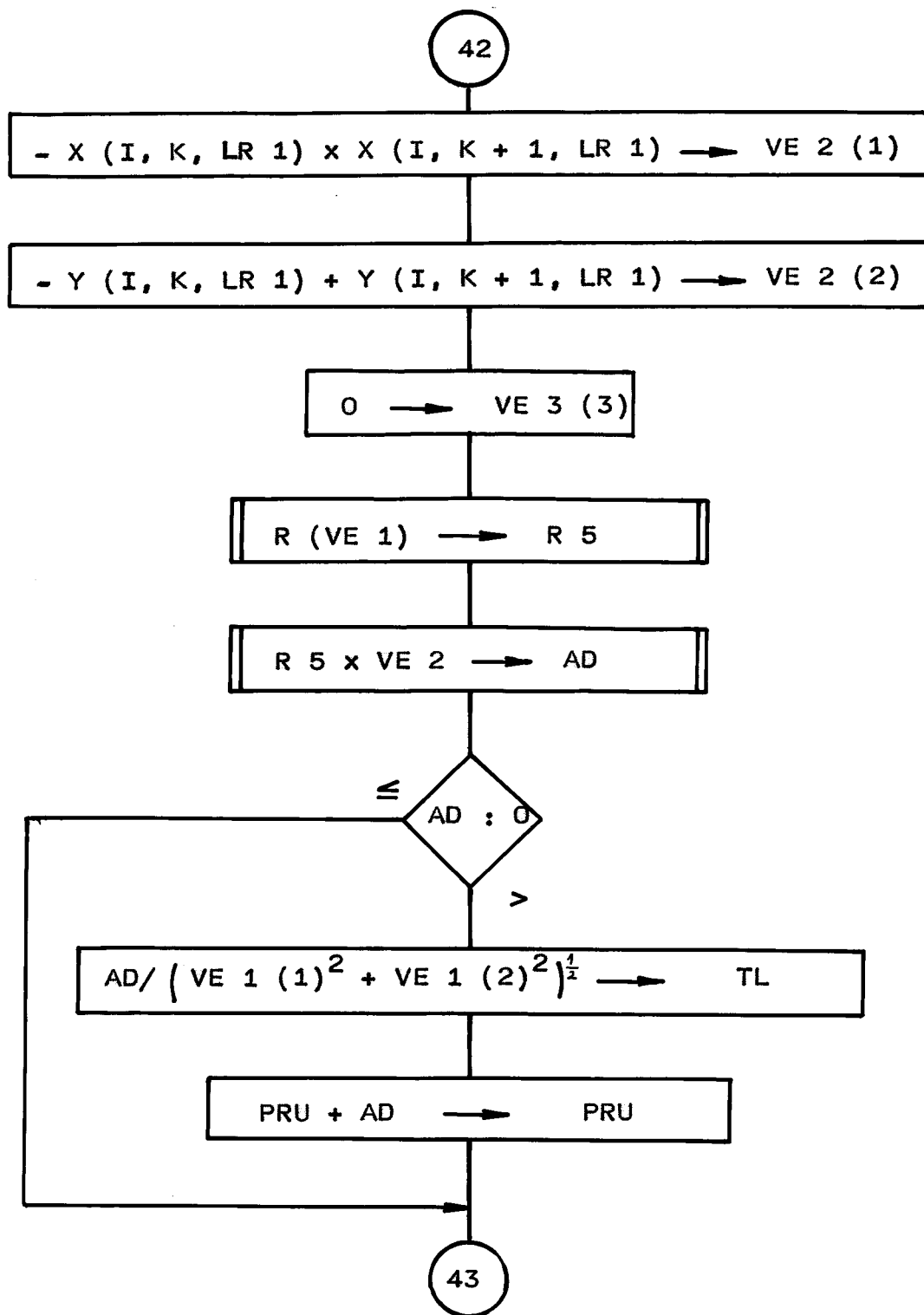


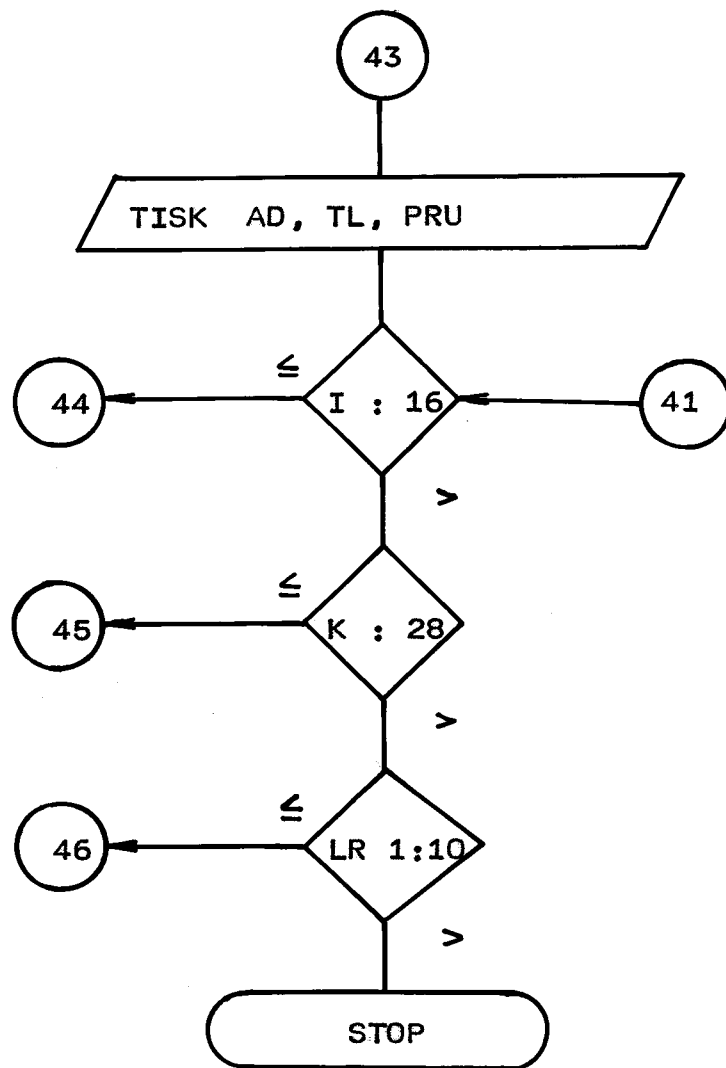












4.6.2 Program

```

    DIMENSION OB (3), ON (3), V (3), P (3), B (16, 28, 3),
    /BP (1, 1, 3), BP 1 (3), BP 2 (3), Q (3,3), A (3, 3),
    /C (3), G 1 (3), Q 1 (3,3), Q 2 (3, 3), E (3, 3),
    /E 1 (3, 3), G 2 (3), G 5 (3), G (3, 3), Z (3, 3),
    /Z 1 (3, 3), P 1 (3), TEO (3, 3), P 4 (3), TE 1 (3, 3),
    /TE 2 (3, 3), TE 3 (3, 3), TE 4 (3, 3), RON (3, 3),
    /NOR (3), B 1 (3), B 2 (3), B 3 (3), Q 3 (3, 3),
    /B 4 (3), BB (16, 28, 3), F 1 (3, 3), F 2 (3, 3),
    /F 2 (3, 3), H (3), S (3), H 1 (3), S 1 (3), ROB (3, 3),
    /RN 5 (3, 3), ON 5 (3), ON 1 (3), ON 2 (3), PT (3),
    /NOR 1 (3), NOR 2 (3), X (16, 28, 10), Y (16, 28, 10),
    /VE 1 (3), VE 2 (3), R 5 (3, 3), VE 3 (3), GY (3),
    /ZA (16, 28, 10)

C   VYPOCET PRUREZU REZU PRI ODVALOVACIM FREZOVANI PRIMYCH
    OZUBENYCH KOL
    INTEGER SA, SB
    READ (5, 100), RPO, RPN, RHO, RHN, HZ, M, PZ, ZHN,
    /BETA, AL, GA, OTO, OTN, VF, DT, SA, SB, PI 1, PI 2,
    /DE, EPS
    WRITE (6, 105)
100 FORMAT (F 5, 2, 3 F 10, 2, F 13, 5, 17, F 14, 5/
    /F 2, 0, F 17, 7, 2, F 10, 7, F 9, 6, F 13, 6, F 7, 5/
    /F 9, 7, 14, I 10, F 16, 7, F 10, 7, F 12, 6, F 9, 7)
105 FORMAT (////'
    /PRI          OVALOVACIM          VYPOCET    PRUREZU    REZU
    /              ZUB                  FREZOVANI'////'    RNA
    /              BOD                  SOUR X
    /  SOUR Y '////'                  LR 1          K
    /      I                      X              X')

C   POLOHOVE VEKTORY
    OB (1) = 0
    OB (2) = 0

