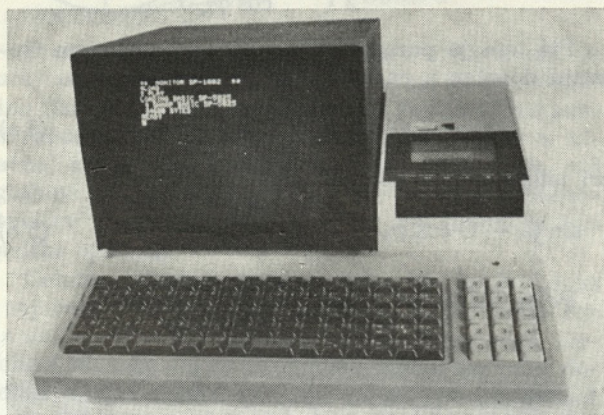


UDK 621.914.001.2:681.32

Teoretična odvisnost sil od geometrije pri obodnem frezanju

HINKO MUREN

Zelo nagel razvoj najnovejših vrst mikroracionalnikov, povezan z izrednim padanjem cen računalniške opreme, bo v najkrajšem času pripeljal do tega, da bodo tudi manjši oddelki v tovarnah imeli svoj lastni, neodvisni računalnik, katerega zmogljivost bo zadoščala za reševanje velike večine vsakdanjih nalog, na veliki računalnik pa se bo treba priključiti samo še v posameznih primerih. Primer takšnega, presenetljivo uporabnega računalnika prikazuje slika 1. Tako bo mogoče hitro in ekonomično računati po natančnih načinih tudi zapletene probleme iz prakse, kjer si je do sedaj bilo treba pomagati s približnimi načini.



Slika 1

Prav klasičen primer za nujnost takšnega aproksimativnega računanja je s področja odrezovanja določanje debeline in prereza odrezka, s tem pa tudi rezalnih sil in porabe moči pri frezanju. Pri obodnem frezanju se namreč debelina in prerez odrezka spreminjata po zelo zapleteni zakonitosti, zato ustrezne enačbe niso rešljive na preprost način. Iz literature je znanih več predlogov za računanje — posebno je tu znan tako imenovani »frezalni integral« —, ki omogočajo bolj ali manj

natančno računanje. Dobljeni rezultati so sicer za prakso dovolj natančni, vendar je na sodobnem računalniku z zmogljivostjo že 2 kB mogoče še hitrejši izračun po natančnih računskih načinih, celo takih, ki deloma še niso bili objavljeni v literaturi.

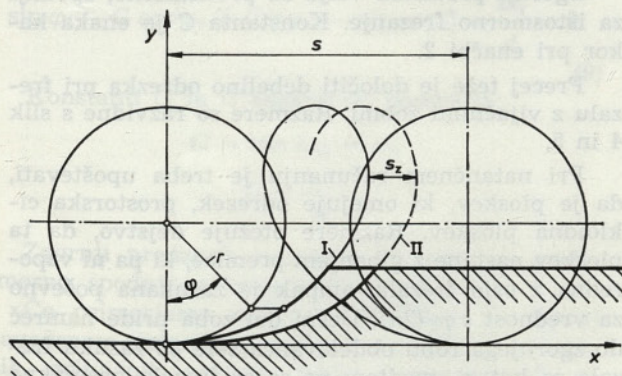
Pri obodnem frezanju se takoj na začetku pokaže, da je potreben dogovor, kaj razumemo pod debelino odrezka, ker definicija ni tako preprosta kakor na primer pri struženju in skobljanju. Sicer pa je definicija debeline odrezka tudi pri teh dveh postopkih pravzaprav samo stvar dogovora. Težava je namreč v tem, da pri frezanju prehaja v odrezek plast, katere debelina se spreminja, medtem ko gre pri skobljanju za preprosto, ravno plast. Odrezek je pri ravnem frezanju omejen z dvema podaljšanimi cikloidama, pri krožnem in konturnem frezanju pa imamo opraviti celo s krožnimi podaljšanimi cikloidami. Povrh vsega se debelina odrezka spreminja pri protismernem frezanju drugače kakor pri istosmernem (slika 2).

Od vseh možnih dogovorov za definicijo debeline odrezka je najbolj sprejemljiv ta, da merimo debelino odrezka radialno proti osi orodja od vrha rezila, ne glede na velikost cepilnega kota, čeprav odrezek nima nikoli takšne debeline.

