

## RPI DƏZGAHLARINDA KONİK SƏTHLƏRİN EMAL DƏQİQLİYİNİN MODELƏŞDİRİLMƏSİ

Nizami Dəmir oğlu Yusubov, Heyran Mürşid qızı Abbasova, Ramil Yengibar oğlu Dadaşov  
*Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, Azərbaycan*

### MODELING OF MACHINING ACCURACY OF CONICAL SURFACES ON CNC MACHINE TOOLS

Nizami Demir Yusubov, Heyran Murshid Abbasova, Ramil Yengibar Dadashov

*Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan*

nizami.yusubov@aztu.edu.az, abbasova.heyran@aztu.edu.az, dadashov@aztu.edu.az

<https://orcid.org/0000-0002-6009-9909>, <https://orcid.org/0000-0002-0407-5275>,

<https://orcid.org/0000-0003-1786-8060>

**Abstract.** The paper investigates accuracy models for the machining of conical surfaces on CNC machine tools. A mathematical model has been developed by identifying the main factors affecting form and dimensional deviations along the generatrix of conical surfaces, such as interpolation errors, tool geometry and wear, thermal deformations, and elastic deflections. Experimental studies have demonstrated that the application of solid carbide tools, appropriate finishing passes, and the use of compensation mechanisms within the CNC system significantly improve surface quality and cone angle accuracy. The developed model can be utilized as an effective tool for the optimized machining of conical surfaces on CNC machine tools. Furthermore, this model allows for increased productivity during the machining process and ensures the stability of the results. The proposed approach is of significant importance for achieving both high accuracy and efficiency in the manufacturing of conical surfaces using CNC technologies. Consequently, the model aids in optimizing the planning and control of manufacturing processes.

**Keywords:** CNC machine tool, conical surface, accuracy models, finishing, carbide tool.

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

## GİRİŞ

### Problemin hazırkı vəziyyəti

Rəqəmli proqramla idarə olunan (RPI) dəzgahlar konik səthlərin yüksək dəqiqliklə emalı üçün ən geniş istifadə olunan avadanlıqlardan biridir [1, s. 120–180; 2, s. 45–70; 3, s. 80–110; 4, s. 150–200; 5, s. 50–90], [6]. Konik səthlər əsasən torna, frez və çoxkoordinatlı RPI dəzgahlarında, həmçinin torna-frez mərkəzlərində emal olunur [4, s. 150–200], [7, 8]. Bu tip səthlər konstruksiyanın tələblərindən asılı olaraq müxtəlif konus bucaqlarında formalaşdırılır və dəzgahın həm koordinat hərəkətlərinin dəqiqliyindən, həm də alət trayektoriyasının düzgün proqramlaşdırılmasından asılıdır. RPI dəzgahlarında konik səthlərin emalında əldə edilən tipik dəqiqlik ölçü dəqiqliyi üzrə IT6–IT8; konus bucağının dəqiqliyi üzrə  $\pm(5–20)$  mikroradian, konusun doğuranı (generatrısı) boyunca sapması 2–10 mikrondur. Bu göstəricilər istifadə olunan dəzgahın sinfi, konstruksiyasının sərtliyi, pəstahın materialı və alətin keyfiyyətindən asılı olaraq dəyişə bilər. Səth keyfiyyətinin göstəriciləri isə səthin kələ-kötürlüyü ( $R_a$ ) üzrə  $R_a = 0.8–1.6$  mkm (təmiz emal keçidi ilə birlikdə), kobud emalda isə  $R_a = 3.2–6.3$  mkm-dir. Bərk karbidli alətlər (kəsici hissəsi volfram karbidi (WC) və kobalt (Co) qarışığından hazırlanmış çox bərk və istiliyə davamlı alətlər, onlara çox vaxt sadəcə karbid alətlər də deyilir), yüksək dəqiqlikli RPI dəzgahları və düzgün texnoloji rejimdən istifadə etməklə  $R_a = 0.4$   $\mu\text{m}$  və daha aşağı səviyyələr də əldə oluna bilər [9,10], [11, s. 25–55], [12–15].

Konik səthlərin RPI dəzgahlarda emalında rast gəlinən problemlər isə konus bucağının sapması (istiqamət oxları arasındakı sinxronluğun pozulması, dəzgahın elastiki və termiki deformasiyası, koordinatların kalibrənməsindəki xətalər), səthin kələ-kötürlüyünün normadan yüksək olması (kəsici alətin yeyilməsi, təmiz emal rejimlərin düzgün seçilməməsi, vibrasiya, pəstah və alət bərkidilməsinin qeyri-kafi olması), forma xətaləri (konusun doğuranı boyunca qeyri-bərabərlik, RPI sistemində interpolasiya xətaləri, alətin radius kompensasiyasının səhv tətbiqi), termiki təsirlərə bağlı dəqiqlik itkiləri (uzun konik səthlərin emalında dəzgahın istilik yüklənməsi, mövqeyin dəyişməsi nəticəsində mikrosapmalar), pəstahın elastik deformasiyasıdır (uzun və nazik detalların konik emalı zamanı əyilmə, kəsici qüvvələrin qeyri-bərabər paylanması).

### Məsələnin aktuallığı

Konik səthlərin RPI dəzgahlarda emalı müasir maşınqayırmanın ən vacib sahələrindən biridir. Çünki konus elementlər çoxlu sayda mexanizmlərdə – alət tutqaclarında, val birləşmələrində, hidravlik sistemlərdə, şpindel bağlantılarında və dəqiq yığma tələb edən konstruksiyalarda geniş istifadə olunur. Müasir istehsalatda bu səthlərin emalına qoyulan tələblər getdikcə sərtləşdiyi üçün dəqiqlik modellərinin işlənməsi böyük əhəmiyyət kəsb edir.