```

```
OB (3) = 1
ON (1) = - COS (BETA)
ON (2) = 0
ON (3) = - SIN (BETA)
V (1) = 0
V (2) = 1
V (3) = 0
P (1) = 0
P (2) = RHN * RPO
P (3) = FLOAT (SA)
C  SOURADNICE BODU V ZAKLADNI POLOZE
   SK 1 = 2 * RT - (HZ/2 + (2 . 25 * FLOAT (M) + 0 . 4 *
/x SQRT (FLOAT (M))) * TAN (AL))
   SK 7 = 2 * RT - HZ/2
   SR 1 = RPN
   SR 7 = RHN
   DO 1 J = 1, 3
     B (1, 1, J) = P (J) - SK 1 * ON (J) + SR 1 * V (J)
     B (16, 1, J) = B (1, 1, J) - PZ * ON (J)
1    BP (7, 1, J) = P (J) - SK 7 * ON (J) + SR 7 * V (J)
     CALL TE (GA, ON, Q)
     DO 2 J = 1, 3
2    BP 1 (J) = BP (7, 1, J) - B (1, 1, J)
     CALL MUL (Q, BP 1, BP 2)
     DO 6 J = 1, 3
       B (7, 1, J) = BP 2 (J) + B (1, 1, J)
       B (10, 1, J) = B (7, 1, J) - HZ * ON (J)
     DO 4 I = 2, 6
4    B (I, 1, J) = B (1, I, J) + FLOAT (I - 1)/6 . *
/x (B (7, 1, J) - B (1, 1, J))
     DO 5 I = 8, 9
5    B (I, 1, J) = B (7, I, J) + FLOAT (I - 7)/3 . *
/x (B (10, 1, J) - B (7, 1, J))
     DO 6 I = 11, 15
```

```
6  B (I, 1, J) = B (10, 1, J) + FLOAT (I - 10)/6 . x
   /x (B (16, 1, J) - B (10, 1, J))
C  ZAKLADNI POLOHA JEDNOTLIVYCH ZUBU
   CALL TE (- DE, ON, A)
   DO 7 I = 1, 16
   DO 8 J = 1, 3
8  C (J) = B (I, 1, J) - P (J)
   CALL MUL (A, C, GV)
   DO 7 J = 1, 3
7  G (I, J) = GV (J)
   DO 9 K = 2, 28
   DO 10 I = 1, 16
   DO 10 J = 1, 3
10 B (I, K, J) = G (I, J) + P (J) + FLOAT (K - 1)/
   /ZHN x PI 1 x FLOAT (M)/ COS (BETA) x ON (J)
   DO 9 I = 1, 16
   DO 11 J = 1, 3
11 GV (3) = G (I, J)
   CALL MUL (A, GV, G 1)
   DO 9 J = 1, 3
9  G (I, J) = G 1 (J)
C  VYPOCET DZE
   OMN = PI 2 x OTN
   OMO = PI 2 x OTO
   DO 51 J = 1, 3
51 ON 1 (J) = ON (J)
   CALL TE (- OMO x DT, OB, Q 2)
   DO 12 I 1 = 1, 3
   DO 12 J 1 = 1, 3
   E (I 1, J 1) = 0
   E (I 1, I 1) = 1
12 E 1 (I 1, J 1) = E (I 1, J 1)
   L = 0
```

```
DO 14 K = 1, 28, 7
DO 14 I = 1, 16
DO 15 J = 1, 3
15 G 5 (J) = B (I, K, J) - P (J)
20 CALL TE (OMN x DT, ON 1, Q 1)
CALL MUL (E, G 5, G 1)
DO 16 J = 1, 3
16 G 1 (J) = G 1 (J) + P (J)
CALL MUL (E 1, G 1, G 2)
DO 17 J = 1, 3
17 G 5 (J) = G 2 (J) + VF x FLOAT (L) x DT x OB (J)
CALL MU (Q 1, E, Z)
CALL MU (Q 2, E 1, Z 1)
DO 18 J 1 = 1, 3
DO 18 I 1 = 1, 3
E (I 1, J 1) = Z (I 1, J 1)
18 E 1 (I 1, J 1) = Z 1 (I 1, J 1)
IF (FLOAT (SA), GT, G 5 (3), OR, G 5 (3), GT,
/FLOAT (SB), OR, G 5 (1) x x 2 + G 5 (2) x x 2, GT .
/. RHO x x 2) GO TO 19
21 L = L + 1
CALL MUL (Q 2, P, P 1)
DO 45 J = 1, 3
P (J) = P 1 (J) + VF x DT x OB (J)
45 G 5 (J) = G 5 (J) - P (J)
CALL MUL (Q 2, ON 1, ON 2)
DO 52 J = 1, 3
52 ON 1 (J) = ON 2 (J)
GO TO 20
19 CONTINUE
14 CONTINUE
DZE = OMO x DT x L/10
```

```
DR = DZE/OMO
WRITE (7, 107) DZE
107 FORMAT ('DZE' = ', F 8, 6)
C  DIMENSIONALNI ROVINA
    LG = 0
    PSI = OMN x DZE/OMO
    T = 0
    DO 22 I 1 = 1, 3
    DO 22 J 1 = 1, 3
    TEO (I 1, J 1) = 0
22  TEO (I 1, I 1) = 1