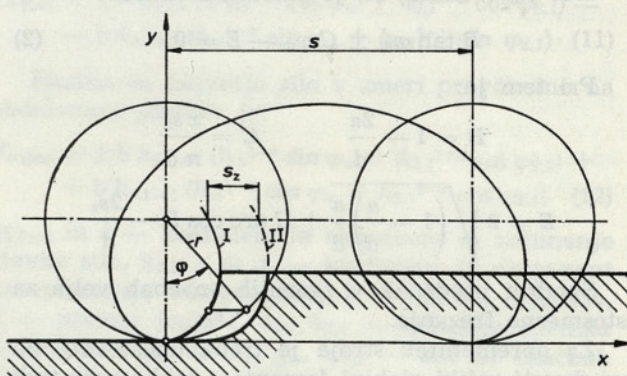
V praksi je v rabi računanje s tremi debelinami odrezka:

- največjo
- trenutno (dejansko) in
- srednjo.

Največjo debelino odrezka potrebujemo, če želimo določiti največjo vrednost rezalnih sil. Potrebujemo jih pri določanju največjih dopustnih delovnih režimov in za ugotavljanje odstopkov, ki jih povzročajo deformacije obdelovalnega sistema. Nadalje je ta vrednost osnova za določanje konic porabe moči, ki pa jih praksa navadno ne upošteva, čeprav utegnejo biti tudi za 50 % večje od povprečne porabe.



Slika 2 a

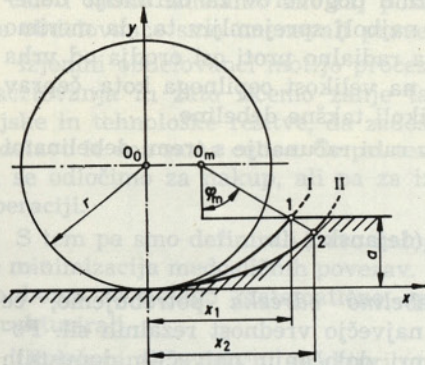


Slika 2 b

Trenutna debelina odrezka omogoča določiti zakonitost, po kateri se spreminjajo rezalne sile. Ta zakonitost je osnova za proučevanje dinamičnih pojavov.

Srednja debelina odrezka je v bistvu samo računski pojem, ki je pri nekaterih aproksimativnih enačbah določen precej samovoljno. Uvedli so jo svojčas kot pomoč za približno, poenostavljeno reševanje nekaterih enačb, med drugim tudi že omejenega »frezalnega integrala«. Ker je končni cilj razmišljanj o debelini odrezka le določanje sil, momentov in moči, ta veličina pri natančnem računanju nima nobenega pomena. Enako velja tudi za prerez odrezka pri delu z vijačnimi zobmi, ki pri natančnem računanju ne omogoča določitve sil. Vsa nadaljnja izvajanja so zato usmerjena le v določanje sil, momentov in moči — prerez odrezka bo uporabljen samo kot izhodišče za nadaljnji račun.

Razmere pri natančnem določanju največje debeline odrezka h_m pri protismernem frezanju z ravnimi zobmi prikazuje slika 3. Odrezek omejujeta dve podaljšani cikloidi I in II, največjo debelino doseže odrezek takrat, kadar pride os frezala v točko O_m in je drugi zob frezala (ki zarisuje krivuljo II) zasukan za kot φ_m .



Slika 3

Največjo debelino odrezka h_m je mogoče izračunati iz enačbe:

$$h_m = \frac{d}{2} - \frac{d/2 - a}{\cos \varphi_m} \quad (1)$$

Kot φ_m v enačbi (1) je določen z enačbo:

$$B \tan \varphi_m \pm C \varphi_m - E = 0 \quad (2)$$

Pri tem je:

$$B = 1 - \frac{2a}{d} \quad C = \frac{z s_z}{\pi d}$$

$$E = 2 \sqrt{\left(1 - \frac{a}{d}\right) \frac{a}{d}} + C \arccos B - \frac{2s_z}{d}$$

Spodnji predznak v zgornjih enačbah velja za istosmerno frezanje.

Za obremenitev stroja je treba upoštevati, da pri dovolj veliki globini frezanja a lahko reže tudi več zob hkrati. Dva zoba režeta hkrati, če je:

$$\varphi_m > \frac{2\pi}{z}$$

Teoretično bi lahko rezalo naenkrat tudi več zob, vendar pokaže praktični izračun, da pri normalnem delu s standardnimi frezali reže največkrat samo en zob (če je raven), dva zoba pa le izjemoma.