Bu mövzu yüksək dəqiqlik tələbləri (texnoloji proseslərdə mikron səviyyəsində dəqiqlik tələb olunur), interpolasiya və hərəkət sistemlərinin inkişafı (RPI dəzgahlarının yeni nəsil idarəetmə sistemləri dəqiqliyin riyazi modelləşdirilməsini aktual edir), səth keyfiyyətinin yaxşılaşdırılması ehtiyacı (aşağı kələ-kötürlük funksional baxımdan həyati əhəmiyyət daşıyır), sənayedə məhsuldarlığın artırılması (dəqiqlik modelləri düzgün seçilmiş rejimlərin tətbiqinə imkan verir), alət və dəzgah xətalарının kompensasiyası (model əsaslı yanaşma ilə xəta mənbələri analiz edilir və kompensasiya olunur) səbəblərinə görə aktualdır.

Beləliklə, RPI dəzgahlarda konik səthlərin emal dəqiqlik modellərinin işlənməsi həm elmi, həm də praktiki baxımdan yüksək aktuallığa malikdir və müasir istehsalatın səmərəliliyini artırmağa yönəlmiş mühüm tədqiqat istiqamətidir.

### METODOLOGİYA

#### Problemin qoyuluşu

RPI dəzgahlarında konik səthlərin emalında müşahidə olunan bir sıra çətinliklər (konus bucağının dəqiqliyində sapmalar, konusun doğuranı boyunca forma xətalарı, səth kələ-kötürlüyünün normadan yüksək olması, uzun və qalınlığı az olan detalların elastik deformasiyası, RPI sisteminin kompensasiya mexanizmlərinin qeyri-dəqiq işləməsi) belə səthlərin yüksək dəqiqliklə alınmasını çətinləşdirir və istehsalat prosesində əlavə xərclər və vaxt itkisi yaradır.

**Tədqiqatın məqsədi** RPI dəzgahlarda konik səthlərin emalına təsir edən əsas faktorları müəyyənləşdirmək, bu faktorların dəqiqlik göstəricilərinə təsirini modelləşdirmək, konusun doğuranı boyunca forma və ölçü sapmalarını qiymətləndirmək, emal dəqiqliyini artırmağa yönəlmiş nəzəri və praktiki model işləməkdir. Hazırlanan model konik səthlərin emalında alət seçimi, rejimlərin optimallaşdırılması, vibrasiya idarəetməsi və RPI kompensasiya sistemlərinin düzgün konfigurasiyası üçün əsas baza rolunu oynayacaqdır.

Tədqiqat RPI dəzgahlarında konik səthlərin form və ölçü dəqiqliyini müəyyən edən əsas faktorların təhlili və bu faktorların nəzərə alınması ilə dəqiqlik modelinin qurulması istiqamətində aparılmışdır. Metodika aşağıdakı mərhələlərdən ibarətdir:

**1. Konus səthinin riyazi təsviri.** Konik səth generatris (konusun doğuranı) və əsas diametr əsasında riyazi olaraq modelləşdirilir [12-15]. Konusun hündürlüyü, konusun doğuranı üzrə bucaq dəyişməsi və alət trayektoriyası üçün analitik ifadələr qurulur.

**2. Alət trayektoriyasının interpolasiyası.** RPI sistemlərində X–Z koordinatlarında xətti interpolasiya əsasında konus formalaşdırılır. Bu zaman interpolasiya xətası, sürət dəyişmələrinin doğuran üzrə təsiri, alətin uc radiusunun kompensasiyası öyrənilir və modelə daxil edilir.

**3. Kəsici alətin həndəsi və yeyilmə modelləri.** Kəsici alətin uc radiusu, arxa bucağı, kəsici bucağı, yeyilmə zonaları (VB – yan səth üzrə yeyilmə (Flank wear), KT- Qabaq üz üzrə yeyilmə (Crater wear)) konus səthində forma xətlərinə təsir edən parametrlər kimi modelləşdirilir.

**4. Dəzgahın sərtliyi və termiki xətalарın nəzərə alınması.** RPI dəzgahın konstruktiv elastikliyi, titrəyişə qarşı sabitliyi, termiki deformasiyaları konusun doğuranı boyunca mikrosapma kimi qəbul edilir və xəta funksiyasına daxil olunur.

**5. Eksperimental ölçmələr.** Hazırlanan modellərin sınaqdan keçirilməsi üçün müxtəlif konus bucaqlarında detallar RPI torna dəzgahında emal olunur. Hər emaldan sonar konus bucağı, konusun doğuran üzrə forma sapmaları, Ra səth kələ-kötürlüyü ölçülərək model nəticələri ilə müqayisə edilir.

### Tədqiqat nəticələri

Aparılan modelləşdirmə və eksperimental ölçmələr nəticəsində aşağıdakı nəticələr əldə edilmişdir (Cədvəl 1):

Cədvəl 1

Tədqiqat nəticələrinin cədvəl formatında təqdimatı

| Faktor                           | Ölçülən parametrlər         | Təmiz emal keçidi ilə Ra (mkm) | Forma sapması (mkm) | Konus bucağı sapması (°) |
|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------|
| İnterpolasiya xətası             | X–Z interpolasiya           | 0.8–1.2                        | 2–7                 | $\pm 0.008$ – $0.02$     |
| Alətin yeyilməsi                 | Arxa bucağın dəyişməsi      | 1.0–2.4                        | 3–6                 | $\pm 0.01$ – $0.015$     |
| Termiki deformasiya              | Dəzgahın istilik yüklənməsi | 0.8–1.6                        | 5–12                | $\pm 0.01$               |
| Elastik deformasiyalar           | Uzun detal əyilməsi         | 0.9–1.3                        | 3–5                 | $\pm 0.008$              |
| Alətin radiusunun kompensasiyası | R səhvi                     | 1.0–1.6                        | 2–4                 | $\pm 0.015$              |

1. İnterpolasiya xətlərinin forma sapmalarının əsas mənbəyi olduğu müəyyənəşdirilmişdir. Belə ki, RPİ sistemində xətti interpolasiya zamanı konus doğurarı üzrə 2–7 mikron sapmalar müşahidə olunur. Bu sapmalar konus bucağında  $\pm 0.008^{\circ}$ – $0.02^{\circ}$  dəyişməyə səbəb olur.