    CALL TE (- DZE, OB, TE 1)
    CALL TE (DZE, OB, TE 2)
    DO 37 K = 1, 28
    P 4 (1) = 0
    P 4 (2) = 1
    P 4 (3) = 0
    P (1) = 0
    P (2) = RHN + RPO
    P (3) = FLOAT (SA)
    DO 53 J = 1, 3
53  ON 1 (J) = ON (J)
    P 5 (J) = P (J)
    CALL MATR (ON, RON)
    CALL MUL (RON, P 4, NOR)
    DO 23 LR 1 = 1, 10
    DO 65 I = 1, 16
    ZA (I, K, LR 1) = 0
    DO 24 J = 1, 3
24  B 1 (J) = B (I, K, J) - P (J)
40  CALL TE (OMN x T, ON, Q 20)
    CALL MUL (Q 20, B 1, B 2)
```

```
DO 25 J = 1, 3
25 B 3 (J) = B 2 (J) + P (J)
CALL TE ( - OMO x T, OB, Q 3)
CALL MUL (G 3, B 3, B 4)
DO 26 J = 1, 3
26 BB (I, K, J) = B 4 (J) + VF x T x OB (J)
F = 0
DO 27 J = 1, 3
27 F = (BB (I, K, J) - P 5 (J)) x NOR (J) + F
CALL MUL (Q 3, B 2, H)
CALL MUL (Q 3, P, S)
CALL MATR (OB, ROB)
CALL MUL (Q 3, ON, ON 5)
CALL MATR (ON 5, RN 5)
DO 28 I 5 = 1, 3
DO 28 J 5 = 1, 3
F 1 (I 5, J 5) = - OMO x ROB (I 5, J 5) + OMN x
/x RN 5 (I 5, J 5)
28 F 2 (I 5, J 5) = - OMO x ROB (I 5, J 5)
CALL MUL (F 1, H, H 1)
CALL MUL (F 2, S, S 1)
FD = 0
DO 29 J = 1, 3
29 FD = (H 1 (J) + S 1 (J) + VF x OB (J)) x NOR (J) + FD
TN = T - F/FD
IF (ABS (TN - T), GT, EPS) GO TO 30
IF (FLOAT (SA) . GT . BB (I, K, 3), OR, BB (I, K, 3),
/ GT, FLOAT (SB), OR, BB (I, K, 1) x x 2 + BB (I, K, 2)
/x x 1, GT, RHO x x 2) GO TO 65
ZA (I, K, LR 1) = 1
X (I, K, LR 1) = 0
Y (I, K, LR 1) = 0
```

```
DO 55 J = 1, 3
  Y (I, K, LR 1) = (BB (I, K, J) - P 5 (J)) x P 4 (J) +
  /+ Y (I, K, LR 1)
55  X (I, K, LR 1) = (BB (I, K, J) - P 5 (J)) x ON 1 (J) +
  /+ X (I, K, LR 1)
  WRITE (6, 150) LR 1, K, I, X (I, K, LR 1), Y (I, K,
  LR 1)
150 FORMAT (I 25, I 14, I 17, F 23, 6, F 21, 6)
  GO TO 65
30  T = TN
  GO TO 40
65  CONTINUE
  CALL MUL (TE 1, PE 5, PT)
  CALL TE (PSI, ON 1, TE 3)
  CALL MUL (TE 1, ON 1, ON 2)
  CALL MUL (TE 3, NOR, NOR 1)
  CALL MUL (TE 1, NOR 1, NOR 2)
  CALL MUL (TE 3, P 4, P 41)
  CALL MUL (TE 1, P 41, P 4)
  DO 33 J = 1, 3
    P 5 (J) = PT (J) + VF x DR x IB (J)
    ON 1 (J) = ON 2 (J)
33  NOR (J) = NOR 2 (J)
    IF (LR 1 . EQ . 1) T 1 = 1
23  CONTINUE
37  T = T 1 + P 12/7/OMN
C   VYPOCET PRUREZU
    DO 42 LR 1 = 1, 10
    DO 42 K = 1, 22, 7
    DO 41 I = 1, 15
    PRU = 0
    IF (ZA (I, K, LR 1) . EQ . 0 . OR . ZA (I, K, LR 1) .
    / . EQ . 0) GO TO 41
```

```

VE 1 (1) = X (I, K, LR 1) - X (I + 1, K, LR 1)
VE 1 (2) = Y (I, K, LR 1) - Y (I + 1, K, LR 1)
VE 1 (3) = 0
VE 2 (1) = - X (I, K, LR 1) + X (I, K + 1, LR 1)
VE 2 (2) = - Y (I, K, LR 1) + Y (I, K + 1, LR 1)
VE 2 (3) = 0
CALL MATR (VE 1, R 5)
CALL MUL (R 5, VE 2, VE 3)
AD = - VE (3)
IF (AD, LT, 0) GO TO 41
PRU = PRU + AD
TL = AD/SQRT (VE 1 (1) x x 2 + VE 1 (2) x x 2)
41 CONTINUE
WRITE (6, 110) AD, TL, I, K, LR 1
WRITE (6, 115) PRU, K, LR 1
42 CONTINUE
110 FORMAT (F 15, 6, F 20, 6, 3, I 10)
115 FORMAT (F 9, 5, 212)
STOP
END