V primeru, da režeta dva zoba, je obdelovalni sistem najbolj obremenjen takrat, kadar je eden od obeh zob v legi po sliki 3, drugi pa je zasukan za kot:

$$\varphi_{2,1} = \varphi_m - \frac{2\pi}{z} \quad (3)$$

Debelino odrezka na dodatno delujočem zobu dobimo iz enačbe:

$$h_{2,1} = \frac{d}{2} \left(1 - \frac{\cos \varphi_4}{\cos \varphi_{2,1}}\right) \quad (4)$$

Pri tem je parameter φ_4 pri protismernem frezanju določen z enačbo:

$$\sin \varphi_4 - G \cos \varphi_4 + C(\varphi_4 - \varphi_m) = 0 \quad (5 a)$$

pri istosmernem pa z enačbo:

$$\sin \varphi_4 - G \cos \varphi_4 - C(\varphi_4 - \varphi_m) - \frac{4s_z}{d} = 0 \quad (5 b)$$

Poleg že znane vrednosti C pomeni tu:

$$G = \tan \left(\varphi_m - \frac{2\pi}{z} \right)$$

Trenutno debelino odrezka h pri zobu frezala, zasukanem za kot φ iz začetne lege, je mogoče računati po enačbi:

$$h = \frac{d}{2} \left(1 - \frac{\cos \varphi_3}{\cos \varphi}\right) \quad (6)$$

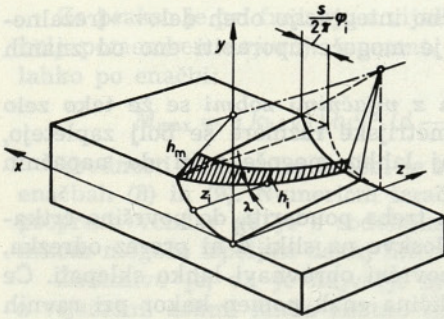
Parameter φ_3 zgornje enačbe je določen z enačbo:

$$\sin \varphi_3 - \tan \varphi \cdot \cos \varphi_3 + C(\varphi_3 - \varphi) \mp \frac{2s_z}{d} = 0 \quad (7)$$

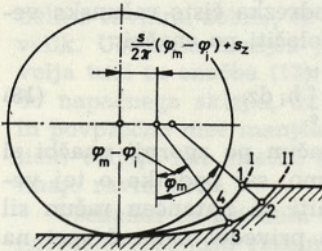
Zgornji predznak velja za protismerno, spodnji za istosmerno frezanje. Konstanta C je enaka kakor pri enačbi 2.

Precej težje je določiti debelino odrezka pri frezalu z vijačnimi zobmi. Razmere so razvidne s slik 4 in 5.

Pri natančnem računanju je treba upoštevati, da je ploskev, ki omejuje odrezek, prostorska cikloidna ploskev. Razmere otežuje dejstvo, da ta ploskev nastane z gibanjem premice, ki pa ni vzporedna z osjo frezala, ampak je zasukana poševno za vrednost $s \varphi_i / (2\pi)$. Desni del zoba pride namreč do zgornjega robu obdelovanca šele po zasuku frezala za kot φ_i , medtem pa se os frezala premakne naprej za omenjeno vrednost.



Slika 4



Slika 5

Prerez odrezka pri delu z vijahnimi zobmi je torej zavita prostorska ploskev s spremenljivo širino (šifrirana ploskev na sliki 3). Iz literature znani računski načini poenostavljajo to ploskev v vijahno zavito trapez. Pri manjših razmerjih a/d (globina frezanja/premer frezala) je takšna poenostavitev sprejemljiva, pri večjih pa utegnejo biti razlike opazne.