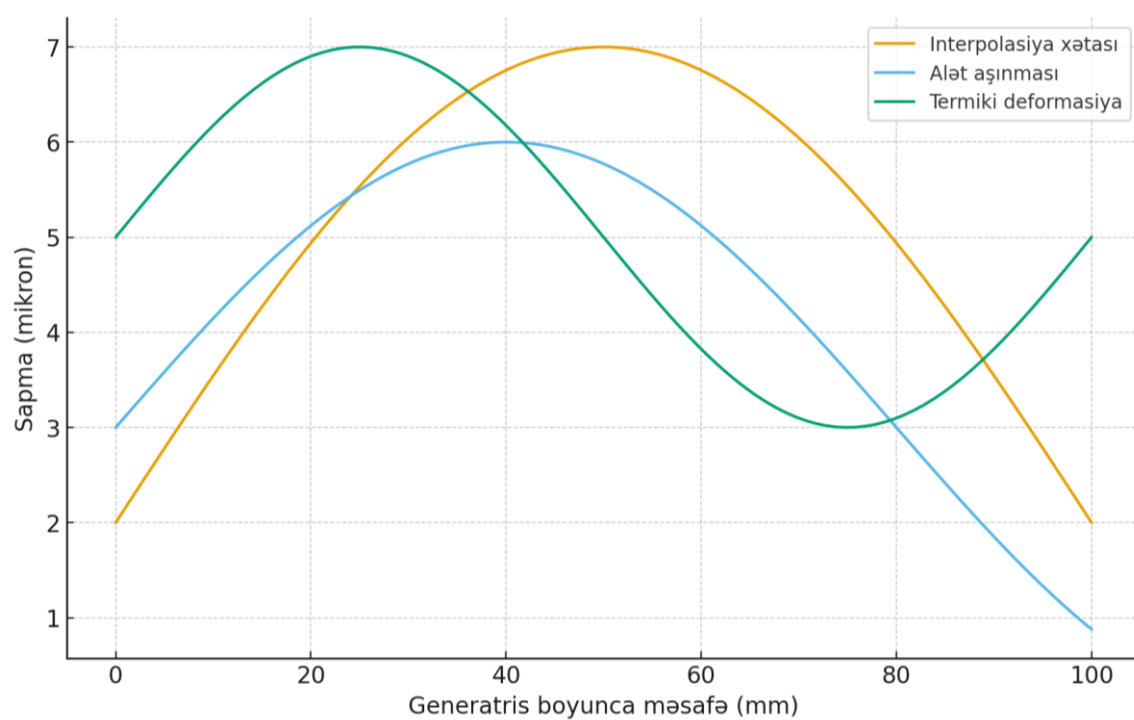
2. Alətin yeyilməsi səthin keyfiyyətinə ən çox təsir edən faktordur. Alətin arxa səthi yeyildikcə Ra qiyməti 0.8  $\mu\text{m}$ -dən 2.4  $\mu\text{m}$ -ə yüksəlir və doğuran boyunca dalğalanmalar 3 mikrona qədər artır.

3. Termiki deformasiyalar uzun konuslarda əhəmiyyətlidir. Dəzgahın qızması (ısınməsi) ilə X–Z oxları arasında 5–12 mikron mövqe dəyişməsi müşahidə edilir. Bu, xüsusən uzun konik səthlərdə forma xətasına səbəb olur.

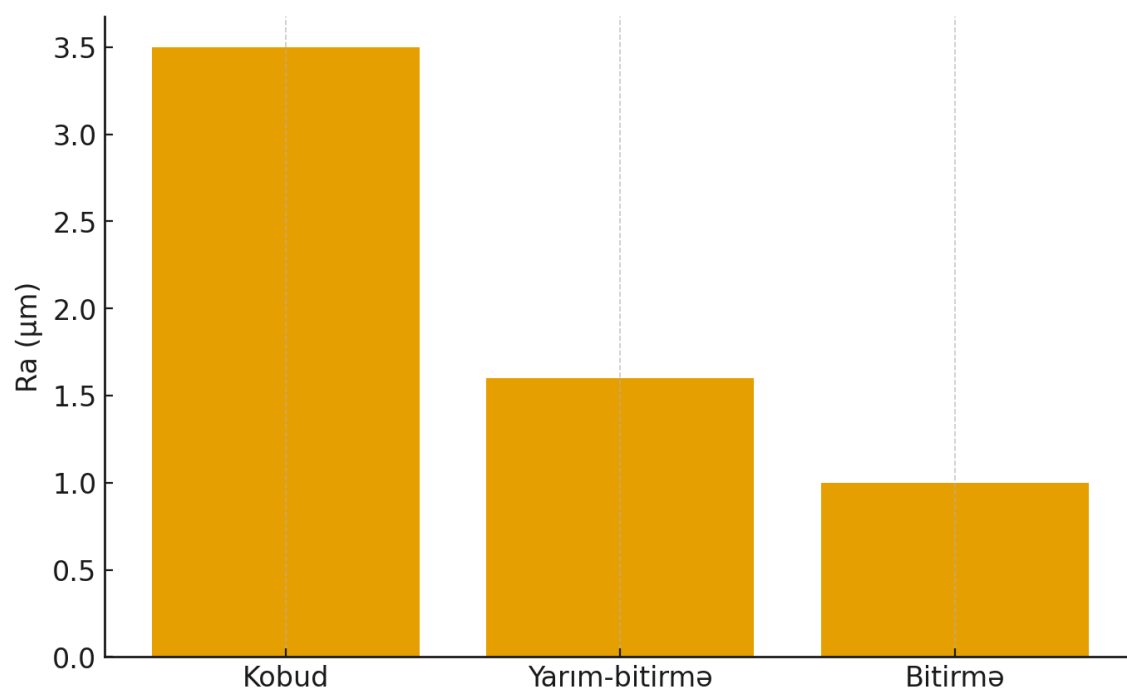
4. Bərk karbidli alətlərin tətbiqi səth keyfiyyətini sabitləşdirir. Bərk karbid uclu alətlər ilə təmiz emal keçidində Ra 0.8–1.2 mkm intervalında sabit saxlanılır. Tezəkəsən alətlərdə (HSS) və əsas tərkibi dəmir (Fe) və karbon (C) olan, lakin yüksək möhkəmlik və temperatur müqaviməti üçün Volfram (W), Vanadium (V), Molibden (Mo) və Kobalt (Co) kimi əlavələrlə möhkəmləndirilmiş metaldan hazırlanmış alətlərə deyilir. Bu alətlər, tərkibindəki ərintilər sayəsində yüksək sürətlərdə belə deformasiyaya uğramadan işləməyə davam edə bilər) isə bu qiymət 1.6–2.8 mkm arasında dəyişir.