```

```

C SUBROUTINE PRO ANTISYMETRICKY TENSOR
SUBROUTINE MATR (VEK, R)
DIMENSION VEK (3), R (3, 3)
DO 1 I = 1, 3
1 R (I, I) = 0
R (1, 2) = - VEK (3)
R (2, 1) = VEK (3)
R (1, 3) = VEK (2)
R (3, 1) = - VEK (2)
R (2, 3) = - VEK (1)
R (3, 2) = VEK (1)
RETURN
END

```

C SUBROUTINE PRO TENSOR OTOCENI

SUBROUTINE TE (X, V, A)

DIMENSION V (3), A (3, 3), B (3, 3), E (3, 3), R (3, 3)

DO 1 I = 1, 3

DO 1 J = 1, 3

1 B (I, J) = V (I) x V (J)

DO 2 I = 1, 3

DO 2 J = 1, 3

2 E (I, J) = 0

DO 3 I = 1, 3

3 E (I, I) = 1

CALL MATR (V, R)

DO 4 I = 1, 3

DO 4 J = 1, 3

4 A (I, J) = (E (I, J) - B (I, J)) x COS (X) + R (I, J) x
/x SIN (X) + B (I, J)

RETURN

END

C SUBROUTINE PRO NASOBENI MAT. A VEK.

SUBROUTINE MUL (A, V, W)

DIMENSION A (3, 3), V (3), W (3)

DO 1 I = 1, 3

W (I) = 0

DO 1 J = 1, 3

1 W (I) = W (I) + A (I, J) x V (J)

RETURN

END

C SUBROUTINE PRO NASOBENI MATIC

SUBROUTINE MZ (A, B, C)

DIMENSION A (3, 3), B (3, 3), C (3, 3)

DO 1 I = 1, 3

```
DO 1 K = 1, 3
C (I, K) = 0
DO 1 J = 1, 3
1 C (I, K) = C (I, K) + A (I, J) x B (J, K)
RETURN
END
```

Označení konstant a proměnných v programu

Vstupní data:

RHO poloměr hlavové kružnice obrobku
RHN poloměr hlavové kružnice nástroje
RPO poloměr patní kružnice obrobku
RPN poloměr patní kružnice nástroje
HZ šířka hlavy profilu nástroje
M modul
PZ šířka paty profilu nástroje
ZHN počet hřebenů
BETA úhel nastavení nástroje
AL úhel boku zubu
GA úhel čela nástroje
OTO otáčky obrobku
OTN otáčky nástroje
VF rychlost posuvu
DT časový element
SA parametr rozměru obrobku
SB parametr rozměru obrobku
PI 1 Ludolfovo číslo
PI 2 dvojnásobek Ludolfova čísla
DE parametr nástroje
EPS přesnost výpočtu
RT rozteč

Další veličiny:

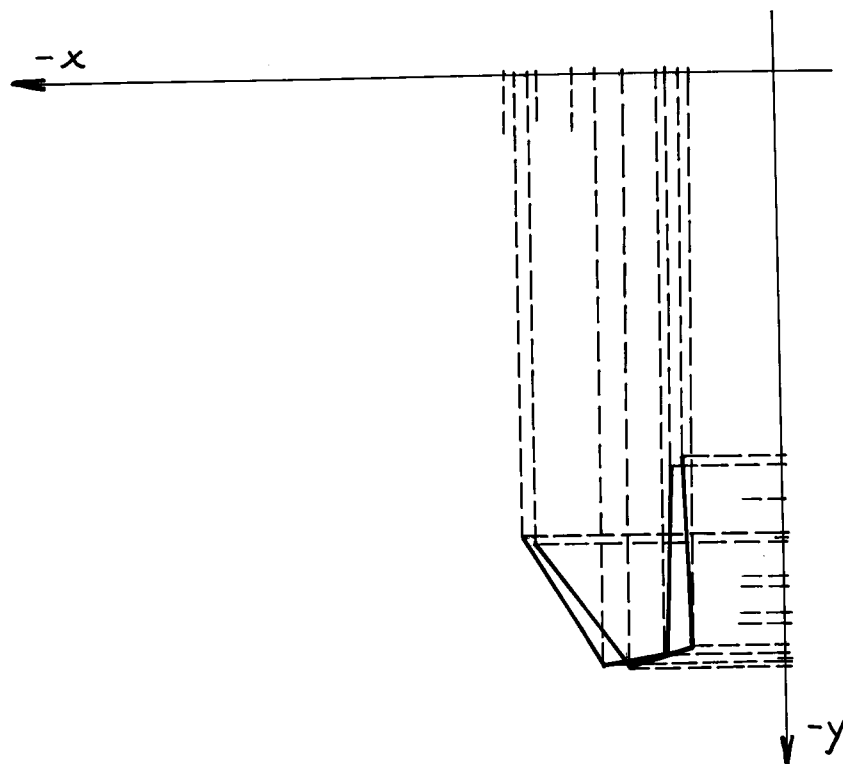
OMN úhlová rychlost nástroje
OMO úhlová rychlost obrobku
DR vypočtený časový element
DZE úhel pootáčení dimenzionální roviny
T reálný čas
TN čas v následujícím iteračním kroku
X, Y souřadnice průsečíku
OB jednotkový vektor $\mathbf{o}_0$
ON jednotkový vektor $\mathbf{o}_n$
P polohový vektor
VE 1, vektory v dimenzionální rovině
VE 2
AD elementární průřez A_{D1}
PRU celkový průřez
TL tloušťka

5. Grafické vyhodnocení

Vzhledem k tomu, že se podařilo program vyladit jen částečně a ze získaných výsledků si nelze vytvořit obraz o rozložení namáhání na jednotlivé zuby, nemělo by smysl uvádět zde celkové grafické vyhodnocení. Pro ukázkou však uvedu alespoň příklad. V případě, že by se podařilo program v termínu doladit, grafické vyhodnocení bude dodáno s přílohou.

5.1 Znázornění průřezu na příkladu

Jako příklad uvádím grafické znázornění průsečnic dvou po sobě jdoucích zubů (č. 15, 16) s 1. dimenzionální rovinou.



obr. 25

6. Z á v ě r

Hlavním úkolem této diplomové práce je sestavení programu pro výpočet průřezu řezu při odvalovacím frézování na základě řezného procesu. Tento program umožní zjištění průběhu namáhání jednotlivých zubů nástroje v různých okamžicích procesu obrábění.

V úvodní části se práce zabývá procesem odvalovacího frézování a problémy spojenými s rovnoměrným namáháním nástroje při práci. Všímá si různých způsobů odstranění nerovnoměrného úběru materiálu, přičemž se důkladněji zabývá korekcí pomocí PROGRES fréz.