Celotna ploskev prereza odrezka je pri delu z vijahnimi zobmi največja takrat, kadar pride zob na enem robu obdelovanca do zgornjega roba. Debelina odrezka je na tem mestu enaka največji debelini h_m pri delu z ravnimi zobmi (po enačbah 1 in 2). Od tu naprej se debelina odrezka postopoma zmanjšuje, tako da je v razdalji h_i od roba obdelovanca samo še h_m . To debelino lahko izračunamo po enačbi

$$h_i = \frac{d}{2} \left(1 - \frac{\cos \varphi_4}{\cos \kappa} \right) \quad (8)$$

Pri tem pomeni:

$$\kappa = \varphi_m - \varphi_i = \varphi_m - \frac{2z_i}{d} \tan \lambda$$

Parameter φ_4 je mogoče določiti iz enačbe:

$$\sin \varphi_4 - G \cos \varphi_4 \mp C [(\varphi_m - \varphi_i) - \varphi_4] - \frac{2s_z}{d} = 0 \quad (9)$$

Konstanti G in C enačbe (9) pomenita:

$$G = \tan(\varphi_m - \varphi_i)$$

$$C = \frac{s_z z}{d}$$

Zgornji predznak v enačbi (9) velja za protismerno, spodnji za istosmerno freziranje.

Če primerjamo rezultate, dobljene po zgoraj navedenem natančnem načinu, z rezultati po znanih, približnih načinih, lahko ugotovimo, da so razlike v večini primerov zanemarljivo majhne. Pri

manjših globinah frezanja in manjših podajanjih utegne biti razlika celo manjša od 0,001 mm. Približno računanje je za prakso povsem sprejemljivo celo pri delu z vijahnimi zobmi, kjer zapleteni enačbi (8) in (9) nadomeščamo s preprosto enačbo:

$$h_i = K_1 z_i + K_2$$

torej z enačbo premice. Do večjih razlik prihaja šele pri izrednih globinah frezanja, ki skoraj ne prihajajo v poštev.

Z uvedbo sodobne računalniške tehnike se smotrnost dela z natančnimi, vendar za klasično računanje preveč zapletenimi enačbami kaže v novi luči. Če imamo izdelane ustrezne programe in shranjene na magnetnem traku ali disku, je računanje tudi s temi enačbami hitrejše kakor s približnimi enačbami na klasični način.

V primeru, da se odločimo za sodobnejši pristop in za delo po natančnem načinu, se velja vprašati, katere veličine v zvezi z geometrijo odrezka pravzaprav potrebujemo v praksi. Preprosto razmišljanje pokaže, da ni treba sestavljati programov za določanje debeline in prereza odrezka. V praksi potrebujemo dejansko samo podatke o velikosti rezalnih sil in o potrebni moči.

Tehnolog potrebuje pri načrtovanju delovnega postopka naslednje podatke o obremenitvah:

— največji moment na glavnem vretenu M_{\max} za kontrolo, če niso presežene dopustne obremenitve pogonskega mehanizma stroja,

— največjo silo v smeri podajalnega gibanja $F_{s \max}$ za kontrolo obremenitev podajalnega mehanizma,

— največjo silo v smeri pravokotno na obdelovano ploskev $F_{v \max}$ za določanje deformacij konzole in glavnega vretena, ki so odločilne za dosledno natančnost obdelave.

Če za osnovo izračuna obremenitev vzamemo Kienzlejevo enačbo, dobimo največji moment po enačbi:

$$M_{\max} = \frac{d}{2} b k_{h1 \times 1} (h_{m1}^{1-z} + h_{2,1}^{1-z}) \quad (10)$$

Največjo silo v smeri podajalnega gibanja lahko računamo po enačbi:

$$F_{s \max} = \pm b k_{h1 \times 1} (h_{m1}^{1-z} \cos \varphi_m + h_{2,1}^{1-z} \cos \varphi_{2,1}) - b k_{a1 \times 1} (h_{m1}^{1-x} \sin \varphi_m + h_{2,1}^{1-x} \sin \varphi_{2,1}) \quad (11)$$

Enačba za največjo silo v smeri pravokotno na obdelovano ploskev je:

$$F_{v \max} = \pm b k_{h1 \times 1} (h_{m1}^{1-z} \sin \varphi_m + h_{2,1}^{1-z} \sin \varphi_{2,1}) + b k_{a1 \times 1} (h_{m1}^{1-x} \cos \varphi_m + h_{2,1}^{1-x} \cos \varphi_{2,1}) \quad (12)$$

$k_{h1 \times 1}$ in z — koeficient in eksponent za računanje glavne sile, $k_{a1 \times 1}$ in x — koeficient in eksponent za računanje odzivne sile, b — širina frezanja, d — premer frezala, $h_m, h_{2,1}$ — debeline odrezka po enačbah (1) in (4), $\varphi_m, \varphi_{2,1}$ — kot po enačbah (2) in (3); zgornji predznak velja povsod za protismerno, spodnji za istosmerno freziranje.