5. Alətin radiusunun kompensasiyası düzgün tətbiq edilmədikdə forma xətası artır. Bildiyimiz kimi, kəsici hissənin həndəsəsinə **kəsmə bucağı, arxa bucaq, sıfırlandırma radiusu (nose radius), alətin uc radiusunun dəqiqliyi, alətin profilinin konusa uyğunluğu aiddir**. Məsələn, ucu radiusu lazım olduğundan böyük və ya kiçikdirsə, konusun forması pozulur. R kompensasiyası səhv daxil edildikdə doğuran üzrə sapma 2–4 mikron, konus bucağı üzrə sapma isə  $0.015^{\circ}$  təşkil edir.

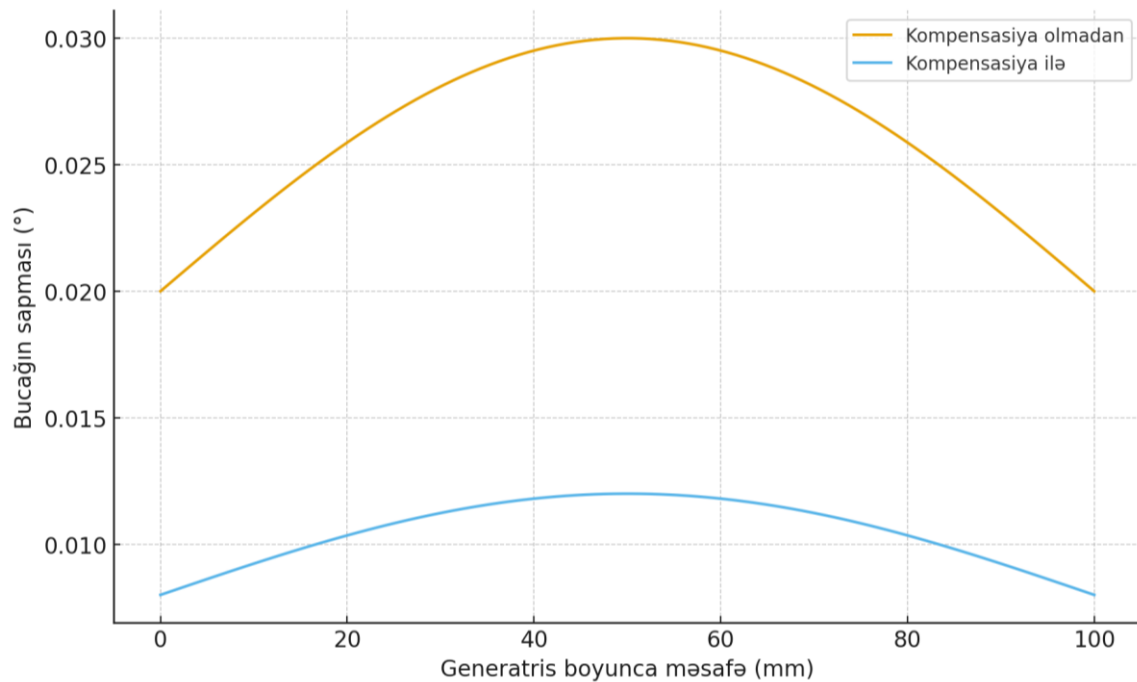
Şəkil 1-3 də konusun doğurarı üzrə forma sapmaları, səth kələ-kötürlüyü təmiz emal keçidinə görə və konus bucağını konusunun doğurarı üzrə sapması verilmişdir. Şəkil 1-də interpolasiya xətası, alət yeyilməsi və termiki deformasiya doğuran boyunca vizual olaraq təsvir edilir. Burada X oxu konusun doğurarı üzrə məsafənin (mm), Y oxu isə sapmanın qiyməti (mikron) verilmişdir. Müxtəlif rənglər interpolasiya xətası, alət aşınması və termiki deformasiyaları göstərir. Şəkil 2-də isə X oxu kəsmə dərinliyini (mm), Y oxu isə səth kələ-kötürlüyünü Ra ( $\mu\text{m}$ ) göstərir. Kobud (qırmızı rəng), yarım təmiz (narıncı rəng) və təmiz (yaşıl) keçidləri üçün fərqli rənglərdən istifadə olunur.