Dále je uveden souhrn dosavadních poznatků z oblasti výpočtu průřezu odebírané vrstvy. Tato část si všímá teorií některých významných autorů, vzájemně je porovnává a hodnotí.

Z těchto poznatků vycházím v další části při stanovení výpočtu průřezu řezu. Z výsledných vztahů jsem sestavil program pro číslicový počítač EC 1033.

Výsledky programu měly být v poslední části graficky vyhodnoceny. Program se však nepodařilo zcela odladit a získané výsledky bohužel k úplnému grafickému vyhodnocení nestačí. Počítač sice počítá souřadnice průsečíků trajektorií bodů s dimenzionální rovinou, ale všímá si jen několika málo zubů v některých rovinách. Chyba je zřejmě v tom, že jen málo zubů je v daném okamžiku dostatečně blízko

dimenzionální roviny, což je při tak složité trajektorii nezbytné k tomu, aby mohla bezpečně fungovat iterační metoda, jejíž pomocí je úloha řešena. Přiblížení bodu do dostatečné blízkosti se zatím nepodařilo zaručit. V důsledku této chyby nedává výsledky ani poslední část programu - výpočet průřezu.

Je velice pravděpodobné, že po odstranění této chyby bude program vykazovat řádné výsledky.

Jelikož namáhání nástroje je přímo úměrné průřezu řezu, bude možno si ze získaných výsledků utvořit přesný obraz o namáhání jednotlivých zubů nástroje v procesu obrábění. Z toho lze vyjít při návrhu nového řezného nástroje, jehož břity budou rovnoměrně namáhány. Díky tomu se značně zvýší trvanlivost a životnost nástroje, bude umožněno zvýšení řezných podmínek, zejména posuvu. Zvýší se tedy produktivita práce a náklady na nástroj oproti tomu značně klesnou.

Význam této práce pro naši ekonomiku je tedy zřejmý. Zvýšení produktivity práce a snížení nákladů povede nepochybně ke značným úsporám, zvýšení produkce případně i zkvalitnění vyráběných kol.

Při vypracování mé diplomové práce mi poskytli
cennou pomoc svými radami soudruzi - ing. Robert
K v a p i l, CSc., ing. Vladimír K r a c i k, CSc.,
ing. Květuše C e j h o n o v á a ing. Zdeněk
S t r á n s k ý.

Patří jim za to můj vřelý dík.

V Liberci 4. června 1982

Petr Hranovský

Literatura

- / 1/ Buda, J. - Békés, J.:
Teoretické základy obrábění kovov. 1. vyd.,
SNTL Bratislava 1967
- / 2/ Budínský, B. - Kepr, B.:
Základy diferenciální geometrie s technickými aplikacemi, 1. vyd., SNTL Praha 1970
- / 3/ Cejnohová, K.:
Analytické stanovení řezné síly při odvalovacím frézování (Diplomová práce), Liberec VŠST 1981.
Fakulta strojní
- / 4/ Dráb, V.:
Technologie I. 1. vyd., Liberec, VŠST 1979
- / 5/ Klepal, V.:
Výroba ozubených kol. Praha, SNTL 1959
- / 6/ Klubičková, M.:
Analytické určení průřezu třísky při odvalovacím frézování (Diplomová práce), Liberec, VŠST 1977.
Fakulta strojní
- / 7/ Kvapil, R.:
Konstrukční a technologické parametry odvalovacích fréz (Kandidátská dizertace), Liberec, VŠST 1977.
Fakulta strojní
- / 8/ Kvapil, R.:
Možnosti úprav odvalovacích fréz na základě analýzy řezného pochodu (Diplomová práce), Liberec, VŠST 1961

- / 9/ Olehla, M. - Tišer, J.:
Použití Fortranu v praxi. 1. vyd., Liberec, VŠST 1973
- /10/ Olehla, M. - Tišer, J.:
Základy numerických metod a programování. 1. vyd.,
Liberec, VŠST 1977
- /11/ Přikryl, Z. - Musilková, R.:
Teorie obrábění. 1. vyd., SNTL Praha 1971
- /12/ Rodin, P. R.:
Základy teorie navrhování řezných nástrojů. 1. vyd.,
SNTL Praha 1963
- /13/ Švec, S.:
Konstrukce nástrojů pro výrobu čelních ozubených kol.
Praha, SNTL 1956