Enačbe, ki jih v praksi uporabljamo za računanje moči, dajejo skoraj brez izjeme le povprečne vrednosti. V konicah porabe, ko je prerez odrezka največji, pa je poraba moči znatno večja. Če so vztrajnostni momenti vrtečih se delov v pogonskem mehanizmu majhni, lahko prihaja med delom do dokajšnje neenakomernosti vrtenja, zato bi bilo koristno preverjati tudi konice moči, ki jih lahko izračunamo po enačbi:

$$P_{\max} = M_{\max} \omega = 2\pi n M_{\max} \quad (13)$$

Za prakso sta nadalje zanimiva delo pri frezanju W in neto moč P_N , pod katero razumemo povprečno porabo energije za tvorbo odrezkov. Izhodišče za računanje obeh je delo pri enem vrtljaju frezala:

$$W_1 = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi_{\max}} F_h \frac{d-h}{2} d\varphi = \frac{1}{2} b k_{h1} \int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi_{\max}} h^{1-z} (d-h) d\varphi \quad (14)$$

V tej enačbi se pojavlja dobro znani »frezalni integral«, za katerega je bilo v literaturi objavljenih več rešitev, ki so vse bolj ali manj približne. Tudi najbolj natančni načini reševanja izhajajo iz približnih enačb za debelino odrezka, saj je že tako reševanje dokaj zahtevno. S sodobnim računalnikom pa je mogoče tudi zelo natančno računati. Če je program že posnet, je treba za to kvečjemu nekaj minut.

Pri natančnem računanju je treba najprej upoštevati, da se debelina odrezka h spreminja v odvisnosti od kota φ po dveh različnih zakonitostih in je zato reševanje integrala treba razdeliti v dve stopnji. Pri tem je zelo zapleteno določiti vse tri meje integriranja.

Debelina odrezka je sicer pri kotu $\varphi = 0$ tudi $h = 0$, vendar med vrtenjem frezala to vrednost obdrži vse do kota φ_0 , ki je določen s presečiščem obeh podaljšanih cikloid I in II (slika 2). Ta kot je mogoče izračunati iz enačbe:

$$\sin \varphi_0 + C \varphi_0 - \frac{S_z}{d} = 0 \quad (15)$$

Simboli v tej in tudi v naslednjih enačbah imajo enake pomene kakor v dosedanjih enačbah.

Debelina odrezka h se spreminja od kota φ_0 do kota φ_m po enačbi (6). Integracijsko mejo φ_m je mogoče izračunati po enačbi (2).

Od kota φ_m do kota φ_e se debelina odrezka spreminja po drugi zakonitosti, ki jo določa enačba:

$$h = \frac{d}{2} - \frac{d/2 - a}{\cos \varphi} \quad (16)$$

Zgornjo integracijsko mejo za ta drugi del določa kot φ_e , ki ga je mogoče izračunati po enačbi:

$$\varphi_e = \arccos \left(1 - \frac{2a}{d} \right) = \arccos B \quad (17)$$

Za numerično integracijo obeh delov »frezalne ga integrala« je mogoče uporabiti eno od znanih metod.

Pri frezalih z vijajnimi zobmi se že tako zelo zapletene geometrijske razmere še bolj zapletejo, zato je tu kaj lahko mogoče priti do napačnih sklepov.

Kot prvo je treba poudariti, da površina črtkano označene ploskve na sliki 4 ni prerez odrezka, kakor bi pri površni obravnavi lahko sklepali. Če naj ima ta veličina enak pomen kakor pri ravnih zobeh, potem je prerez odrezka čisto računaska veličina, ki jo je mogoče določiti po enačbi:

$$A = \int_0^b h_i dz_i \quad (18)$$

Trud za zapleten izračun po zgornji enačbi si v praksi lahko prihranimo, saj podatka o tej veličini ne potrebujemo niti za natančen račun sil niti moči. Račun bi nas privedel namreč spet na približno računanje s fiktivnimi »srednjimi« vrednostmi.