Şəkil 1. Konusun forma sapmalarının konusun doğruları üzrə asılılığı



Şəkil 2. Konusun səthinin kələ-kötürlüyünün ( $R_a$ ) təmiz emal keçidindən asılılığı



Şəkil 3. Konus bucağı sapmasının konusun doğurani üzrə asılılığı

Bu qrafiklər RPİ dəzgahlarının və alət seçimlərinin konik səth keyfiyyətinə təsirini vizual olaraq nümayiş etdirir və modelin doğruluğunu təsdiqləyir.

## MÜZAKİRƏ

Əldə edilən nəticələr göstərir ki, konik səthin RPİ dəzgahlarında emalı zamanı dəqiqliyin əsas məhdudlaşdırıcı faktorları alət yeyilməsi, interpolasiya qeyri-dəqiqliyi və termiki dəyişkənliklərdir.

Alət yeyilməsi. Yeyilmə artdıqca kəsici alətin real həndəsəsi modeldən uzaqlaşır və forma sapması artır. Bu, xüsusən konusun doğurani boyunca dalğavari mikroprofil yaradır.

Interpolasiya xətaləri. RPİ sistemində xətti interpolasiya real konus səthinin riyazi forması ilə tam üst-üstə düşmür. Yüksək sürətlərdə bu fərq daha da böyüyür. Model bu sapmanı dəqiq ifadə etdiyi üçün kompensasiya imkanlarını genişləndirir.

Termiki deformasiyalar. Dəzgahın işləmə müddətinə görə temperatur dəyişdikcə konstruktiv elementlərin ölçüləri dəyişir. Bu dəyişmə konus bucağına və konusun doğurani istiqamətinə təsir edir. Model bu effektləri nəzərə aldıqda daha dəqiq nəticələr əldə olunur.

Sərtlilik və bərkidilmə. Uzun detalların elastik əyilməsi konusun real formasını dəyişə bilər. Modeldə elastik deformasiyanın kompensasiyası nəzərə alındıqda sapmalar minimuma enir.

Qeyd etmək lazımdır ki, bu istiqamətdə müəlliflər tərəfindən çoxlu elmi tədqiqat işləri aparılmış və mühüm nəticələr alınmışdır. Belə ki, N.D. Yusubov və H.M. Abbasova tərəfindən istər təkəllətli emal, istərsə də çoxəllətli emal ilə bağlı tədqiqat işlərində müxtəlif parametrləri nəzərə almaqla texnoloji sistemdə yaranan elastiki yerdəyişmələrin hesablanması üçün matris modelləri yaradılmış və tədqiq olunmuşdur [16-34]. R.Y. Dadaşov isə hazırda konik səthlərin mexaniki emalı zamanı yaranan qüvvə balansının müxtəlif oxlarda proyeksiyalarını nəzərə almaqla texnoloji sistemdə yaranan elastiki yerdəyişmələrin qabaqcadan proqnozlaşdırmağa imkan verən riyazi modelləri hazırlayır.

RPİ dəzgahlarında konik səthlərin emal dəqiqliyini təklif olunan metodologiya ilə hesablamaq üçün lazım olan eksperimental verilənlər məlum olmalıdır. Əgər verilənlərdən bir qismi belə məlum olarsa, onda sadələşdirilmiş hesablar aparmaq olar. Bu, əsasən konik səthin həndəsi xətaləri, alət parametrləri və dəzgahın dəqiqliyi əsasında xətalərin hesablanması ilə bağlıdır. Məsələn, tutaq ki, Tutaq ki, **konik səth bizə məlumdur**. Konusun böyük radiusu  $R_1 = 50 \text{ mm}$ , konusun kiçik radiusu

$R_2 = 20 \text{ mm}$ , konusun hündürlüyü  $h = 100 \text{ mm}$ , konus bucağı (yarım konik bucaq- konusun oxu ilə konus səthinin arasındakı bucaqdır)  $\alpha = \arctan \frac{R_1 - R_2}{h}$ , emal edilən material alüminium, alətin uc radiusu  $r_c = 2 \text{ mm}$  –dir. Dəzgahın parametrləri isə oxlar üzrə belədir:  $\delta_x = 0,01 \text{ mm}$ ,  $\delta_y = 0,01 \text{ mm}$ ,  $\delta_z = 0,015 \text{ mm}$  –dir. Real qiymətlərlə hesablamanı aparaq:

1. Konik səthin parametrini hesablayaq. Konik səthin radiusu  $z$  üzrə dəyişir:

$$R(z) = R_2 + (R_1 - R_2) \cdot \frac{z}{h} = 20 + (50 - 20) \cdot \frac{z}{100} = 20 + 0,3z$$

$$z \in [0, 100] \text{ mm.}$$

2. Alət radiusu və profil xətası. Alətin ucu radiusa malikdir və konik səthi emal edərkən **alətin uc radiusu səthdə kiçik bir profil xətası yaradır**. Bu xətanın ölçüsü alətin səthə toxunduğu bucaqla bağlıdır (şəkil 4). Profil xətası üçün təxmini formul aşağıdakı kimi götürülür:

$$\delta_r = r_c \cdot (1 - \cos \varphi),$$

Burada:  $\varphi$  – alət radiusunun səth ilə qarşılaşdığı bucaqdır.

Ən pis halda, bu bucaq  $90^\circ$  kimi götürülür. Bu, alətin radiusunun maksimum profil xətası yaratdığı haldır.

- Əgər  $\varphi = 0^\circ$  -dirsə, onda  $\delta_r = 0$  olur, yəni heç bir xəta yoxdur.
- Əgər  $\varphi = 90^\circ$  -dirsə, onda  $\delta_r = r_c$  olur, yəni maksimum xəta yaranır.

Yəni, konusun aşağı hissəsində profil xətası daha çox, yuxarı hissədə isə azdır.

Qısaca olaraq belə demək olar ki,  $\varphi$  burada **alət radiusunun konik səth ilə yaratdığı kontakt bucağıdır** və  $90^\circ$  götürülməsi konservativ, maksimum xəta üçün hesablamaadır. Sonradan bu təxmini qiyməti **konusun radiusuna görə azaldaraq** real  $\delta_r$  -ni hesablayırıq:

$$\delta_r \approx \frac{r_c^2}{2R(z)} \quad (\text{təxmini alətin radiusu xətası})$$

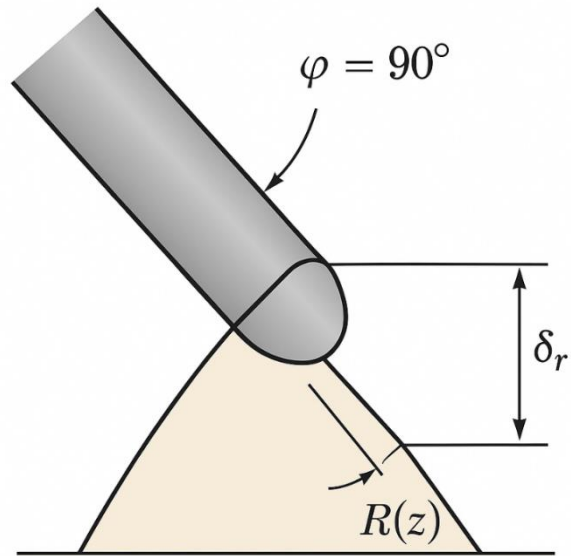
Məsələn, orta radius  $R_{orta} = (R_1 + R_2)/2 = 35 \text{ mm}$ .

$$\delta_r \approx \frac{2^2}{2 \cdot 35} \approx 0,057 \text{ mm.}$$

3. Dəzgah xətlərinin təsirini hesablayaq. Dəzgah oxlar üzrə xətləri və  $z$  oxu (profil) xətası konik səthə təsir edir. Ümumi xəta:

$$\delta_{\text{ümumi}} = \sqrt{\delta_r^2 + \delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2} = \sqrt{0,057^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + 0,015^2} = \sqrt{0,003674} \approx 0,061 \text{ mm.}$$

Nəticə: Bu konik səthin emal dəqiqliyi təxminən  $\pm 0.061 \text{ mm}$  olacaq



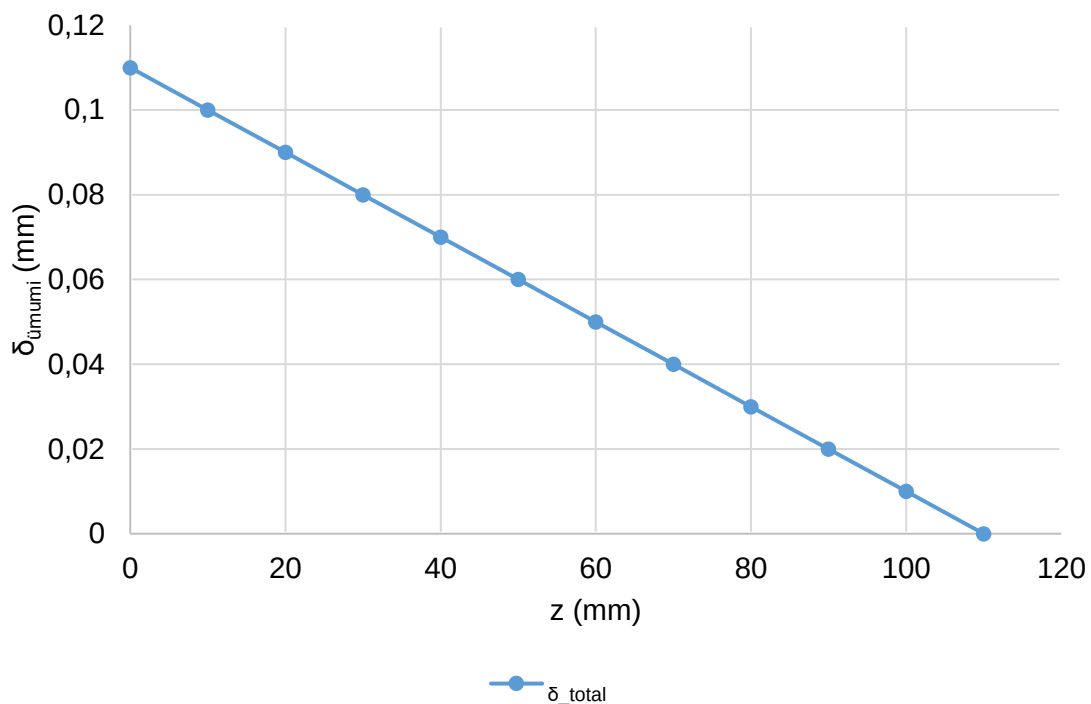
Şəkil 4. Alətin konik səthə necə toxunduğunu və  $\delta_r$  -in necə yarandığını göstərən vizual təsvir

Nəticəni qrafiklə  $z$  oxu üzrə vizuallaşdırmaq olar. Bunun üçün  $z$  oxunu 0–100 mm aralığında **10 mm intervallarla** götürək və həm cədvəl (cədvəl 2), həm də qrafik formasında (şəkil 5) göstərək.