Program 1. Največje vrednosti za debelino odrezka, moment in sile pri protismernem frezanju

```

10 PRINT"NAJVEČJE VREDNOSTI ZA DEBELINO ODREZKA,"
20 PRINT"MOENT IN SILE PRI PROTISMERNEM FREZANJU"
30 INPUT"GLDEJNA FREZANJA v [mm] a=";A
40 INPUT"PODAJANJE NA EN ZOB v [mm] sz=";S
50 INPUT"PREMER FREZALA v [mm] d=";D
60 INPUT"STEVILLO ZOB FREZALA z f=";Z
70 INPUT"SIRINA FREZANJA v [mm] b=";B
80 INPUT"KIENZLEJEV EKSPONENT z=";EZ
90 INPUT"KIENZLEJEV EKSPONENT x=";EX
100 INPUT"KIENZLEJEV KOEFICIENT kh=";KH
110 INPUT"KIENZLEJEV KOEFICIENT ka=";KA;PRINT
120 N=.000001;X=.1
130 B=1-2*A/D;C=Z*S*/D
140 EF=ATN(SQR(1-B*B)/B)
150 E=2*SQR((1-A/D)*A/D)+C*EF-2*S/D
160 F=10
170 GOSUB310
180 IFX-INT(F*X)=0THEN200
190 F=10#F;GOTO180
200 IFY>0THEN270
210 X=X+1/F
220 GOSUB310
230 IFY>0THEN250
240 GOTO210
250 IF1/F<=NTHEN360
260 X=X-.9/F;F=10#F;GOTO220
270 X=X-1/F
280 GOSUB310
290 IFY>0THEN270
300 F=10#F;GOTO210
310 IFJ>0THEN340
320 Y=B*TAN(X)+C*X-E
330 W=0;RETURN
340 Y=SIN(X)-G*COS(X)+C*(X-P)
350 W=1;RETURN
360 IFW=1THEN480
370 H=D/2-(D/2-A)/COS(X)
380 P=X
390 FM=INT(P*100000+.5)/100000
400 HM=INT(H*1000+.5)/1000
410 PRINT"KOT F1max=";F1;" "
420 PRINT"Hmax=";HM;PRINT
430 J=P-2*S*/Z
440 G=TAN(J)
450 IFJ>0THENPRINT"REZETA DVA ZOBA";PRINT;GOTO470
460 PRINT"REZE SAMO EN ZOB";PRINT;GOTO530
470 X=.1;GOTO160
480 HM=D/2*(1-COS(X)/COS(J))
490 H2=INT(HH*1000+.5)/1000
500 F2=INT(J*100000+.5)/100000
510 PRINT"KOT F12=";F2;" "
520 PRINT"h2=";H2;PRINT
530 M=BF/2000*KH*(D-H)*H+(1-EZ)+(D-H)*HH+(1-EZ)
540 FH=2000*M/D
550 FM=BF*KH*H+(1-EZ)
560 FA=BF*KH*H+(1-EX)
570 FO=BF*KH*H+(1-EZ)
580 FB=BF*KH*H+(1-EX)
590 FV=FM*SIN(P)+FA*SIN(J)+FO*COS(P)+FB*COS(J)
600 FS=FM*COS(P)-FA*COS(J)+FO*SIN(P)-FB*SIN(J)
610 DEF FNR(X)=INT(X*100+.5)/100
620 PRINT"MAKSIMALNI MOMENT Mm=";FNR(M);" [N.m]"
630 IFJ>0THENPRINT"RAČUNSKA GLAVNA SILA Fh=";FNR(FH);" [N]"
640 IFJ>0THENPRINT"MAKS. GLAVNA SILA Fm=";FNR(FM);" [N]"
650 PRINT"MAKS. NAVPIČNA SILA Fv=";FNR(FV);" [N]"
660 PRINT"MAKS. VODRAVNA SILA Fw=";FNR(FW);" [N]"
670 END

```

Za prakso je pri frezanju z vijačnimi zobmi najbolj pomemben največji moment. Izračunamo ga lahko po enačbi:

$$M_{\max} = \frac{1}{2} k_{h1} \times \int h_i^{1-z} (d - h_i) dz_i \quad (19)$$

Vrednosti za h_i v tej enačbi je treba določiti po enačbah (8) in (9). Numerični izračun vsekakor ni preprost, vendar ga je s sodobnim mikroročunalnikom mogoče izpeljati dokaj hitro.

Zanimivo je, da je največji moment pri delu z vijačnimi zobmi lahko znatno manjši kakor pri delu z ravnimi zobmi, če je kot poševnosti λ dovolj velik. Ustrezno manjša je konica moči, za katero velja tudi tu enačba (13). To pa nas ne sme zavesti do napačnega sklepa, da sta tudi porabljeno delo in povprečna moč manjša. Za izračun teh dveh veličin veljajo iste enačbe kakor za delo s frezali, ki imajo ravne zobe.

Vsekakor so pri delu z vijačnimi zobmi manjše največje vrednosti rezalnih sil.

Program 2. Moment in sile pri protismernem frezanju z vijačnimi zobmi

```

10 PRINT "MOMENT IN SILE PRI PROTISMERNEM FREZANJU";
20 PRINT "Z VIJACNIMI ZOBMI":PRINT
30 INPUT "GLOBINA FREZANJA v [mm] a=":A
40 INPUT "PODAJANJE NA EN ZOB v [mm] sz=":S
50 INPUT "PREMER FREZALA v [mm] d=":D
60 INPUT "ŠTEVILO ZOB FREZALA z f=":Z
70 INPUT "ŠIRINA FREZANJA v [mm] b=":BF
80 INPUT "KOT POŠEVNOSTI v [°] LAMBDA=":L
90 INPUT "KIENZLEJEV EKSPONENT z=":EZ
100 INPUT "KIENZLEJEV EKSPONENT x=":EX
110 INPUT "KIENZLEJEV KOEFICIENT kh=":KH
120 INPUT "KIENZLEJEV KOEFICIENT ka=":KA:PRINT
130 N=.000001:D=1:T=1
140 B=1-2*A/D:C=Z*S/π/D
150 FE=ATN(SQR(1-B*B)/B)
160 E=2*SQR((1-A/D)*A/D)+C*FE-2*S/D:GOTO230
170 ZH=FM*D/2/TAN(L*π/180)
180 IF ZH<B THEN DB=ZH/30:GOTO210
190 DB=BF/20
200 IN=BF:GOTO220
210 IN=ZH
220 FOR ZZ=DB/2 TO (IN-DB/2) STEP DB
230 F=10: X=.1
240 IF Q=1GOSUB520
250 IF Q=2GOSUB540
260 IF F<X-INT(F*X)=0 THEN280
270 F=10#F:GOTO260
280 IF Y>0 THEN360
290 X=X+1/F
300 IF Q=1GOSUB520
310 IF Q=2GOSUB540
320 IF Y>0 THEN330
330 GOTO290
340 IF (1/F<N) * (Q=1) THEN F=X:D=2:HM=D/2-(D/2-A)/COS(FM):GOTO170
350 IF (1/F<N) * (Q=2) THEN F=X:D=2:GOTO430
360 X=X-.9/F:F=10#F
370 GOTO300
380 X=X-1/F
390 IF Q=1GOSUB520
400 IF Q=2GOSUB540
410 IF Y>0 THEN370
420 F=10#F:GOTO290
430 H=D/2*(1-COS(FX))/COS(FZ)
440 DF=DB#H+(1-EZ)*KH
450 DA=DB#H+(1-EX)*KA
460 DV=DF#SIN(FZ)+DA#COS(FZ)
470 FV=FU+DV
480 DS=DF#COS(FZ)-DA#SIN(FZ)
490 FS=FU+DS
500 DM=DF*(D-H)/2000
510 HM=DM:GOTO570
520 Y=B*TAN(X)+C*X-E
530 RETURN
540 FZ=FM-2*ZZ/D*TAN(L*π/180)
550 Y=SIN(X)-TAN(FZ)*COS(X)+C*(X-FZ)-2*S/D
560 RETURN
570 NEXT ZZ
580 FH=2000#M/D
590 F2=FM-2*S/π/Z
600 IF (F2<=0) * (T=1) THEN PRINT "REZE SAMO EN ZOB":GOTO630
610 IF (F2<=0) * (T=2) THEN PRINT "REZETA DVA ZOBA":GOTO630
620 ZZ=0:FM=F2:T=2:GOTO170
630 DEF FNR(X)=INT(X*100+.5)/100
640 PRINT "MAKSIMALNI MOMENT Mm=":FNR(M):" [N.m]"
650 PRINT "RACUNSKA GLAV. SILA Fh=":FNR(FH):" [N]"
660 PRINT "MAKS. NAVPIČNA SILA Fv=":FNR(FV):" [N]"
670 PRINT "MAKS. VODRAVNA SILA Fs=":FNR(FS):" [N]"
680 END