Cədvəl 2

$Z$  oxu üzrə konik səth xətasının cədvəl şəklində təsviri

| $z$ (mm) | $R(z)$ (mm) | $\delta_r$ (mm) | $\delta_{\text{ümumi}}$ (mm) |
|----------|-------------|-----------------|------------------------------|
| 0        | 20          | 0.100           | 0.104                        |
| 10       | 23          | 0.087           | 0.091                        |
| 20       | 26          | 0.077           | 0.080                        |
| 30       | 29          | 0.069           | 0.073                        |
| 40       | 32          | 0.063           | 0.067                        |
| 50       | 35          | 0.057           | 0.061                        |
| 60       | 38          | 0.053           | 0.057                        |
| 70       | 41          | 0.049           | 0.053                        |
| 80       | 44          | 0.045           | 0.049                        |
| 90       | 47          | 0.043           | 0.047                        |
| 100      | 50          | 0.040           | 0.046                        |

Şəkil 5.  $Z$  oxu üzrə konik səth xətasının qrafik şəklində təsviri

Şəkil 5-dən göründüyü kimi sol tərəfdə yuxarı hissə konusun aşağı ucu ( $z=0$ ), sağ tərəfdə alt hissə konusun yuxarı ucu ( $z=100$ ) üçündür. Ulduzlar (\*)  $\delta_{\text{ümumi}}$  qiyməti göstərir.

Göründüyü kimi, **konusun aşağı hissəsi ( $z=0$ ) ən çox xəta ilə hazırlanır**, yuxarıya doğru isə dəqiqlik artır.



## NƏTİCƏ

Aparılan tədqiqat nəticəsində RPİ dəzgahlarda konik səthlərin yüksək dəqiqliklə emalı üçün dəqiqlik modeli işlənmiş və aşağıdakı nəticələrə əldə edilmişdir:

1. Konus səthinin dəqiqliyinə təsir edən əsas faktorlar kimi interpolasiya xətalrı, alət həndəsəsi və yeyilməsi, termiki deformasiyalar, elastik sapmalar müəyyənləşdirilmişdir.
2. Bu faktorların təsirini nəzərə alan riyazi model hazırlanmışdır.
3. Model eksperimentlə təsdiqlənmiş və konusun doğuranı üzrə sapma 2–10 mikron intervalında olmuşdur.
4. Səth keyfiyyətini artırmaq üçün təmiz emal keçidi, karbid alətlər və vibrasiya nəzarəti ən effektiv üsullar kimi müəyyən edilmişdir.
5. RPİ sistemində kompensasiya mexanizmlərinin tətbiqi konus bucağı dəqiqliyini əhəmiyyətli dərəcədə yaxşılaşdırması faktı müəyyən edilmişdir.

Nəticə olaraq, işlənən dəqiqlik modeli RPİ dəzgahlarında konik səthlərin emalının optimallaşdırılması, ölçü və form xətalının azaldılması və səth keyfiyyətinin yaxşılaşdırılması üçün səmərəli yanaşma təqdim edir.

## ƏDƏBİYYAT

1. Groover M.P. Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems. Hoboken (New Jersey), Wiley, 2020. 1024 p.
2. Koren Y. Computer control of manufacturing systems. New York, McGraw-Hill, 2010. 304 p.
3. Altintas Y. Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. Cambridge, Cambridge University Press, 2012. 300 p.
4. Tlustý J. Manufacturing processes and equipment. Upper Saddle River (New Jersey), Prentice Hall, 2000. 456 p.
5. Davies M.A. CNC machining handbook: Basic theory, production data, and machining procedures. New York, Industrial Press, 2011. 600 p.
6. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Matrix model of accuracy in machining conical surfaces on CNC lathes. *Reliability: Theory and Applications*, 2025, Special Issue No.7 (83), pp. 393–400. DOI: 10.24412/1932-2321-2025-783-393-400.
7. Yusubov N.D., Boqatenkov S.A., Dadaşov R.Y., Əzizli Z.M. RPİ dəzgahlarında emal keyfiyyəti və məhsuldarlığın yüksəldilməsinin araşdırılması. *Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi Əsərləri*, №2, Bakı, 2023, s. 58–65.
8. Guzeev V., Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Optimization of the number of machining stages workpieces for mechanical engineering parts. *Machine Science*, 2024, Vol. 13, No. 2, pp. 4–12. DOI: 10.61413/VZRV4922.
9. Mativenga P.T., Lockett H. Precision machining of conical surfaces on CNC lathe centers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(9–12), pp. 4031–4043. DOI: 10.1007/s00170-018-2235-7.
10. Childs T.H.C. Mechanical design engineering handbook. Butterworth-Heinemann, 2019. 900 p.
11. Weck M. Advanced machining processes. Berlin, Springer, 2015. 320 p.
12. Юсубов Н.Д., Богатенков С.А., Сазонова Н.С. [и др.] Моделирование искажения выполняемых размеров в одноинструментной обработке с поворотного суппорта. *Автоматизированное проектирование в машиностроении*, 2023, №15, с. 42–46. DOI: 10.26160/2309-8864-2023-15-42-46.
13. Юсубов Н.Д.о., Аббасова Х.М.г., Дадашов Р.Э.о. Модели сил резания при механической обработке на современных станках токарной группы. *Всероссийский форум молодых исследователей – 2023*, Петрозаводск: Новая Наука, 2023, с. 236–246.
14. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Theoretical basis for the development of an algorithmic unified complex of mathematical models of cutting forces. *Machine Science*, 2023, No1, pp. 55–60.
15. Юсубов Н.Д. Матричные модели точности обработки в одноинструментной токарной обработке. *Технология машиностроения*, №1, 2009, с. 41–45.
16. Юсубов Н.Д. Многоинструментная обработка на станках-автоматах токарной группы (Матричная теория точности...). Саарбрюккен: AV Akademikerverlag / LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 256 с.
17. Юсубов Н.Д. Основы матричной теории точности многоинструментной токарной обработки. Саарбрюккен: OmniScriptum / LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 216 с.
18. Юсубов Н.Д. Оптимизация многопереходной обработки по критерию производительности. Саарбрюккен: OmniScriptum / LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 264 с.
19. Yusubov N., Abbasova H. Models for Machining Accuracy in Multi-Tool Adjustment. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2020, 17(3), pp. 8067–8085. DOI: 10.15282/ijame.17.3.2020.01.0605.