```

Od rezalnih sil je za določanje delovnega režima pomembna v glavnem samo sila F_v , ki deluje pravokotno na obdelovano ploskev. Računamo jo lahko po enačbi:

$$F_{v \max} = \pm k_{h1} \times \int h_i^{1-z} \sin\left(\varphi_m \frac{2z_i}{d} \tan \lambda\right) dz_i + k_{a1} \times \int h_i^{1-x} \cos\left(\varphi_m \frac{2z_i}{d} \tan \lambda\right) dz_i \quad (20)$$

Kakor je rečeno že v uvodu, so za klasični način računanja vse navedene enačbe v praksi neuporabne, na sodobnem mikroročunalniku pa tudi najbolj zapletene med zgoraj navedenimi enačbami lahko rešimo v nekaj minutah, če imamo izdelane ustrezne programe in shranjene na trak ali disk. Da bi praksi tudi to delo olajšali, so dodani trije programi, ki omogočajo izračun vseh za prakso potrebnih podatkov.

Program 3. Delo in moč pri protismernem frezanju

```

10 PRINT "DELO IN MOČ PRI PROTISMERNEM FREZANJU":PRINT
20 INPUT "GLOBINA FREZANJA v [mm] a=":A
30 INPUT "PODAJANJE NA EN ZOB v [mm] sz=":S
40 INPUT "PREMER FREZALA v [mm] d=":D
50 INPUT "ŠTEVILO ZOB FREZALA z f=":Z
60 INPUT "ŠIRINA FREZANJA v [mm] b=":BF
70 INPUT "KIENZLEJEV EKSPONENT z=":EZ
80 INPUT "KIENZLEJEV KOEFICIENT kh=":KH
90 INPUT "REZALNA HITROST v [m/s]":V:PRINT
100 N=.000001:D=1
110 B=1-2*A/D:C=Z*S/π/D
120 FE=ATN(SQR(1-B*B)/B)
130 E=2*SQR((1-A/D)*A/D)+C*FE-2*S/D:GOTO160
140 D1=(F+FM)/20
150 FOR F1=(-D/2) TO (FM-D/2) STEP D1
160 F=10: X=-1
170 IF Q=1GOSUB430
180 IF Q=2GOSUB450
190 IF Q=3GOSUB470
200 IF F<X-INT(F*X)=0 THEN220
210 F=10#F:GOTO200
220 IF Y>0 THEN320
230 X=X+1/F
240 IF Q=1GOSUB430
250 IF Q=2GOSUB450
260 IF Q=3GOSUB470
270 IF Y>0 THEN290
280 GOTO230
290 IF (1/F<N) * (Q=1) THEN F=X:D=2:GOTO160
300 IF (1/F<N) * (Q=2) THEN F=X:D=2:GOTO160
310 IF (1/F<N) * (Q=3) THEN F=X:D=2:GOTO160
320 X=X-.9/F:F=10#F
330 GOTO240
340 X=X-1/F
350 IF Q=1GOSUB430
360 IF Q=2GOSUB450
370 IF Q=3GOSUB470
380 IF Y>0 THEN330
390 F=10#F:GOTO230
400 H=D/2*(1-COS(FX))/COS(F1)
410 FH=BF#H+(1-EZ)*KH
420 DW=FH*(D-H)/2*D1:GOTO490
430 Y=SIN(X)+C*X-S/D
440 RETURN
450 Y=B*TAN(X)+C*X-E
460 RETURN
470 Y=SIN(X)-TAN(F1)*COS(X)+C*(X-F1)-2*S/D
480 RETURN
490 W=W+DW
500 NEXT F1
510 D2=(FE-FM)/5
520 FOR F2=(FM+D/2) TO (FE-D/2) STEP D2
530 H=D/2-(D/2-A)/COS(F1)
540 FH=BF#H+(1-EZ)*KH
550 DW=FH*(D-H)/2*D2
560 W=W+DW
570 NEXT F2
580 W=W/1000
590 DEF FNR(X)=INT(X*1000+.5)/1000
600 PRINT "DELO ENEGA ZOBA PRI ENEM VRTLJAJU JE:"
610 PRINT "W1=":FNR(W):" [N.m]"
620 W=M*Z
630 PRINT "DELO FREZALA PRI ENEM VRTLJAJU JE:"
640 PRINT "W=":FNR(W):" [N.m]"
650 PN=W#V/D+.5
660 PRINT "NETO MOČ JE:"
670 PRINT "Pn=":FNR(PN):" [kW]"
680 END

```

Avtorjev naslov: prof. dr. ing. Hinko Muren,
Fakulteta za strojništvo
v Ljubljani