20. Yusubov N., Abbasova H., Khankishiyev İ. Development of a planning theory for multi-tool machining with the possibilities of modern CNC machine tools. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2021, Vol. 85, pp. 661–678. DOI: 10.1007/s10010-021-00478-7
21. Yusubov N.D., Abbasova H.M. Full-factor matrix model of accuracy of dimensions performed on multi-purpose CNC machines. *Metal Working and Material Science*, 2021, Vol. 23, No. 4, pp. 6–20. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-6-20.
22. Abbasov İ.T., Simon S., Fritzsche P.D., Yusubov N.D. Study on reducing energy consumption in rough turning operations. *SOCAR Proceedings*, 2022, Special Issue 1, pp. 023–028.
23. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R., Salmanov İ. On the matrix generalization of the theory of machining accuracy. *Machine Science*, 2022, Vol. 11, No. 2, pp. 23–36.
24. Yusubov N.D., Abbasova H.M. Systematics of multi-tool setup on lathe group machines. *Metal Working and Material Science*, 2024, Vol. 26, No. 4, pp. 92–111. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-92-111.
25. Юсубов Н.Д. Матричные модели точности в многоинструментных двухсуппортных наладках. *Вестник машиностроения*, 2009, №3, pp. 52–54.
26. Yusubov N., Abbasova H. Full Factorial Models of Dimensional Accuracy of Multi-Tool Machining on Automatic Turning Machines. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry*, 2019, Vol. 19, Issue 1, pp. 56–67.
27. Yusubov N., Movlazade V., Abbasova H. Accuracy models of machining in multi-tool adjustments. *Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA 2022)*, Vol. 2, pp. 477–479.
28. Yusubov N. Matrix Models of Processing Accuracy in Multitool Turning. *Mechanical Engineering Technology*, 2013, Issue 1, pp. 57–63.
29. Yusubov N. Algorithmization of analytical model of dimensions stray field, executed in multi-tool multi-carriage adjustments. *Vestnik Mashinostroeniya*, 2008, Vol. 2, pp. 54–56.
30. Yusubov N., Khankishiyev İ., Abbasova H., Mammadov E., Huseynov R. Matrix models of machining errors in multi-tool multi-carriage adjustments. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 2023, Vol. 15, Issue 56, pp. 309–315.
31. Юсубов Н.Д. Повышение эффективности многоинструментной обработки на станках автоматах токарной группы: автореферат диссертации доктора технических наук. Баку, 2009, 41 с.
32. Bogatenkov S.A., Sazonova N.S., Guzeev V.I., Yusubov N.D., Abbasova G.M. Increasing the productivity of multitool machining on automated lathes by optimizing the tool positions. *Russian Engineering Research*, 2021, Vol. 41, Issue 11, pp. 1075–1079.
33. Bogatenkov S.A., Sazonova N.S., Yusubov N.D., Mammadov P.V., Bazhenov R.I. Increasing the Productivity of Multitool Machining on Automated Lathes by Optimizing the Machining Plan. *Russian Engineering Research*, 2021, Vol. 41, pp. 1071–1074.
34. Bogatenkov S.A., Sazonova N.S., Yusubov N.D., Abbasova H.M., Badalova B.B., Bazhenov R.I. Decision-making in the conditions of introduction of automated design systems of technological processes. *SOCAR Proceedings*, 2022, Special Issue 1, pp. 006–010.

## RPİ DƏZGAHLARINDA KONİK SƏTHLƏRİN EMAL DƏQİQLİYİNİN MODELƏŞDİRİLMƏSİ

N.D.Yusubov, H.M.Abbasova, R.Y.Dadaşov

**Xülasə.** Məqalədə RPİ (rəqəmli proqramla idarə olunan) dəzgahlarda konik səthlərin emalının dəqiqlik modelləri tədqiq edilmişdir. Konik səthlərin doğuran boyunca forma və ölçü sapmalarına təsir edən əsas faktorlar – interpolasiya xətaləri, alət həndəsəsi və yeyilməsi, termiki deformasiyalar və elastik sapmalar – müəyyən edilərək riyazi model qurulmuşdur. Aparılan eksperimental tədqiqatlar göstərmişdir ki, sərt karbidli alətlərin tətbiqi, düzgün təmiz emal keçidi və RPİ sistemində kompensasiya mexanizmlərinin istifadəsi səth keyfiyyətini və konus bucağı dəqiqliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Hazırlanan model RPİ dəzgahlarda konik səthlərin optimallaşdırılmış emalı üçün effektiv vasitə kimi istifadə oluna bilər. Eyni zamanda, bu model emal prosesində məhsuldarlığın yüksəldilməsinə və nəticələrin sabitliyinin təmin edilməsinə də imkan verir. Təklif olunan yanaşma RPİ texnologiyalarında konik səthlərin istehsalında həm yüksək dəqiqlik, həm də səmərəlilik əldə etmək məqsədilə mühüm əhəmiyyət daşıyır. Nəticədə, model istehsal proseslərinin planlaşdırılmasını və idarə edilməsini optimallaşdırmağa kömək edir.

**Açar sözlər:** RPİ dəzgahı, konik səth, dəqiqlik modelləri, təmiz emal, karbid alət.

Accepted: 05.12.2025